

CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA

*para los cultivos de papa y quinua
en el departamento de Puno, Perú*



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
PERÚ 2021

CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA

*para los cultivos de papa y quinua
en el departamento de Puno, Perú*

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA PARA LOS CULTIVOS DE PAPA Y QUINUA 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

Constantino Alarcon Velazco
Director de Agrometeorología del Senamhi

Karim Quevedo Caiña
Subdirectora de Estudios e Investigaciones agrometeorológicas del Senamhi

Autores:
Christian Tello LLamoja, Karim Quevedo Caiña

Contribuciones:
Kris Correa, K. Takahashi

Diseño y diagramación:
Almendra Tamariz Salazar

Primera edición: noviembre de 2021
Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-12834

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. (2021b). *Caracterización de la sequía agrícola para los cultivos de papa y quinua en el departamento de Puno*. (Tello, C.). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI - HELVETAS - PREDES.

CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA

*para los cultivos de papa y quinua
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:



ÍNDICE

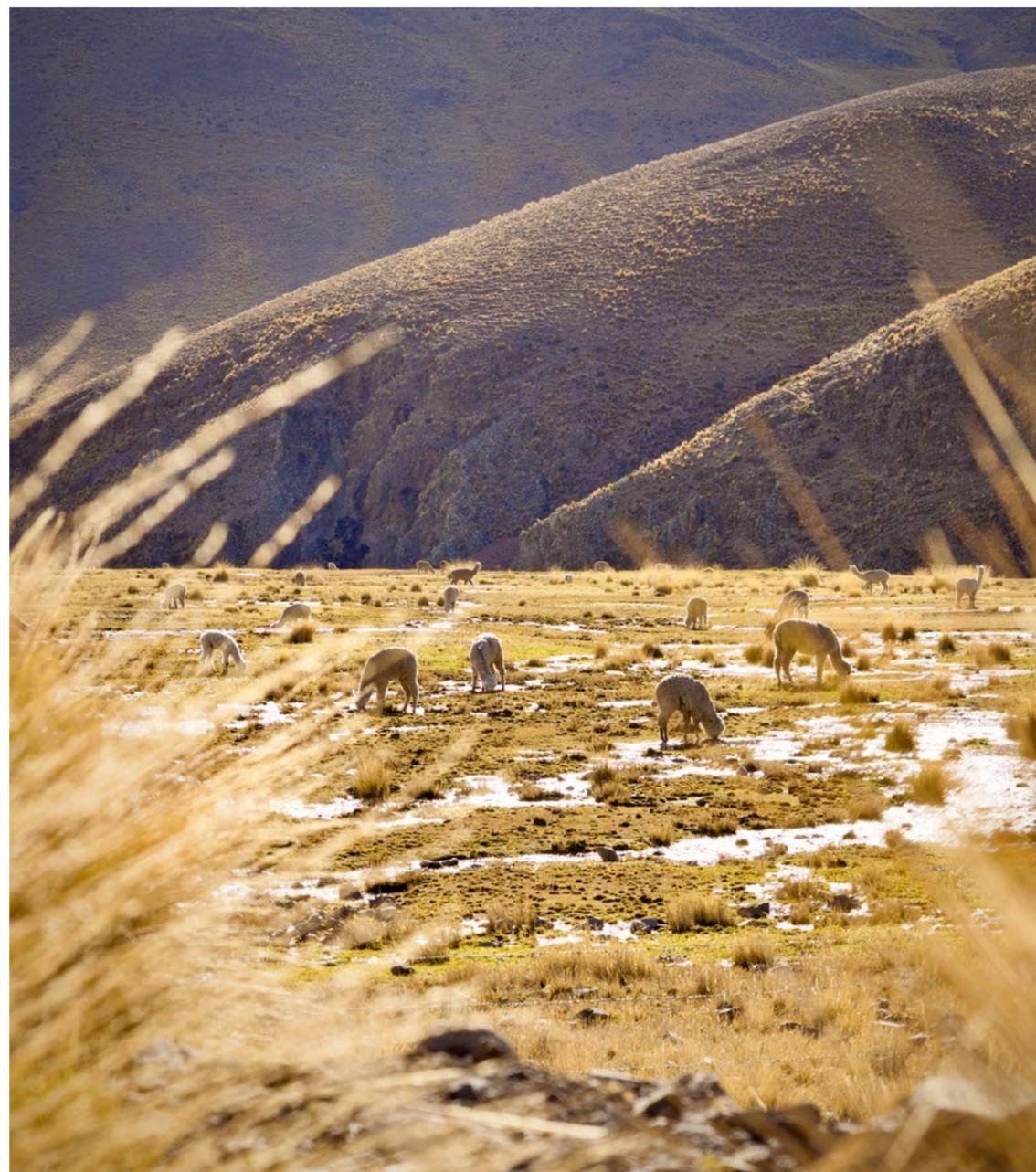
Resumen	13		
1. Introducción	14		
1.1. Objetivos	16		
1.1.1. Objetivo general	16		
1.1.2. Objetivos específicos	16		
2. Descripción del área de estudio	17		
2.1. Ubicación geográfica y política	17		
2.2. Clima	18		
2.3. Fisiografía	19		
2.4. Hidrografía	21		
2.5. Capacidad de uso mayor de tierras	21		
2.6. Uso actual	22		
2.7. Los cultivos de papa y quinua en Puno	23		
3. Revisión bibliográfica	25		
3.1. Marco teórico	25		
3.1.1. Respuesta de las plantas al estrés hídrico	25		
3.1.2. El agua en el suelo	26		
3.1.3. La capacidad de retención de agua disponible para las plantas	28		
3.1.4. Sequía agrícola	29		
3.1.5. Índice de satisfacción de los requerimientos hídricos del cultivo (WRSI)	29		
3.1.6. Caracterización de la sequía agrícola	31		
3.2. Marco conceptual	32		
4. Datos y metodología	33		
4.1. Datos	33		
4.1.1. Datos meteorológicos	33		
4.1.2. Datos del cultivo y rendimientos	35		
4.1.3. Datos del suelo	36		
4.1.4. Balance hídrico agrícola	37		
4.2. Metodología	40		
5. Resultados y discusión	43		
5.1. Análisis de intensidad de las sequías agrícolas	43		
5.1.1. Cultivo de papa	43		
5.1.2. Cultivo de quinua	46		
5.2. Análisis de frecuencia de las sequías agrícolas	48		
5.2.1. Cultivo de papa	48		
5.2.2. Cultivo de quinua	51		
5.3. Análisis de severidad de la sequía agrícola	52		
5.3.1. Cultivo de papa	53		
5.3.2. Cultivo de quinua	57		
5.4. Análisis de relación entre WRSI y rendimientos de los cultivos de papa y quinua	61		
5.5. Estimación de distritos con mayor presencia de sequía agrícola	65		
6. Conclusiones y recomendaciones	67		
7. Referencias bibliográficas	70		
8. Anexos	72		
8.1. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1981-1982	72		
8.2. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1982-1983	72		
8.3. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1984-1985	73		
8.4. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1986-1987	74		
8.5. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1987-1988	75		
8.6. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1989-1990	76		
8.7. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1991-1992	77		
8.8. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2003-2004	78		
8.9. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2004-2005	79		
8.10. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2015-2016	80		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1	Mapa político del departamento Puno	17	Figura V-3	Gráfica de la distribución de los valores de WRSI para fin de campaña del cultivo de quinua	46
Figura II-2	Mapa fisiográfico del departamento de Puno	20	Figura V-4	Cuantificación porcentual de la intensidad de la sequía agrícola correspondiente a los valores entre 79-60, valores entre 59 50 y valores por debajo de 50 de WRSI para el cultivo de quinua	47
Figura II-3	Porcentajes de superficie CUM por Grupo.	22	Figura V-5	Frecuencia de la sequía agrícola para valores < 80 de WRSI (a), < 60 de WRSI (b) y < 50 de WRSI (c) en el cultivo de papa	49
Figura II-4	Categorías de uso actual de tierras	23	Figura V-6	Porcentaje de frecuencia de la sequía agrícola en los distritos de Puno para valores entre 60-79 de WRSI (bajo), 50-59 de WRSI (pobre) y < 50 de WRSI (fracaso), del cultivo de papa	50
Figura III-1	Esquema general de evapotranspiración en la planta	25	Figura V-7	Frecuencia de la sequía agrícola para valores < 80 de WRSI (a), < 60 de WRSI (b) y < 50 de WRSI (c) en cultivo de quinua	51
Figura III-2	Esquema del contenido de agua en el suelo según la textura del suelo	27	Figura V-8	Porcentaje de frecuencia de la sequía agrícola en los distritos de Puno para valores entre 60-79 de WRSI (bajo), 50-59 de WRSI (pobre) y < 50 de WRSI (fracaso) del cultivo de quinua	52
Figura III-3	Esquema del agua disponible para las plantas	28	Figura V-9	Porcentaje de la superficie agrícola con riego para los distritos de Puno	53
Figura IV-1	Distribución de los datos del rendimiento del cultivo de papa y quinua en la región Puno	36	Figura V-10	Distribución distrital de la severidad de sequía agrícola para las campañas del cultivo de papa	54
Figura IV-2	Balance hídrico agrícola	38	Figura V-11	Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <80 de WRSI (bajo) del cultivo de papa	55
Figura IV-3	Flujograma del procesamiento de datos y obtención de índice WRSI para las campañas agrícolas del periodo 1981-2016 en la región Puno	40	Figura V-12	Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <60 de WRSI (pobre) del cultivo de papa	56
Figura IV-4	Flujograma del estudio de "Caracterización de la sequía agrícola en la región de Puno"	41			
Figura V-1	Gráfica de la distribución de los valores de WRSI para el fin de campaña en el cultivo de papa	44			
Figura V-2	Cuantificación porcentual de la intensidad de la sequía agrícola correspondiente a los umbrales entre 79-60 (derecha), 59-50 (medio) y por debajo de 50 de WRSI (izquierda) para el cultivo de papa	45			

ÍNDICE DE TABLAS

Figura V-13	<i>Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno < 50 de WRSI (fracaso) del cultivo de papa</i>	57	Tabla II-1	<i>Tabla de principales cultivos de la región Puno</i>	24
Figura V-14	<i>Distribución distrital de la severidad de sequía agrícola para las campañas del cultivo de quinua</i>	58	Tabla III-1	<i>Tabla de clasificación de los valores de WRSI</i>	30
Figura V-15	<i>Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <80 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua</i>	59	Tabla III-2	<i>Clasificación de la productividad del cultivo basada en el WRSI</i>	31
Figura V-16	<i>Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <60 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua</i>	60	Tabla IV-1	<i>Parámetros para el cálculo de Evapotranspiración referencial</i>	34
Figura V-17	<i>Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <50 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua</i>	61	Tabla IV-2	<i>Información del cultivo</i>	35
Figura V-18	<i>Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de papa en departamento de Puno</i>	62	Tabla IV-3	<i>Procesos metodológicos para la caracterización de la sequía agrícola</i>	42
Figura V-19	<i>Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de quinua en el departamento de Puno</i>	63	Tabla V-1	<i>Registro de las 10 primeras campañas con mayor intensidad de la sequía agrícola para el cultivo de papa</i>	45
Figura V-20	<i>Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de quinua en el departamento de Puno</i>	64	Tabla V-2	<i>Registro de las 10 primeras campañas con mayor intensidad de sequía agrícola para el cultivo de quinua</i>	48
Figura V-21	<i>Porcentaje promedio de la severidad de sequía agrícola para los distritos de Puno. Izquierda papa y derecha quinua</i>	65	Tabla V-3	<i>Registro de los 20 primeros distritos con mayor afectación por la sequía agrícola para el cultivo de papa y quinua</i>	66



CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA

para los cultivos de papa y quinua en el departamento de Puno

Resumen

En el presente trabajo, se caracterizó la sequía agrícola en el área de producción de cultivos de papa y quinua de la región de Puno a través de la información obtenida de los resultados de intensidad, frecuencia y severidad. Dichos resultados se analizaron a partir de los valores calculados del Índice de Satisfacción del Requerimiento Hídrico del Cultivo (WRSI, por sus siglas en inglés) para cada campaña durante el periodo 1981-2016. Se contabilizaron 35 campañas en total y se examinó el comportamiento de la sequía agrícola en los distritos de producción agrícola de la región. El comportamiento temporal del WRSI para la región de Puno indicó que la zona de estudio fue afectada por sequías agrícolas más intensas en las campañas 1982-1983, 1989-1990, 1991-1992, 2004-2005 y 2015-2016, las cuales coincidieron tanto en el cultivo de papa como en el de quinua. Respecto a la determinación espacial, se identificó a los siguientes distritos como los de mayor afectación por sequías agrícolas para el período de análisis (1981-2016) en el cultivo de papa: Sinia, Quiaca, Corani, Cuyo Cuyo, Usicayos, Puno

Macusani, Crucero, Atuncolla, Huata, Huayrapata, Cabanillas, Santa Lucía, Capachica, Patambuco, Coasa, Usicayos, Crucero, Macusani y Corani. Para el cultivo de quinua, se identificó a los distritos de Usicayos, Coasa y Crucero como los de mayor afectación. De igual manera, se pudo incluir a los distritos de Munani, Huacullani, Pisacoma, Caracoto, Pusi, Desaguadero y Kelluyo. Si bien es posible afirmar que las sequías agrícolas se han presentado en la gran mayoría de los distritos, los mencionados son los que obtuvieron los más altos valores de intensidad, frecuencia y severidad. Finalmente, se recomienda ampliar el presente estudio implementando otros índices de sequía agrícola, así como el estudio de otros eventos climáticos que merman la producción de los cultivos del Altiplano como son las heladas o lluvias intensas.

Palabras clave: Sequía, agroclimática, índices, Puno, SENAMHI, WRSI, sequía agrícola

1. Introducción

Una parte importante de la población de los países en desarrollo depende de la agricultura para su subsistencia. Esto produce que sus habitantes sean particularmente vulnerables a los fenómenos meteorológicos extremos que han resultado de las condiciones climáticas cambiantes.

Según el pronunciamiento de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), de marzo del 2019 por el "Día Mundial del Agua", la agricultura es, con mucho, "el sector más afectado en períodos de sequía, lo que provoca pérdidas de cosechas y una reducción de la producción". Además, esta institución incide en que los principales perjudicados por las pérdidas en el rendimiento del cultivo son la población de las zonas rurales y los agricultores, primordialmente, los pequeños campesinos que trabajan el mayor porcentaje de las explotaciones agrícolas globales en parcelas de menos de dos hectáreas (FAO, 2019).

Precisamente, en el contexto peruano, durante el 2016, el Gobierno anunció la declaratoria del estado de emergencia por peligro inminente ante el déficit hídrico en los departamentos de Apurímac, Ancash, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Lambayeque, La Libertad, Pasco, Piura, Puno, Tacna y Tumbes, así como en siete (07) provincias del departamento de Lima, y en cuatro (04) provincias del

departamento de Arequipa (El Peruano, 2016). Esta creciente frecuencia e intensidad de los episodios de sequía tienen un impacto significativo en los sistemas de producción agrícola y ganadera, por ende, en los mercados de alimentos y en las economías locales y globales. Por ello, la caracterización de la sequía agrícola, es decir, el conocimiento de la ocurrencia, frecuencia e intensidad de sus episodios, así como las características ambientales, agrícolas y socioeconómicas de las zonas propensas y la identificación de los puntos críticos de estrés por deficiencias hídricas son esenciales para determinar con precisión los espacios administrativos que necesitan una intervención inmediata.

Para poder analizar las características de los eventos de sequía agrícola, es indispensable cuantificarlas numéricamente, por lo que es oportuno el uso de índices cuyos valores reflejen sus niveles de intensidad. Este análisis es fundamental para evaluar el impacto de este tipo de eventos en la producción agrícola durante las campañas pasadas y, a partir de ellas, poder entender su comportamiento en las áreas de cultivo en la actualidad. De tal modo, se asegura que los esfuerzos para contrarrestar el efecto de las sequías se dirijan a las zonas más vulnerables.

En ese sentido, se desarrolla el proyecto binacional "Información, gobernanza y acción para la reducción del riesgo de sequías en Perú y Bolivia en un contexto de cambio climático

- Pachayatiña/Pachayachay", ejecutado en Bolivia y Perú por el consorcio integrado por SENAMHI Bolivia, SENAMHI Perú, HELVETAS Swiss Inter-cooperation de Bolivia y Perú, y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES). Además, es financiado por el programa EUROCLIMA+ de la Unión Europea, con agencias implementadoras como la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD).

Este proyecto tiene como objetivo central contribuir a reducir el riesgo de pérdidas agropecuarias ocasionadas por la sequía en un contexto de variabilidad y cambio climático en el Altiplano boliviano – peruano. Asimismo, plantea, en etapa inicial, el desarrollo de estudios de caracterización de las sequías en el departamento de Puno que permitan conocer cómo evolucionaron históricamente desde el año 1981 para precisar el grado de impacto en el sector y conocer su intensidad y extensión espacial. Así, se establecería el tipo de incidencia que estos eventos tuvieron sobre los rendimientos de cultivos prioritarios.

Por último, es importante mencionar que los resultados del presente estudio sirven de información esencial para orientar las inversiones y son una guía para formular políticas de desarrollo con base científica. Estas deben buscar como finalidad el reducir las amenazas climáticas y vulnerabilidades del departamento de Puno.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- * Caracterizar la sequía agrícola en la región de Puno, en términos del análisis de la intensidad, frecuencia y severidad a partir de las salidas de WRSI, durante las campañas agrícolas del período 1981-1982 al 2015-2016

1.1.2. Objetivos específicos

- * Generar una base de datos resultante que sirva para identificar las zonas de mayor déficit hídrico en la agricultura
- * Determinar, por definición y según la escala de WRSI, los niveles de sequía agrícola
- * Identificar las campañas y los distritos con los valores más intensos de sequías agrícolas para los cultivos de papa y quinua
- * Evaluar la frecuencia de los valores de sequía agrícola para los cultivos de papa y quinua en las diferentes campañas y distritos del departamento de Puno
- * Determinar las campañas y los distritos del departamento de Puno que manifiestan mayor severidad de sequía agrícola, según los valores de WRSI
- * Analizar la relación entre las salidas de WRSI y los datos históricos de rendimiento para los cultivos de papa y quinua

2. Descripción del área de estudio

2.1. Ubicación geográfica y política

El departamento de Puno está ubicado al extremo sur este del Perú, entre los 13°00'00" y 17°17'30" de latitud sur y los 71°06'57" y 68°48'46" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Cuenta con una extensión territorial de 71 999,0 km² (6 por ciento del territorio nacional) y es el quinto departamento más grande del Perú. Limita por el norte con la región Madre de Dios, por el este con la República de Bolivia, por el sur con la región Tacna y la república de Bolivia y por el oeste con las regiones de Moquegua, Arequipa y Cusco.

Figura II-1

Mapa político del departamento Puno



Nota. Tomado de Información Proyecto de Presupuesto del Sector Público para el Año 2021 (p.31), por Gobierno Regional de Puno (GORE Puno), 2020 a.

El territorio puneño comprende 43 886,36 km² (61,0 %) de sierra, 23 101,86 km² (32,1 %) de zona de selva, 14,5 km² (0,02 %) de superficie insular y 4 996,28 km² (6,9 %) que corresponden a la parte peruana del Titicaca. La región abarca un perímetro fronterizo de 1 108 km, que representa el 11 % de línea de frontera del Perú. Asimismo, está subdividida en 13 provincias y 109 distritos, distribuidos de la siguiente manera: Puno, 15 distritos; Azángaro, 15; Carabaya, 10; Chucuito, 7; El Collao, 5; Huancané, 8; Lampa, 10; Melgar, 9; Moho, 4; San Antonio de Putina, 5; San Román, 4; Sandía, 10; y Yunguyo, 7.

2.2. Clima

La región Puno, debido a su elevada altitud, en general superior a los 3.810 m.s.n.m., posee la característica de un clima frío, aun durante el verano. Además, las altas cordilleras longitudinales que rodean el Altiplano, actúan como barreras para los vientos húmedos provenientes de las vertientes y llanuras exteriores, especialmente del oriente. No obstante, al interior del Altiplano, la presencia del extenso lago Titicaca constituye una importante fuente de humedad y un elemento moderador del clima.

En la superficie de la región Puno, se pueden encontrar diez tipos climáticos bien diferenciados, según GORE Puno (2016):

1. Tipo Climático A r B'2 a': expresa un clima excesivamente húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua mesotermal. Este ha sido identificado en la estación meteorológica de Taquile, Limbaní y Ollachea, y se extiende en la ceja de selva y en la isla Taquile que se encuentra en el Titicaca.
2. Tipo Climático A r B'4 a': expresa un clima excesivamente húmedo y poca o ninguna deficiencia de agua mesotermal. Se presenta en la estación meteorológica de San Gabán y se proyecta a la parte baja de la selva del departamento de Puno, en las provincias de Carabaya y Sandía.
3. Tipo Climático B1 r B'1 a': expresa un clima ligeramente húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Este tipo de clima se detecta en las estaciones meteorológicas de Ananea, Arapa, Ayaviri, Cabanillas, Capazo, Huancané, llave, Juliaca, Mañazo, Muñani, Pizacoma, Progreso, Puno, Putina y Santa Lucía.
4. Tipo Climático B1 r B'2 a': expresa un clima ligeramente húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Esta clase de clima se presenta en la estación meteorológica de la isla de los Uros.
5. Tipo Climático B2 r B'1 a': expresa un clima moderadamente húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Se identifica en las estaciones meteorológicas de Capachica, Chuquibambilla, Crucero, Cuyo Cuyo, Desaguadero, Lampa, Laraqueri, Lla-lly, Macusani, Pucará, Rincón de la Cruz Acora y Yunguyo.

6. Tipo Climático B2 r B'2 a': expresa un clima moderadamente húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Este tipo de clima se presenta en la estación meteorológica de la Isla de Suana.
7. Tipo Climático B3 r B'1 a': expresa un clima húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Es propio de las estaciones meteorológicas de Cojata, Huayra Moho, Juli, Pampahuta y Santa Rosa.
8. Tipo Climático B3 r B'2 a': expresa un clima húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua mesotermal. Se detecta en la estación meteorológica de la Isla de Soto.
9. Tipo Climático B3 r B'4 a': expresa un clima húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua mesotermal. Se identifica en la estación meteorológica de San Juan del Oro.
10. Tipo Climático C2 r B'1 a': expresa un clima húmedo, poca o ninguna deficiencia de agua microtermal. Este tipo de clima se presenta en las estaciones meteorológicas de Azángaro, Mazocruz y Taraco.

2.3. Fisiografía

La fisiografía o geografía física se define como la descripción de la naturaleza a partir del estudio del relieve y la litosfera en conjunto con el estudio de la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera (Villota, 1992).

El departamento de Puno está formado fisiográficamente por cinco grandes provincias (GORE Puno, 2016): Altiplano, Cordillera Occidental, Cordillera Oriental, Zona Subandina y Llanura Amazónica.

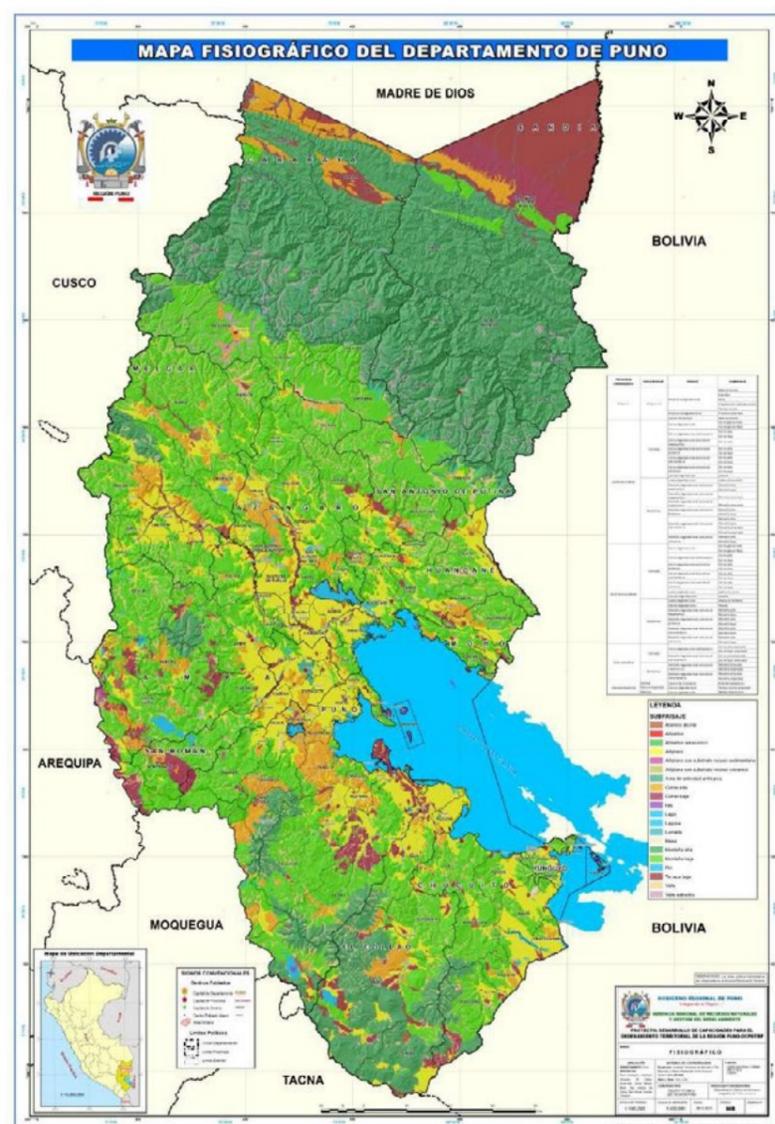
- a. El Altiplano es una unidad genética de origen cuaternario (agradacional y degradacional), de relieve plano a ondulado que fue ocupada por el lago, desde el final del terciario y durante el cuaternario, con lo que fue rellenada por material de origen lacustre, aluvial y sedimentos finos.
- b. La Cordillera Oriental es una alineación montañosa que constituye el ramal oriental de la cordillera de los Andes en el Perú. Atraviesa parte del departamento de Puno y se encuentra situada en el límite con la Zona Subandina.
- c. La Cordillera Occidental es una cadena montañosa que constituye el ramal occidental de la cordillera de los Andes en el Perú. Se trata de una divisoria de aguas entre los dos océanos que bordean el continente sudamericano y engloba manifestación plutónica y volcánica cenozoica.
- d. La Zona Subandina se encuentra localizada entre la Cordillera Oriental y la plataforma estable del escudo brasileiro. Aquí la serie estratigráfica andina es concordante desde

el Paleozoico hasta el Mioceno y solo la tectónica Mioceno-Plioceno afecta a esta megaestructura geológica.

- e. La Llanura Amazónica comprende zonas con pendientes casi horizontales y que presentan relativa estabilidad tectónica.

Figura II-2

Mapa fisiográfico del departamento de Puno



Nota. Tomado de Zonificación Ecológica y Económica (p.35), por GORE-Puno, 2016.

2.4. Hidrografía

La hidrografía muestra la ubicación espacial de lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes, así como de superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, dulce, que pueden estar conectadas o no con un río permanente de agua. En la zona andina, existen cuerpos de agua (lagos y lagunas) situados en alta montaña o cabecera de cuenca que constituyen las áreas de nacimiento de los ríos.

De acuerdo con el estudio hidrográfico, el departamento de Puno se encuentra dentro de tres regiones hidrográficas del Perú (Titicaca, Amazonas y Pacífico). A la vertiente del Titicaca pertenecen ocho cuencas hidrográficas, las cuales son Huaycho, Suches, Huancané, Ramis, Coata, Illpa, Ilave y la zona circunlacustre correspondiente a la vertiente del Titicaca.

A la vertiente del río Amazonas pertenecen las cuencas de Inambari, Tambopata, medio bajo Madre de Dios y Alto Ucayali. Y a la vertiente del Pacífico, las cuencas de Quilca - Vitor - Chili, Tambo y Camaná (GORE, 2016).

2.5. Capacidad de uso mayor de tierras

Esta se refiere a la máxima aptitud de cada unidad de suelo, o potencial edáfico del territorio, para producir naturalmente en forma constante y bajo tratamientos continuos y usos específicos con el fin de conseguir el óptimo beneficio social y económico dentro de los principios del desarrollo sostenible. Esta información brinda un enfoque general de las tierras aptas y con potencial agrícola dentro de la región Puno respecto de los demás grupos de capacidad de uso mayor.

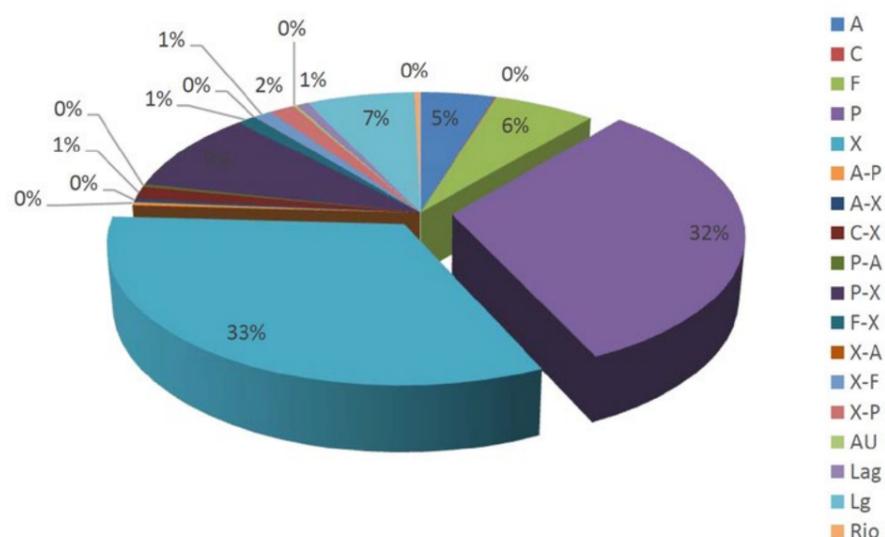
La clasificación de tierras se basa en cuatro grupos de capacidad de uso mayor. Estos son presentados a continuación:

- * Tierras aptas para cultivo en limpio (A)
- * Tierras aptas para cultivos permanentes (C)
- * Tierras para pastos (P)
- * Tierras aptas para producción forestal (F)
- * Tierras de protección (X).

En la Figura II-3, se advierte que, de acuerdo con la clasificación por capacidad de uso mayor (CUM), las superficies de mayor extensión son las tierras exclusivamente de protección (X) con un 33 %. En segundo lugar, se encuentran las tierras exclusivamente para pastos (P) con un 32 %. Se debe tomar en cuenta que estos porcentajes de CUM pueden aumentar al contabilizar tierras agrícolas de pasturas (A-P), tierras agrícolas de protección (A-X), entre otras. Es relevante mencionar que este gráfico representa los porcentajes correspondientes a las áreas urbanas (AU), lagunas (Lag), lagos (Lg) y ríos (Río).

Figura II-3

Porcentajes de superficie CUM por Grupo.



Nota. Tomado de Zonificación Ecológica y Económica (p.38), por GORE-Puno, 2016.

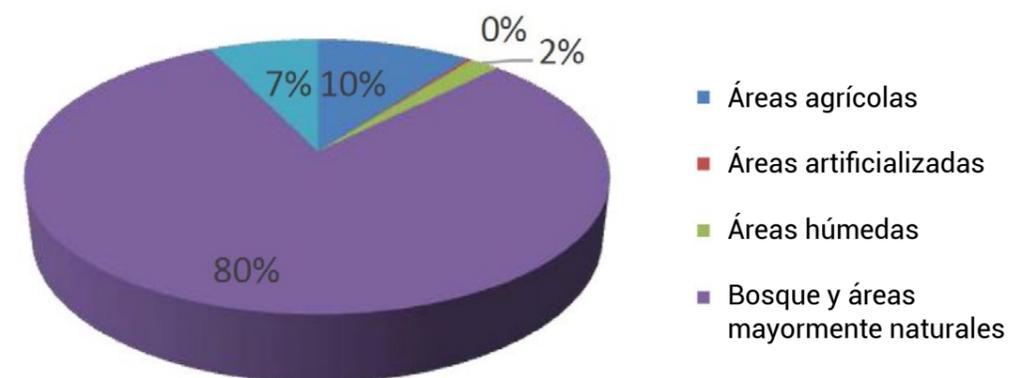
2.6. Uso actual

El estudio de uso actual de tierras consiste en identificar, delimitar y representar cartográficamente las distribuciones espaciales de las principales actividades productivas desde el punto de vista económico. El uso actual de tierras - nivel I se ha clasificado en cinco categorías: áreas artificializadas, áreas agrícolas, bosques y áreas mayormente naturales, áreas húmedas, y superficies de agua.

La Figura II-4 exhibe que, actualmente, la mayor área de tierras del departamento de Puno está en uso de bosque natural y alcanzan un 80 % del total. Respecto a las áreas agrícolas, estas suponen un 10 % del total, lo que incluye a los cultivos de quinua, papa, entre pastos cultivados, entre otros.

Figura II-4

Categorías de uso actual de tierras



Nota. Tomado de Zonificación Ecológica y Económica (p.47), por GORE-Puno, 2016.

2.7. Los cultivos de papa y quinua en Puno

Según el Centro Internacional de la Papa (CIP) (1980), la sequía en el altiplano puede causar pérdidas en el rendimiento hasta en 85 %. Esto dependerá de la intensidad y duración del fenómeno, del estado fenológico y sanitario, y del manejo del cultivo e incidencia de plagas, enfermedades y malezas principalmente, debido a que el 90 % de la superficie total de papa se cultiva bajo condiciones de lluvia.

El cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno es de gran importancia económica y social por ser el predominante y constituir la base de la alimentación del poblador. Sin embargo, los rendimientos que se obtienen son bajos por la incidencia de diversos factores limitantes que afectan la producción y productividad. Entre estos factores, los más limitantes son los climáticos, ya que el cultivo de la papa es altamente vulnerable a la ocurrencia impredecible de las heladas y sequías que causan daños considerables en el rendimiento y en la calidad y presentación de los tubérculos de papa (Canahuana, 2020).

Tabla II-1

Tabla de principales cultivos de la región Puno

Cultivo	Sup. Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (kg/ha)
Papa	59 711	742 924	12 442
Quinua	35 269	39 610	1 123
Cebada grano	25 625	27 156	1 060
Haba grano seco	9 832	11 911	1 211
Avena grano	7 792	7 633	980
Cañihua	5 704	4 785	839
Maíz amiláceo	3 768	6 034	1 601
Oca	3 424	28 309	8 268
Olluco	3 042	19 782	6 503

Nota. Tomado de Información estadística para la campaña agrícola 2016-2021 por la Dirección Regional Agraria Puno, (DRA Puno), 2021.

Por otro lado, la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un cultivo originario de la zona andina, adaptado a condiciones agroecológicas extremas (sequías, heladas). Es uno de los alimentos más completos y balanceados que existe en nuestro territorio por su contenido de vitaminas, aminoácidos, ácidos grasos insaturados (omega 3, 6, 9), minerales y proteínas que varían entre 12 a 21.3 % (INIA, 2013).

La demanda de quinua lleva a dos destinos bien diferenciados: el auto sostenimiento y el mercado de productos funcionales. El primero es integrado por familias en condición de pobreza y extrema pobreza, y el segundo es constituido por el mercado nacional e internacional que cada vez crece más para este cultivo. No obstante, respecto a esto último, la oferta aún no puede satisfacer la demanda (Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA], 2013).

Para ello, el INIA está trabajando exitosamente con la finalidad de incrementar la producción y productividad de este grano andino. Busca incorporar alternativas tecnológicas adaptadas a condiciones y escenarios actuales de cambio climático en los espacios en los que se desarrolla el cultivo (INIA, 2013).

3. Revisión bibliográfica

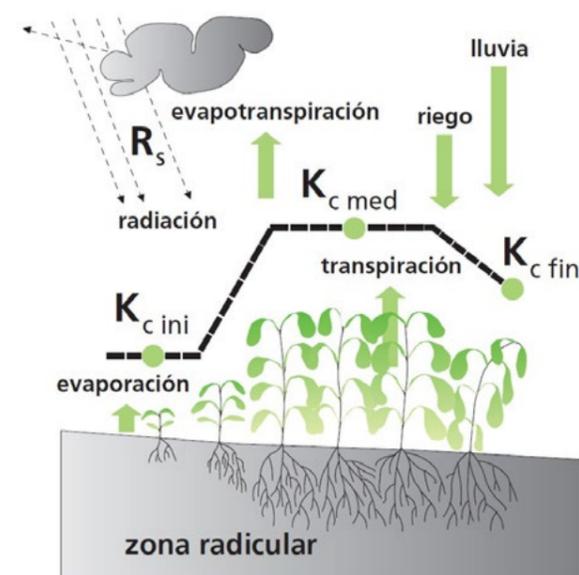
3.1. Marco teórico

3.1.1. Respuesta de las plantas al estrés hídrico

El estrés por déficit hídrico o por sequía se produce en las plantas como respuesta a un ambiente escaso en agua, en donde la tasa de transpiración excede a la toma de este recurso. El déficit hídrico no sólo ocurre cuando existe poca agua en el ambiente, sino también por bajas temperaturas y por una elevada salinidad del suelo (Moreno, 2009). La radiación solar interceptada es la fuerza que impulsa la transpiración y la fotosíntesis del cultivo. Por tanto, existe una relación directa entre la producción de biomasa y el agua consumida a través de la transpiración. El estrés hídrico y la disminución de la transpiración producen la reducción de la biomasa, lo cual generalmente disminuye el rendimiento (FAO, 2014).

Figura III-1

Esquema general de evapotranspiración en la planta



Nota. Tomado de Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, por FAO, 2006.

Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, la transpiración se efectúa a través de los estomas, los cuales constituyen evidentemente un mecanismo homeostático que regula las problemáticas demandas de absorción creciente del CO_2 , así como la decreciente pérdida de agua en la planta. El mecanismo de control estomático de H_2O puede detener paulatinamente el crecimiento vegetal, puesto que la excesiva pérdida de agua podría causar un daño mucho más severo que la reducción temporal de la fotosíntesis (Bidwell, 1993).

3.1.2. El agua en el suelo

El agua es un elemento fundamental para la vida de las plantas, pues interviene en sus procesos de crecimiento y desarrollo. Los minerales requeridos para su nutrición se disuelven en el agua del suelo; luego, son absorbidos a través de las raíces y transportados hasta sus hojas, y finalmente, mediante la fotosíntesis, se elabora la materia orgánica. A su vez, el agua que fluye dentro de la planta permite una correcta "refrigeración" para adaptarse a las condiciones climáticas. La cantidad de agua que consumen las plantas depende tanto de las variedades del cultivo, así como de la climatología de la zona, particularmente, de las condiciones de radiación solar, temperatura, humedad y viento dominante.

a. Estados del agua en el suelo

La fase líquida del suelo, que incluye el agua y las soluciones del mismo, ocupa los poros que existen en la fase sólida. El agua puede adoptar diferentes formas con una disposición muy distinta para ser utilizada por la planta. Dependiendo de los índices de tensión de humedad, las formas fundamentales del agua en el suelo son las siguientes (Valero, 1999):

- **Agua gravitacional:** Es el agua no retenida por las partículas sólidas del suelo, como consecuencia, puede desplazarse libremente por los poros. Se encuentra retenida con una tensión superficial inferior de -33 kPa.
- **Agua capilar:** Es una forma de agua retenida por las partículas sólidas del suelo mediante fuerzas de tensión superficial. El intervalo de tensiones al que se encuentra retenida comprende entre -33 y -3000 kPa.
- **Agua higroscópica:** Esta está fijada a la fase sólida por fuerzas eléctricas, puesto que el agua se comporta como un dipolo. Representa una fracción muy pequeña y se encuentra retenida a una tensión superior a -3000 kPa, tan enérgicamente que no está disponible para las plantas.

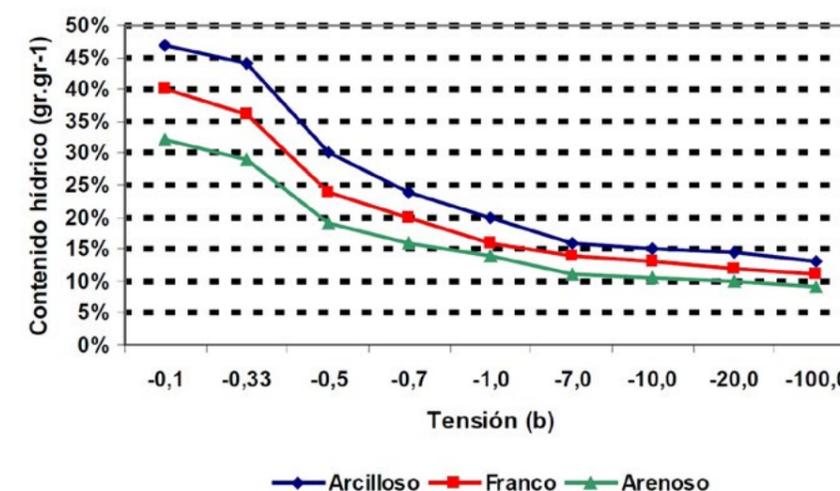
b. Contenido de agua en el suelo:

El comportamiento del suelo puede ser comparado a un depósito de agua, donde se almacena una cierta cantidad, y gradualmente se cede en función de las necesidades de los cultivos. En razón a la gran variedad de tipos de suelos, la cantidad que pueda ser almacenada en ellos también es diversa y está relacionada a la distribución del tamaño de los poros, la textura y estructura del suelo (Valero, 1999).

Para un momento concreto, el agua retenida por el suelo depende de factores como el tipo de cobertura, densidad, fase de crecimiento de la planta, profundidad de raíces, relaciones de evaporación y transpiración, cantidad de agua infiltrada, relación de humectación, naturaleza de los horizontes del suelo y la longevidad en el tiempo desde el último riego o precipitación. Los límites del agua disponible para la planta se encuentran para un perfil del suelo desde la superficie hasta el fondo de la zona radicular. Como la profundidad de las raíces está variando con el tiempo, también la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente –cada uno representado por los contenidos de agua del suelo medidos sobre la zona entera de raíces– cambian temporalmente (Valero, 1999).

Figura III-2

Esquema del contenido de agua en el suelo según la textura del suelo



Nota. Tomado de *Conceptos básicos de las relaciones agua - suelo - planta* (p.17), por Angella, G., 2016.

La Figura III-2 manifiesta el contenido de agua en el suelo en relación con las tres clases texturales de este (arcilloso, franco y arenoso), y bajo los diferentes estados de agua en el suelo. La clase textural arcillosa es la que retiene mayor cantidad de H_2O , seguida de la clase textural franco y, finalmente, la arenosa. Esto aplica tanto en el estado gravitacional, capilar e higroscópico del suelo.

3.1.3. La capacidad de retención de agua disponible para las plantas

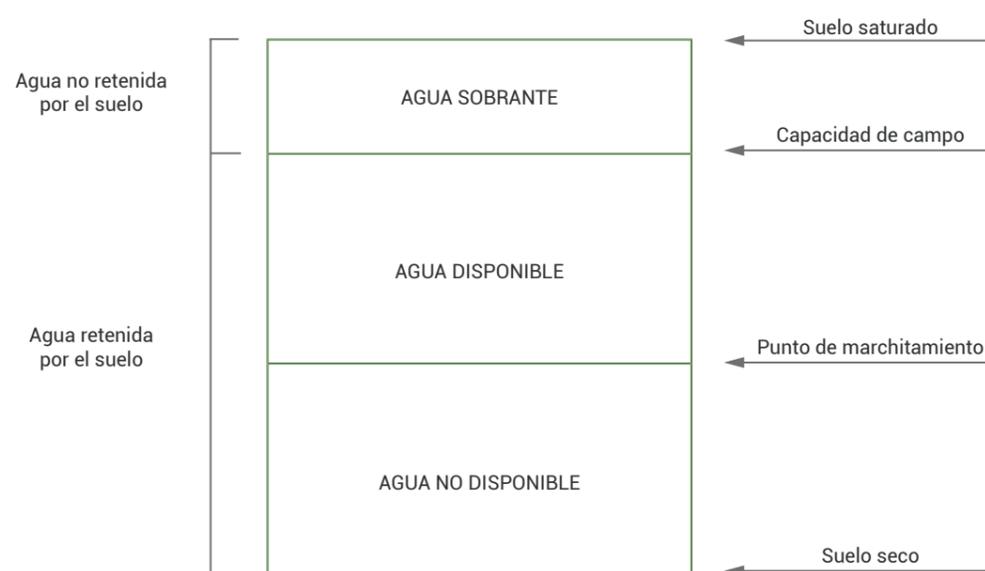
Esta es la cantidad de agua en un perfil del suelo que puede extraerse teóricamente por la planta, después de que haya drenado libremente por gravedad durante un periodo de tiempo. Es definida por la diferencia en el contenido de humedad en la capacidad de campo y el punto de marchitez o porcentaje de marchitez permanente (Valero, 1999).

Para el presente estudio, se ha determinado la capacidad de retención de agua disponible para el cultivo como WHC final (*Water Holding Capacity*). Se establece de acuerdo con el producto de la profundidad de raíz efectiva de un cultivo específico y la capacidad de retención de agua en el suelo (WHC nominal). Esta última es la cantidad de agua que un tipo de suelo puede retener para el uso en la agricultura. Incluye tanto al agua disponible para las plantas como la que no.

A partir del producto del WHC final y el valor de la fracción de agua del suelo que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico "p", se puede calcular el valor de agotamiento máximo permisible (MAD, por sus siglas en inglés). El valor de "p" puede oscilar entre 0,3, en plantíos de escaso desarrollo radicular, hasta 0,5, que es el más usado para diferentes cultivos. Este valor depende y se ajusta en función de la demanda atmosférica, del tipo de suelo y del estado del cultivo. Asimismo, después de una precipitación o un riego, el agua presente en el suelo supera la capacidad de campo, como se muestra en la Figura III-3 (Valero, 1999).

Figura III-3

Esquema del agua disponible para las plantas



Nota. Adaptado de *Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) para las plantas en suelos del Alto y Medio Aragón* (p. 31) por Valero, A., 1999.

3.1.4. Sequía agrícola

Esta se detecta cuando el estrés continuo e intenso por la humedad del suelo conduce a una reducción significativa del rendimiento del cultivo (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2011). La sequía en el sentido agrícola no comienza con el cese de la lluvia, sino, más bien, cuando el agua almacenada disponible apoya la evapotranspiración real a solo una pequeña fracción de la tasa de evapotranspiración potencial. La velocidad de transpiración de un cultivo depende en gran medida, de la disponibilidad de agua del suelo según lo determinen los sistemas de raíces de los cultivos.

En una situación de sequía, la escasez de agua del suelo a menudo se ve agravada por una mayor carga de calor impuesta a la planta, por la radiación neta debido a la menor nubosidad y, posiblemente, por menor albedo. La deficiencia puede ser consecuencia de un suministro de humedad inusualmente pequeño o una demanda de humedad inusualmente grande. Las plantas pueden estar sujetas a estrés térmico severo con los consiguientes efectos bioquímicos y fisiológicos nocivos (OMM, 2011).

3.1.5. Índice de satisfacción de los requerimientos hídricos del cultivo (WRSI)

Este índice representa el consumo de agua que el sistema suelo-cultivo alcanzaría normalmente en condiciones reales, comparado con el que acaecería sin ninguna limitación hídrica. Se trata del cociente entre la evapotranspiración real (ET_r) y la evapotranspiración estándar (ET_c). Según la OMM y Asociación Mundial del Agua (GWP, por sus siglas en inglés) cada cultivo posee su propio cociente, que se basa en su desarrollo y las relaciones conocidas entre los rendimientos y el estrés ocasionado por la sequía (2016). En ese sentido, el índice WRSI está diseñado para permitir la fácil identificación de las zonas de cultivo con una alta probabilidad de estrés hídrico (sequía) a través del cálculo del balance hídrico agrícola.

- Calcular SumET_r: Realiza el acumulado de la evapotranspiración real conforme al avance cada decadiario.
- Calcular SumET_c: Realiza el acumulado de la evapotranspiración estándar conforme al avance cada decadiario.
- Calcular WRSI:

$$WRSI = \frac{SumET_r}{SumET_c} \times 100 \quad ec. 1$$

Los valores de WRSI del 95 - 100 % ("suficiente") indican que hay suficiente agua en la zona de raíces del cultivo para soportarlo durante la próxima década sin experimentar estrés hídrico (es decir, lluvias adecuadas y disponibilidad de humedad, o ausencia de reducción del rendimiento debido al déficit de agua). Los valores entre el 95 % y el 50 % indican un grado variable de estrés hídrico y reducción del rendimiento debido a un suministro de agua inadecuado. Por último, los valores por debajo del 50 % señalan la pérdida de la cosecha (Smith, 1992) (ver Tabla III-1).

Tabla III-1

Tabla de clasificación de los valores de WRSI

WRSI	Clasificación
100 a 99	Muy Bueno
99 a 95	Bueno
95 a 80	Promedio
80 a 60	Bajo
60 a 50	Pobre
50 a 0	Fracaso

Los valores de WRSI son los acumulados de los requerimientos hídricos durante el ciclo del cultivo. Se considera a las estimaciones del final de ciclo como las que representan el estado hídrico de toda la campaña.

Un valor de WRSI inferior a 50 (ver Tabla III-2) se entiende como una condición de fracaso de la cosecha y se toman en cuenta otros valores intermedios de WRSI para clasificar a su condición. Sobre la base de esta, y para lograr una relación entre el WRSI y el rendimiento del cultivo, se asignó a cada año de la base de datos un estado diferente, a saber, muy bueno, bueno, medio, fracaso de los cultivos, etc., y se analizó su frecuencia a lo largo de toda la serie temporal (Smith, 1992).

Tabla III-2

Clasificación de la productividad del cultivo basada en el WRSI

Percentage of yield relation to average of 3 best yields	Crop performance index	Water requirement satisfaction index (WRSI)
>100%	Very good	100
90-100%	Good	95-99
50-90%	Average	80-94
20-50%	Mediocre	60-79
10-20%	Poor	50-59
<10%	Crop failure	<50

Nota. Tomado de *Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*, por Smith, M., 1992, FAO.

3.1.6. Caracterización de la sequía agrícola

El comienzo de las sequías agrícolas, la intensidad alcanzada y sus frecuencias son procesos graduales y acumulativos que ocurren lentamente. Su determinación es complicada. Al ser la caracterización de las sequías un análisis de su intensidad y frecuencia, es necesario entender que están asociadas con las particularidades agroclimáticas propias de cada región. La identificación de las áreas afectadas, así como la intensidad y duración de estas, puede ser efectuadas mediante la utilización de información meteorológica de superficie e información satelital (Ravelo, 2000).

La investigación denominada "Caracterización espacio-temporal de la sequía en los departamentos andinos del Perú (1981-2018)", la cual aborda la caracterización de estas desde un frente netamente meteorológico, concluye que en el periodo 1981 al 2018 las sequías meteorológicas se presentaron en los años 1982, 1983, 1985, 1987, 1988, 1990, 1992, 2004, 2005 y 2016 con intensidades de moderada a extremadamente seca (SENAMHI, 2019). Esta información sirve de base para el presente estudio, pues todo evento de sequía agrícola sucede después de un evento de sequía meteorológica.

- Intensidad: Referido al grado de afectación del evento, respecto a la situación normal
- Frecuencia: Número de veces en que aparece sucede o se realiza un evento durante un periodo
- Severidad: Porcentaje de área afectada respecto del total analizado.

3.2. Marco conceptual

Balance hídrico agrícola: Consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un delimitado periodo de tiempo. Al medir varios componentes del balance de hídrico agrícola, se puede determinar la evapotranspiración (FAO, 2006).

Estrés hídrico agrícola: El estrés por déficit hídrico o por sequía se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso en agua, en el que la tasa de transpiración excede a la toma de esta (OMM, 2011).

Evapotranspiración de referencia (ET_o): Se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera de una superficie de un cultivo hipotético de pasto con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 (FAO, 2006).

Evapotranspiración estándar (ET_c): Se refiere a la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla libre de enfermedades, con buena fertilización, que crece en un campo extenso bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y que alcanza su producción total bajo ciertas condiciones climáticas (FAO, 2006).

Índice de sequía: Los índices suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores enumerados. Tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las sequías en el entorno en un período de tiempo específico (OMM, 2011).

Índices de sequía agrícola: Estos deben basarse en la humedad del suelo en la zona de la raíz, en el análisis de los déficits de evapotranspiración y cumplir la necesidad de ayudar a vigilar eficazmente la sequía agrícola (OMM, 2011).

Fenología: Las etapas del desarrollo del cultivo y su duración son, con frecuencia, características diferenciadoras de las distintas variedades de un mismo cultivo. El usuario debe especificarlas según la variedad en cuestión (FAO, 2014).

4. Datos y metodología

4.1. Datos

4.1.1. Datos meteorológicos

a. Temperatura:

La información de temperatura (máxima y mínima) decadiaria a nivel de toda la región sur del país proviene de la base de datos de la Subdirección de Predicción Climática del SENAMHI, para un total de 38 estaciones. A partir de estas, se genera el grillado decadiario de temperatura máxima y mínima a escala espacial de 1 km².

La construcción de los grillados de temperatura máxima y mínima se realizó interpolando las anomalías decadiarias y utilizando el método del *Inverse Distance Weighting* (IDW) (Li y Heap, 2008). Las anomalías se calculan a través de la diferencia del valor de temperatura en un determinado decadiario y el valor del punto de píxel (donde se ubica una estación meteorológica) de la grilla de la climatología. Finalmente, para la obtención del valor real de la temperatura decadiaria, solo se debe agregar (sumar) las climatología y anomalías especializadas (Oyler et al., 2015).

$$\begin{aligned} T_{anom} &= T_{normal} - T_{mensual} \\ T_{mensual} &= T_{normal} + T_{anomInterpolada} \end{aligned} \quad ec. 2$$

Donde: Tanom es la anomalía de la temperatura. Tnormal es la temperatura climática de 30 años correspondiente a un determinado periodo. Tmensual es la temperatura promedio del mes. Y TanomInterpolada es la Tanom luego de un proceso de interpolación de sus valores puntuales.

b. Evapotranspiración referencial ET_o:

Los grillados de evapotranspiración referencial decadiaria se calcularon según el método FAO-Penman-Monteith, recomendado por la FAO. Para el proceso de generación del grillado, se sugiere agrupar las variables de entrada para el cálculo del ET_o basándose en la variabilidad temporal, es decir, en aquellas que varían con el tiempo (dinámicas) y viceversa (estáticas). Originalmente, la mayoría de las variables son dinámicas; sin embargo, a falta de disponibilidad de información y con fines de operatividad, se simplifican ciertos procesos, los cuales son indicados por la misma metodología de cálculo (FAO, 2006).

- * **Variables dinámicas:** Como variables dinámicas están las grillas de temperatura mínima y temperatura máxima.
- * **Variables estáticas:** Como variables estáticas están las siguientes:
 - **Latitud (LAT):** LAT es una variable necesaria para el cálculo de diferentes parámetros astronómicos.
 - **Elevación sobre el nivel del mar (Z):** Z es un parámetro indispensable para el cálculo de la presión atmosférica y radiación solar en cielo despejado.
 - **Velocidad de viento (U₂):** Debido a la falta de información confiable de U₂, se asume el valor constante de 2m/s. Este se espacializa en todo el ámbito de estudio.
 - **Radiación solar promedio (R_s):** La radiación (o irradiación) se obtuvo a partir del Atlas de Energía Solar del Perú (SENAMHI, 2003).

Tabla IV-1

Parámetros para el cálculo de Evapotranspiración referencial

Simbolo	Parámetro	Unidad
T_{max}	Temperatura máxima	°C
T_{min}	Temperatura mínima	°C
R_s	Radiación solar promedio	$MJm^{-2}dia^{-1}$
U_2	Velocidad de viento promedio	ms^{-1}
Z	Elevación sobre el nivel del mar	m
J	Día juliano	-
LAT	Latitud	°

c. Precipitación:

Se ha utilizado la base de datos PISCO (*Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations*) para el producto precipitación diaria (PPd) de resolución espacial de 0.1° x 0.1° (~10 km) en el período enero de 1981 hasta el 2018, que están disponibles en:

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.Prec/.v2p1/.unstable/.monthly/>

4.1.2. Datos del cultivo y rendimientos

a. Datos del cultivo de papa y quinua

El decadiario de inicio de siembra se obtiene a partir de la información de las intenciones de siembra de los principales cultivos de la Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra (ENIS). El ENIS reporta estos inicios a nivel mensual y, a partir de esta información, se pondera los SOS a nivel decadiario. La data del agotamiento máximo permitido se extrae de la FAO (2006). La información del periodo vegetativo se obtiene del MINAGRI referente al cultivo de papa de variedad INIA 307 "Puneñita" y al cultivo de quinua de variedad Blanca de Juli. Los valores de kc fueron conseguidos del "Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos" del MsC. Oscar Baldomero Garay Canales (2009).

Los requerimientos de datos de los cultivos son los siguientes:

Tabla IV-2

Información del cultivo

DATOS DEL CULTIVO	PAPA	QUINUA
Inicio de campaña (decadiarios)	24, 25, 27, 28, 30 y 31	24, 25, 27, 28, 29 y 30
Final de campaña (decadiarios)	3, 4, 6, 7, 9 y 10	5, 6, 8, 9, 10 y 11
Periodo vegetativo (decadiarios)	16	18
Coefficiente del cultivo (kc)	0.75, 1.15, 1.15, 0.85	0.52, 1, 1, 0.6
Fracción de agotamiento máximo permitido ("p")	0.35	0.7
Profundidad de raíz	0.6	0.8

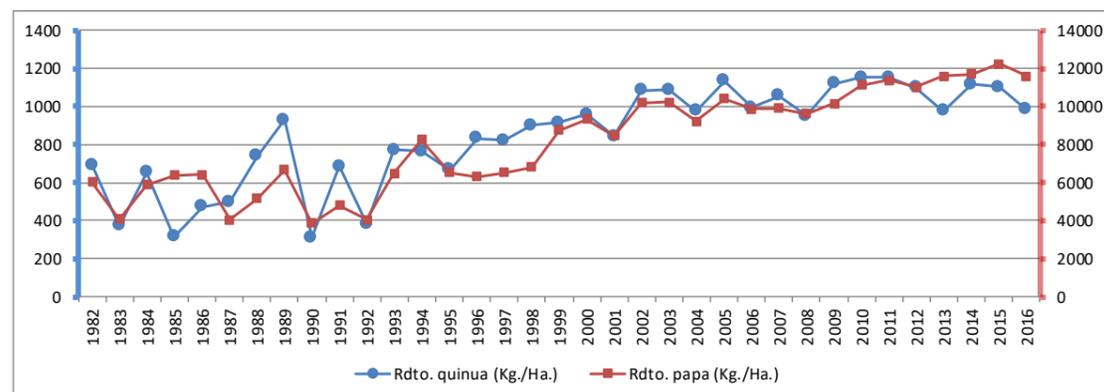
b. Datos de rendimiento del cultivo de papa y quinua

Estos datos corresponden a la información estadística agraria de la Dirección Regional Agraria del Gobierno Regional de Puno, y presenta los rendimientos en kilogramos por hectárea, a nivel de todo el departamento de Puno, para el periodo de campaña agrícola 1981:1982 al 2015:2016. Los datos están disponibles en <https://www.agropuno.gob.pe/informacion-estadistica/estadistica-agricola/>

En la Figura IV-1, se exponen, en color azul, los datos del rendimiento promedio del cultivo de quinua y, en rojo, los datos del rendimiento promedio del cultivo de papa para Puno. Se observa que, al paso de los años, ambos presentan un incremento progresivo de su rendimiento.

Figura IV-1

Distribución de los datos del rendimiento del cultivo de papa y quinua en la región Puno



Al 2016 el promedio nacional de rendimiento de papa alcanzó las 14.5 tn/ha. En el departamento de Puno, llegó a un rendimiento 11.6 tn/ha, un promedio por debajo del nacional. Es relevante mencionar que, dentro del departamento de Puno, se pudo advertir que los distritos de Cuyocuyo, Ayapata, Quiaca, Patambuco, Sandia, Limbani y Phara sobrepasaron el promedio nacional. De estos, Cuyocuyo alcanzó las 16 343 tn/ha, con una producción distrital de 9 841 tn. y con un área de siembra de 0.6 hectáreas aproximadamente. En un mismo análisis, Ayapata obtuvo un rendimiento de 16 213 tn/ha, con una producción distrital de 51 884 tn. en 3.2 hectáreas aproximadamente.

4.1.3. Datos del suelo

Los datos de entrada a nivel del suelo corresponden a su capacidad de retención de agua nominal (WHC), la que se genera a partir de las proporciones de las clases texturales, como la arcilla (fracción superior a 2 micras), limo (2 - 50 micras) y arena (50 - 2 000 micras) presentes en el suelo. Estos valores se obtienen de la base de datos provenientes de "El mapa digital del suelo del mundo realizado" por la FAO/versión 3.6, completada en enero de 2003. La data se descarga en formato *shapefile* y, posteriormente, deberá ser convertida en uno ráster, el mismo formato que los datos meteorológicos (FAO-UNESCO, 1971).

El valor de WHC nominal ha de servir para obtener el WHC final, el valor del agotamiento máximo permisible (MAD) y el nivel crítico del agua en el suelo (SWC, *Critical Soil Water*), que serán usados para realizar los cálculos del balance hídrico agrícola. Es importante tomar en cuenta que los datos son procesados para ser aplicados en el modelamiento de dicho balance. Estos deben ser grillados de un mismo formato, con un igual tamaño de píxel y estar en el mismo sistema de coordenadas de referencia.

a. Cálculos de "WHC" final y "MAD":

* WHC final:

$$WHC = WHC \text{ nominal} \times \text{Long. raiz} \quad \text{ec. 3}$$

* El valor del agotamiento máximo permisible (MAD):

$$MAD = WHC \times "p" \quad \text{ec. 4}$$

b. Cálculos de SWC:

Se calcula el nivel crítico del agua en el suelo (SWC) y se encuentra la diferencia entre el WHC final y el MAD, cuyos valores varían durante el periodo del cultivo en función de la profundidad de la raíz. También, se le denomina el valor umbral del contenido de agua en el suelo por debajo del cual se reduce la transpiración debido al estrés hídrico (FAO, 2006).

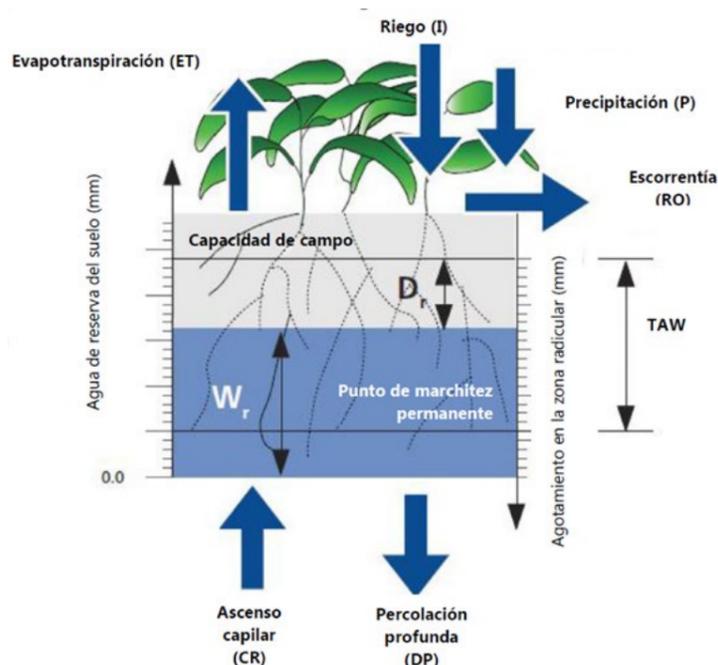
$$SWC = WHC - MAD \quad \text{ec. 5}$$

4.1.4. Balance hídrico agrícola

El producto de este modelamiento del balance hídrico agrícola es un grillado de la Evapotranspiración Real acumulada (Sum ETr) para un periodo de diez días dentro del ciclo del cultivo, lo que refiere al agua que consume para su desarrollo. Esta se relaciona con la Evapotranspiración Estándar acumulada (Sum ETc), que alude al acumulado de diez días de agua que el cultivo debería consumir para su óptimo desarrollo.

Figura IV-2

Balance hídrico agrícola



Nota. Tomado de *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (p. 31), por FAO, 2014.

A continuación, se enunciarán las ecuaciones para el cálculo del balance hídrico agrícola, en secuencia de pasos:

Paso 1: Cálculo agua crítica del suelo (SWC) en función de la profundidad de la raíz y "p"

$$SWC_i = SWC, \text{ SI: "p" } = 0 \quad \text{ec. 6}$$

$$SWC_i = SWC \times root_i, \text{ SI: "p" } \neq 0 \quad \text{ec. 7}$$

Paso 2: Valor del requerimiento de agua por la planta (WR) o evapotranspiración estándar (ETc)

$$WR_i = kc_i \times ETc_i \quad \text{ec. 8}$$

Paso 3: Calcular el agua disponible de la planta (AVW) / (PAW)

$$AVW_i = SW_{i-1} + PPT_i \quad \text{ec. 9}$$

Paso 4a: Calcular la evapotranspiración real (ETr) sobre la base de las siguientes condiciones

$$ETr_i = \frac{AVW_i}{SWC_i} \times WR, \text{ SI: } AVW < SWC \quad \text{ec. 10}$$

$$ETr_i = WR_i, \text{ SI: } AVW \geq SWC \quad \text{ec. 11}$$

Paso 4b: Calcular la ETr basado en la tercera condición

$$ETr_i = AVW_i, \text{ SI: } ETc_i > AVW_i \quad \text{ec. 12}$$

Paso 5: Calcular el agua final del suelo (SW) sobre la base de tres condiciones

$$SW_i = 0, \text{ SI: } SW_{i-1} + PPT_i - ETr_i < 0 \quad \text{ec. 13}$$

$$SW_i = WHC, \text{ SI: } SW_{i-1} + PPT_i - ETr_i > WHC \quad \text{ec. 14}$$

$$SW_i = SW_{i-1} + PPT_i - ETr_i, \text{ SI: } SW_{i-1} + PPT_i - ETr_i < WHC \quad \text{ec. 15}$$

Paso 6: Déficit hídrico (D)

$$D_i = ETr_i - WR_i \quad \text{ec. 16}$$

Paso 7: Exceso hídrico (D)

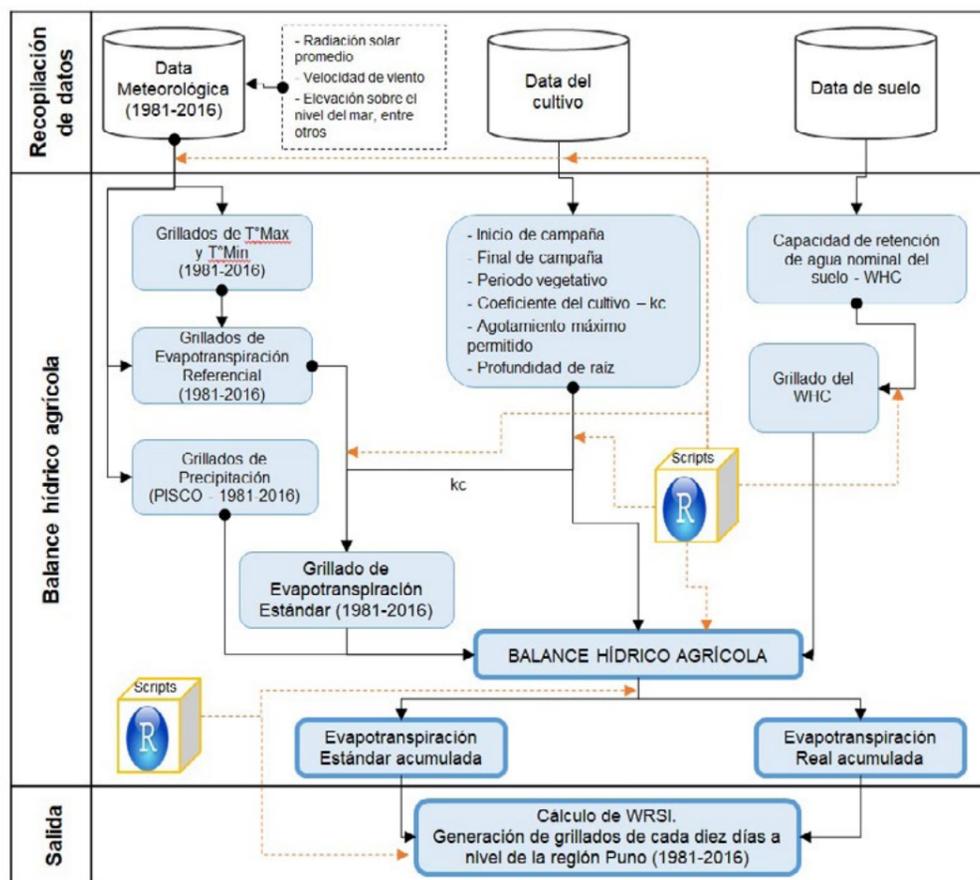
$$Ex_i = 0, \text{ SI: } SW_i < SWC_i \quad \text{ec. 17}$$

$$Ex_i = AVW_i - ETr_i - SWC_i, \text{ SI: } SW_i > SWC_i \quad \text{ec. 18}$$

Como se describe en la Figura IV-3, el modelo del balance hídrico agrícola representa las interacciones entre el suelo, los componentes del cultivo y la influencia de las variables meteorológicas sin tomar en cuenta los parámetros de gestión agrícola. Finalmente, la salida del modelamiento otorga los ráster de WRSI por cada decadiario del periodo del cultivo, de las 15 campañas agrícolas del periodo 1981 – 2016.

Figura IV-3

Flujograma del procesamiento de datos y obtención de índice WRSI para las campañas agrícolas del periodo 1981-2016 en la región Puno



4.2. Metodología

El presente estudio se realiza para el total de los 109 distritos del departamento de Puno. En 90 de estos distritos, se siembra el cultivo de papa y, en 78 distritos, el de quinua. La mayor parte de la agricultura que se practica en los diferentes distritos es una de secano.

Luego de la recopilación, selección y procesamiento de los datos, y posterior obtención de los valores de WRSI, el estudio se llevó a cabo de acuerdo con los pasos detallados a continuación:

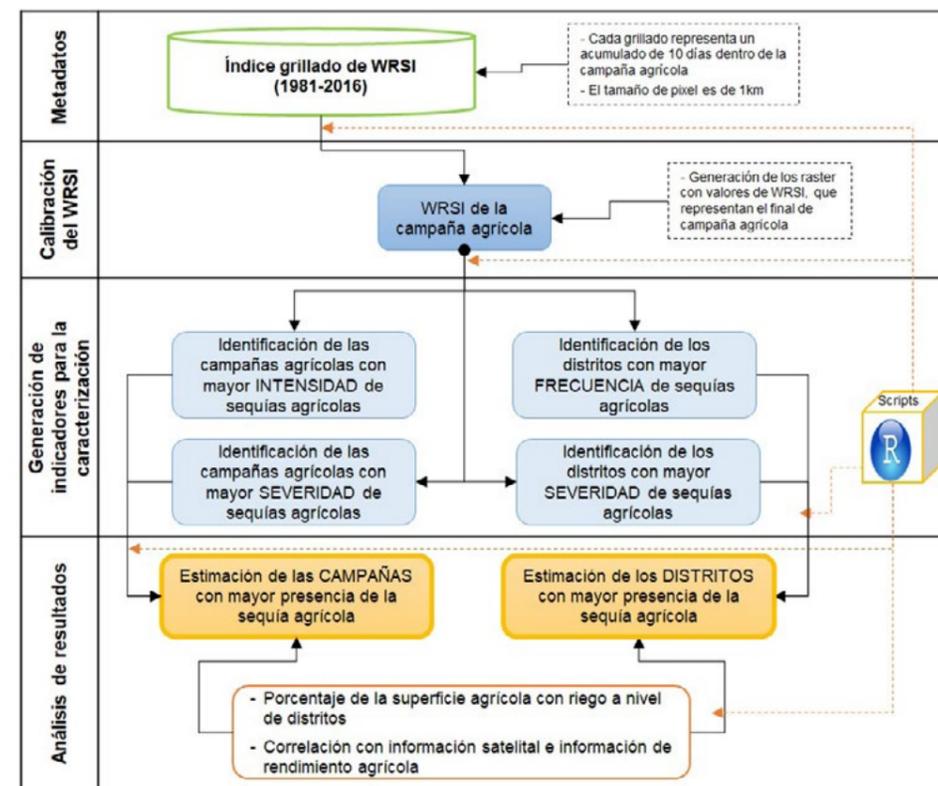
- * Armonización y calibración de la metadata correspondiente a los valores de WRSI que representen a la campaña agrícola: Se establece un ráster por campaña a partir de los valores finales de WRSI, según el ciclo de campaña agrícola correspondiente a cada distrito, el cual se encuentra acorde a la información de inicio de campaña del ENIS.

- * Establecimiento del sistema de caracterización: Se realizó bajo el desempeño de indicadores de intensidad, frecuencia y severidad, contabilizados a nivel de campañas agrícolas y distritos. Estos fueron distribuidos en tres niveles de sequía agrícola, según la clasificación de la Tabla III-1 y Tabla III-2. En el presente estudio, se examina la ocurrencia de la sequía agrícola, tanto para un periodo de 35 campañas (de 1981-1982 al 2015-2016) como para los 109 distritos correspondientes al departamento de Puno.
- * Análisis de los resultados: Se desarrolló a partir de la comparación y estimación de los elementos de caracterización de la sequía agrícola, bajo la calibración de los valores de porcentaje de superficie de cultivo irrigada en cada distrito.

En la Figura IV-4, se aprecia el diagrama de flujo de los procesos realizados para caracterizar la sequía agrícola y lograr estimar las campañas y distritos más perjudicados para cada uno de los cultivos analizados.

Figura IV-4

Flujograma del estudio de "Caracterización de la sequía agrícola en la región de Puno"



En la Tabla IV-3, se describen los procesos que forman parte de los cálculos y análisis de resultados mostrados en la Figura IV-4. En ellas, se presentan algunas definiciones y se describen las condiciones, herramientas y análisis de estos.

Tabla IV-3

Procesos metodológicos para la caracterización de la sequía agrícola

A. Cálculo y calibración del WRSI
<p>El WRSI estima la cantidad de agua disponible para satisfacer el requerimiento del cultivo. Esto se consigue a partir de la relación entre el acumulado de la Evapotranspiración Real (ET_r) y el acumulado de la Evapotranspiración Estándar (ET_c).</p> $WRSI = \frac{SumET_r}{SumET_c} \times 100$ <p>Para el obtener el ET_r, se produce un balance hídrico agrícola para un determinado cultivo. En ese proceso, interviene la ET_c, la precipitación, la capacidad de retención de agua del suelo, los parámetros del cultivo (profundidad de raíz, periodo del cultivo, kc, inicio de siembra), entre otros.</p> <p>Para este estudio, se calculan los valores de WRSI para los cultivos de quinua y papa al abarcar toda la zona agrícola del departamento Puno. Las salidas de WRSI son ráster con pixeles de 1km x 1km para el decadiario final de cada campaña agrícola, que representan un total de 35 campañas.</p> <p>De acuerdo con la definición de sequía agrícola, esta inicia cuando el estrés del cultivo, producido por el incremento del déficit hídrico, se vuelve tan extremo que su rendimiento se reduce significativamente. Considerando esta definición, para el presente trabajo, se toma como reducción significativa al 50% de su rendimiento, lo que, según la Tabla III-2 de clasificación de la productividad del cultivo basada en los valores de WRSI (Smith, 1992), corresponde a aquellos valores por debajo del 80. Dichos valores definidos para cuantificar a la sequía agrícola contienen tres clasificaciones correspondientes a los de WRSI ("bajo", "pobre" y "fracaso"), que son fuente de análisis en este estudio y representan los tres niveles de sequía agrícola. Estos son descritos a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • "bajo", 60-79 de WRSI que equivaldría a un valor de productividad del 50-20% del cultivo • "pobre", 50-59 de WRSI que equivaldría a un valor de productividad del 20-10% del cultivo • "fracaso", <50 de WRSI que equivaldría a un valor de productividad <10% del cultivo <p>Se podría especificar que valores de WRSI inferiores a 50 representan una sequía extrema; valores entre 50 y 59, una sequía severa; valores entre 60 y 79, una sequía moderada; valores entre 80 y 90, un período seco; y valores superiores a 90, la ausencia de problemas de estrés hídrico.</p>
B. Intensidad de la sequía agrícola por campañas
<p>El objetivo de este análisis es mostrar las campañas con los valores más intensos de sequía agrícola. Para ello, se ha considerado contabilizar independientemente las cantidades porcentuales de las tres clasificaciones de WRSI que representan a la sequía agrícola (bajo, pobre y fracaso).</p> <p>Las campañas agrícolas más intensas se identifican como aquellas que presenten la mayor cantidad porcentual de valores menor a 50 de WRSI (fracaso). Las campañas de intensidad media se reconocen como aquellas que presenten la mayor cantidad porcentual de valores entre 50-59 de WRSI (pobre). Y las de intensidad baja se identifican como las que presenten la mayor cantidad porcentual de valores entre 60-79 de WRSI (bajo). Estos resultados se muestran a través de un gráfico de barras en la Figura V2 y Figura V4, para el cultivo de papa y quinua, respectivamente.</p>
C. Frecuencia de la sequía agrícola
<p>Para identificar la frecuencia de sequía agrícola, se analizó el número de veces que se han presentado los valores correspondientes a las salidas de: < 50, 50-59, 60-79 de WRSI, respecto de las 35 campañas agrícolas. De forma gráfica, se examinan los mapas de la región Puno, en los que se visualizan estas frecuencias a través de una barra de colores que va de 0 a 35. El valor de "0" indica las zonas que no presentaron valores del umbral correspondiente en ninguna campaña durante el periodo analizado; el valor "35", las zonas que presentaron dichos valores durante el total del periodo analizado.</p> <p>Para cuantificar los valores del gráfico anterior, se utiliza el diseño en forma de barras 100 % apiladas. Estas indican el porcentaje de frecuencia de las sequías agrícolas para cada distrito del departamento de Puno, que corresponde al 100 % el total del periodo analizado (35 campañas). Asimismo, describen en un solo gráfico los porcentajes de los tres niveles de sequía agrícola, más el porcentaje gráfico de "no sequía" en forma transparente. Estas clasificaciones de sequía agrícola se identifican según los colores de la Tabla III-1.</p>
D. Severidad de la sequía agrícola por distritos y campañas
<p>Para identificar la severidad de la sequía agrícola, se usó la ayuda de los mapas de calor con matriz. Esta, en vertical, muestra en orden creciente las 35 campañas del análisis establecido en el presente estudio, y, en horizontal, los distritos agrícolas correspondientes al departamento de Puno, que están asociados según la similaridad de sus valores. Se entiende al color transparente como los distritos sin severidad (0.0 %), pasando por el amarillo, naranja y finalmente al rojo como el de mayor severidad (100 %). Se realizan estos gráficos para cada una de las tres clasificaciones correspondientes a los de WRSI ("bajo", "pobre" y "fracaso").</p> <p>En la parte superior de cada gráfico, se observa el árbol de conglomerados de los distritos próximos y semejantes que agrupa a aquellos que poseen similaridad de los datos de severidad de sequía agrícola. Para cada cultivo, se propone un gráfico de mapas de la región Puno, que representan la severidad para el final de las 35 campañas. Estas están en concordancia con los valores de los gráficos de mapas de calor para la clasificación de WRSI correspondientes a "bajo".</p>

5. Resultados y discusión

5.1. Análisis de intensidad de las sequías agrícolas

El análisis se desarrolla a partir de las figuras (Figura V-1 y Figura V-3) que contienen los valores de WRSI distribuidos espacialmente en las zonas agrícolas de la región Puno para los cultivos de papa y quinua respectivamente. Se muestran los valores representativos y compilados de WRSI para el final de las campañas agrícolas dentro del periodo de 1981-1982 hasta 2015-2016 (con un total de 35 campañas). Los valores de WRSI se identifican por los colores correspondientes a la clasificación mostrada en la Tabla III1.

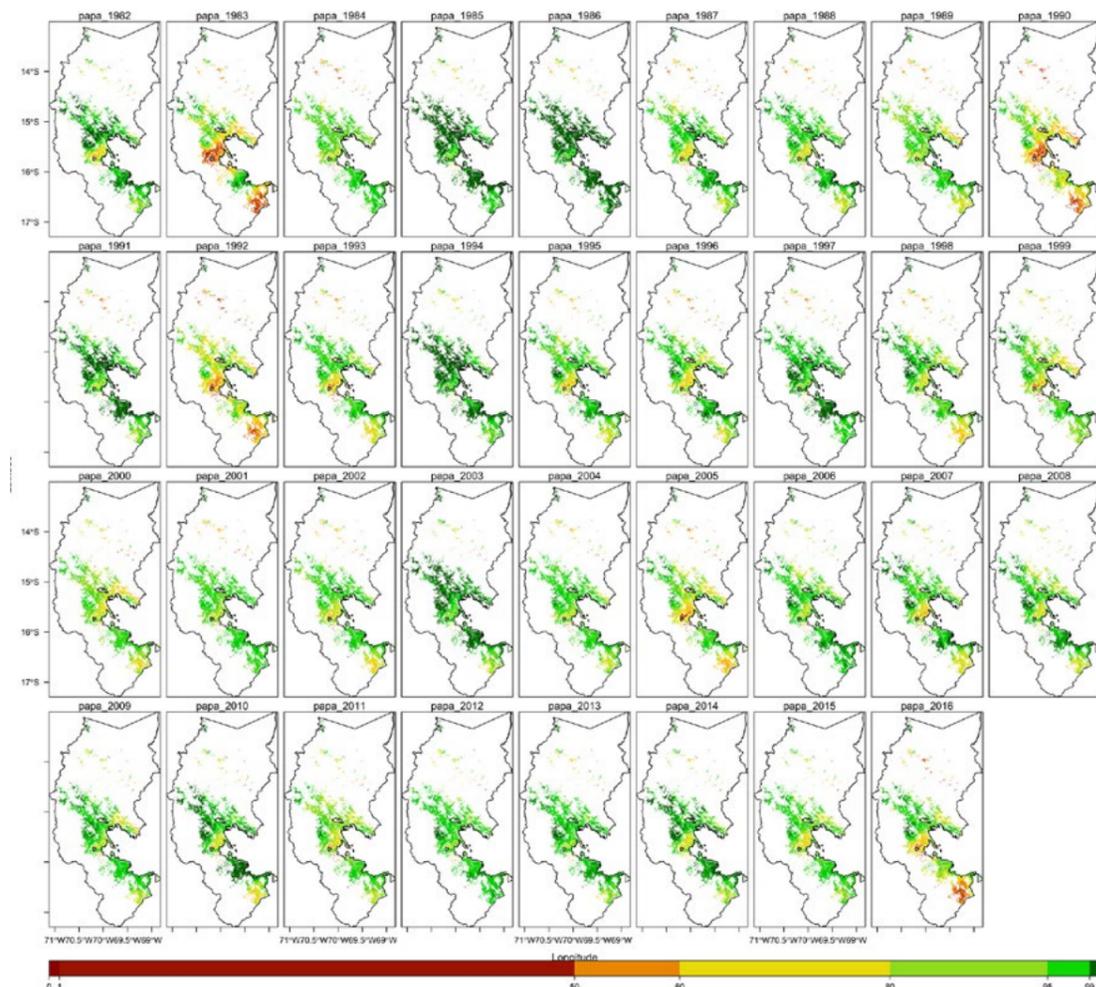
5.1.1. Cultivo de papa

La Figura V-1 corresponde a los valores calculados de WRSI para las 35 campañas, que representan el estado final del cultivo de papa, respecto del WRSI en cada una. Desde esta imagen, se logra identificar la distribución de las diferentes intensidades de la sequía agrícola, es decir, valores entre 79 - 60, entre 59 - 50 y por debajo de 50 de WRSI en cada una. Cada año observado en la figura corresponde al segundo año de una respectiva campaña agrícola.

En relación con el grado de intensidad, se llevó cabo el análisis para cada una de las tres categorías de sequía agrícola, que son definidas por los valores calculados de WRSI (entre 79-60, 59-50 y por debajo de 50 de WRSI).

Figura V-1

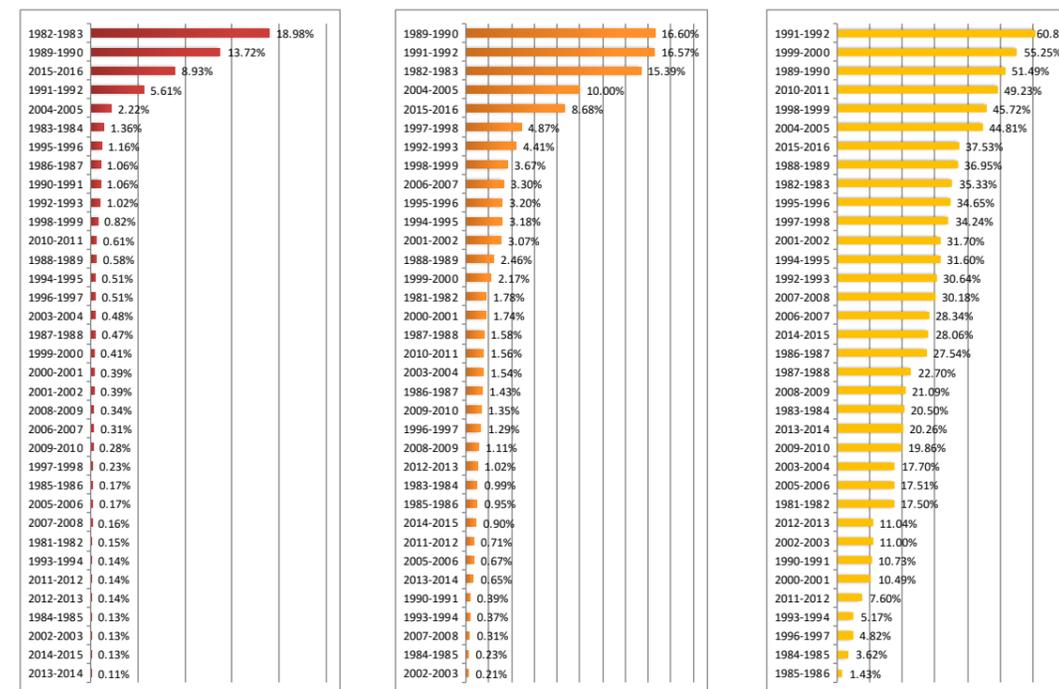
Gráfica de la distribución de los valores de WRSI para el fin de campaña en el cultivo de papa



Por otra parte, la Figura V-2 muestra, a través de un diagrama de barras en forma horizontal y según los colores correspondientes, a cada una de las categorías de la sequía agrícola y la distribución porcentual de sus valores presentes en cada campaña del periodo analizado del cultivo de papa. Estos están organizados en forma decreciente por cada categoría. Debido a ello, se pueden visualizar las campañas agrícolas con los valores más intensos.

Figura V-2

Cuantificación porcentual de la intensidad de la sequía agrícola correspondiente a los umbrales entre 79-60 (derecha), 59-50 (medio) y por debajo de 50 de WRSI (izquierda) para el cultivo de papa



A continuación, la Tabla V-1 muestra a las 10 primeras campañas con mayor cantidad porcentual de áreas o intensidad de sequía agrícola, que corresponden al acumulado de los valores de mayor intensidad y por cada una de las tres categorías.

Tabla V-1

Registro de las 10 primeras campañas con mayor intensidad de la sequía agrícola para el cultivo de papa

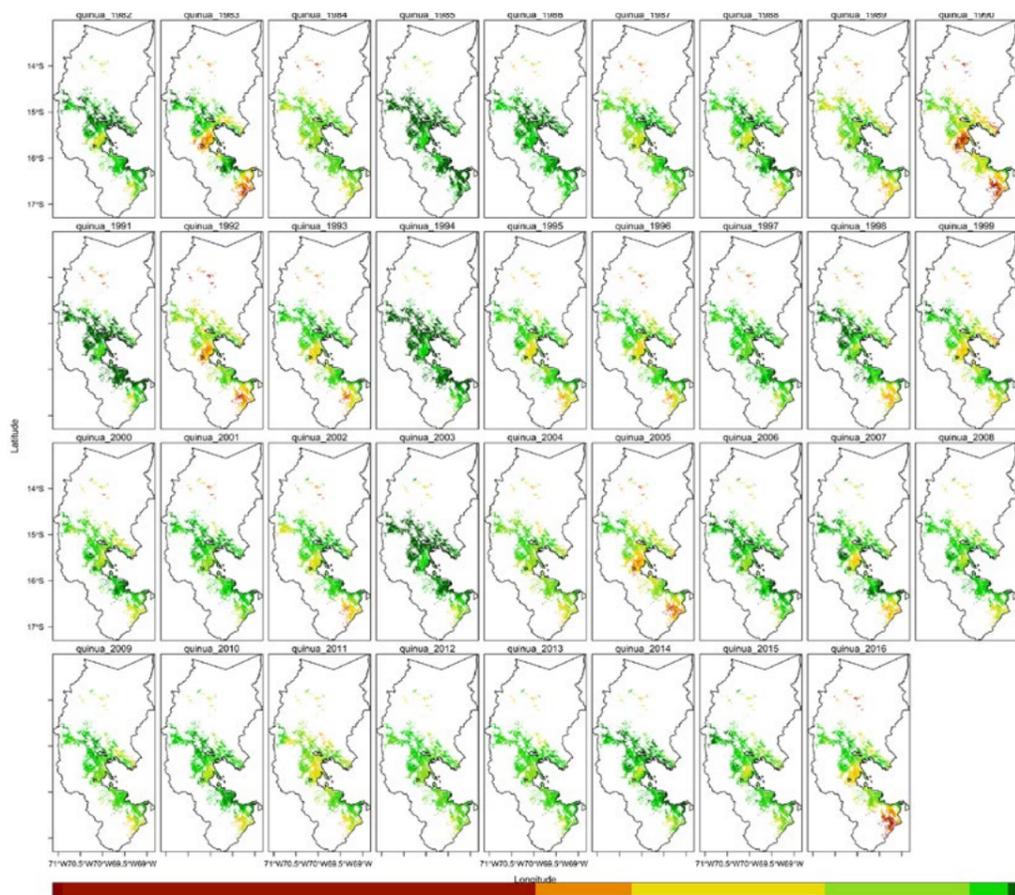
N°	ACUMULADO	
	Campañas	%
1	1991-1992	83.05
2	1989-1990	81.81
3	1982-1983	69.70
4	1999-2000	57.83
5	2004-2005	57.03
6	2015-2016	55.15
7	2010-2011	51.40
8	1998-1999	50.21
9	1988-1989	40.00
10	1997-1998	39.33

5.1.2. Cultivo de quinua

En la Figura V-3, se observan los valores calculados de WRSI para el cultivo de quinua en las zonas agrícolas de la región Puno. Se identifican las diferentes escalas del índice según los colores correspondientes en la Tabla III-1. Además, desde esta gráfica, se logra detectar la distribución de las diferentes intensidades de la sequía agrícola, es decir, valores entre 79-60, entre 59-50 y por debajo de 50 de WRSI en cada campaña.

Figura V-3

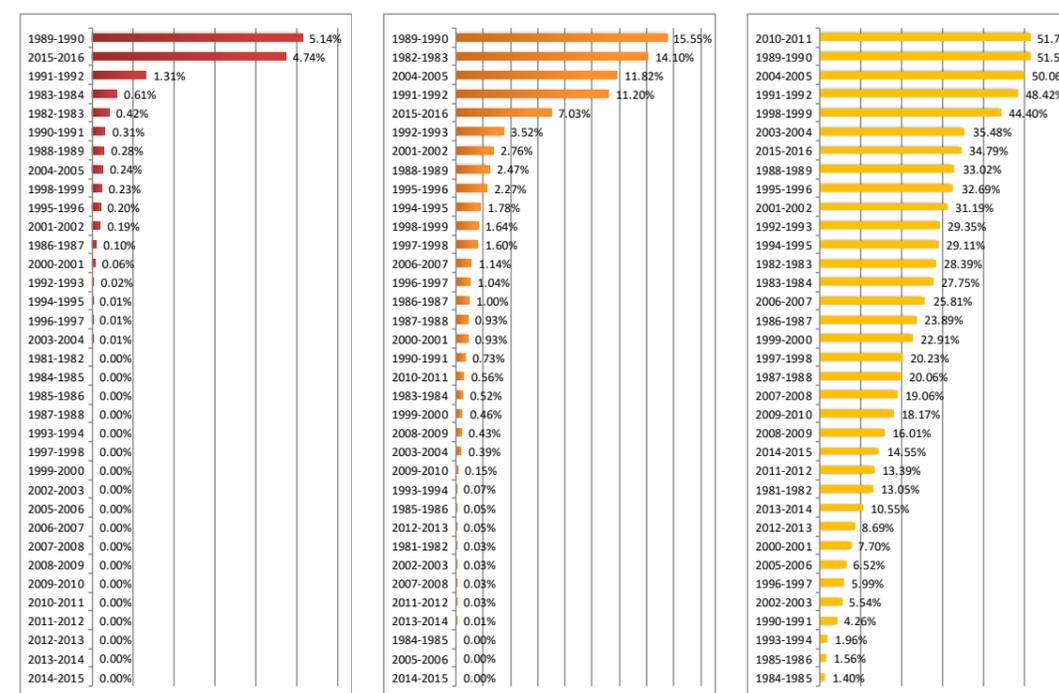
Gráfica de la distribución de los valores de WRSI para fin de campaña del cultivo de quinua



Estas gráficas representan los valores finales de WRSI para cada una de las 35 campañas agrícolas, dentro del periodo de 1981-1982 hasta 2015-2016. Cada año observado en la figura, corresponde al segundo año de una campaña agrícola respectiva. A partir de él, se registran las campañas que han presentado mayores zonas con valores de WRSI relacionados a las tres categorías de intensidades de la sequía agrícola, en otras palabras, valores entre 79-60, entre 59-50 y por debajo de 50 de WRSI (los más intensos). De ellos se extraen las cantidades porcentuales para cada campaña agrícola del periodo analizado del cultivo de quinua. Es relevante tener en cuenta que las categorías se agrupan a partir de los valores por debajo de 80 de WRSI.

Figura V-4

Cuantificación porcentual de la intensidad de la sequía agrícola correspondiente a los valores entre 79-60, valores entre 59-50 y valores por debajo de 50 de WRSI para el cultivo de quinua



La Figura V-4 expone, mediante un diagrama de barras en forma horizontal y según los colores correspondientes, a cada una de las categorías de la sequía agrícola y a la distribución porcentual de sus valores presentes en cada campaña del periodo analizado del cultivo de quinua.

Estos valores están organizados en forma decreciente por cada categoría. Según esto, se puede visualizar las campañas agrícolas con los valores más intensos. La Tabla V-2 muestra a las 10 primeras con mayor cantidad porcentual de áreas o intensidad de sequía agrícola, que corresponden al acumulado de los valores de mayor intensidad y por cada una de las tres categorías.

Tabla V-2

Registro de las 10 primeras campañas con mayor intensidad de sequía agrícola para el cultivo de quinua

N°	ACUMULADO	
	Campañas	%
1	1989-1990	72.25
2	2004-2005	62.15
3	1991-1992	60.94
4	2010-2011	52.34
5	2015-2016	46.57
6	1998-1999	46.28
7	1982-1983	42.91
8	2003-2004	35.89
9	1988-1989	35.78
10	1995-1996	35.17

5.2. Análisis de frecuencia de las sequías agrícolas

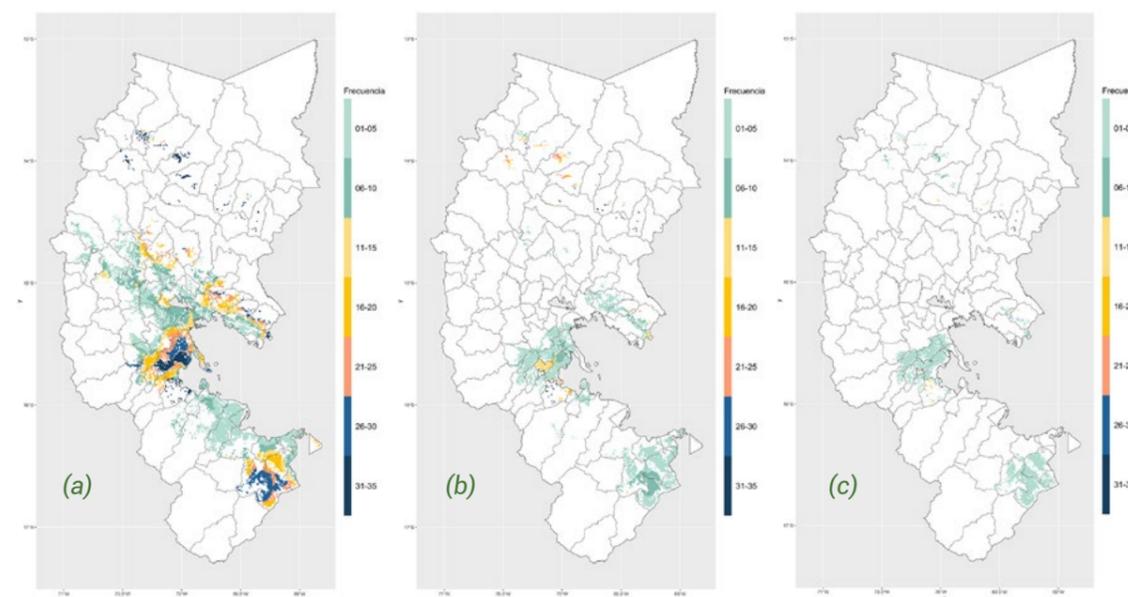
A través del análisis de frecuencia, se distinguió a aquellos distritos que, durante el periodo de evaluación, indicaron, un mayor número de veces, las clasificaciones de "bajo", "pobre" y "fracaso". Mediante los gráficos de barras horizontales, se representa el nivel de frecuencia de las sequías agrícolas manifestadas, respecto de un total de las 35 campañas que representan el 100%. De la misma forma, las barras registran los niveles de sequía agrícola, según los colores de la Tabla III-1. El color rojo expresa el fracaso total del cultivo e indica los valores de WRSI por debajo de 50. El color naranja clasifica entre 50 y 60 de WRSI. Por último, el color amarillo clasifica entre 60 y 80 de WRSI.

5.2.1. Cultivo de papa

En esta sección, se muestran aquellos distritos de la región Puno que presentan una mayor frecuencia de la sequía agrícola, es decir, que marcan valores menores de 80 de WRSI. La Figura V-5 expone tres ráster de frecuencias, que muestran el número de veces en que se anotaron, para cada píxel, los valores menores a 50, 60 y 80 de WRSI respectivamente. Estas frecuencias se identifican mediante los siete rangos de colores presentes en la figura.

Figura V-5

Frecuencia de la sequía agrícola para valores < 80 de WRSI (a), < 60 de WRSI (b) y < 50 de WRSI (c) en el cultivo de papa

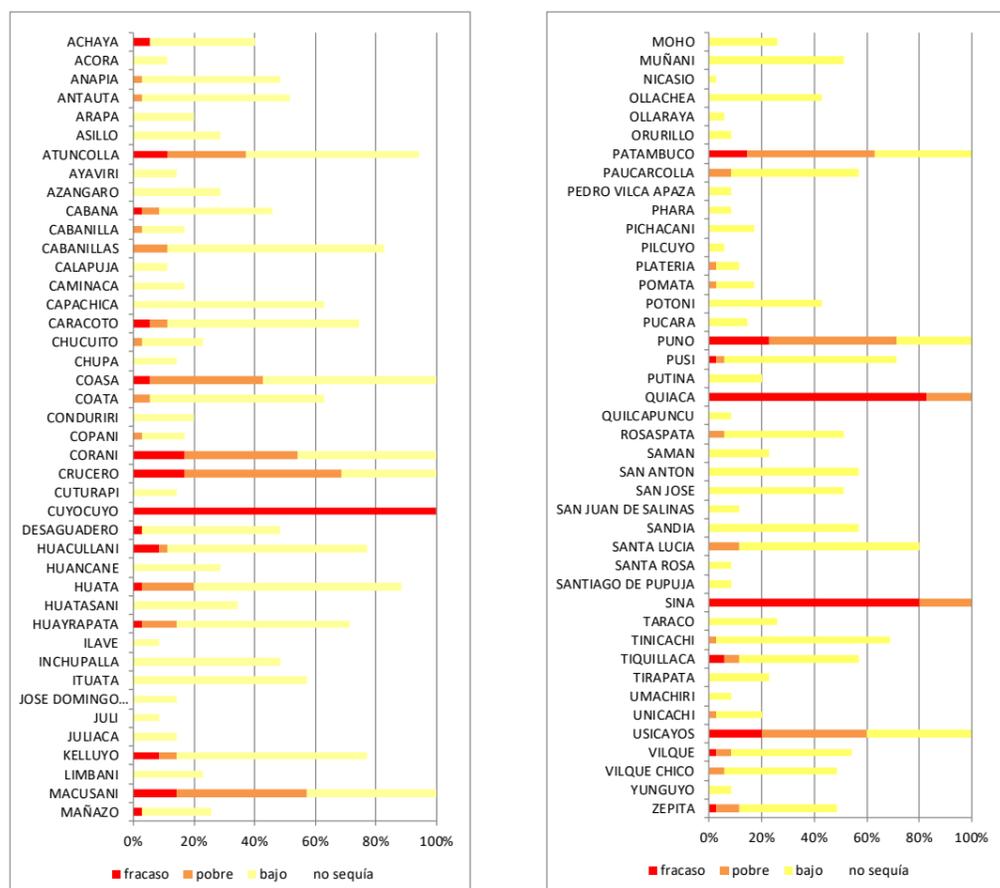


La Figura V-5 (a) grafica espacialmente la frecuencia de los valores menores a 80 de WRSI. Es observable que estos valores abarcan varios distritos del departamento de Puno. En la Figura V-5 (b), se observa la frecuencia de píxeles con valores menores a 60 de WRSI y se puede distinguir que la cantidad de distritos afectados son menores comparados al de la izquierda. Para la Figura V-5 (c), se detectan las zonas más frecuentes de píxeles con valores menores de 50 de WRSI, los que alcanzan a menos distritos que los anteriores.

En la Figura V-6, se observa la frecuencia de sequía agrícola en valores porcentuales por cada distrito del departamento de Puno. Estas están distribuidas mediante las tres clasificaciones de WRSI para la sequía agrícola (fracaso, pobre y bajo), de acuerdo con los colores correspondientes a la clasificación mostrada en la Tabla III-1.

Figura V-6

Porcentaje de frecuencia de la sequía agrícola en los distritos de Puno para valores entre 60-79 de WRSI (bajo), 50-59 de WRSI (pobre) y < 50 de WRSI (fracaso), del cultivo de papa



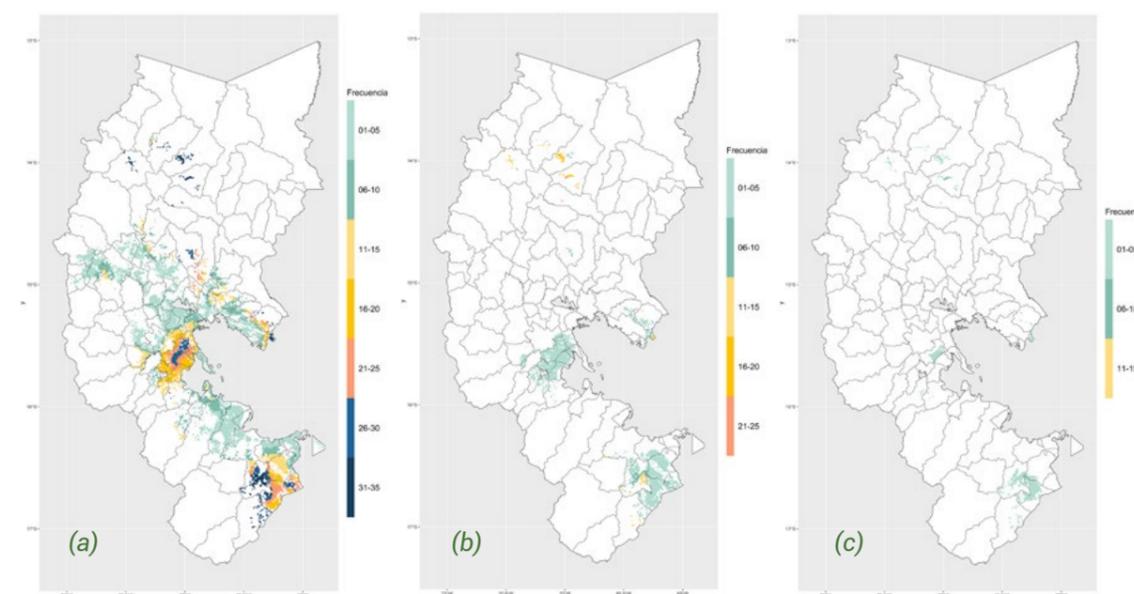
También, se puede identificar que Cuyo Cuyo, Quiaca, Sina, Puno, Crucero, Patambuco, Usicayos, Macusani, Corani y Coasa son los diez distritos que han presentado mayores valores de sequía agrícola durante todo el periodo analizado. Por ello, se asume que fueron los más afectados. Es importante indicar que el distrito de Cuyo Cuyo presentan valores de fracaso, es decir <50 de WRSI. Los distritos de Quiaca y Sina presenta valores de fracaso en más del 80 %, lo que apunta a que muestran los más extremos de afectación de la sequía agrícola durante el periodo examinado, según el análisis de frecuencia. Un segundo grupo de distritos identificados, que señalan valores de sequía agrícola menores del 80 de WRSI en el 80% del periodo analizado, son Atuncolla, Huata, Kellullo, Huacullani y Caracoto.

5.2.2. Cultivo de quinua

La Figura V-7 muestra la frecuencia para los valores menores a 50, 60 y 80 de WRSI, en referencia a las tres categorías de clasificación de la sequía agrícola. El máximo valor de frecuencia o número de veces en que se ha manifestado el evento es 35 veces, que se refiere al total o 100 % de las campañas analizadas.

Figura V-7

Frecuencia de la sequía agrícola para valores < 80 de WRSI (a), < 60 de WRSI (b) y < 50 de WRSI (c) en cultivo de quinua

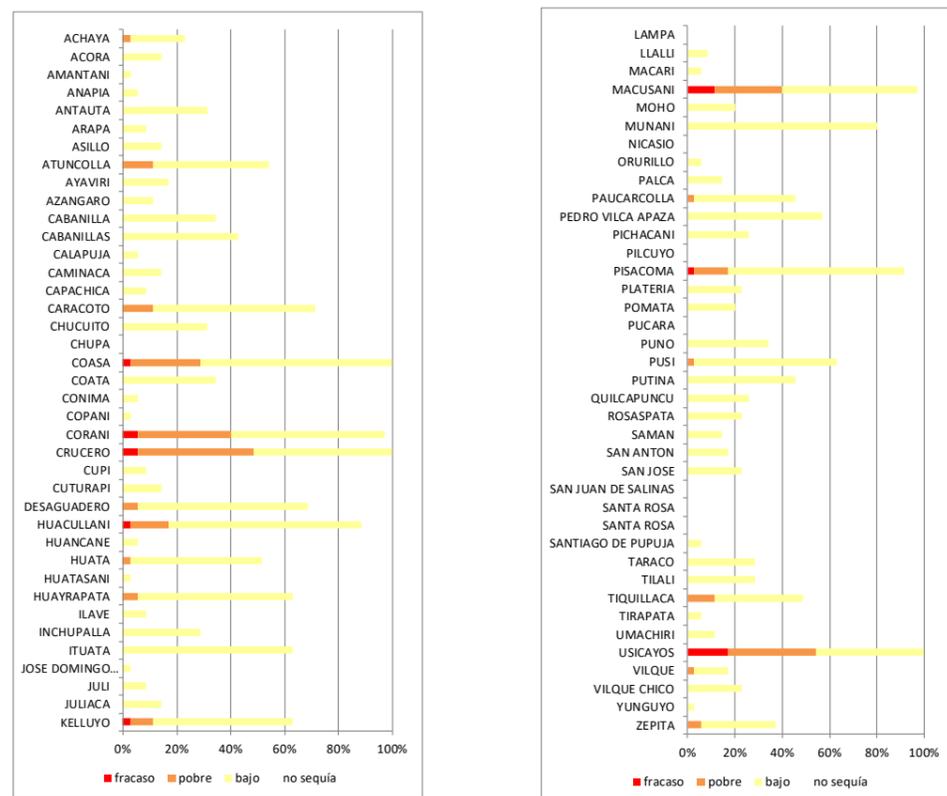


La Figura V-7 (a) muestra espacialmente la frecuencia de píxeles con valores menores a 80 de WRSI. Es observable que estos abarcan varios distritos del departamento de Puno. En la Figura V-7 (b), se advierte la frecuencia de píxeles con valores menores a 60 de WRSI. Se puede notar que la cantidad de distritos afectados son menores comparados al de la izquierda. Para la Figura V-7 (c), se detectan las zonas más frecuentes de píxeles con valores menores de 50 de WRSI, que alcanzan menos distritos que los anteriores.

La Figura V-8 muestra la frecuencia porcentual por cada distrito del departamento de Puno. En ella se exponen las tres clasificaciones de WRSI para la sequía agrícola (fracaso, pobre y bajo), de acuerdo con los colores correspondientes a la clasificación mostrada en la Tabla III-1. De igual modo, se deduce que Usicayos, Macusani, Crucero, Corani, Coasa, Pisacoma, Kelluyo, Huacullani, Caracoto y Desaguadero son los diez distritos que presentaron mayores valores de sequía agrícola durante todo el periodo analizado, por lo que se asume que fueron los más afectados, según el análisis de la frecuencia de los valores de sequía agrícola.

Figura V-8

Porcentaje de frecuencia de la sequía agrícola en los distritos de Puno para valores entre 60-79 de WRSI (bajo), 50-59 de WRSI (pobre) y < 50 de WRSI (fracaso) del cultivo de quinua



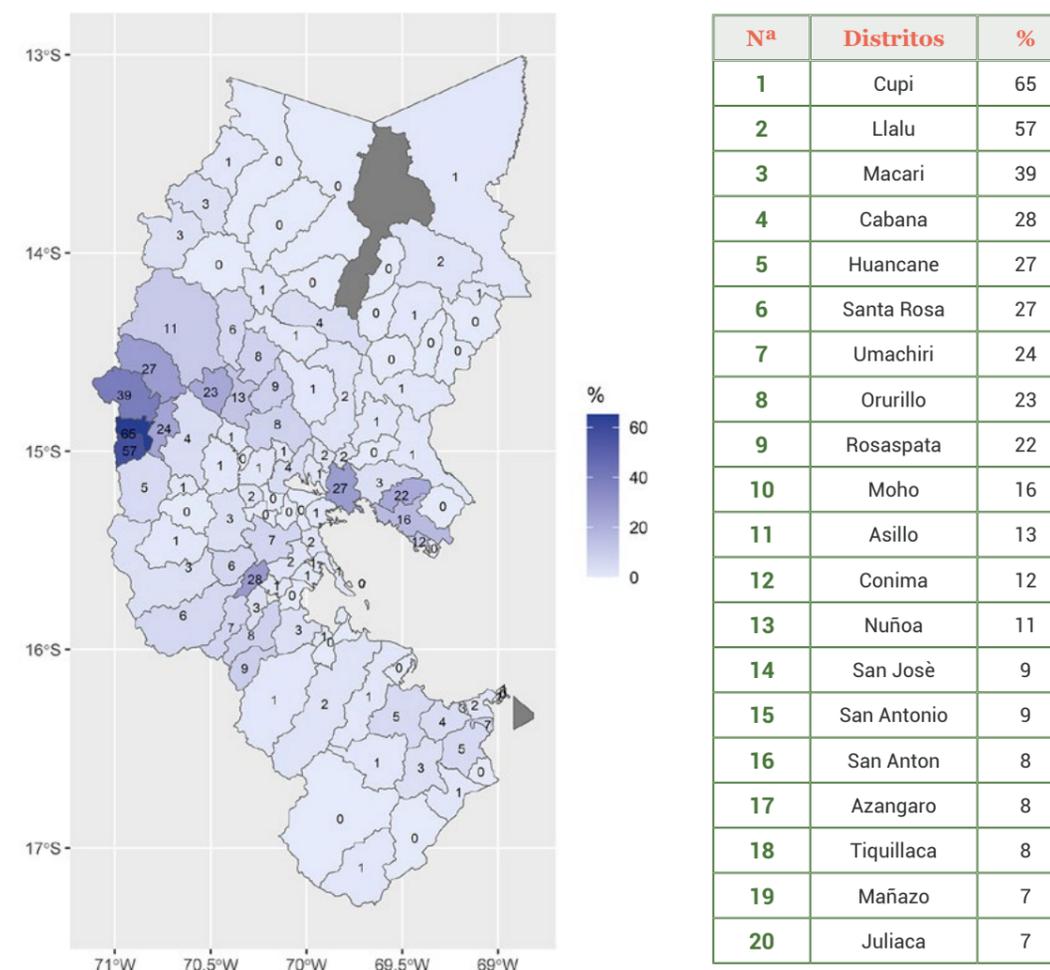
5.3. Análisis de severidad de la sequía agrícola

La severidad de la sequía agrícola es el resultado de la relación entre las zonas agrícolas afectadas y el total de las correspondientes a un distrito. Las afectadas son todos aquellos pixeles que poseen valores por debajo de 80 de WRSI, nivel inferior de lo que se considera afectación. Con fines de profundizar en el análisis, se calcularon las severidades de estas sequías para valores por debajo de 60 y 50 de WRSI mediante los gráficos de calor. Estos presentan, tanto en la parte superior como en la parte izquierda, un árbol de conglomerados que agrupa o asocia a las campañas agrícolas (vertical) y distritos (horizontal), de acuerdo con la semejanza o a la similitud de los valores de severidad de sequía que fueron calculados durante todo el periodo de análisis.

A los valores calculados de severidad, se le han restado los valores del porcentaje de la superficie agrícola con riego de los distritos del departamento de Puno, los cuales fueron obtenidos a partir de la información de CENAGRO (2012). En la Figura V-9, se exponen estos valores del porcentaje de la superficie agrícola con riego a través de un mapa con el contenido espacial de la información porcentual por distrito. En él, se registran los valores mediante intensidades del color azul y por el número dentro de cada polígono que representa un distrito. Se adjunta, también, una lista de los 20 primeros distritos con mayor porcentaje de superficie agrícola con riego.

Figura V-9

Porcentaje de la superficie agrícola con riego para los distritos de Puno

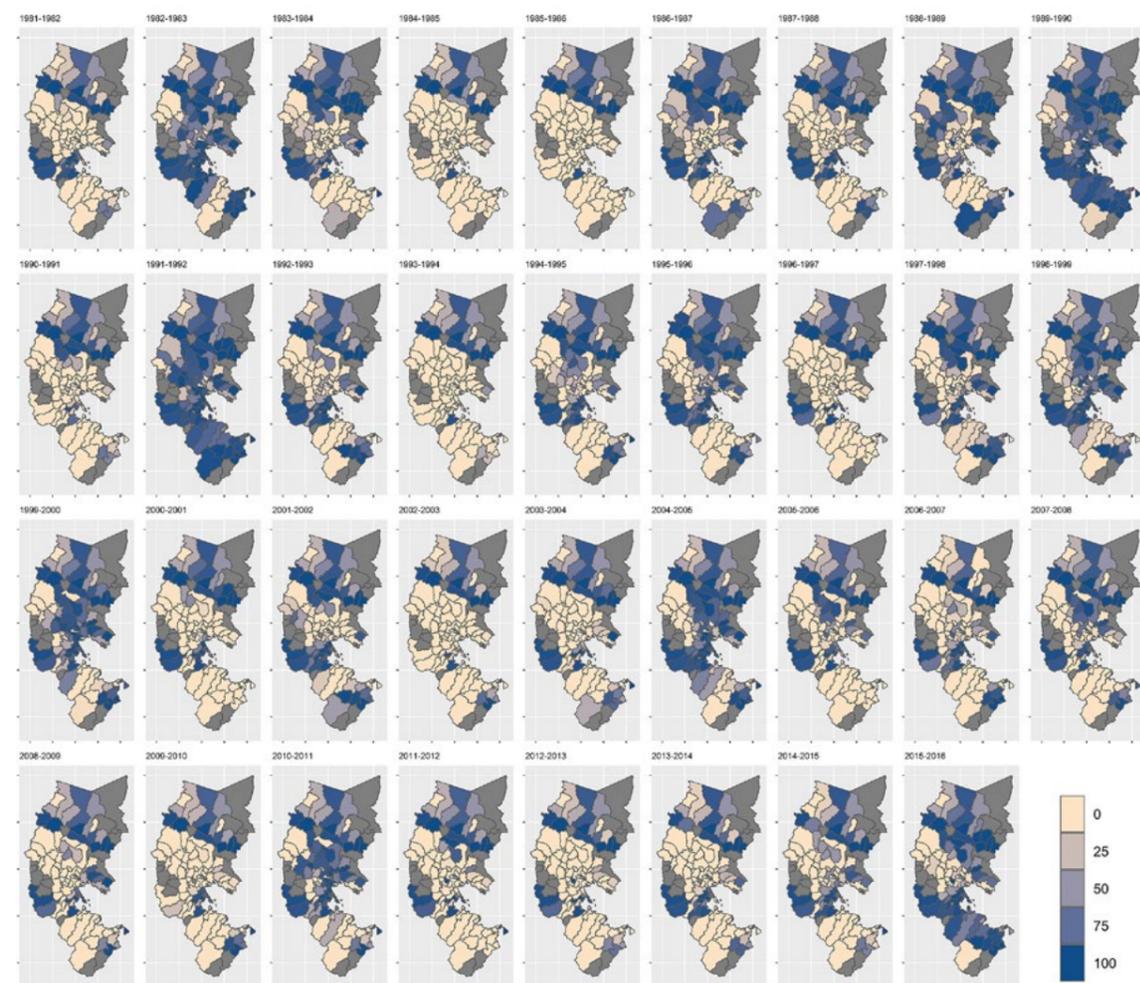


5.3.1. Cultivo de papa

La Figura V-10 exhibe los valores porcentuales de severidad de sequía agrícola, calculados para valores por debajo de 80 de WRSI del cultivo de papa, correspondientes a los distritos agrícolas de la región Puno. Los mapas representan el estado final de severidad de sequía en cada una de las 35 campañas agrícolas dentro del periodo de 1981 al 2016. Los valores máximos, con 100 % de severidad, se representan con el color azul oscuro, que disminuye progresivamente en tonalidades de azul hasta llegar al color crema correspondiente a los valores mínimos con 0 % de severidad de sequía agrícola, según la leyenda posicionada en la parte inferior derecha del gráfico.

Figura V-10

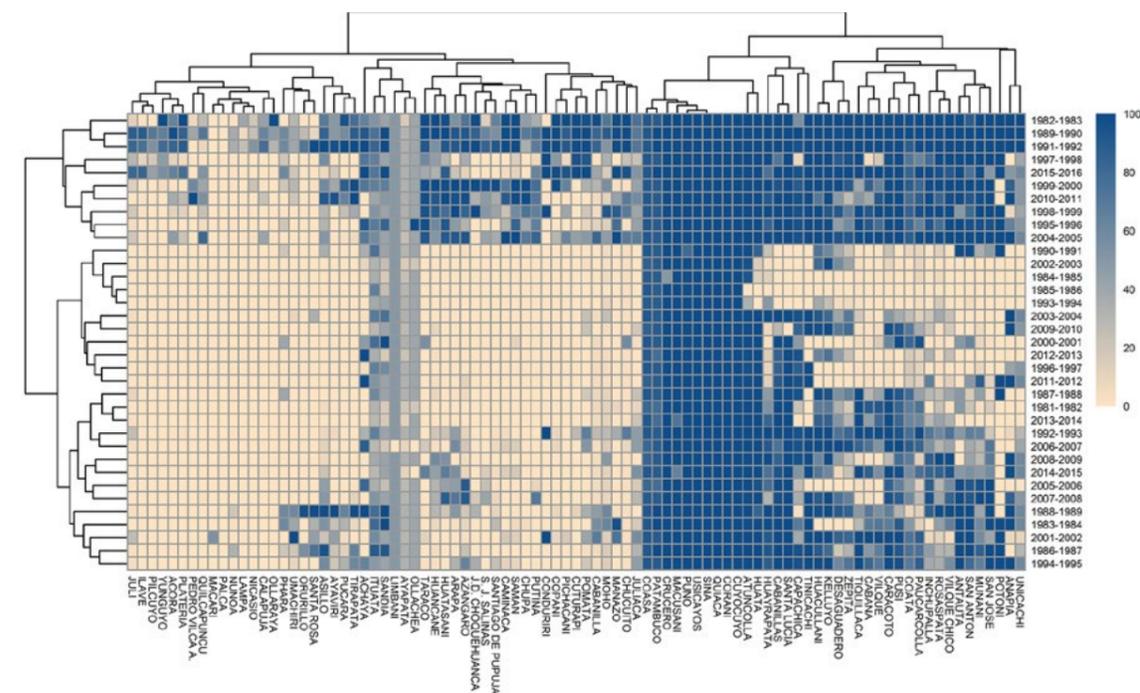
Distribución distrital de la severidad de sequía agrícola para las campañas del cultivo de papa



En la Figura V-11, se describen los valores calculados de severidad de sequía agrícola por debajo del umbral de 80 de WRSI para el cultivo de papa. Según los resultados del conglomerado horizontal se distribuyen a los distritos en tres grandes grupos: el primero y segundo pertenecen al gran grupo de la derecha, en los que se encuentran los de mayor severidad y, finalmente, el tercero es el gran grupo de la izquierda.

Figura V-11

Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <80 de WRSI (bajo) del cultivo de papa



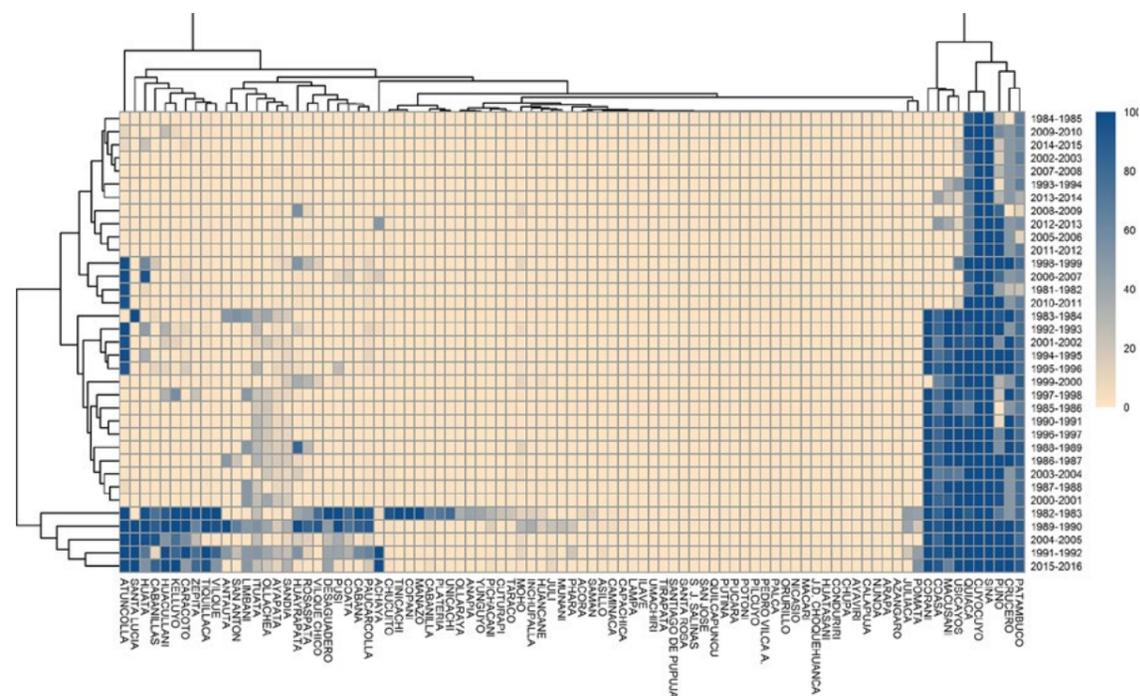
El primer grupo que contiene a los distritos de mayor severidad de sequía agrícola es Quiaca, Cuyo Cuyo, Usicayos, Sinia, Corani, Puno, Macusani, Crucero, Coasa, Patambuco, Huata, Atuncolla, Santa Lucía y Cabanillas ordenados por sus valores de severidad en orden decreciente. El segundo grupo abarca a los distritos de severidad intermedia de sequía agrícola, los que son Caracoto, Pusi, Coata, Paucarcolla, Huayrapata, Tiquillaca, Vilque, Huacullani, Kelluyo, Desaguadero, Zepita, Capachica, Tinicachi, Potoni, Anapa, Unicachi, Antauta, San Anton, Munani, San Jose, Inchupalla, Vilque Chico, Huatasani, Rosaspata, Achaya, Ituata, Sandia, Limbani, Ayapata y Ollachea, ordenados por sus valores de severidad decrecientemente. El tercer grupo está compuesto por los distritos con severidad baja de sequía agrícola: Taraco, Caminaca, Samani, Putina, Arapa, Azángaro, entre otros.

En el gráfico, también, se identifican a las campañas con mayor valor porcentual de severidad de sequía agrícola. Estos valores están concentrados en la parte superior del agrupamiento en vertical. Las campañas de 1982-1983, 1989-1990, 1991-1992, 1997-1998, 2015-2016, 1999-2000, 2010-2011, 1998-1999, 1995-1996, 2004-2005, entre otras, son las de mayor severidad de sequía agrícola, en sentido decreciente.

En la Figura V-12, se describen los valores calculados de severidad de sequía agrícola por debajo del umbral de 60 de WRSI para el cultivo de papa. A partir de los resultados del conglomerado horizontal, se distribuyen a los distritos en tres grandes grupos: el primero y segundo pertenecen al gran grupo de la derecha, en los que se encuentran los de mayor severidad de sequía agrícola y, por último, el tercero es el gran grupo de la izquierda.

Figura V-12

Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <60 de WRSI (pobre) del cultivo de papa



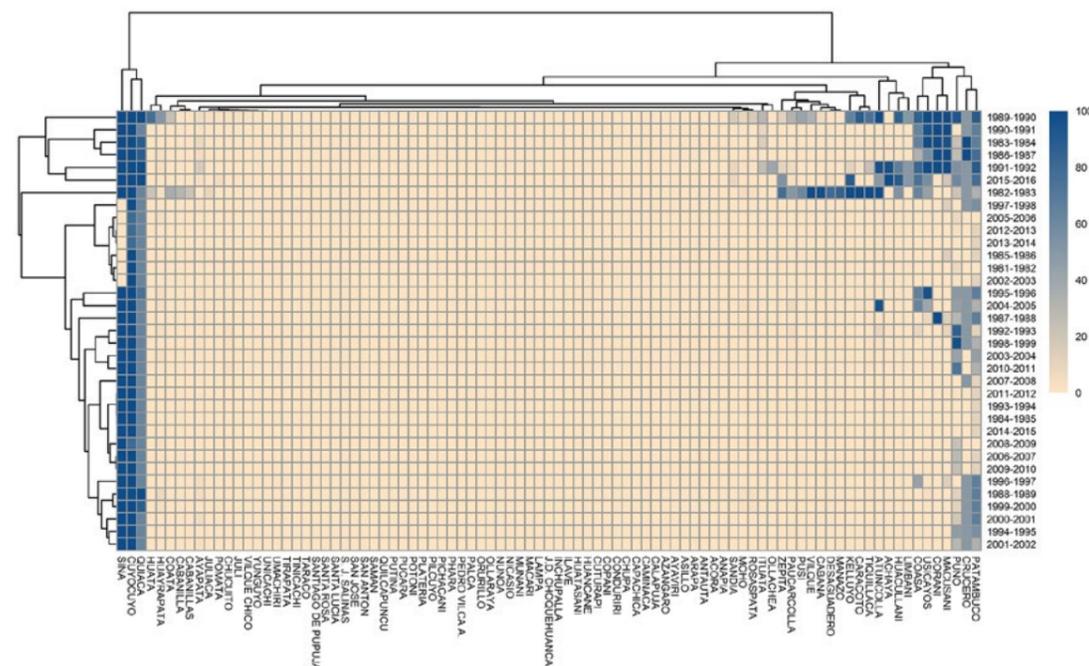
El primer grupo que contiene a los distritos de mayor severidad de sequía agrícola está conformado por Quiaca, Cuyo Cuyo, Sina, Puno, Crucero y Patambuco, ordenados por sus valores de severidad en orden decreciente. El segundo grupo abarca a los distritos de severidad intermedia de sequía agrícola, los que son Corani, Coasa, Usicayos y Macusani, ordenados por sus valores de severidad en orden decreciente. El tercer grupo está compuesto por los distritos con severidad baja de sequía agrícola: Atuncolla, Santa Lucia, Achaya, Vilque, Tiquillaca, Caracoto, Zepita, entre otros, consignados en sentido decreciente.

Asimismo, en el mismo gráfico, se observan a las campañas con mayor valor porcentual de severidad en la parte inferior del agrupamiento en vertical. Las de 1982-1983, 1989-1990, 2004-2005, 1991-1992, 2015-2016, 1983-1984, 1992-1993, 2001-2002, 1994-1995, 1995-1996, entre otras, son las de mayor severidad de sequía agrícola, en sentido decreciente.

Finalmente, el análisis de las salidas de severidad menores al umbral de 50 de WRSI mostrado en la Figura V-13, para el cultivo de papa, describen dos grandes grupos en horizontal. El grupo de la izquierda señala a los distritos de mayor severidad e incluye a Sinia, Cuyo Cuyo y Quiaca. El grupo horizontal de la derecha se compone de una variedad de subgrupos y se ubica al extremo. Los subgrupos que contienen a los distritos con mayor valor porcentual de severidades son Patambuco, Crucero, Puno, Macusani, Corani, Usicayos, Coasa, entre otros.

Figura V-13

Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno < 50 de WRSI (fracaso) del cultivo de papa



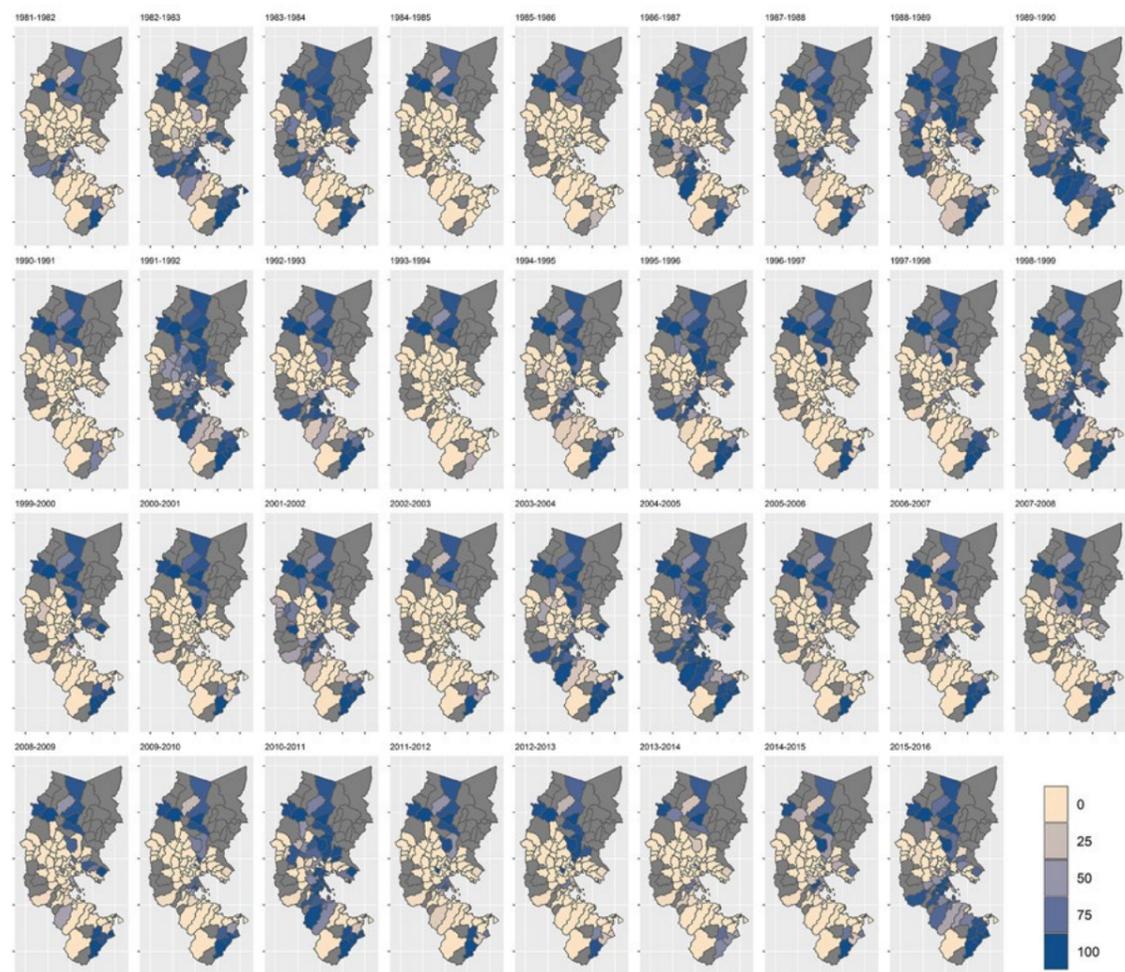
Es relevante remarcar que este gráfico identifica también a las campañas con mayor severidad de sequía agrícola. Estos valores no se detectan en todos los distritos de la región. Según este análisis, las campañas que se ubican en el grupo superior del gráfico 1989-1990, 1982-1983, 1991-1992, 2015-2016, 1990-1991, 1983-1984, 1986-1987, 1995-1996, 2004-2005, 1987-1988 entre otras, son las de mayor severidad en sentido decreciente.

5.3.2. Cultivo de quinua

La Figura V-14 enseña los valores porcentuales de severidad de sequía agrícola, calculados para valores por debajo de 80 de WRSI del cultivo de quinua, correspondientes a los distritos agrícolas de la región Puno. Los mapas representan el estado final de severidad de sequía en cada una de las 35 campañas agrícolas dentro del periodo de 1981 al 2016. Los valores máximos, con 100 % de severidad de sequía agrícola, se consignan con el color azul oscuro, que disminuye progresivamente en tonalidades de azul, hasta llegar al color crema con el que se representan los valores mínimos con 0 % de severidad, según la leyenda posicionada en la parte inferior derecha del gráfico.

Figura V-14

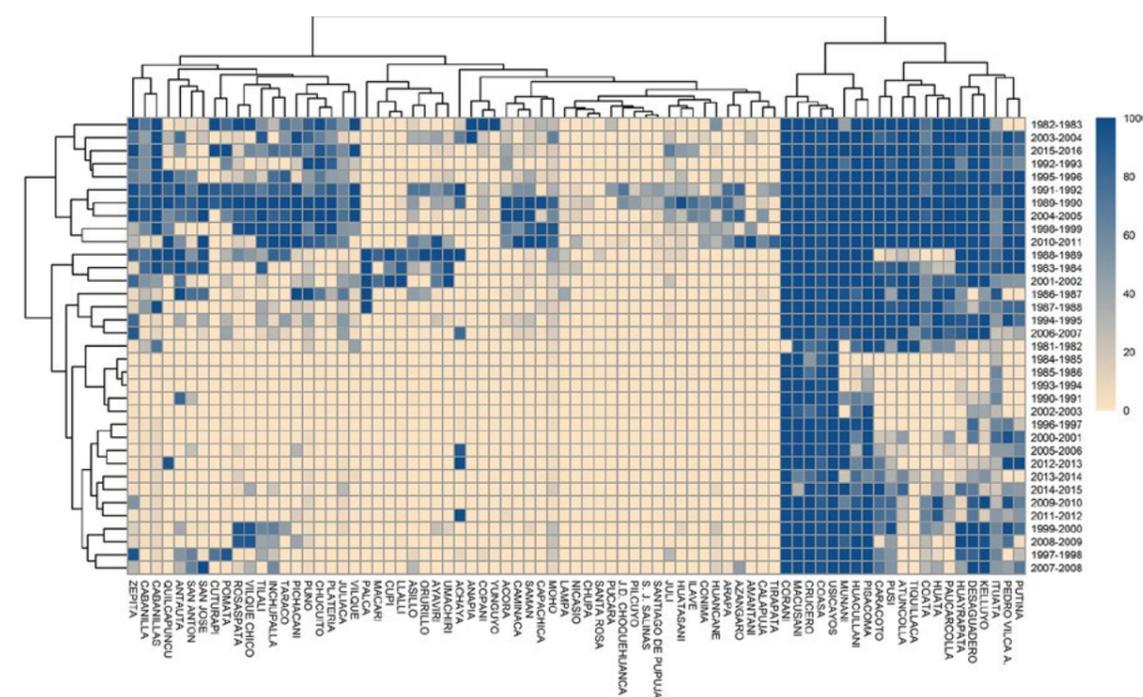
Distribución distrital de la severidad de sequía agrícola para las campañas del cultivo de quinua



En la Figura V-15, se describen los valores calculados de severidad de sequía agrícola por debajo del umbral de 80 de WRSI para el cultivo de quinua. De acuerdo con los resultados del conglomerado horizontal, se distribuyen a los distritos en tres grandes grupos. El primer y segundo pertenecen al gran grupo de la derecha, en los que se encuentran los de mayor severidad. Finalmente, el tercero es el gran grupo de la izquierda.

Figura V-15

Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <80 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua



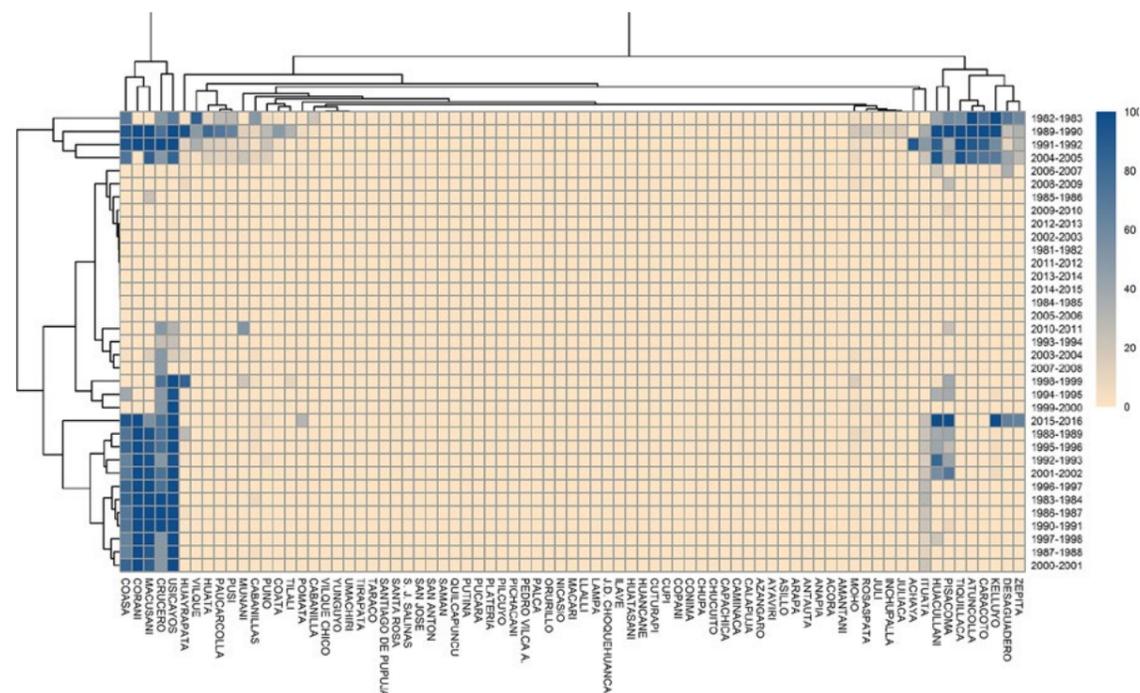
El primer conjunto abarca a los distritos de mayor severidad de sequía agrícola. Estos son Usicayos, Coasa, Macusani, Crucero, Corani, Pisacoma, Huacullani y Munani, ordenados por sus valores de severidad decrecientemente. El segundo grupo encuadra a los distritos de severidad intermedia, los que son Huayrapata, Desaguadero, Kelluyo, Ituata, Pedro Vilca, Putina, Pisacoma, Caracoto, Pusi, Coata, Huata, Atuncolla, Paucarolla y Tiquillaca, ordenados por sus valores de severidad en sentido decreciente. El tercer grupo está compuesto por los distritos con severidad baja: Zepita, Cabanilla, Cabanillas, Quilcapuncu, Antauta, San Anton, San Jose, Vilque, entre otros.

Del mismo modo, en el gráfico, se identifican a las campañas con mayor valor porcentual de severidad de sequía agrícola en la parte superior del agrupamiento en vertical. Las campañas de 1991-1992, 1989-1990, 2004-2005, 1998-1999, 2010-2011, 1982-1983, 2015-2016, 2003-2004, 1992-1993, 1995-1996, entre otras, son las de aquellos años de mayor severidad en sentido decreciente.

La Figura V-16 refiere a los valores calculados de severidad de sequía agrícola por debajo del umbral de 60 de WRSI para el cultivo de quinua. En ella, se observan dos grandes grupos horizontales. El de la izquierda comprende a los distritos de mayor severidad en sentido decreciente, que son Usicayos, Crucero, Macusani, Corani, Coasa, entre otros. También, se identifican a las campañas con mayor valor porcentual de severidad de sequía agrícola en la parte superior del agrupamiento en vertical. Las campañas de 1982-1983, 1989-1990, 1991-1992, 2004-2005 y 2015-2016 son de mayor severidad en sentido decreciente.

Figura V-16

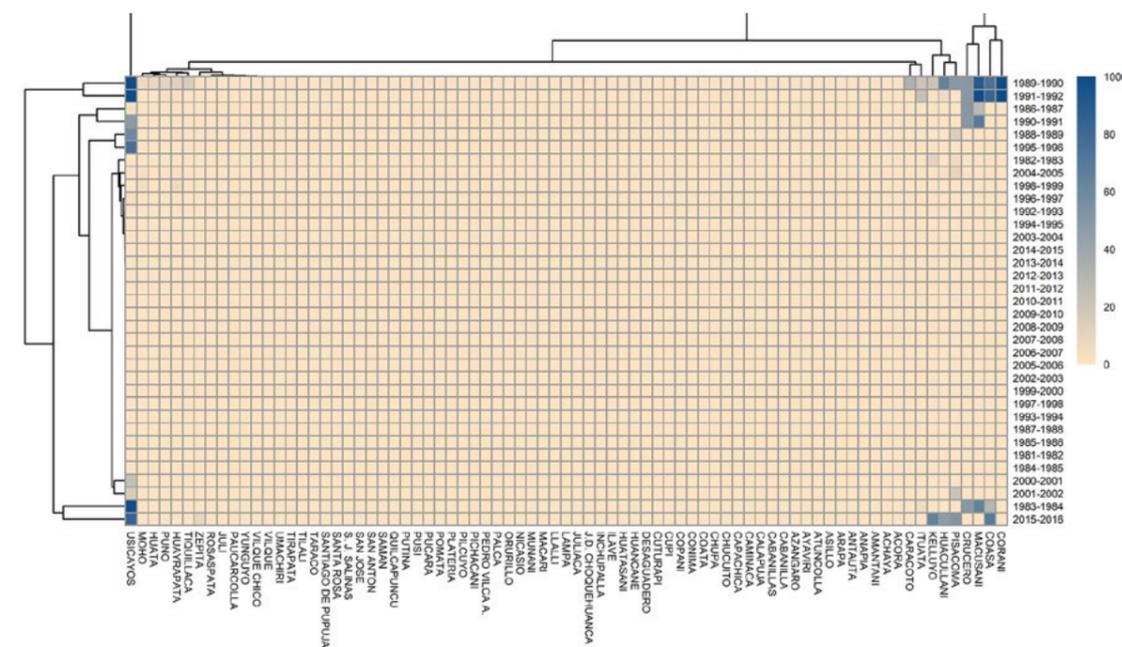
Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <60 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua



Por último, en la Figura V-17, se muestran los valores calculados de severidad de sequía agrícola por debajo del umbral de 50 de WRSI del cultivo de quinua. En general, se advierten pocos distritos con valores cercanos al 100 %. Se podría mencionar al distrito de Usicayos como el que indica mayor presencia de severidad para el periodo de estudio en el gráfico. Luego, en Usicayos, Corani, Coasa, Macusani y Crucero, se advierten altos valores de severidad de sequía agrícola en las campañas de 1989-1990 y 1991-1992. Para la campaña 2015-2016, con severidades menores al 80 %, se distinguen a los distritos de Usicayos, Coasa, Pizacoma, Huacullani y Kellullo. Para 1983-1984, con severidad del 80 %, se identifica a Usicayos; y con severidades menores del 60 %, a los distritos Macusani, Crucero, Coasa e Ituata.

Figura V-17

Agrupamiento de los valores de severidad de la sequía agrícola para las campañas y distritos del departamento de Puno <50 de WRSI (bajo) del cultivo de quinua



5.4. Análisis de relación entre WRSI y rendimientos de los cultivos de papa y quinua

En este apartado, se busca observar y analizar la relación de los valores calculados de WRSI, y los valores históricos de los rendimientos consolidados por la Dirección Regional Agraria de la Región de Puno para los cultivos de papa y quinua. La comparación se realizó a nivel de la región de Puno para un total de 35 campañas agrícolas entre el periodo de 1981:1982 y 2015:2016. Los datos de rendimiento muestran la relación entre el peso de los tubérculos cosechados y el área sembrada en kg/ha. Por otro lado, el WRSI es el promedio regional y representa el porcentaje de suficiencia hídrica acumulada del cultivo para el valor del final de cada campaña agrícola.

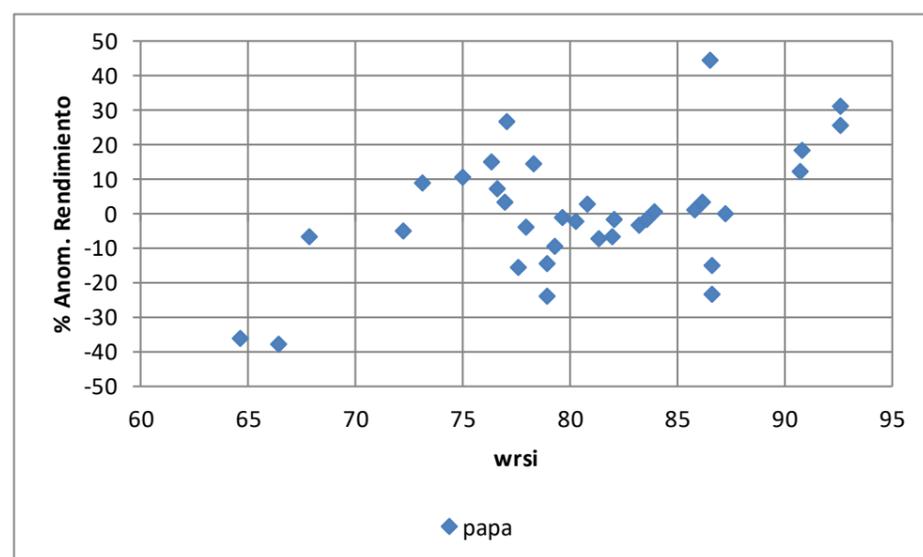
Finalmente, la relación se efectuó entre la anomalía del rendimiento del cultivo y el promedio del índice WRSI para la región Puno. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.50 para el cultivo de papa que indica la existencia de una correlación positiva débil. Para el de quinua, se alcanzó una correlación de 0.15, lo que señala que esta no existe.

El gráfico de dispersión (ver Figura V-18), del cultivo de papa, describe lo siguiente: por encima del valor de 90 de WRSI, solo se presentan anomalías positivas que significan buenos rendimientos del cultivo. Estos resultados están acordes a lo esperado según la escala teórica del índice. Respecto a los valores ubicados entre los niveles de 70 y 90 de WRSI, se puede evidenciar que existen tantas anomalías positivas como negativas sobre el rendimiento del cultivo de papa. Debido a ello, es

posible presumir que las anomalías negativas, que significan bajos rendimientos en el cultivo, pudieron ser influenciadas por otros factores como la carencia de buenas prácticas agronómicas, la falta de innovación tecnológica, la presencia de plagas, la insuficiencia en la respuesta inmediata ante otros impactos meteorológicos, etc.

Figura V-18

Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de papa en departamento de Puno

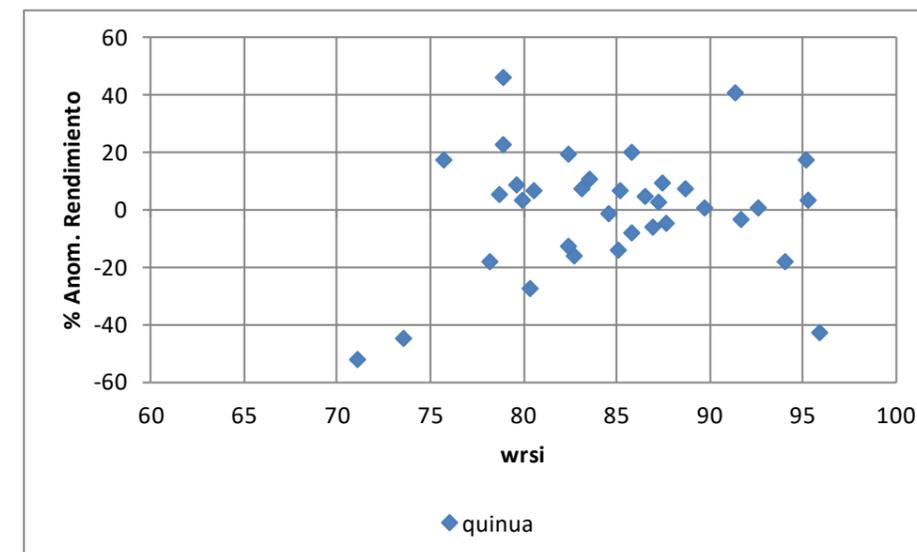


Al evaluar los valores por debajo de 70 de WRSI, se distingue que solo ocurren anomalías negativas del rendimiento del cultivo de papa. Por lo tanto, indica que existe una relación positiva para los valores cercanos a pobre y fracaso de WRSI, ya que, teóricamente, estas representarían rendimientos cercanos al 50 %. Así, se manifiesta una sequía agrícola.

Respecto al gráfico de dispersión del cultivo de quinua (ver Figura V-19), se observa un comportamiento semejante que en el cultivo de papa, puesto que los valores por encima de 75 de WRSI exponen tantas anomalías positivas como negativas. Esto es lógico al comprender que el rendimiento de los cultivos no solo depende de la disponibilidad hídrica, sino de otros factores que pudiesen afectar en su desarrollo. Cabe señalar que, a partir del gráfico, se asevera que en el cultivo de quinua existe una mayor cantidad de valores con anomalía positiva que en el de papa. Esto se debe a que el cultivo de quinua posee mayor resistencia al déficit hídrico.

Figura V-19

Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de quinua en el departamento de Puno



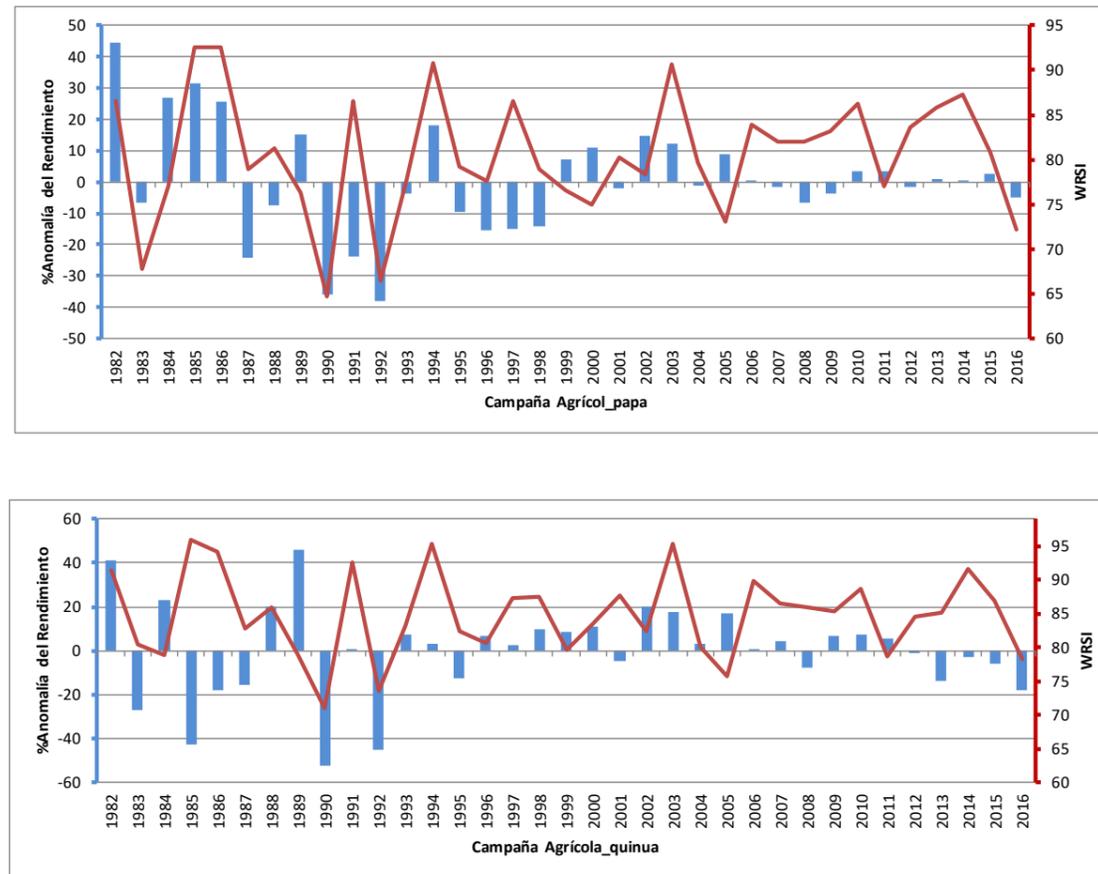
Del mismo gráfico, se puede mencionar que, por debajo del 75 de WRSI, se identifican las anomalías negativas más intensas del rendimiento del cultivo de quinua sin encontrar ninguna positiva. Esto es un buen indicador, ya que afirma una adecuada lectura para los valores cercanos a pobre y fracaso de WRSI.

Tras realizar un análisis a la serie de WRSI y el porcentaje de la anomalía de rendimiento, con la finalidad de examinar las coincidencias por año, se desarrolla la Figura V-20, en la que se observa a la serie de WRSI sobre los valores porcentuales de la anomalía del rendimiento del cultivo de papa (superior) y del de quinua (inferior). En los gráficos, los valores porcentuales de la anomalía en ambos cultivos presentan una gran variabilidad hasta la primera mitad de la serie analizada (Campaña 1995:1996), lo que indica una mayor correlación, 0.66 en el cultivo de papa y 0.20 en el cultivo de quinua. Dicho cambio de variabilidad de los rendimientos se podría deber, en primer lugar, a la implementación de variedades resistentes al déficit hídrico. En segundo lugar, es posible que se origine por la falta de precisión de los datos de rendimiento, sobre todo en el periodo 1997 al 2004.

Además, también se podría deber a lo que el estudio "Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981 - 2018)" (SENAMHI, 2019) menciona para el departamento de Puno. En este, se han presentado episodios de sequía los años 1983, 1987, 1990, 1992 y 2016, por lo que existe una coincidencia con los años más bajos de los valores de WRSI, y en el que se entiende un periodo sin sequía desde 1993 al 2015. Así, es compatible con los valores de WRSI y la variabilidad del rendimiento, ya que en dicho periodo se reducen los valores de RSI por arriba de 70 para papa y de 75 para quinua.

Figura V-20

Gráfico de dispersión que relaciona las salidas de WRSI y el porcentaje de anomalía del rendimiento para el cultivo de quinua en el departamento de Puno



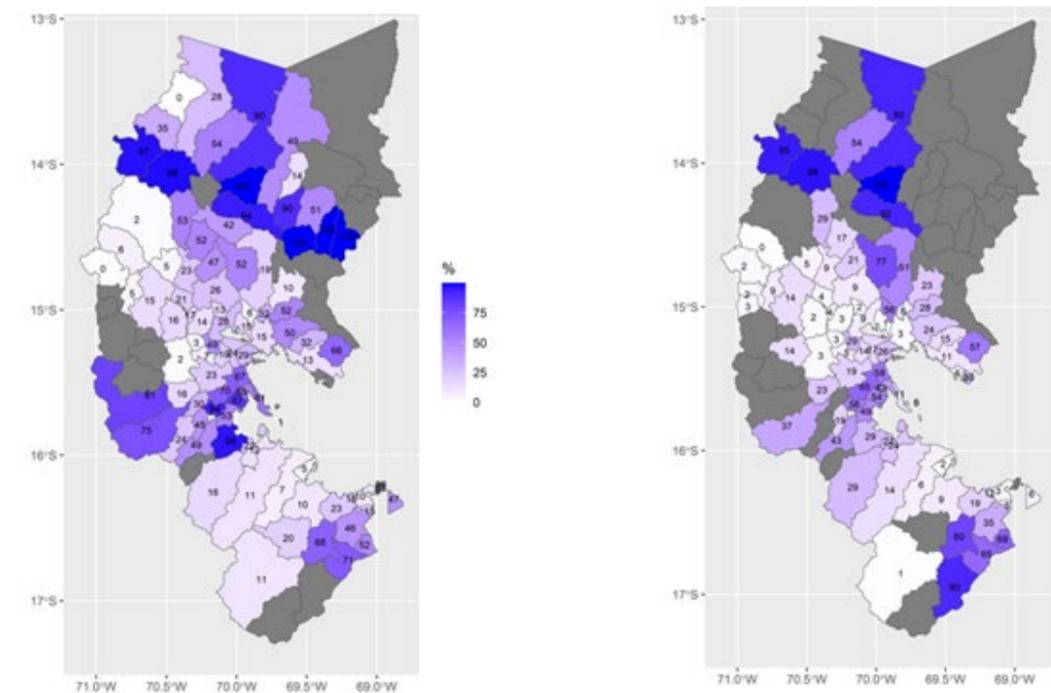
Respecto a la campaña agrícola 1985:1986 para el cultivo de quinua, en el que el WRSI presenta valores altos y la anomalía del rendimiento es negativa, el estudio "Diagnóstico de daños por eventos extremos" (INTECSA-AIC-CNR, 1993) menciona que existieron afectaciones a los cultivos, principalmente alrededor del lago Titicaca, en la zona sur de Puno, donde se siembra la quinua en mayor porcentaje. Esta situación explica la contradicción de los resultados de WRSI y la anomalía del rendimiento para el cultivo de quinua. Del mismo modo, en la campaña 2015-2016, la quinua y papa registraron pérdidas por heladas.

5.5. Estimación de distritos con mayor presencia de sequía agrícola

A partir de un análisis que unifique los resultados de afectación por sequía agrícola en ambos cultivos, podría advertirse que los distritos en los que se siembran tienen una coincidencia importante en cuanto a los resultados de afectación. Esto se puede notar en la Figura V-21, en la que también es posible detectar la distribución espacial de las zonas de mayor afectación.

Figura V-21

Porcentaje promedio de la severidad de sequía agrícola para los distritos de Puno. Izquierda papa y derecha quinua



La afectación por la sequía agrícola, tanto por severidad y por frecuencia, es mayor para el cultivo de papa que para el de quinua. Esto sucede por la mayor susceptibilidad fisiológica que presenta el cultivo de papa y por la resistencia a las sequías que presenta el de quinua.

En la Tabla V-3, se puede observar que Quiaca, Cuyo Cuyo, Usicayos, Sinia, Macusani, Corani, Puno, Crucero, Atuncolla, Coasa, Patambuco, Huata, Santa Lucia, Cabanillas, Kellullo, Caracoto, Huacullani, Tinicachi, Pusi, Huayrapata, entre otros, son los primeros 20 distritos más afectados por la sequía agrícola, en orden decreciente. De la misma forma, para el cultivo de quinua, Usicayos, Macusani, Corani, Coasa, Crucero, Pisacoma, Huacullani, Munani, Desaguadero, Kellullo, Caracoto, Pusi, Huayrapata, Pedro Vilca, Atuncolla, Huata, Ituata, Putina, Paucarolla, Tiquillaca, entre otros, son los 20 primeros distritos más afectados por la sequía agrícola, en orden decreciente.

Tabla V-3

Registro de los 20 primeros distritos con mayor afectación por la sequía agrícola para el cultivo de papa y quinua

N°	Cultivo de papa		Cultivo de quinua	
	Distritos	Severidad %	Distritos	Severidad %
1	QUIACA	100	USICAYOS	100
2	CUYOCUYO	100	MACUSANI	96
3	USICAYOS	100	CORANI	95
4	SINA	100	COASA	92
5	MACUSANI	98	CRUCERO	92
6	CORANI	97	PISACOMA	90
7	PUNO	96	HUACULLANI	80
8	CRUCERO	94	MUÑANI	77
9	ATUNCOLLA	94	DESAGUADERO	68
10	COASA	90	KELLUYO	65
11	PATAMBUCO	90	CARACOTO	65
12	HUATA	87	PUSI	58
13	SANTA LUCIA	81	HUAYRAPATA	57
14	CABANILLAS	75	PEDRO VILCA APAZA	56
15	KELLUYO	71	ATUNCOLLA	56
16	CARACOTO	70	HUATA	54
17	HUACULLANI	68	ITUATA	54
18	TINICACHI	68	PUTINA	51
19	PUSI	67	PAUCARCOLLA	49
20	HUAYRAPATA	66	TIQUILLACA	43

Para finalizar, al llevar a cabo un análisis de coincidencia de los primeros 20 distritos más afectados por la sequía agrícola, se advierte que los distritos de Usicayos, Macusani, Corani, Crucero, Atuncolla, Coasa, Huata, Kellullo, Caracoto, Pusi y Huayrapata coinciden como los de mayor afectación para los cultivos de papa y quinua.

6. Conclusiones y recomendaciones

- * Se examinaron los datos de observación de las 35 campañas agrícolas, según el Índice de Satisfacción del Requerimiento Hídrico en los cultivos de papa y quinua. Esto sirvió para identificar las campañas con mayor intensidad de sequía agrícola, así como los distritos de mayor susceptibilidad, a partir de los cálculos de frecuencia y severidad. Los datos ayudarán a fortalecer el sistema estadístico en relación con la gestión en la agricultura y permiten a los interesados realizar diversos análisis en los ámbitos de seguridad alimentaria, agronegocios, administración de tierras, planificación de uso de tierra, investigadores, entre otros.
- * La sequía agrícola es un fenómeno difícil de interpretar, ya que no se presenta inmediatamente en la zona de cultivo, sino depende de la acumulación de los déficits de agua, de la etapa fenológica y del tipo de agricultura que se practica. Esta acumulación de déficits, en algún momento, llega a ser tan significativa que la producción agrícola disminuye hasta un nivel de no rentabilidad para el agricultor. Dicho nivel, para este estudio, se ha estandarizado en rendimientos por debajo del 50 %, que según Smith (1992), equivalen a valores por debajo de 80 de WRSI. Por ello, se encuentra que, por debajo del valor de 80 de WRSI, se tienen tres clasificaciones que determinan la intensidad de la sequía agrícola: "bajo" de 60-79 de WRSI, "pobre" de 50-59 de WRSI y "fracaso" <50 de WRSI.
- * Se identificaron las campañas de 1982-1983, 1989-1990, 2015-2016, 1991-1992, 2004-2005, 1983-1984, 1995-1996 y 1990-1991 como aquellas que contienen los valores de WRSI de mayor intensidad, en orden decreciente según la serie mostrada, las cuales coincidieron tanto en el cultivo de papa como en el de quinua. Se comprende a las campañas agrícolas de mayor intensidad como aquellas que alcanzaron la mayor cantidad espacial con valores extremos de la clasificación de <50 de WRSI, "fracaso".
- * En la evaluación de la frecuencia de la sequía agrícola o el número de veces en que aparecen los valores de esta durante el periodo 1981-2016, se identificaron tres grandes grupos, que se enunciarán en orden de mayor afectación. El primero comprende a los distritos de Cuyo Cuyo, Quiaca y Sina, los que manifestaron valores de "fracaso"

en más del 80 % de las 35 campañas analizadas, y para los cuales se requiere la mayor prioridad y concentración de esfuerzos en búsqueda de la mejora de las herramientas de respuesta frente a la sequía agrícola. El segundo grupo es conformado por los distritos de Puno, Crucero, Patambuco, Usicayos, Macusani, Corani y Coasa, los que presentaron valores que notifican sequía agrícola en el 100 % de las campañas analizadas, las cuales en su mayoría son de categoría "pobre", seguido de "fracaso" y "bajo". El tercer grupo lo encabezan los distritos de Atuncolla, Huata, Cabanillas, Santa Lucía, Huacullani, Caracoto, Huayrapata, Kellullo, Pusi, Tinicachi, Coata y Capachica, con valores que indican sequía agrícola en no menos del 60 % de las campañas analizadas. Respecto al cultivo de quinua, se puede señalar en un primer grupo a los distritos de Usicayos, Crucero, Coasa, Macusani y Corani como los que mantienen valores que revelan sequía agrícola en el 100 % de las campañas analizadas. En un segundo grupo, se encuentra a los distritos de Pisacoma, Huacullani, Macusani, Caracoto, Desaguadero, Huayrapata, Ituata, Kellullo y Pusi con valores que manifiestan sequía agrícola en no menos del 60 % de las campañas analizadas.

- * La identificación de la severidad expresa la expansión porcentual de los valores de sequía agrícola en cada distrito analizado. Para el cultivo de papa, se identificó a Cuyo Cuyo, Corani, Quiaca, Sinia, Usicayos, Puno, Macusani, Crucero, Patambuco, Coasa como los distritos con valores de 100 % de severidad durante todo el periodo de análisis 1981-2016. Los distritos de Atuncolla, Huata, Huayrapata, Cabanillas, Santa Lucía, Capachica y Tinicachi poseen valores de 100% de severidad en más de 29 de las 35 campañas de análisis. Los distritos de Huacullani, Kellullo, Desaguadero, Zepita, Tiquillacaca, Cabana, Vilque, Caracoto y Pusip tienen valores por encima de 100 % de severidad durante la mitad del periodo de análisis 1981-2016. Para el cultivo de quinua, los distritos que encabezan la lista con valores de 100 % de severidad durante todo el periodo de análisis son Usicayos, Coasa, Crucero, Macusani, y Corani. Los distritos con valores de 100 % de severidad en más de la mitad del periodo de análisis 1981-2016 son Munani, Huacullani, Pisacoma, Caracoto, Pusi, Atuncolla, Tiquillaca, Coata, Huata, Paucarolla, Huayrapata, Desaguadero, Kellullo, Ituata, Pedro Vilca, Putina, entre otros.
- * Se identificaron las campañas de 1982-1983, 1989-1990, 1991-1992, 1997-1998, 2015-2016, 1999-2000, 2010-2011, 1998-1999, 2004-2005 y 1995-1996 como las 10 más afectadas por deficiencias hídricas en el cultivo, en orden decreciente según la serie mostrada, para la papa. Para el cultivo de quinua, las 10 campañas agrícolas más afectadas son 1991-1992, 1989-1990, 2004-2005, 1998-1999, 2010-2011, 1982-1983, 2003-2004, 2015-2016, 1995-1996 y 1992-1993, en orden decreciente según la serie mostrada.

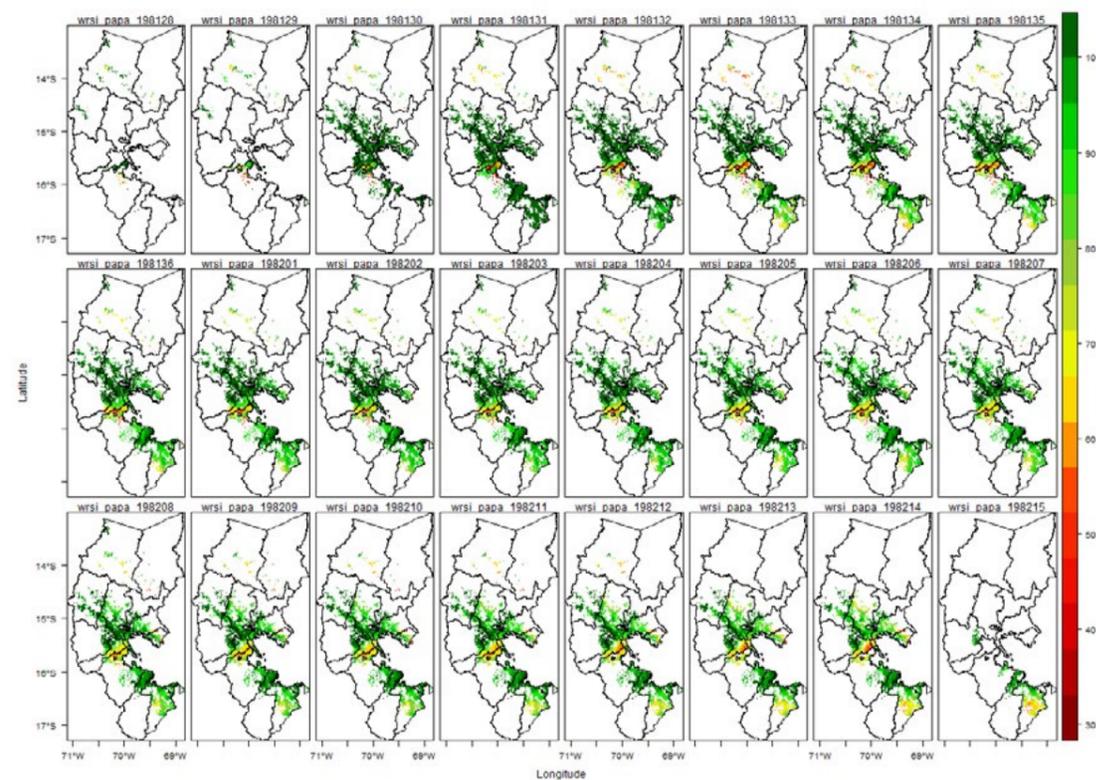
- * Para determinar los distritos de mayor afectación por sequías agrícolas en el período examinado (1981-2016), se requiere realizar un análisis por cultivo, puesto que no en todos los distritos se siembran el mismo, y es distinta su respuesta ante las deficiencias de hídricas. Para el cultivo de papa con mayor afectación de la sequía agrícola, se identifica a los distritos de Cuyo Cuyo, Corani, Quiaca, Sinia, Usicayos, Puno, Macusani, Crucero, Patambuco, Coasa, Atuncolla, Huata, Huayrapata, Cabanillas, Santa Lucía, Capachica, Tinicachi, Huacullani, Kellullo y Desaguadero. Estos son los 20 primeros de la lista con valores de sequía agrícola más extremos, según este estudio de caracterización. Para el de quinua, se detecta a los distritos de Usicayos, Coasa, Crucero, Macusani, Corani, Munani, Huacullani, Pisacoma, Caracoto, Pusi, Atuncolla, Tiquillaca, Coata, Huata, Paucarolla, Huayrapata, Desaguadero, Kellullo, Ituata y Pedro Vilca como los 20 primeros de mayor afectación por la sequía agrícola. En general, estas se han presentado en la gran mayoría de los distritos. Para la ocasión, se menciona aquellos que obtuvieron los valores de las intensidades, frecuencias y severidades más altas.
- * El cultivo de papa muestra mayor correlación entre los valores de WRSI y el valor porcentual de la anomalía del rendimiento de cultivos. El gráfico de dispersión de ambos cultivos indican que existe una relación positiva para los valores de sequía agrícola, cercanos a pobre y fracaso de WRSI, es decir, valores por debajo de 70 de WRSI. El análisis se realizó con datos promedios a nivel de la región Puno. Cabe indicar que los resultados podrían mejorar según se desarrolle a nivel provincial o distrital. Es lógico que por encima de 80 de WRSI se tengan valores negativos de anomalía del rendimiento, ya que estos pudieron ser afectados por otros factores meteorológicos como las heladas e inundaciones, y por un manejo ineficiente de los cultivos, plagas, etc. Tal como indican los resultados del presente estudio y otros mencionados, existe mayor presencia de campañas con sequía agrícola en el periodo 1982 – 1996, que en el periodo 1997 – 2016, lo que llevaría a concluir que el WRSI posee una relación bastante clara con las campañas de sequía agrícola (< de 70 de WRSI) que con las de déficit hídrico (> de 70 de WRSI).
- * Es recomendable ampliar en un nuevo estudio el análisis con información satelital, como el índice de salud vegetal (VHI), índice de la condición de la vegetación (VCI), entre otros; que incluya en lo ideal un análisis de la información de campo del estado de los cultivos, data de producción y rendimiento histórico a nivel distrital, al disponerse de 30 años de registro.

7. Referencias bibliográficas

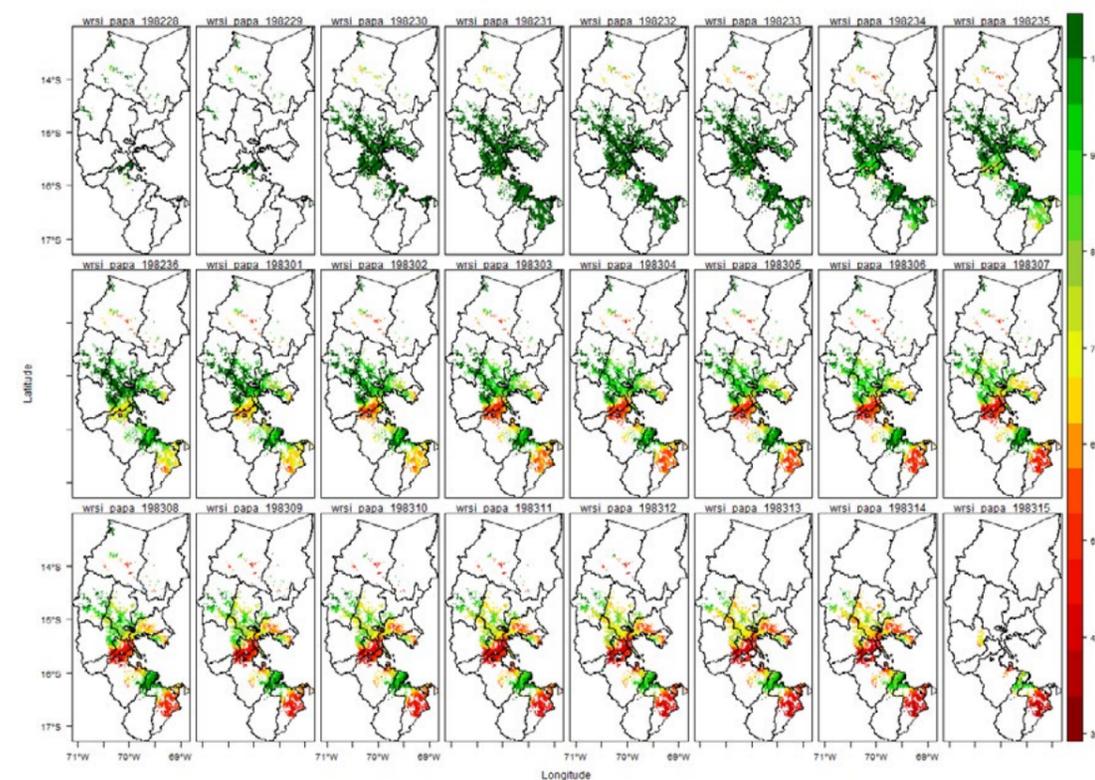
- Angella, G., Frías, C. y Salgado, R. (2016). *Conceptos básicos de las relaciones agua -suelo - planta*. Inta Ediciones.
- Bidwell, R. (1993). *Fisiología Vegetal*. A.G.T. Editor, S.A.
- Canahuana, L. (2020). *Evaluación de clones de papa (Solanum tuberosum) tolerantes a helada y sequía en Tahuaco – Yunguyo – Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/15609>
- Centro Internacional de la papa. (1980). *Compendio de enfermedades de la Papa*. CIP.
- Dirección Regional Agraria Puno. (2021). *Información estadística*. <https://www.agropuno.gob.pe/informacion-estadistica/estadistica-agricola>
- El Peruano. (6 de diciembre de 2016). Declaran el Estado de Emergencia por peligro inminente por déficit hídrico. *Diario Oficial El Peruano*. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/declaran-el-estado-de-emergencia-por-peligro-inminente-por-d-decreto-supremo-n-089-2016-pcm-1461423-2/>
- Garay, C. B. (2009). *Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos*.
- Gobierno Regional de Puno. (2016). *Zonificación Ecológica y Económica*. GORE-PUNO.
- Gobierno Regional de Puno. (2020a). *Información Proyecto de Presupuesto del Sector Público para el Año 2021*. GORE-PUNO.
- Gobierno Regional de Puno. (2020b). *Plan de contingencia por bajas temperaturas región Puno*. GORE-PUNO.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2013). *Quinua Salcedo INIA*. Ministerio de Agricultura – INIA.
- INTECSA-AIC-CNR. (Julio de 1993). *Plan Director Global Binacional de protección-prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa (Sistema TDPS)*. https://pelt.gob.pe/sirh/Plan_Director/Diagnostico-de-danos-por-eventos-extremos.pdf.
- Li, J y Heap, A. D. (2008). *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists*. Geoscience Australia.
- Moreno F. (2009). *Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión*. Departamento de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (22 de marzo de 2019). *El acceso al agua potable para toda la población es esencial para el desarrollo sostenible*. FAO <http://www.fao.org/news/story/es/item/1186505/icode/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1971). *Mapa mundial de suelos*. FAO-UNESCO.
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Agricultural Drought Indices. Proceedings of the Expert Group Meeting: 2-4 June, 2010, Murcia, Spain*. OMM.
- Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía*. OMM y GWP.
- Oyler, J., Ballantyne, A., Jencson, K., Sweet, M. y Running, S. (2015). Creating a topoclimatic daily air temperature dataset for the conterminous United States using homogenized station data and remotely sensed land skin temperature. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2258-2279. <https://doi.org/10.1002/joc.4127>
- Ravelo, A. (2000). Caracterización agroclimática de las sequías extremas en la región pampeana argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Córdoba*, 20(2), 187-192. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/2000raveloac.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). *Caracterización Espacio Temporal de la Sequía en los Departamentos Altoandinos del Perú (1981 - 2018)*. SENAMHI.
- Smith, M. (1992). *Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. FAO.
- Valero, A. (1999). Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) para las plantas en suelos del Alto y Medio Aragón. *Escuela Politécnica Superior de Huesca*. <http://hdl.handle.net/10261/92824>
- Villota, H. (1992). *El sistema CIAF de clasificación fisiográfica del terreno*. Santafé de Bogotá: IGAC.

8. Anexos

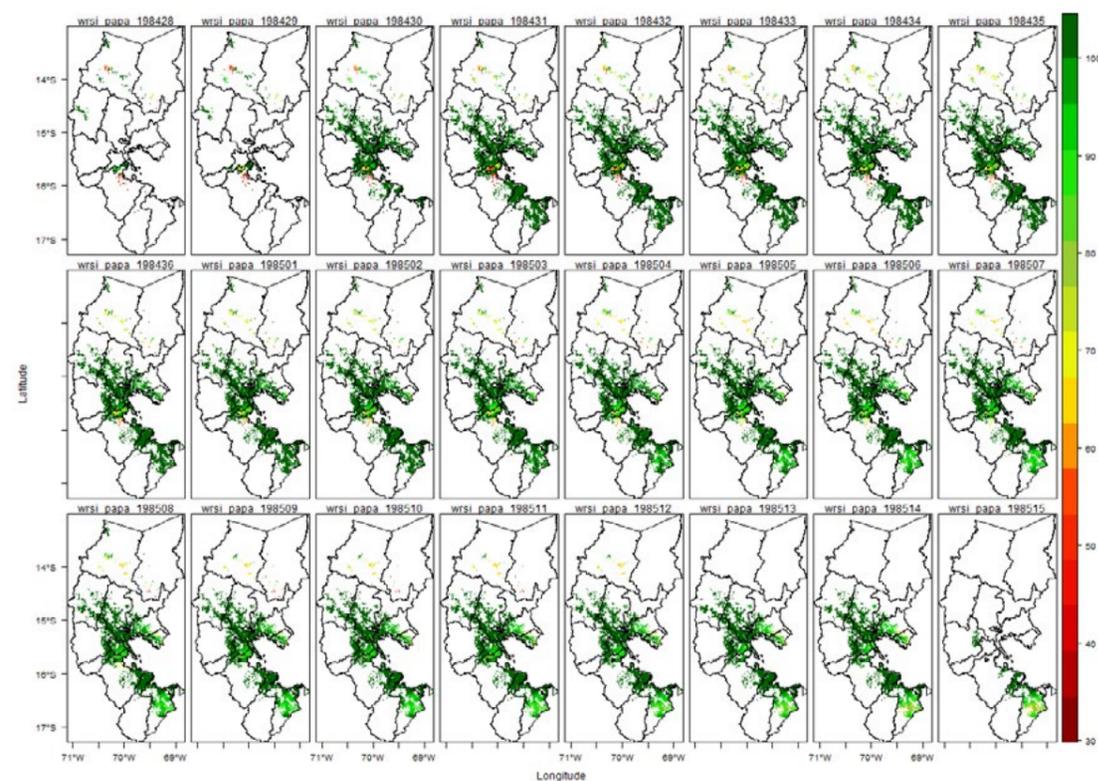
8.1. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1981-1982



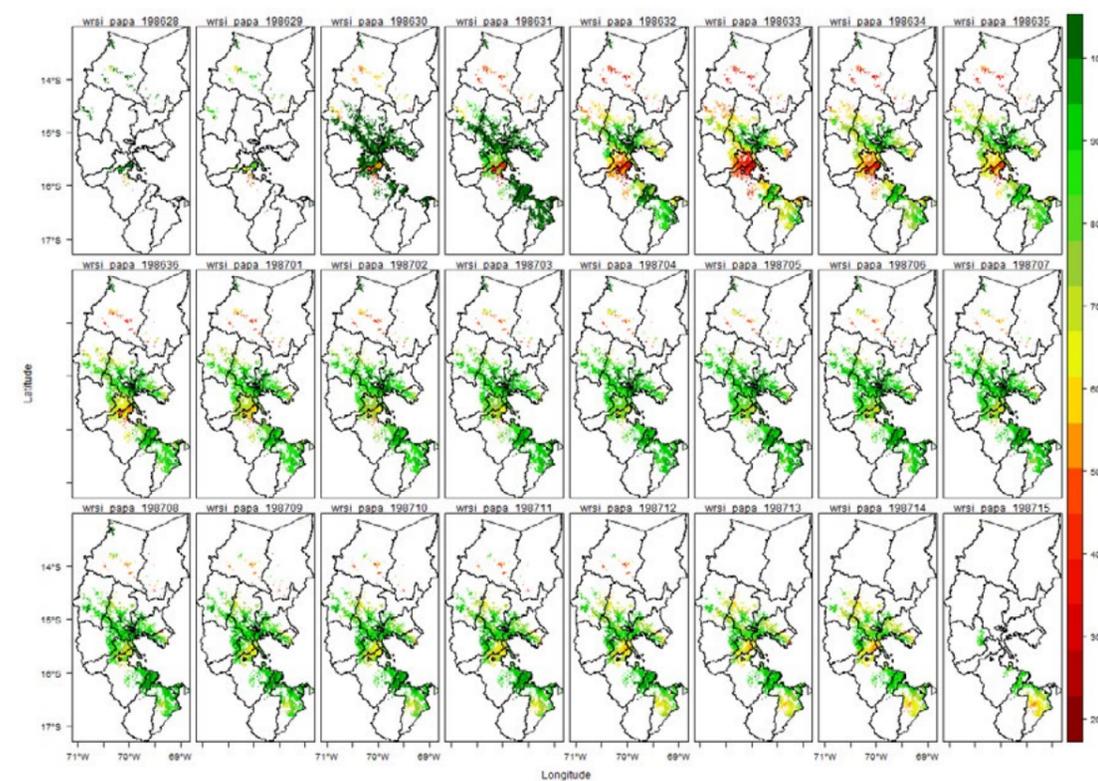
8.2. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1982-1983



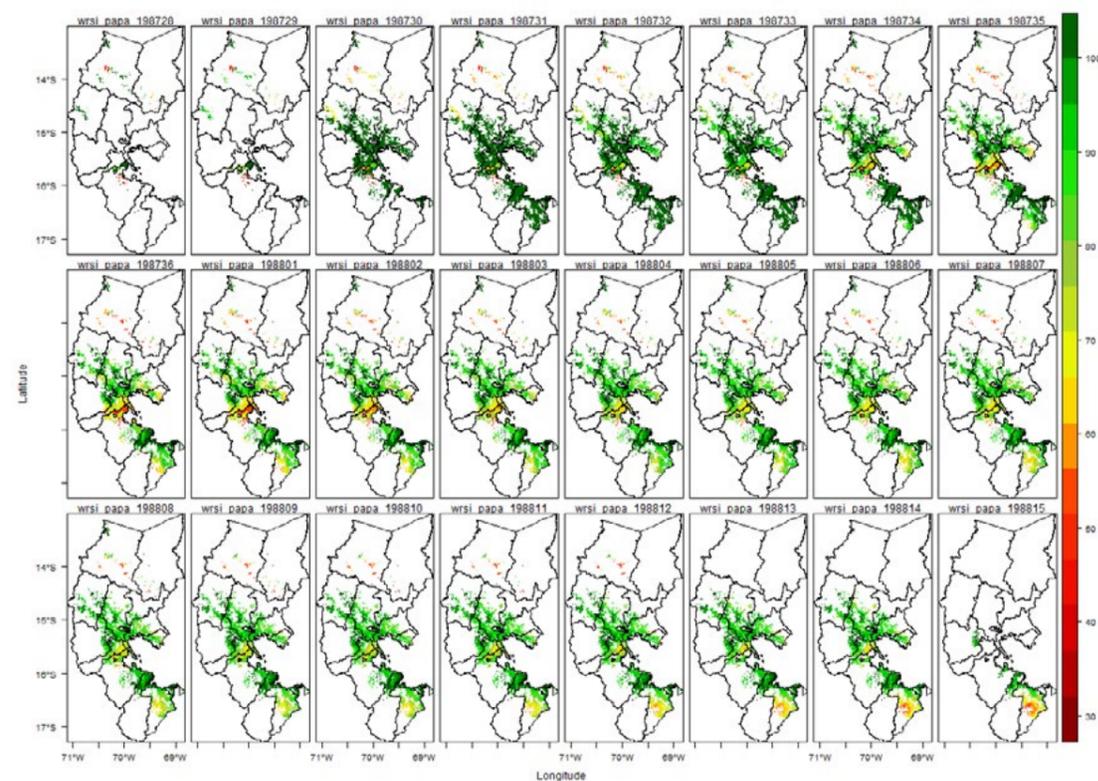
8.3. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1984-1985



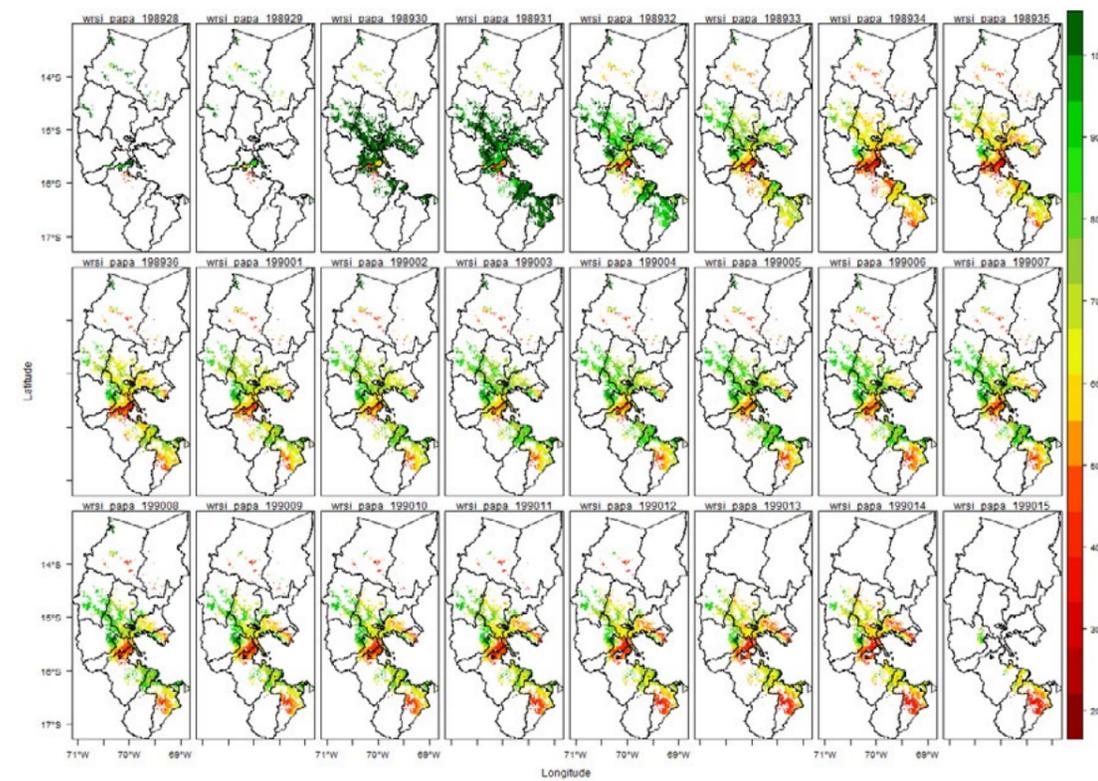
8.4. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1986-1987



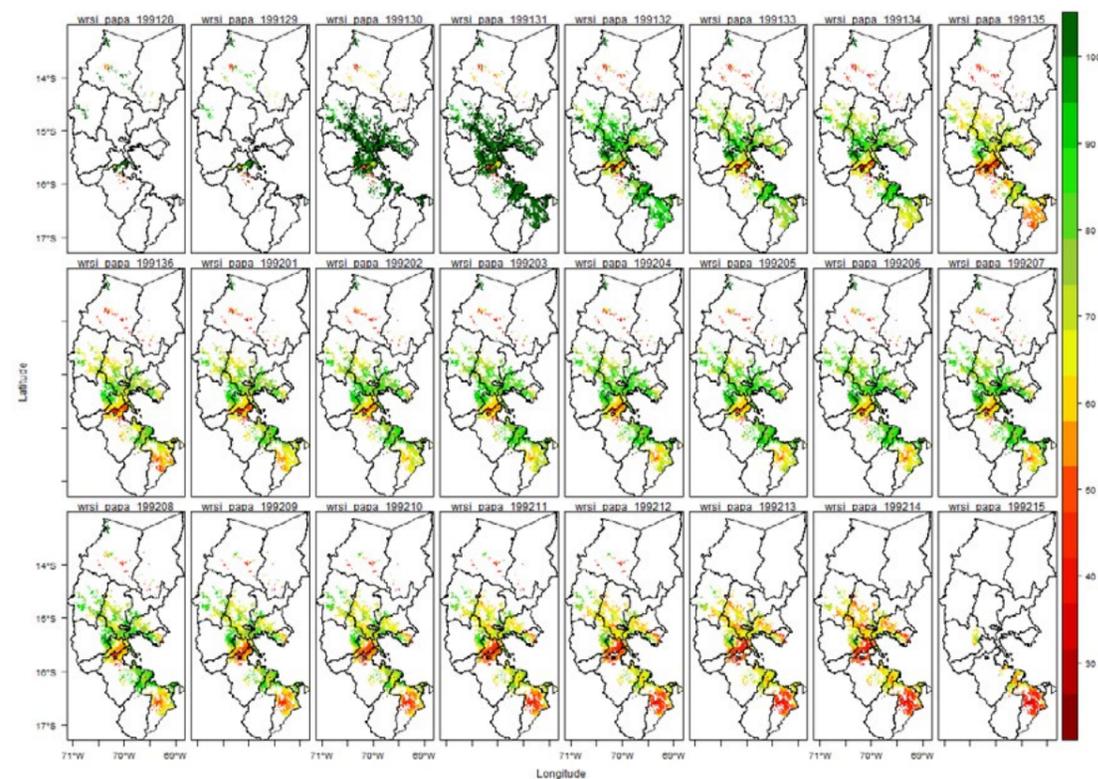
8.5. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1987-1988



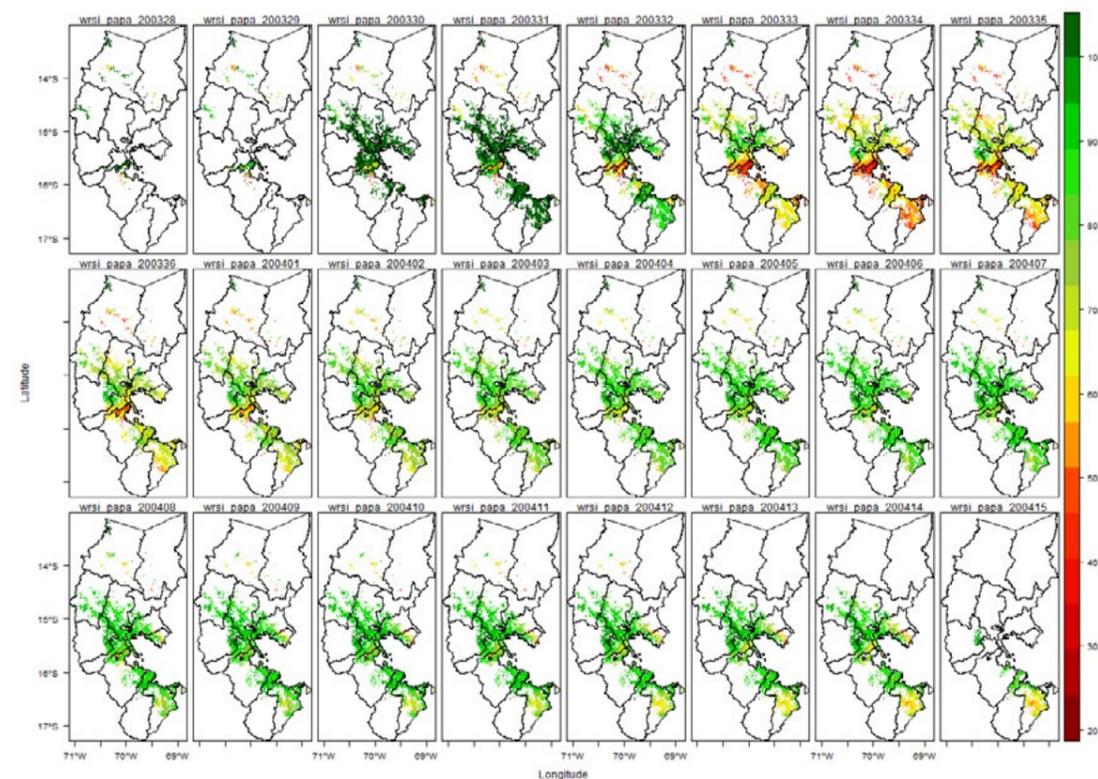
8.6. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1989-1990



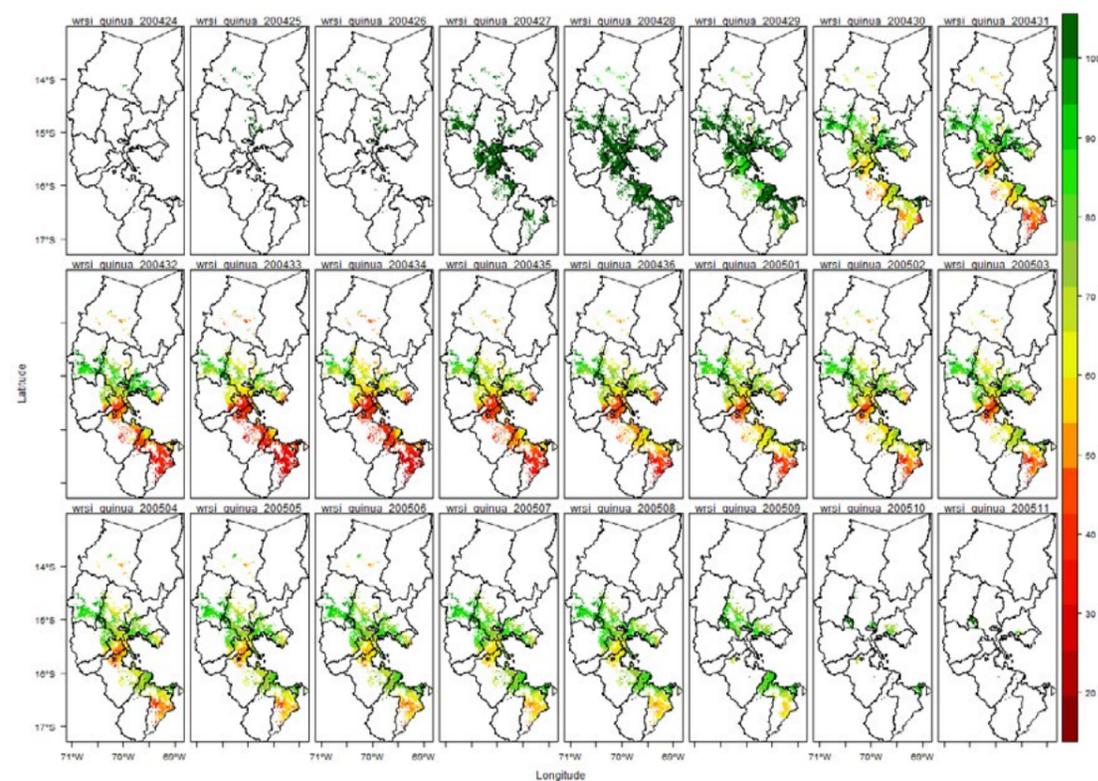
8.7. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 1991-1992



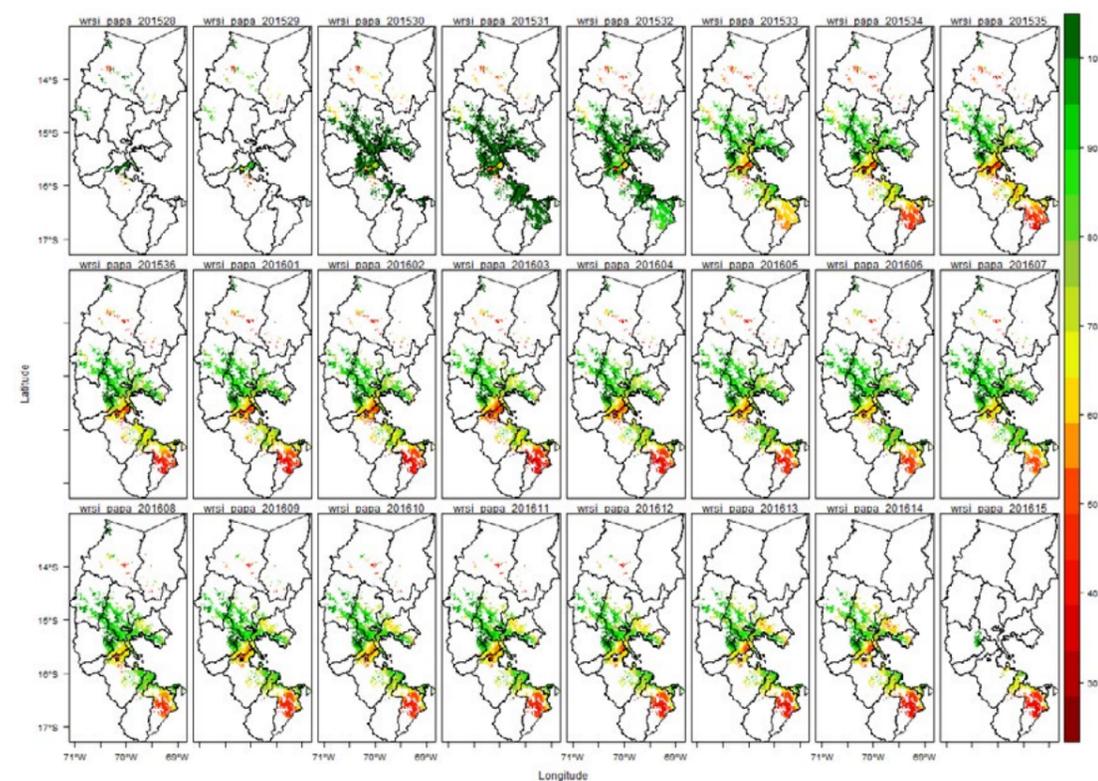
8.8. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2003-2004



8.9. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2004-2005



8.10. Índice de sequía agrícola de la campaña agrícola 2015-2016







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



Entidad coordinadora:



Consortio integrado por:

