



UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR

SEDE CENTRAL

Sucre – Bolivia

**MAESTRÍA EN CAMBIO GLOBAL, GESTIÓN DE
RIESGOS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA**

Gestiones 2016 -2017

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE AGUA POR
EVAPORACIÓN EN ATAJADOS (QUTHAÑAS) COMO
EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COMUNIDAD
LAKA PUCARA MUNICIPIO DE COROCORO**

**Tesis presentada para optar el
Grado Académico de Magister
en Cambio Global, Gestión de
Riesgos y Seguridad
Alimentaria**

MAESTRANTE: RAMIRO JUAN COLQUE TAMBO

Sucre – Bolivia

2020



UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR

SEDE CENTRAL

Sucre – Bolivia

**MAESTRÍA EN CAMBIO GLOBAL, GESTIÓN DE
RIESGOS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA**

Gestiones 2016 -2017

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE AGUA POR
EVAPORACIÓN EN ATAJADOS (QUTHAÑAS) COMO
EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COMUNIDAD
LAKA PUCARA MUNICIPIO DE COROCORO**

**Tesis presentada para optar el
Grado Académico de Magister
en Cambio Global, Gestión de
Riesgos y Seguridad
Alimentaria**

MAESTRANTE: RAMIRO JUAN COLQUE TAMBO

TUTOR: EMILIO GARCÍA APAZA, Ph.D

Sucre – Bolivia

2020

DEDICATORIA

A Dios por la vida, a mis padres y mi hermana Estela por su apoyo incondicional.

A mis hijos Keyly Jelen y Gael Amilcar que son la fortaleza de mí vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la bendición de culminar con este propósito y la Madre Tierra por permitir realizar y concluir el trabajo de investigación.

A la Universidad Andina Simón Bolívar, Programa de Maestría en Cambio Global, Gestión de Riesgos y Seguridad Alimentaria Versión III, por permitir la especialización y desarrollar conocimientos científicos sobre el Cambio Climático, al personal administrativo y profesores que dictaron clases en la maestría.

Agradecer infinitamente Ing. Ph. D. Emilio García Apaza, tutor de tesis por el apoyo incondicional, la orientación, experiencia y el aporte de conocimiento científico en el tema de investigación.

Expresar agradecimientos a SENAMHI por la facilitación de datos meteorológicos, y la comunidad Laka Pucara por permitir el desarrollo del trabajo de investigación.

Al tribunal revisor por el aporte y orientación para la conclusión de la investigación y redacción del presente documento.

RESUMEN

El propósito de la investigación fue evaluar la pérdida de agua por evaporación en atajados como efecto del cambio climático en la comunidad Laka Pucara, Municipio de Corocoro, Provincia Pacajes del Departamento de La Paz, Bolivia.

Mediante recopilación y análisis de datos históricos del SENAMHI, se evaluó el comportamiento de autocorrelación y serie histórica de precipitación, la evaporación histórica se comparó con la evaporación en tanque evaporímetro tipo A y 3 atajados en estudio entre marzo del 2018 a febrero del 2019.

El análisis de series tiempo de precipitaciones (1971 – 2018) de Calacoto, presentó una autocorrelación no significativa al 5% de error, la precipitación media alcanza 422.03 mm/año, una máxima de 785.6 mm en 1997, y mínimas de 209.2 mm y 223 mm en 1980 y 1983. La precipitación de últimos 5 años (372.2 mm/año), es menor a la precipitación histórica promedio (422.03 mm/año). El comportamiento acíclico de patrones de precipitación y anomalías pueden atribuirse al fenómeno de El Niño, posibles efectos del cambio climático y la actividad solar, que se manifiestan con precipitaciones concentradas en poco tiempo y fuera de la época.

La evaporación histórica (1971 – 2016) en tanque evaporímetro de Patacamaya, muestra un promedio de 1774.30 mm/año, presentando una tendencia mínima en disminuir en el tiempo, con 0.98 unidades de evaporación por cada unidad de tiempo. La evaporación de últimos 5 años (1862.70 mm/año) es superior al promedio histórico, que posiblemente sean atribuidos a efectos del cambio climático.

La evaporación en tanque evaporímetro en Laka Pucara (1763.75 mm/año), es aproximado a la evaporación histórica de Patacamaya (1774.30 mm/año), y superior al promedio histórico de San Calixto de La Paz (1038.72 mm/año). La evaporación aproximada a Patacamaya, puede ser atribuida a cercanía, condiciones climáticas y topográficas similares de ambas zonas.

La evaporación mensual, por efectos de oscilación de radiación neta, nubosidad y precipitaciones según época del año, presenta mayor evaporación entre abril

a diciembre con 140 a 207 mm/mes, y menor evaporación en enero, febrero y marzo con 58, 60 y 66.3 mm/mes.

La evaporación en tanque evaporímetro (1763.75 mm/año), es mayor a la evaporación en atajados 1, 2, y 3 con 1192.84 mm/año, 1650.33 mm/año y 1310.58 mm/año, debidos al mayor volumen de almacenamiento de agua, acumulación de calor y sólidos suspendidos en agua de atajados, que provoca una disminución en su presión de vapor y por lo tanto una reducción en la evaporación.

La evaporación en atajados, está relacionada con el tamaño del área evaporante y capacidad de almacenamiento, atajados de mayor tamaño registran menores tasas de evaporación. El atajado 3, con mayor área evaporante de 670.09 m² en marzo, registró evaporación de 1310.58 mm/año; el atajado 1, con área evaporante de 506,45 m² presentó 1192.84 mm/año y el atajado 2, con menor área evaporante de 378,21 m² presentó una evaporación de 1650.33 mm/año.

El análisis de comparación de medias de Tukey, no presenta diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%. Se concluye que diferencias del tamaño y capacidad de almacenamiento de agua en los 3 atajados, estadísticamente no inciden en las pérdidas por evaporación.

Las pérdidas del volumen de agua por evaporación, muestran una tasa de evaporación de 53% y 52 % para los atajados 1 y 2, y del 41% para el atajado 3, que son atribuidas al tamaño del área evaporante y principalmente a la capacidad de almacenamiento de agua.

Palabras clave: Cambio climático, precipitación, evaporación, atajado, superficie evaporante.

ABSTRACT

The purpose of the research was to evaluate the loss of water by evaporation in shortcuts as an effect of climate change in the Laka Pucara community, Municipality of Corocoro, Pacajes Province, Department of La Paz, Bolivia.

Through the collection and analysis of historical data from SENAMHI, the autocorrelation behavior and historical series of precipitation were evaluated, the historical evaporation was compared with the evaporation in a type A evaporimeter tank and 3 surveyed in the study between March 2018 to February 2019.

The time series analysis of rainfall (1971 - 2018) of Calacoto, presented a non-significant autocorrelation with a 5% error, the average rainfall reached 422.03 mm / year, a maximum of 785.6 mm in 1997, and minimums of 209.2 mm and 223 mm in 1980 and 1983. The precipitation of the last 5 years (372.2 mm / year) is less than the average historical precipitation (422.03 mm / year). The acyclic behavior of precipitation patterns and anomalies can be attributed to the El Niño phenomenon, possible effects of climate change and solar activity, which are manifested with concentrated rainfall in a short time and outside the season.

The historical evaporation (1971-2016) in the Patacamaya evaporimeter tank, shows an average of 1774.30 mm / year, presenting a minimal tendency to decrease over time, with 0.98 evaporation units for each unit of time. The evaporation of the last 5 years (1862.70 mm / year) is higher than the historical average, which may possibly be attributed to the effects of climate change.

Evaporation in an evaporimeter tank in Laka Pucara (1763.75 mm / year), is approximate to the historical evaporation of Patacamaya (1774.30 mm / year), and higher than the historical average of San Calixto de La Paz (1038.72 mm / year). The approximate evaporation to Patacamaya, can be attributed to the proximity, similar climatic and topographic conditions of both areas.

The monthly evaporation, due to the effects of oscillation of net radiation, cloudiness and rainfall according to the time of year, shows the highest evaporation between April to December with 140 to 207 mm / month, and the

lowest evaporation in January, February and March with 58, 60 and 66.3 mm / month.

Evaporation in the evaporator tank (1763.75 mm / year), is greater than the evaporation in cuttings 1, 2, and 3 with 1192.84 mm / year, 1650.33 mm / year and 1310.58 mm / year, due to the greater volume of water storage, accumulation of heat and suspended solids in cut water, which causes a decrease in its vapor pressure and therefore a reduction in evaporation.

Evaporation in cutoffs is related to the size of the evaporating area and storage capacity, larger cuttings register lower evaporation rates. Cutoff 3, with the largest evaporating area of 670.09 m² in March, registered evaporation of 1,310.58 mm / year; Cutoff 1, with an evaporating area of 506.45 m², presented 1,192.84 mm / year and Cutoff 2, with a smaller evaporating area of 378.21 m², presented an evaporation of 1,650.33 mm / year.

Tukey's mean comparison analysis does not show significant differences at a confidence level of 95%. It is concluded that differences in the size and capacity of water storage in the 3 cutoffs, statistically do not affect evaporation losses.

Losses in water volume due to evaporation show an evaporation rate of 53% and 52% for cuttings 1 and 2, and 41% for cutoff 3, which are attributed to the size of the evaporating area and mainly to the capacity of water storage.

Key words: Climate change, precipitation, evaporation, cut off, evaporating surface.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Situación problemática	2
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Justificación de la investigación.....	4
1.4 Objetivos de la investigación	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Autocorrelación de series de tiempo de precipitaciones.....	5
2.1.1 Serie histórica de precipitación	6
2.2 Evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo “A”.....	9
2.2.1 Evaporación del agua	9
2.2.2 Tanque evaporímetro tipo “A”.....	10
2.2.3 Factores meteorológicos que afectan la evaporación.....	11
2.2.3.1 Radiación y ciclo solar	11
2.2.3.2 Temperatura del aire	13
2.2.3.3 Humedad del aire	13
2.2.3.4 Velocidad del viento.....	14
2.2.3.5 Precipitación	14
2.3 Volumen de evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento	14

2.3.1	Cosecha de agua con atajados	14
2.3.2	Pérdidas por evaporación en superficies de agua libre	15
2.3.3	Factores que afectan la evaporación en atajados	16
2.3.3.1	Volumen de agua	17
2.3.3.2	Salinidad y partículas suspendidas	17
2.3.3.3	Tamaño de la superficie libre.....	17
2.3.3.4	Superficie de evaporación	18
2.3.3.5	Infiltración	18
CAPÍTULO III.....		20
3.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	20
3.1	Hipótesis General	20
3.2	Hipótesis Específicas.....	20
3.3	Identificación de Variables.....	20
3.4	Operacionalización de Variables	21
3.5	Matriz de Consistencia	21
CAPÍTULO IV.....		22
4.	METODOLOGÍA	22
4.1	Localización.....	22
4.2	Características climáticas.....	22
4.2.1	Precipitación	22
4.2.2	Temperatura	23
4.2.3	Humedad relativa	24
4.2.4	Radiación solar.....	24
4.3	Materiales y métodos.....	25
4.3.1	Materiales	25

4.3.1.1	Materiales de Campo.....	25
4.3.1.2	Materiales de Gabinete.....	25
4.4	Metodología.....	25
4.4.1	Recolección de información.....	26
4.4.1.1	Recolección de información primaria.....	26
4.4.1.2	Recolección de información secundaria	26
4.4.2	Autocorrelación de series de tiempo de precipitaciones.....	27
4.4.3	Comportamiento histórico de evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo “A”	28
4.4.3.1	Análisis histórico normal del volumen de evaporación	28
4.4.3.2	Evaporación anual del agua en tanque tipo A	29
4.4.4	Evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento.....	31
4.4.4.1	Estimación de la evaporación por el método del balance hídrico	31
4.4.4.2	Volumen de agua en atajados	32
4.4.4.3	Pérdidas por Infiltración	33
CAPÍTULO V.....		35
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
5.1	Autocorrelación de series de tiempo de precipitación	35
5.1.1	Patrones de precipitación	35
5.1.2	Serie histórica de precipitación.....	37
5.1.3	Series de tiempo de precipitaciones.....	41
5.2	Comportamiento histórico de la evaporación.....	43
5.2.1	Evaporación anual y mensual en tanque evaporímetro tipo A.....	43
5.2.2	Comportamiento histórico de evaporación en tanque evaporímetro tipo A	46

5.2.3	Comportamiento mensual de evaporación en atajados y tanque evaporímetro.....	49
5.3	Evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento.....	53
5.3.1	Evaporación acumulada de agua en atajados.....	53
5.3.2	Superficie de evaporación de agua en relación al tiempo	55
5.3.2.1	Relación de evaporación y superficie de evaporante	57
5.3.3	Volumen de infiltración y evaporación	62
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES.....	68
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXOS.....	78

Índice de Figuras

Figura 1: Distribución de precipitación (1975 – 2010) Atlas Climatológico de Bolivia.	8
Figura 2: Distribución de la radiación total (Watts/hr/día).	12
Figura 3: Localización del municipio de Corocoro y Comunidad Laka Pucara.	22
Figura 4: Esquema de retención de agua en atajados.....	32
Figura 5: Promedio mensual de precipitación en Calacoto (1971 al 2018) y promedio mensual de últimos 5 años (2014 -2018).....	36
Figura 6: Serie histórica de precipitación en Calacoto (La Paz, Bolivia), entre 1971 al 2018	38
Figura 7: Variación de luminosidad solar a lo largo del ciclo de manchas solares durante últimos 30 años.....	40
Figura 8: Autocorrelación de la serie histórica de precipitación de Calacoto entre 1971 al 2018 (La Paz, Bolivia).	42
Figura 9: Evaporación histórica San Calixto (1942 -2017) y Patacamaya (1971 – 2016) y Laka Pucara - Corocoro (marzo 2018 a febrero 2019).	44
Figura 10: Evaporación histórica Patacamaya (1971 - 2016), (2012 - 2016) y Laka Pucara - Corocoro (marzo 2018 a febrero 2019).	45
Figura 11: Comportamiento histórico de evaporación en tanque evaporímetro, Patacamaya (La Paz, Bolivia), entre 1971 al 2016.	47
Figura 12: Ubicación y área de aporte hídrico de atajados en Comunidad Laka Pucara, Municipio de Corocoro.....	50
Figura 13: Evaporación mensual en atajados y tanque evaporímetro tipo A (marzo 2018 a febrero 2019).	52
Figura 14: Evaporación acumulado en atajados y tanque evaporímetro (marzo 2018 a febrero 2019).	54
Figura 15: Superficie evaporante en atajados y su relación con el tiempo (marzo 2018 a febrero 2019).	56

Figura 16: Atajado 1. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).	59
Figura 17: Atajado 2. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. Superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).....	60
Figura 18: Atajado 3. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. Superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).....	62
Figura 19: Volumen acumulado de infiltración en atajados (marzo 2018 y febrero 2019).....	64

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Densidad aparente según textura	19
Cuadro 2: Operacionalización de variables	21
Cuadro 3: Matriz de consistencia.....	21
Cuadro 4: Humedad relativa (%).....	24
Cuadro 5: Radiación solar mensual para el periodo de 1980 a julio 2013	25
Cuadro 6: Permeabilidad de suelos.	34
Cuadro 7: Características de atajados en estudio	51
Cuadro 8: Capacidad de almacenamiento y área de aporte hídrico.	51
Cuadro 9: Análisis de Varianza.....	55
Cuadro 10: Comparaciones en parejas de Tukey.....	55
Cuadro 11: Capacidad de almacenamiento y pérdidas por evaporación en atajados.	57
Cuadro 12: Índice de permeabilidad de suelos.....	63

Lista de Siglas y Abreviaturas

APMT: Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra.

BID: Banco Interamericano de Desarrollo.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y El Caribe.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CORDEPAZ: Corporación Regional de La Paz.

ENSO: El Niño – Southern Oscillation.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

GAMC: Gobierno Autónomo Municipal de Corocoro.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GMC: Gobierno Municipal Corocoro.

GPS: Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PROAGRO-GIZ: Programa de Apoyo al Desarrollo Agropecuario Sustentable – Cooperación Técnica Alemana.

PTDI: Plan Territorial de Desarrollo Integral.

SEMTA: Servicios Múltiples de Tecnología Apropriada.

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e hidrología.

UDAPE: Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas.

VSF-CICDA: Veterinarios Sin Fronteras – Centro Internacional de Cooperación para el Desarrollo Agrícola.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático en la región del Altiplano representa una amenaza, para la seguridad alimentaria de la población, por una mayor irregularidad en el comportamiento del régimen de precipitaciones, sequías e incremento de la temperatura (Cordero y Gutiérrez, 2012).

La evaporación de reservorios de agua o cuerpos de agua libre es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico. Esta situación es aún más evidente en climas áridos y semi-áridos, ya que la evaporación puede incluso consumir la totalidad de los recursos que ingresan en forma de precipitación (Johnson, 2009).

Los proyectos de cosecha de agua, responden a la falta de acceso y escasez de agua para usos de riego, consumo animal y doméstico. Según Ayala *et al.* (2015), el propósito principal de construir reservorios, es contar con agua para la familia y el ganado durante gran parte del año, reduciendo el gasto de energía y el maltrato de los animales en traslados desde grandes distancias.

En la comunidad Laka Pucara, por carencia extrema de agua para el consumo del ganado y uso doméstico familiar, la cosecha de agua de lluvia en atajados fue implementada inicialmente en 1984 por CORDEPAZ (Corporación Regional de La Paz) y posteriormente entre 1997 al 2000 por SEMTA (Servicios Múltiples de Tecnología Apropriada) y VSF-CICDA (Veterinarios Sin Fronteras – Centro Internacional de Cooperación para el Desarrollo Agrícola), como una alternativa tecnológica para atenuar la falta de agua en época de estiaje.

La presente investigación, mediante la recopilación de datos históricos de precipitación y evaporación, el registro y análisis del volumen de evaporación de agua, estima la pérdida de agua por evaporación en tanque evaporímetro tipo A y atajados entre marzo del 2018 a febrero del 2019, en un contexto de cambio climático, planteando medidas y/o mecanismos de adaptación.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2014).

El aumento promedio de la temperatura mundial y el cambio en las variables climáticas (IPCC, 2007), como consecuencia de la elevación de la temperatura, son producto del incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera. Esta acumulación, comienza históricamente a inicios de la revolución industrial en Europa, debido a importantes volúmenes de dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) entre los principales, que se liberan desde entonces, como resultado de la combustión del carbón mineral y petróleo.

En Bolivia el impacto del Cambio Climático (APMT, 2015), es más visible y menos previsible en los episodios cada vez más frecuentes y de mayor intensidad, en eventos extremos que se traducen en inundaciones, sequías y granizadas. El incremento en las temperaturas eleva los requerimientos de agua en los cultivos que, bajo escenarios de cambio climático, podrían representar significativas reducciones en los rendimientos de los cultivos.

Adaptarse al cambio climático es un reto, en el que todos tenemos que tomar nuestras medidas porque somos un país en desarrollo. Las sequías, inundaciones, eventos climáticos severos y el aumento en el nivel medio de los océanos, resultarán probablemente en escasez de alimentos, aumento de enfermedades transmitidas por vectores y daños en la infraestructura y la degradación de recursos naturales, (Fröde y Sch Lwedersky, 2011).

Según Mora *et al.* (2014), el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos se predice como un problema potencial, reduciendo la cantidad de agua para la agricultura, la industria y el uso doméstico.

En el contexto del cambio climático, en embalses de agua se tienen pérdidas de agua por dos motivos: (i) filtraciones a través de la plataforma y los taludes que definen el vaso y (ii) evaporación a la atmosfera (Molina, 2004).

En el Altiplano, los atajados son reservorios importantes para el acceso al agua para la familia y el consumo del ganado durante gran parte del año. Los efectos del cambio climático afectan la disponibilidad del agua en atajados por el acortamiento y variabilidad de la época de lluvias, el aumento de la temperatura que repercute en una mayor pérdida de agua por evaporación.

1.2 Formulación del problema

Según Andersen y Jemio (2015), el agua posiblemente es el recurso más indispensable del mundo: alimenta y sostiene a todos los seres vivos, por lo cual su abastecimiento debe ser imprescindible. Existe una relación directa entre la abundancia de agua, la densidad de población y la calidad de vida. A medida que la población mundial crece, la presión sobre los limitados recursos hídricos también. A menos que los recursos hídricos se gestionen correctamente, la escasez puede ser un obstáculo para el desarrollo económico como también para el progreso social.

Con el tiempo se puede decir que debido al calentamiento global se ha ido incrementando la temperatura, por lo que se tiene más evaporación de agua expuestas a la radiación solar, y es, por lo tanto, necesario hacer un análisis de la intensificación del ciclo hidrológico (Huntington, 2006).

La cosecha de agua es beneficiosa en zonas de escasas de agua o regiones áridas y semiáridas. Estas regiones cuentan con pocas o simplemente falta fuentes permanentes de agua, y además la concentración de lluvias se da en periodos cortos del año, la distribución de lluvias es irregular en la época húmeda (PROAGRO-GIZ, 2012).

En consecuencia, bajo este contexto, la cosecha de agua con atajados en la época de estiaje (sequía) se constituye en la principal fuente de agua para el consumo del ganado y el uso doméstico familiar, por lo que es importante estudiar el volumen de pérdidas por evaporación y en contexto de cambio climático.

1.3 Justificación de la investigación

Conocer el comportamiento de la evaporación local puede ser de gran importancia para proyectar la falta o disponibilidad de agua para las actividades agrícolas. Por lo que, sería importante conocer ¿Por qué las aguas de los atajados se pierden antes del inicio de la época de lluvias? ¿Existe algún tipo de influencia climática o temporal que hace que el espejo de agua no tenga suficiente retención? ¿Las pérdidas de agua están influidas por los factores físicos de las construcciones de *quthañas*? ¿Existe alguna sospecha que podría estar ligado a los efectos del cambio climático, en términos de elevación de temperaturas y variación de los patrones de precipitaciones?

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

- Evaluar la pérdida de agua por evaporación en atajados (*quthañas*) en un escenario de cambio climático en la comunidad Laka Pucara del Municipio de Corocoro.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis de autocorrelación en las series de tiempo a través de las precipitaciones en el municipio de Corocoro.
- Analizar el comportamiento histórico normal del volumen de evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo "A".
- Estimar la proporción del volumen de evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Autocorrelación de series de tiempo de precipitaciones

Según Barrera (2004), la autocorrelación es el estudio de la independencia de una serie de datos entre sí o estudiar si los datos de una serie son aleatorios entre sí. También se denomina correlación serial o dependencia temporal. Esto es, que exista dependencia entre un valor y el siguiente en la escala temporal. Este hecho es el que sucede en la gran mayoría de series meteorológicas, pero depende de la escala temporal de trabajo.

El gráfico temporal es una herramienta muy útil para detectar la presencia de autocorrelación. Si los residuos están incorrelacionados, entonces se deben distribuir aleatoriamente por encima o por debajo de su media, que será cero si el modelo incluye un término constante. Por el contrario, si los residuos están positivamente correlacionados, observaremos en el gráfico temporal rachas por debajo y encima de la media.

Por su parte Mauricio (2007), menciona que una serie temporal (o simplemente una serie) es una secuencia de N observaciones (datos) ordenados y equidistantes cronológicamente sobre una característica (serie univariante o escalar) o sobre varias características (serie multivariante o vectorial) de una unidad observable en diferentes momentos.

Una serie de tiempo es una colección de datos obtenidos por mediciones de algún evento natural o inducido, los cuales son reunidos sobre la misma variable, bajo las mismas condiciones a lo largo del tiempo y con intervalos de la misma medida. Un propósito, del análisis de series de tiempo es modelar el mecanismo que da lugar a la serie observada, para pronosticar los valores de su comportamiento futuro, a partir de los cuales, sea posible llevar a cabo una planeación y toma de decisiones (Méndez, 2013).

Hoy en día, diversas organizaciones requieren conocer el comportamiento futuro de ciertos fenómenos con el fin de planificar y predecir lo que ocurrirá con una variable en el futuro a partir del comportamiento de esa variable en el pasado (Ríos, 2008).

Según Reyes (2007), la aplicación de estos métodos tiene dos propósitos: comprender las fuerzas de influencia en los datos y descubrir la estructura que produjo los datos observados. Ajustar el modelo y proceder a realizar pronósticos, monitoreo, retroalimentación y control en avance.

La posibilidad de estimar los impactos del cambio climático depende crucialmente de la disponibilidad de datos simultáneos sobre el objeto y el clima. Las series de tiempo, son datos sobre el mismo objeto en varios puntos en el tiempo (PIB per cápita, temperatura promedio anual y precipitación total anual), que se usan para estimar la relación entre el clima y los rendimientos agrícolas, la relación entre temperaturas extremas y mortalidad humana (Andersen y Jemio, 2015).

2.1.1 Serie histórica de precipitación

El historial de variables climáticas es la esencia para la predicción de su comportamiento futuro. Así para poder descifrar el futuro es necesario entender el pasado para lo cual existen diversos métodos de análisis. La mayoría de estos métodos se fundamentan en el comportamiento estadístico que describen las series de tiempo (Sánchez *et al.*, 2007).

Tradicionalmente, el país está dividido en tres regiones geográficas: Altiplano, valles y llanos, cuyos climas varían ampliamente de una región a otra. En consecuencia, el Altiplano boliviano se caracteriza por contar las precipitaciones de mayor variabilidad en el territorio nacional, con un promedio de 474 mm anuales (García *et al.*, 2015).

PNUD (2011), con el cambio climático el clima es más impredecible y severo en situaciones de sequía y calor intenso. Las lluvias llegan más tarde y se ha acortado la época entre la primera y la última lluvia. Las precipitaciones son más fuertes y más cortas, los espacios entre una precipitación y otra son más largos.

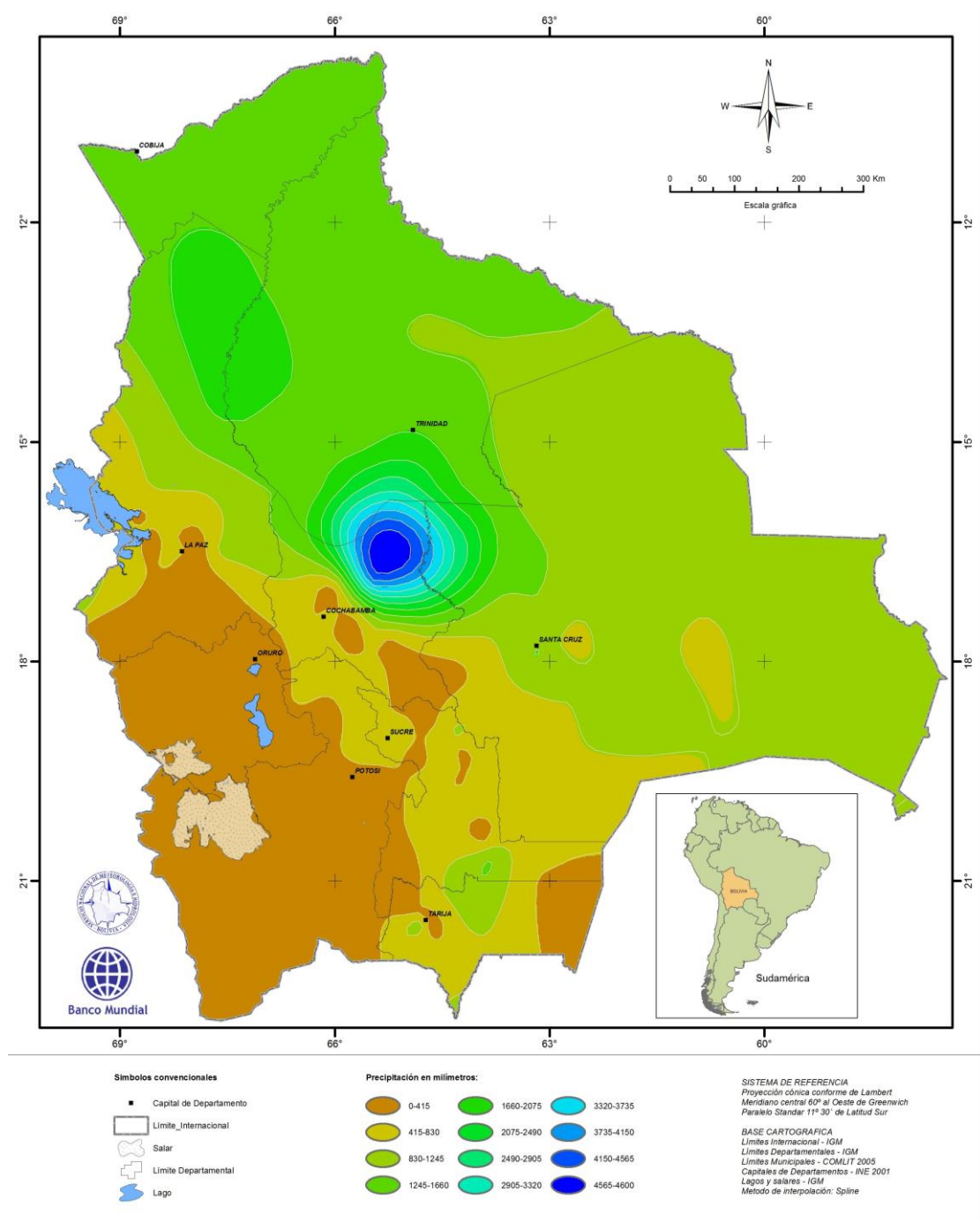
El registro meteorológico de la precipitación es fundamental al ser representativo de las variaciones climáticas a nivel regional o local. En términos estadísticos la variabilidad de una serie climática puede definirse y evaluarse a partir de los índices de dispersión, propios de la estadística descriptiva. Las medidas

estadísticas de dispersión permiten evaluar la mayor o menor relevancia de la presencia de años anómalos con respecto al normal (Flores, 2012).

García *et al.* (2006), muestra tendencias en la variación de los patrones climatológicos con el análisis de 28 estaciones meteorológicas (excluyendo Beni y Pando) en series de 30 años de observación. Mayor concentración de la precipitación, mayor frecuencia de tormentas con menor número de días con lluvia, mayor frecuencia de granizo y reducciones en los caudales de los ríos.

Según SENAMHI (2013), en Atlas Climatológico de Bolivia muestra la distribución de promedio anual de las precipitaciones en el periodo 1975 - 2010 que describe un máximo de precipitación alrededor de la región del Trópico de Cochabamba (sector tropical de las provincias Chapare, Carrasco, Ayopaya y Tiraque) y parte del Norte Integrado de Santa Cruz (provincias Ichilo, Sara y Santiesteban); que describen valores hasta 4800 milímetros. Se puede observar otro máximo secundario entre las provincias Iturrealde del Departamento de La Paz y José Ballivián del Departamento del Beni con montos acumulados entre 2200 y 2500 milímetros de precipitación. Independientemente de los máximos mencionados, la distribución anual de precipitaciones en Bolivia se caracteriza por un gradiente de mayor a menor de norte a sur (donde las mayores cantidades se registran en Pando y las menores cantidades en el Chaco) y de este a oeste (mayores cantidades en el extremo este del Departamento de Santa Cruz y las menores cantidades en el extremo oeste del Departamento de La Paz y Oruro). También se puede visualizar la distribución de precipitaciones en el Altiplano con las mismas características del nivel nacional, con mayores cantidades alrededor del Lago Titicaca hasta con montos entre 500 y 900 milímetros de precipitación con gradientes que van disminuyendo hacia el sur, visualizándose cantidades de precipitaciones entre 210 y 250 milímetros al sudoeste del Departamento de Potosí, quedando finalmente la zona con menores cantidades de precipitaciones en los alrededores del límite entre las provincias Pacajes del Departamento de La Paz y Sajama del Departamento de Oruro con montos inferiores a 180 milímetros.

Figura 1: Distribución de precipitación (1975 – 2010) Atlas Climatológico de Bolivia.



Fuente: SENAMHI (2013).

2.2 Evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo “A”

2.2.1 Evaporación del agua

Se define la evaporación como el fenómeno consistente en el paso del agua del estado líquido al estado gaseoso, se realiza con absorción de calor, lo que origina que el estado de agitación de las moléculas aumente y rompan los enlaces que hay entre ellas, pasando a un estado de mayor agitación (Bateman, 2007).

Según Johnson (2009), la evaporación se produce por efecto de la radiación solar, el viento y las diferencias de tensión de vapor entre el agua y la atmósfera o déficit higrométrico. De esta forma, la evaporación es proporcional al déficit higrométrico y se relaciona inversamente a la presión atmosférica total.

Desde el punto de vista hidrológico (Molina, 2004), la evaporación es una magnitud física que describe la transferencia natural del agua de las fases líquida y sólida a la fase gaseosa y su difusión a la atmósfera.

Se expresa como:

$$E = \frac{dm}{dt}$$

E = tasa de evaporación por unidad de área.

dm = masa de agua por unidad de área que pasa al estado de vapor.

dt = Intervalo de tiempo.

La evaporación provoca un descenso de la temperatura del agua. Cada gramo de agua evaporada quita unas 600 calorías del contenido energético del agua superficial. Estas grandes cantidades de calor, en la naturaleza son suministradas por la radiación solar, por el intercambio de calor sensible con la capa de aire en contacto o por la energía almacenada en el cuerpo de agua.

Las condiciones básicas para la evaporación son:

- Existencia de una fuente de energía, que en condiciones naturales es la radiación solar, el calor sensible de la atmósfera o el calor almacenado en el cuerpo del agua.

- Existencia de un gradiente de concentración de vapor, es decir una diferencia entre la presión de vapor de saturación existente en la superficie de agua, y la presión de vapor actual del aire.

2.2.2 Tanque evaporímetro tipo “A”

Uno de los métodos más utilizados para medir la evaporación superficial consiste en la instalación de tanques de evaporación, permiten cuantificar la altura de agua evaporada en un período de tiempo igual o mayor a un día, obteniéndose una tasa media de evaporación.

Según MVOTMA (2011), la evaporación es una demanda climática que tiene el embalse. Se estima multiplicando el valor de “Evaporación de tanque A” por un coeficiente de corrección tanque – embalse (0,7).

El tanque evaporímetro es, sin lugar a dudas, el instrumento más empleado en la actualidad para predecir la evaporación de embalses, la relación entre la evaporación en un lago y la evaporación en el tanque (mediante el coeficiente del tanque) es bastante consistente (Molina, 2004).

$$E_o = E_{pan} * K_{pan}$$

E_o = Evaporación en lamina libre.

E_{pan} = Evaporación del tanque.

K_{pan} = Constante de proporcionalidad (Varía entre 0,6 y 0,85).

La metodología de medición consiste en adicionar la cantidad de agua necesaria para elevar la altura de agua hasta un nivel fijo, obteniéndose un grado de error menor a 0,5 mm (Johnson, 2009).

El tanque evaporímetro Clase A, corresponde a una bandeja de medición de 1,21 m de diámetro y 0,255 m de profundidad, construido en metal o hierro galvanizado. Debe ser ubicado sobre un enrejado de madera a 0,15 m del suelo, lo que permite la circulación de aire por su sección inferior y su correcta nivelación (Johnson, 2009). En caso de no ser posible instalar tanques evaporímetros estándar, estos pueden ser reemplazados por recipientes de

características similares, con diámetro conocido y alturas graduadas en su interior.

Es necesario cubrir los evaporímetros con mallas para evitar la pérdida de agua debido a pájaros y otros animales que la beben. Lo usual es que la evaporación medida en los evaporímetros sea mayor que en el embalse en estudio, por varias razones, como la capacidad calorífica del material, el color, el tamaño con el que está construido el tanque evaporador, y el albedo, que puede ser diferente para el embalse y para el tanque (Molina, 2004).

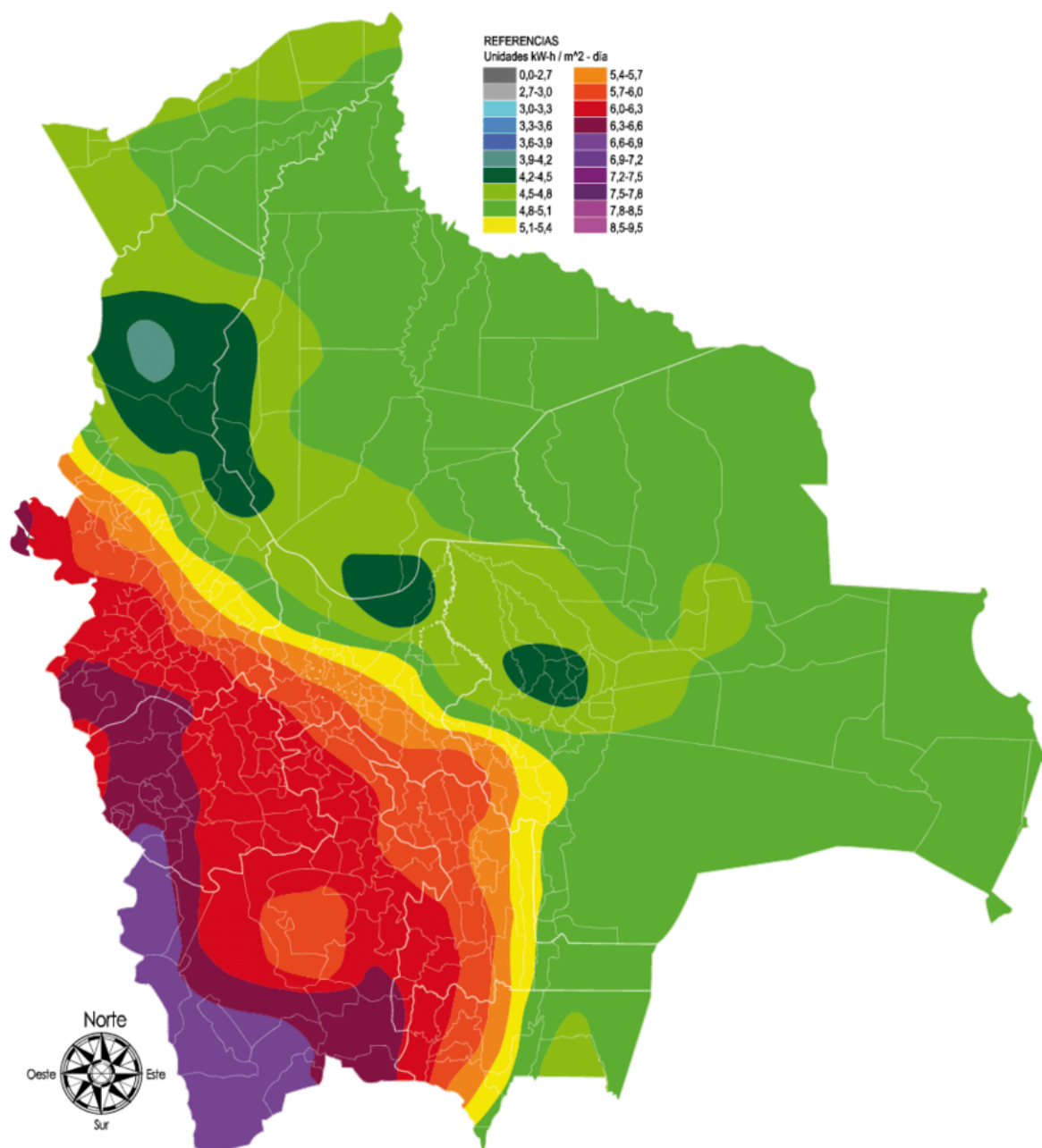
2.2.3 Factores meteorológicos que afectan la evaporación

Los principales parámetros meteorológicos que se deben considerar se presentan a continuación:

2.2.3.1 Radiación y ciclo solar

El proceso de la evaporación está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación (FAO, 2006).

Figura 2: Distribución de la radiación total (Watts/hr/día).



Fuente: Universidad Mayor de San Simón, 2010.

Según Duhau, S. (2010), la cantidad de energía solar que llega a la Tierra afecta la temperatura atmosférica. A su vez, esta energía depende de la actividad del ciclo solar, cuya manifestación es la cantidad de manchas que oscurecen temporalmente la superficie del Sol, en una periodicidad media de 11 años, estudios muestran reducción drástica desde el máximo del ciclo 19 al 20, el ascenso del 20 al 21 y la reducción gradual del 21 al 23.

Torregrosa, A. (2017), por actividad solar se entiende el conjunto de variaciones espacio-temporales que acontecen en el Sol conectadas o que tienen su explicación en el campo magnético solar en una periodicidad de 11 años. Destacar que no todos los ciclos tienen la misma duración ni tampoco la intensidad de la energía radiada es la misma.

2.2.3.2 Temperatura del aire

Según FAO (2006), la radiación solar absorbida por la atmosfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evaporación será mayor que en un día nublado y fresco.

Las tasas de evaporación crecen a medida que aumenta la temperatura. Diversos estudios han demostrado que los océanos, mares, lagos y ríos proveen alrededor del 90% de la humedad a la atmosfera vía evaporación, el restante 10% proviene de la transpiración de las plantas (PHI, 2018).

Las proyecciones mundiales sobre el clima según el cuarto informe, elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) ha llegado a la conclusión de que la temperatura global media de la atmósfera probablemente aumentará entre 1.8 °C y 4.0 °C para finales de este siglo, dependiendo de los escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

2.2.3.3 Humedad del aire

El aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmosfera. En cambio, en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evaporación (FAO, 2006).

2.2.3.4 Velocidad del viento

FAO (2006), el proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación y evapotranspiración del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evaporación disminuye. La demanda evaporación es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente.

2.2.3.5 Precipitación

Es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, incluye lluvia, nieve y granizo; también considerada como rocío y escarcha (Sánchez, 2018). La precipitación junto a la evaporación constituye la forma mediante la cual la atmosfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua (Tapia, 2016).

Según Yugar y Cahuana (2009), la precipitación es la fuente primaria del agua en la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. FAO (2000), los datos importantes se obtienen de las estaciones meteorológicas que cuenten con datos de precipitación mensual de por lo menos diez años.

2.3 Volumen de evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento

2.3.1 Cosecha de agua con atajados

Según Villegas E. y Villegas, A. (2006), un atajado es un reservorio artificial excavado en suelo natural con equipo pesado (tractor a orugas) y emplazado en laderas con ligera pendiente, que almacena agua en el periodo de lluvias proveniente de la escorrentía superficial y esta es utilizada para diferentes usos (riego, pecuario, doméstico, etc.) durante la época de estiaje.

Recoge agua de lluvia que escurre superficialmente; consiste en una excavación de tierra, con canales de recolección de agua de lluvia, desarenador y canal de ingreso, requiere ser impermeabilizado en caso de que el suelo no retenga agua, para esto la construcción demanda el empleo de maquinaria pesada (PROAGRO-GIZ, 2012).

El área de esorrentía, deben asegurar ciertas condiciones para su eficiente captación y, al mismo tiempo, evitar el arrastre de sedimentos, que tiende acortar la vida útil de la infraestructura (Goetter, 2010).

SEMTA (2000), menciona que las construcciones deberán estar ubicadas en sitios adecuados como son los lugares de pastoreo, con áreas suficientes para la cosecha de agua (mayor a 5 hectáreas), suelo arcilloso y con poco arrastre de sólidos que ocasiona la colmatación por la acumulación de lama y una menor capacidad de almacenamiento de recurso hídrico.

En los últimos años, la demanda de agua en áreas áridas y semiáridas se ha incrementado considerablemente. Los atajados pueden ser una alternativa buena y barata, frente a represas grandes o en combinación con ellas, a fin de captar esta agua y utilizarla de manera eficiente (Tammes *et al.*, 2000).

2.3.2 Pérdidas por evaporación en superficies de agua libre

Las superficies de agua libre (océanos, ríos, lagos, lagunas, embalses, etc.) ocupan más de dos tercios de la superficie total del planeta, reciben la energía solar y pierden agua por evaporación. En la altitud, con la reducción de temperatura, el vapor de agua se condensa y precipita en forma de lluvia (FAO, 2013).

En embalses, las pérdidas de agua se pueden dar por dos motivos: (i) filtraciones a través de la plataforma y los taludes que definen el vaso y (ii) evaporación en la atmosfera. El problema de la impermeabilización del vaso de embalses ha sido ampliamente estudiado, existiendo técnicas mediante el uso de materiales naturales (arcillas) o geomembranas sintéticas (policloruros, polietilenos) que permiten la impermeabilización del embalse (Molina, 2004).

Por el contrario, apenas existen estudios sobre las posibles técnicas para minimizar las pérdidas por evaporación y los niveles de eficiencia que se pueden alcanzar (Martínez *et al.* 2003).

García *et al.* (2006), las diferentes zonas áridas y semiáridas del país muestran tendencias al aumento de la demanda de vapor de agua de la atmósfera y mayores niveles de amplitud térmica, incidiendo sobre el índice de aridez en las regiones semiáridas.

PNUD (2011), la evapotranspiración, por la mayor amplitud térmica en el altiplano y en los valles influye sobre el valor de la demanda atmosférica de vapor de agua (clima de desierto), las tendencias proyectadas al año 2050 muestran claros aumentos de la temperatura máxima y disminución de la temperatura mínima.

La evaporación de cuerpos de agua de embalses es muy poco referida en la literatura científica, y en otras ocasiones presentando conclusiones contradictorias (Molina, 2004).

En atajados (Goetter, 2010), la pérdida del agua por evaporación a lo largo de los meses de estiaje es alta. La pérdida hasta fines de octubre, tomando valores de tasa de evaporación de zonas como Aiquile o Mizque, suma el 63% del volumen total almacenado. Es decir, si el total almacenado es aproximadamente 1330 m³, en caso de que no se utilizaría el agua durante la época de estiaje, hacia fines de octubre restaría solo 500 m³ de agua utilizable.

2.3.3 Factores que afectan la evaporación en atajados

La pérdida por evaporación del agua en atajados, está en relación con la temperatura, humedad, radiación solar, la fuerza y frecuencia del viento. El volumen de pérdida por otra parte está en relación con la superficie del espejo de agua. El aumento de la temperatura o la disminución de la humedad ambiental incrementan la evaporación, el incremento de la insolación y del viento también aumentan la evaporación (Tammes *et al.*, 2000).

Dentro del balance hídrico en el sur de la cuenca endorreica, la evapotranspiración es mayor a la precipitación, lo cual implica que al final las

aguas se evaporan totalmente, dando lugar a los vastos depósitos de sal en las zonas inferiores de la cuenca (APMT, 2015).

Nordgren (2011), respecto a los cambios ocurridos en fuentes de agua, como lagunas, ojos de agua, etc., los entrevistados coinciden en señalar que estos cuerpos de agua tienden a durar menos en la época seca e incluso llegan a secarse.

2.3.3.1 Volumen de agua

Según Yugar y Cahuana (2009), los lagos o embalses profundos tienen mayor capacidad de almacenamiento de calor que los almacenamientos someros, este hecho tiene una influencia notoria en las variaciones estacionales y aun en la fluctuación diaria de la evaporación.

2.3.3.2 Salinidad y partículas suspendidas

Según Molina (2004), cuando un soluto se disuelve en agua, la presión de vapor de la solución es menor que la del agua pura y por lo tanto causa reducción de la evaporación. Para condiciones idénticas, la tasa de evaporación del agua del mar (35000 ppm de sales disueltas) es 2 - 3 % menor que la del agua dulce. Aún para agua del mar, la reducción en evaporación nunca sobrepasa un porcentaje significativo, por lo que los efectos de la salinidad pueden despreciarse en la estimación de la evaporación de un embalse.

Sobre partículas suspendidas Johnson (2009), menciona que el contaminante más común del agua es la tierra en forma de sólidos en suspendidos totales. La calidad del agua es importante, porque la tensión de vapor del agua disminuye a medida que aumenta su contenido de sólidos disueltos.

2.3.3.3 Tamaño de la superficie libre

A medida que el tamaño de la superficie evaporante crece, la magnitud de evaporación decrece, llegando a ser insignificante en grandes lagos. Por otro lado, cuando la superficie evaporante se reduce, la magnitud de la evaporación se incrementa (Yugar y Cahuana, 2009).

2.3.3.4 Superficie de evaporación

Según Molina (2004), los procesos de la evaporación desde una superficie de agua y desde un suelo, son diferentes. La tasa de evaporación desde una superficie de suelo completamente saturada se podría tomar como aproximadamente igual a la evaporación desde una superficie de agua cercana, bajo las mismas condiciones meteorológicas. La evaporación desde los suelos continuará mientras que la humedad del suelo exista.

2.3.3.5 Infiltración

Breña y Jacobo (2006), mencionan que, la cantidad de agua que atraviesa la superficie del terreno por unidad de tiempo y se desplaza al subsuelo recibe el nombre de ritmo o tasa de infiltración. El suelo puede estar formado por un medio poroso, por roca consolidada fracturada, o por una combinación de ambos.

Maldonado (2004), la velocidad de infiltración en el suelo está relacionada con la intensidad de precipitación y depende de las características físicas de este como la textura estructura, compactación, etc., además del contenido de humedad que al aumentar este la cantidad de agua infiltrada disminuye.

Según Tammes *et al.* (2000), en muchos atajados puede haber pérdidas por filtraciones, ya que no se cuenta con suelos completamente impermeables. Al incrementarse el porcentaje de arena o limo en la base del atajado y los terraplenes, se incrementa el riesgo de pérdidas por filtraciones. En atajados recién construidos existen pérdidas por filtraciones, porque los terraplenes aún no están asentados. Los suelos con un elevado contenido de arcilla caolinita son los más aptos para la construcción de atajados.

FAO (2019), la permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. El tamaño y número de poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

En muchos atajados Bates *et al.* (2008), puede haber pérdidas por filtraciones, al incrementarse el porcentaje de arena o limo en la base del atajado y los terraplenes. En atajados recién construidos existen pérdidas por filtraciones

porque los terraplenes aún no están bien asentados, disminuyen paulatinamente durante los primeros años después de la construcción.

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso. Esta medida permite la predicción de la transmisión de agua y es un buen índice del grado de compactación por medio del cálculo de la porosidad, responsable del drenaje rápido del exceso de agua (Flores y Alcalá, 2010).

En agricultura, la masa del suelo se refiere al peso después de secar el suelo en estufa a 105° C durante 24 horas o hasta peso constante.

Cuadro 1: Densidad aparente según textura

Textura	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenas	1,6 a 1,7
Francos	1,3 a 1,4
Arcillas	1.0 a 1,2
Suelos orgánicos	0,7 a 1,0

Fuente: Castillo, 2005.

CAPÍTULO III.

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis General

- El volumen de pérdida de agua por evaporación en atajados (*quthañas*) no es significativo respecto al promedio normal en un escenario de cambio climático en la comunidad Laka Pucara, municipio de Corocoro, Provincia Pacajes.

3.2 Hipótesis Específicas

- Las anomalías del análisis de autocorrelación en series de tiempo de precipitaciones no son significativas con respecto al promedio normal en el municipio de Corocoro.
- Las anomalías del análisis del comportamiento histórico normal del volumen de evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo "A" no es significativo al promedio normal.
- La proporción del volumen de evaporación de agua en atajados no es significativa al tiempo de almacenamiento de agua en atajados.

3.3 Identificación de Variables

Las variables identificadas son:

- Patrones de precipitación: autocorrelación de series de tiempo en base a registros históricos de precipitación del SENAMHI (1971 - 2018).
- Volumen de evaporación del agua: datos históricos de evaporación, registro y cálculo de evaporación mediante el tanque evaporímetro de tipo A y método del balance hídrico en atajados.

3.4 Operacionalización de Variables

Cuadro 2: Operacionalización de variables

Variables	Indicador	Valor Final	Tipo de Variable
Variación de patrones de precipitación.	Precipitación	mm/día mm/mes mm/año	Continua
Tasas de Evaporación.	Evaporación	mm/día mm/mes mm/año	Continua

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Matriz de Consistencia

Cuadro 3: Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
¿Por qué las aguas de los atajados se pierden antes del inicio de la época de lluvias? ¿Existe algún tipo de influencia climática o temporal que hace que el espejo de agua no tenga suficiente retención? ¿Existe alguna sospecha que podría estar ligado a los efectos del cambio climático, en términos de elevación de temperaturas y variación de los patrones de precipitaciones?	Evaluar la pérdida de agua por evaporación en atajados (<i>quthañas</i>) en un escenario de cambio climático en la comunidad Laka Pucara del Municipio de Corocoro.	El volumen de pérdida de agua por evaporación en atajados (<i>quthañas</i>) no es significativo respecto al promedio normal en un escenario de cambio climático en la comunidad Laka Pucara, municipio de Corocoro, Provincia Pacajes.	Identificación de variaciones en los patrones de precipitación Pérdida de agua por evaporación en tanque evaporímetro de tipo A y atajados.	Recopilación de datos históricos de precipitación y análisis de autocorrelación, correspondientes a la estación meteorológica de Calacoto, período 1971 al 2018 registrados por SENAMHI. Cálculo de evaporación del agua mediante tanque evaporímetro tipo "A" y el método del balance hídrico en atajados.

Fuente: Elaboración propia.

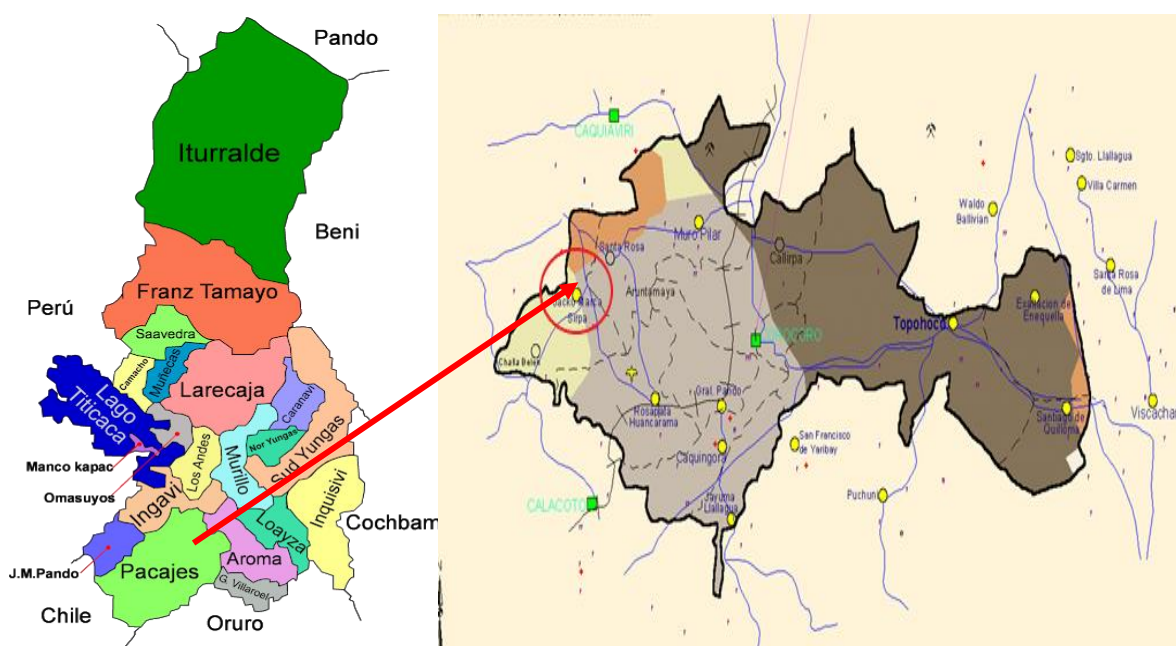
CAPÍTULO IV.

4. METODOLOGÍA

4.1 Localización

El presente de trabajo de investigación se realizó en la Comunidad Laka Pucara situada al oeste del Municipio de Corocoro, Provincia Pacajes del Departamento de La Paz, Bolivia. Geográficamente se encuentra a 110 kilómetros al sur de la Ciudad de La Paz, a una altura de 3892 m.s.n.m. El municipio de Corocoro se encuentra entre los paralelos $68^{\circ}45'$ y $68^{\circ}05'$ LO y entre $17^{\circ}25'$ y $17^{\circ}03'$ LS (GMC, 2005).

Figura 3: Localización del municipio de Corocoro y Comunidad Laka Pucara.



Fuente: SIG – UDAPE.

4.2 Características climáticas

4.2.1 Precipitación

El Altiplano Boliviano se caracteriza por contar con las precipitaciones de mayor variabilidad en el territorio nacional, con un promedio de 474 mm anuales (García, *et al.*, 2015).

El municipio de Corocoro presenta un clima frío y seco, 200 a 405 mm de precipitación pluvial media anual y 200 días de helada al año; con variaciones diarias de temperaturas y marcado déficit hídrico que permiten definirla como región semiárida. La precipitación pluvial, se concentra en los meses de: diciembre, enero, febrero y marzo, el resto de los meses presenta una precipitación poco significativa (GMC, 2005). Las bajas precipitaciones ocasionan sequía, definida como la escasez de agua causada por el desbalance entre la precipitación y la evaporación o evapotranspiración (Andressen, 2006).

El periodo de lluvias en la región se ha acortado y que la intensidad de las precipitaciones se ha incrementado en los últimos 30 años. Los cambios en el clima provocan, entre otras cosas, una reducción de la superficie cubierta por nieve y por glaciares, alteraciones en los patrones de precipitación, disminuciones en la disponibilidad de agua, y una mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos (CEPAL-BID, 2014).

4.2.2 Temperatura

Según SENAMHI (2013), las temperaturas máximas medias en el altiplano ubicado a 3800 metros sobre el nivel medio del mar, se observan promedios que fluctúan entre los 12° C y 14° C y más arriba sobre la Cordillera Oriental con promedios menores a 2° C (datos de la estación meteorológica de Chacaltaya). Las temperaturas más bajas se encuentran en las partes altas de la Cordillera Oriental con promedio anual de -7° C, seguido por zonas en la frontera entre los Departamentos de Oruro y La Paz con temperaturas mínimas medias entre -5° C y -3° C.

El municipio de Corocoro presenta un clima frío y seco, con una temperatura media anual de 7 a 10°C, con variaciones diarias de temperatura y marcado déficit hídrico que permiten definirla como micro región semiárida (GMC, 2005).

La temperatura media ambiente varía en función a estaciones del año, los meses de mayor temperatura están entre octubre y marzo (estación primavera y verano), con un promedio de 20.2°C y las temperaturas más bajas se presentan entre meses de junio, julio y agosto (estación de invierno) registrándose una media de - 8.7 °C.

El Municipio de Corocoro enfrentará uno de los impactos más fuertes producto del cambio climático, de acuerdo a estudios internacionales. Los modelos desarrollados prevén tres amenazas para la región del Altiplano Sur, un aumento de las temperaturas de superficie, lo que aumentaría los niveles de evapotranspiración, que influirá en la humedad del suelo y por tanto afectará las condiciones de producción agropecuaria (GAMC, 2016).

4.2.3 Humedad relativa

De acuerdo a registros de la estación meteorológica de Calacoto, se observa que entre las gestiones del 1973 al 2009, el promedio de la humedad relativa es del 47 %. La humedad relativa va disminuyendo gradualmente entre los meses con mayor y menor precipitación, el detalle del mismo es el siguiente:

Cuadro 4: Humedad relativa (%)

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Humedad relativa (%)	60	60	57	50	41	42	42	42	41	42	44	48	47

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, datos históricos 1973 - 2009.

4.2.4 Radiación solar

Según Lucano y Fuentes (2010), Bolivia por su posición geográfica, se encuentra dentro de una franja de territorio que recibe la mayor radiación solar del mundo, juega a favor otras variables como una baja nubosidad y un perfil geográfico diverso, teniendo pequeñas diferencias en las tasas de radiación entre invierno y verano. La presencia de la Cordillera de los Andes modifica en alguna medida la radiación solar, beneficiando con una mayor tasa a las zonas altas como el Altiplano.

Se observó que la parte noreste de Bolivia, a partir de la Cordillera Oriental presenta los valores más bajos de radiación global, entre 3.9–5.1 kW-h/m²-día, en tanto que, en la zona suroeste la radiación solar aumenta con valores entre 5.1–7.2 kW-h/m²-día (Lucano, 2010).

En la región se presenta una mayor radiación solar durante los meses de octubre a diciembre, con valores que van desde 27.3 a 27.2 MJ/m²/día respectivamente. También podemos señalar que se observan valores altos a finales de la época seca y principios de la época húmeda (APMT, 2015).

Cuadro 5: Radiación solar mensual para el periodo de 1980 a julio 2013

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rad (MJ/m ² - día)	24,9	24,9	23,8	23,2	22,1	20,6	21	23,5	25,4	27,3	28,5	27,2

Fuente: APMT, 2015.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Materiales

4.3.1.1 *Materiales de Campo*

- Planilla de registro.
- Cuaderno de apuntes.
- Lápiz, bolígrafo.
- Cámara fotográfica.
- Tanque evaporímetro tipo A.
- Limnómetro (varilla graduada de 150 cm.)
- Termómetro.
- Wincha de 50 m.
- GPS.

4.3.1.2 *Materiales de Gabinete*

- Computadora.
- Impresora.
- Material de escritorio.

4.4 Metodología

En el relevamiento de información, se utilizó técnicas cuantitativas para la recolección, procesamiento, análisis de datos históricos y de campo, siguiendo un proceso deductivo y secuencial de la información primaria y secundaria.

4.4.1 Recolección de información

4.4.1.1 Recolección de información primaria

El registro de información de campo se realizó entre marzo del 2018 a febrero del 2019, luego del reconocimiento de campo se siguió el siguiente procedimiento:

a) Tanque evaporímetro tipo A:

- Instalación del tanque evaporímetro tipo A, a una distancia de 5 metros del atajado 2, representativo por estar ubicado al medio de los 3 atajados.
- Protección del tanque evaporímetro con alambre tejido y de púa, para evitar las pérdidas de agua por consumo del ganado y pájaros.
- Registro diario (ciclo de 24 horas) de la altura de pérdidas y/o ganancias del nivel de agua para el cálculo de la evaporación.
- Recarga de agua, para mantener el nivel de agua por encima de los 10 cm.

b) Atajados:

- Identificación de 3 atajados, en coordinación y acuerdo con familia propietaria para evitar el rebaje del ganado.
- Instalación de limnómetros (varillas de madera graduadas de 150 centímetros de altura) en los 3 atajados identificados.
- Registro de altura y diámetro del espejo de agua en 3 atajados, cada 10 días para el cálculo de pérdidas y/o ganancias de agua.
- Prueba de campo para la determinación del coeficiente de infiltración en los 3 atajados.

c) Datos históricos de precipitación y evaporación

- Recopilación y procesamiento de datos meteorológicos históricos del SENAMHI (Estación meteorológica de Calacoto, Patacamaya y San Calixto de la Ciudad de La Paz).

4.4.1.2 Recolección de información secundaria

La recolección de la información secundaria, se efectuó con el objeto de conocer y profundizar el tema en estudio, las características de la zona y experiencias en manejo de cosecha de agua con atajados.

Las fuentes de información revisadas fueron el Plan de Desarrollo Municipal de Corocoro (PDM 2005 - 2009), Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI 2016 -2020), series históricas el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) e investigaciones referidas al cambio climático y evaporación de fuentes de agua.

4.4.2 Autocorrelación de series de tiempo de precipitaciones

Los datos históricos (1971 – 2018) de precipitación del SENAMHI de la estación meteorológica de Calacoto, fueron tomados en cuenta para la zona de estudio, por la cercanía y coincidencia de las características climáticas. Calacoto, se encuentra ubicada aproximadamente a unos 25 km, al sur oeste del municipio de Corocoro situada en latitud $17^{\circ}09'20''$, longitud de $67^{\circ}40'17''$ y una altitud de 3890 m.s.n.m. (GMC, 2005).

Por limitaciones en la disponibilidad de datos históricos, el análisis e interpretación se efectuó mediante el modelamiento de la regresión lineal, autocorrelación simple, de series de tiempo y de comparaciones de variaciones locales entre años, empleando programas de Minitab y Excel.

El análisis de regresión lineal es un método estadístico que ayuda a predecir el comportamiento de una variable dependiente (Y) con respecto a una variable independiente (X). El método sustituye la falta de datos a partir de datos de series estadísticamente próximas, que son conocidas como vecinas (Gidahatari, 2019).

El método de la regresión lineal permite entender y explicar fácilmente el significado de los resultados, es valioso para la toma de decisiones y predice el futuro con base en información anterior. Es rápido de modelar y útil cuando la relación de modelar no es compleja, es bastante empleado cuando no se tiene mucha información.

Entre sus desventajas está, en que no se puede modelar relaciones complejas, no se pueden capturar relaciones no lineales sin transformar la entrada, por lo que se tiene que trabajar para que se ajuste a funciones no lineales.

La completación de datos o registros históricos faltantes, se efectuaron con el programa Excel, empleando la función “pronostico” que calcula o predice un valor futuro en una tendencia lineal usando valores existentes en “X” y “Y” conocidos.

4.4.3 Comportamiento histórico de evaporación del agua en tanque evaporímetro de tipo “A”

4.4.3.1 Análisis histórico normal del volumen de evaporación

Ante la falta de datos históricos de evaporación de la estación meteorológica de Calacoto, el análisis comparativo del comportamiento de evaporación se realizó con datos históricos de estaciones meteorológicas de San Calixto de La Paz (periodo 1942 – 2017) y Patacamaya (periodo 1971 -2016).

Con el fin de contar con datos de evaporación de Calacoto, se realizó cálculos de prueba mediante el **Método Combinado**, planteado por Penman en 1948, que combina la ecuación de balance de energía y la ecuación de transferencia de masa. Según Molina (2004), es la expresión utilizada para el cálculo la evaporación del agua de lagos o embalses, es la siguiente.

$$E_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

E_o = Evaporación de lámina libre (mm/día).

Donde:

$$\Delta = \frac{4.098 * e_{as}}{(273.3 + T)^2}$$

Δ = Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Pa °C-1).

e_{as} = Presión de vapor en la superficie a temperatura T (Pa).

T = Temperatura del aire (°C).

$$\gamma = \frac{C_p * Kh * p}{0.622 * l_v * K_w}$$

γ = Constante psicrométrica (Pa °C-1).

C_p : Calor específico del aire húmedo = 1005 [J kg-1 °C-1]

p: Presión del aire en 2 m de altura = 101.3 [kPa]

K_h = difusividad de calor.

K_w = difusividad de 'eddy' (remolino) del vapor

$K_h/K_w = 1$

l_v = calor latente (J/kg)

$$E_r = \frac{R_n}{\lambda \rho_w}$$

E_r = Evaporación debido a la radiación neta (mm/día).

R_n = Radiación neta.

λ = Calor latente de evaporación.

ρ_w = Densidad del agua.

$$E_a = B(e_{as} - e_a)$$

E_a = Evaporación aerodinámica (mm/día).

B = Coeficiente de transferencia de vapor.

e_{as} = Presión de vapor en la superficie.

e_a = Presión de vapor a la altura de 2 metros.

El método planteado fue descartado, por la falta de información meteorológica requerida y los datos calculados resultaron fuera de contexto en relación al promedio histórico de Patacamaya.

Al respecto Chow *et al.* (1999), menciona que la fórmula de Penman ofrece buenos resultados para el cálculo de evaporación cuando toda la información meteorológica requerida se encuentra disponible y todas las suposiciones que estableció Penman se satisfacen. Estas suposiciones pueden sobrestimar apreciablemente la evaporación en condiciones calmadas y húmedas y a subestimarla en condiciones de vientos secos y turbulentos

4.4.3.2 Evaporación anual del agua en tanque tipo A

Para el presente estudio de investigación, con fines comparativos y de aproximación en el comportamiento de la evaporación de agua en atajados, se

instaló el tanque evaporímetro tipo A, al lado del atajado 2, a una distancia de 5 metros, eligiéndose el mismo por estar ubicado al medio de los 3 reservorios.

Las pérdidas por evaporación se calcularon mediante el registro diario (ciclos de 24 horas) de pérdidas o ganancias de altura agua medida en el tanque evaporímetro (mm/día).

El tanque tipo "A" tiene un diámetro de 121.9 cm y una profundidad de 25.4 cm. la profundidad del agua es mantenida entre 10 y 20 cm. Está construido de hierro galvanizado no pintado y colocado sobre un enrejado a 15 cm sobre el nivel del terreno (López, 2008).

El volumen de evaporación entre dos observaciones del nivel del agua en el tanque se determina mediante la fórmula:

$$V_{eva} = P \pm H$$

Dónde:

V_{eva} = Volumen de evaporación (mm/día).

P = Altura de precipitaciones producidas entre dos mediciones.

H = Altura de agua añadida (+) o sustraída (-) del tanque.

El valor de evaporación diaria obtenido del tanque deberá ajustarse para tener en cuenta las ganancias o pérdidas de calor a través de las paredes y el fondo. En estaciones secas y zonas áridas, la temperatura del agua en el tanque es menor que la temperatura del aire, y el coeficiente puede ser 0.6 o menos.

$$V_{eva} = V_{eva} * K$$

Dónde:

V_{eva} = Volumen de evaporación (mm/día)

K = Constante de proporcionalidad (0,6 para zonas áridas).

4.4.4 Evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento

4.4.4.1 Estimación de la evaporación por el método del balance hídrico

Está basado en la ecuación de conservación de masa para un volumen de control de interés. Consiste en efectuar un balance de masa para el cuerpo de agua en estudio, despejando el volumen de agua evaporado en un cierto periodo como función de todas las demás variables del balance, que deben ser conocidas (Molina, 2004). Dicha ecuación se puede plantear de la siguiente forma:

$$E = \Delta S + (Q1 - Q2) + P + ESD - I$$

Donde:

E = Evaporación desde el embalse en el intervalo de tiempo.

ΔS = Cambio en el agua almacenada en el embalse en intervalo de tiempo.

Q1 = Caudal de entrada de embalse.

Q2 = Caudal de salida de embalse.

I = Infiltración desde o al embalse en el intervalo de tiempo.

P = Precipitación directamente sobre el embalse en el intervalo de tiempo.

ESD = Escorrentías superficial directa alrededor del contorno del embalse en el intervalo de tiempo.

Los errores en el cálculo de la evaporación se deben en esencia a los errores en la estimación de las variables independientes, principalmente las características del suelo que influyen en la infiltración.

Por las características propias de los atajados en estudio, para calcular la evaporación en atajados se tomó las variables del volumen total de pérdidas y/o ganancias y el volumen de infiltración, quedando la ecuación con la siguiente relación:

$$E = \Delta S - I$$

E = Evaporación desde el embalse en el intervalo de tiempo.

ΔS = Cambio en el agua almacenada en el atajado en intervalo de tiempo.

I = Infiltración desde o al atajado en el intervalo de tiempo.

En la ecuación no se tomó en cuenta las pérdidas de agua por el consumo del ganado, en razón de que al inicio de la investigación se buscó y acordó con la familia propietaria en evitar el consumo de agua por el ganado, misma que fue facilitada por contar con otros reservorios cercanos.

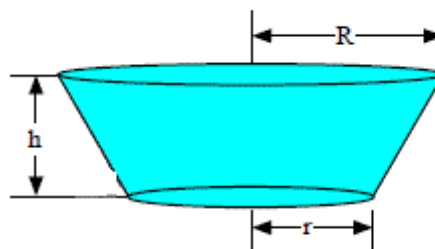
En la comunidad, cada familia cuenta con 3 hasta 5 atajados que están destinados principalmente para el brebaje del ganado, observándose en promedio entre 4 a 5 bovinos y 30 a 60 ovinos por familia.

4.4.4.2 Volumen de agua en atajados

La cantidad de agua retenida en los atajados, se calculó mediante el método citado por Tammes *et al.* (2000), definiendo la forma o vaso del atajado como un tronco de pirámide invertido.

En el presente estudio, por la forma geométrica del vaso del atajado, el volumen total o capacidad de almacenamiento de agua, se calculó mediante la figura de un tronco de cono invertido:

Figura 4: Esquema de retención de agua en atajados



$$V_{tc} = \frac{h * \pi}{3} (R^2 + r^2 + R * r)$$

V_{tc} =Volumen tronco cono (m³) (Volumen de agua en atajados)

r = radio base (m)

R = radio superior (m)

h = Altura de diseño (base inferior y superior) (m)

El cálculo del volumen de pérdidas de agua mensuales, se adecuó a la figura del cilindro:

$$V_c = \pi r^2 h$$

V_c = Volumen del cilindro

Π = Constante Pi

r = radio

h = altura

Para calcular la pérdida mensual del volumen de agua en atajados, se realizó el siguiente procedimiento:

- Altura (h): identificación de 3 atajados e instalación de 3 varillas (limnómetro) de madera graduada de 150 centímetros de altura, que fueron registrados cada 10 días.
- Radio (r): el cálculo del radio del vaso y/o espejo de agua del atajado se realizó mediante el uso wincha de 50 metros, cada 10 días.

Sobre la ganancia de altura de agua en atajados y tanque evaporímetro de tipo A por efecto de la lluvia, granizo, nieve o la recarga de agua en tanque evaporímetro, se procedió en tomar como un valor cero (sin pérdidas y/o ganancias) para los cálculos de pérdidas por evaporación, esto de acuerdo al registro diario cuando hubiese existido cualquiera del tipo de precipitaciones o recarga de agua para el caso del tanque evaporímetro. En sentido todos los días con registro de precipitaciones, se tomaron como días sin pérdidas por evaporación.

4.4.4.3 Pérdidas por Infiltración

Según (Tammes *et al.*, 2000), las pérdidas por filtraciones en la base y los terraplenes se determina mediante la siguiente expresión.

$$V_{fil} = K \cdot A_{bas} \cdot t$$

V_{fil} : Volumen de pérdida por filtraciones (m^3).

K: Factor de permeabilidad del suelo (m/s).

A_{bas} : Superficie de la base del atajado (m^2).

t: Tiempo (mes, día, hora expresado en segundos).

Los índices de permeabilidad, según tipo de suelo se menciona en el siguiente cuadro:

Cuadro 6: Permeabilidad de suelos.

Suelo	Permeabilidad K (m/s)
Arcilla	$2.084 \cdot 10^{-8}$
Franco	$2.581 \cdot 10^{-8}$
Arcillo arenoso	$3.097 \cdot 10^{-8}$

Fuente: Tammes *et al.* (2000).

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad de suelos (K), se realizó el ensayo de campo recomendado por la FAO (2019), que se describe a continuación:

- Excavar hoyo hasta 1 m de profundidad, en el lugar donde se desea determinar el coeficiente de permeabilidad.
- Introducir un tubo de diámetro conocido y llenar el hoyo con agua, hasta que el suelo este completamente saturado.
- Añadir agua hasta el borde del hoyo, medir la velocidad a que baja la superficie del agua, utilizando un reloj para medir el tiempo y una regla en centímetros para medir la altura entre la superficie del agua y el borde del hoyo.
- Dejar de medir cuando la velocidad sea constante.

Para cada una de las mediciones consecutivas de tiempo/distancia, calcular el coeficiente de permeabilidad (K), empleando la siguiente ecuación:

$$K = \left(\frac{D}{2}\right) * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) / 2(t_2 - t_1)$$

K=Coeficiente de permeabilidad (m/s).

D= Diámetro (m).

Ln= Logaritmo natural.

h_1 y h_2 = Altura 1 y 2 (m) y t_1 y t_2 = Tiempo 1 y 2 (s).

CAPÍTULO V.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Autocorrelación de series de tiempo de precipitación

5.1.1 Patrones de precipitación

En base a datos históricos de la Estación Meteorológica de Calacoto del periodo 1971 a 2018 (47 años), se realizó el análisis del patrón de precipitaciones y el comportamiento del mismo en los últimos 5 años, las tendencias y posibles efectos del cambio climático.

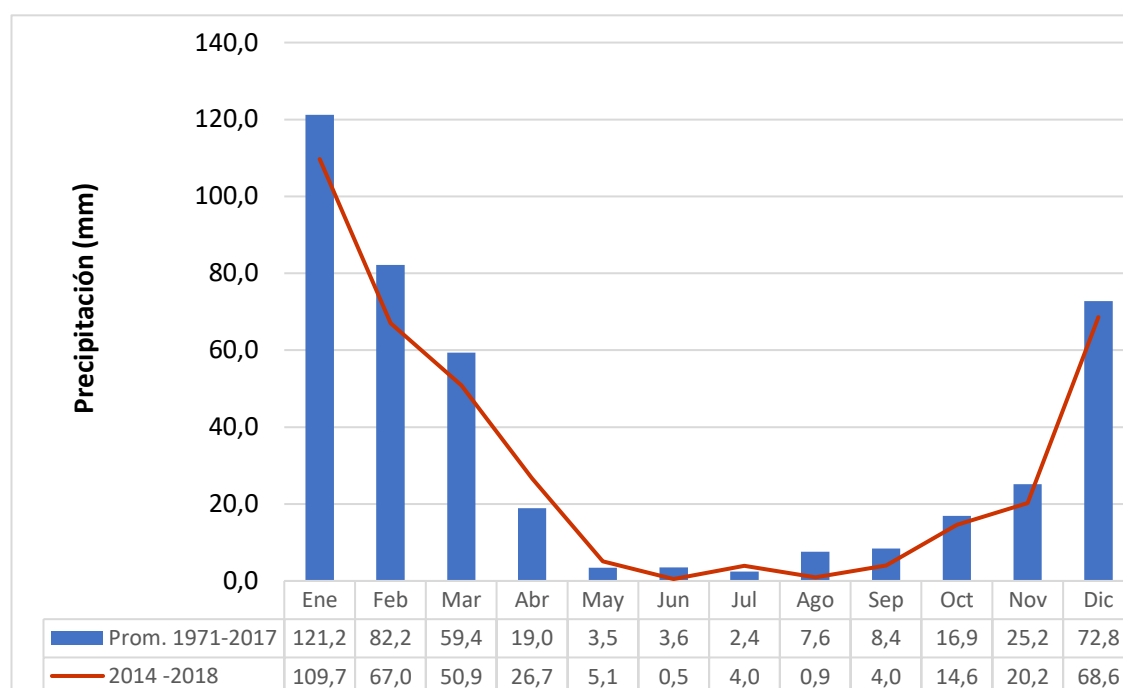
La precipitación histórica mensual promedio (Figura 5) del periodo 1971 - 2018, muestra precipitaciones elevadas entre los meses de diciembre a marzo, representando el 80% de la precipitación anual (335.6 mm). Entre abril a noviembre se tienen bajas precipitaciones alcanzando apenas el 20% del total anual (86,5 mm), misma coincide con la época de estiaje, con lluvias esporádicas y nevada en invierno.

El promedio precipitación de últimos 5 años (372.2 mm/año) representa el 10,63% del periodo de estudio (47 años), y es inferior a la precipitación histórica del periodo 1971 – 2018 que alcanza 422.03 mm/año. Este comportamiento muestra una baja en la precipitación en 49.83 mm/año, que puede atribuida a posibles efectos del cambio climático, que son manifestados a través la ocurrencia de sequias, mayor intensidad en precipitaciones, granizadas, nevadas y heladas fuera de época.

Por lo tanto, las precipitaciones mensuales de últimos 5 años, también son menores a los patrones de precipitación históricos, excepto en los meses de abril, mayo y julio que son mayores (26.7 mm respecto 19.0 mm; 5.1 respecto 3.5 mm, 4.0 mm respecto 2.4 mm) al promedio normal. La misma es percibida por la ocurrencia de precipitaciones en los meses mencionados, a los cuales deben adaptarse los productores adecuando el calendario de actividades agrícolas, como es la deshidratación de la papa (elaboración de chuño) que es afectada por la falta de heladas y presencia de precipitaciones fuera de época.

Las anomalías en el comportamiento normal de precipitaciones afectan en la recarga de agua en atajados, porque ante la falta de lluvias en su época, los niveles de agua en atajados se reducen al mínimo hasta secarse en muchos casos, provocando el déficit hídrico para el rebaje del ganado, que debe buscar otras fuentes de agua perdiendo energías en el recorrido de largas distancias.

Figura 5: Promedio mensual de precipitación en Calacoto (1971 al 2018) y promedio mensual de últimos 5 años (2014 -2018).



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI.

Esta variación en patrones, podrían atribuirse a comportamientos cíclicos como el fenómeno ENSO y anomalías debidas al cambio climático. El IPCC (2007) establece que el cambio climático aumentará la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones.

En un análisis de tendencias históricas de precipitaciones, se ha observado que hay un retraso en el periodo de inicio de lluvias, menor concentración del periodo de lluvias, mayor intensidad en meses más lluviosos y en algunos casos disminución de la intensidad y frecuencia de las lluvias. Los efectos por estas variaciones se traducen en menores rendimientos y producción, lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria (PNUD, 2011).

5.1.2 Serie histórica de precipitación

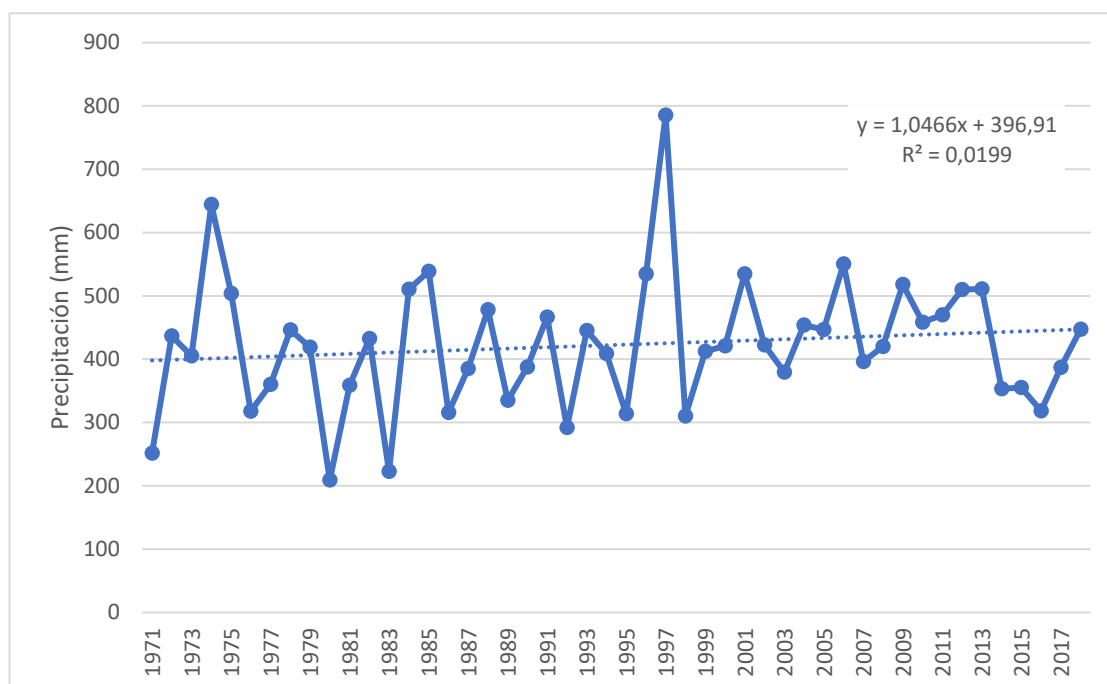
La Figura 6, muestra la serie histórica de precipitación del periodo 1971 – 2018, presentando una precipitación anual promedio de 422.03 mm, una máxima de 785.6 mm ocurrida en 1997 y mínimas de 209.2 mm y 223 mm en 1980 y 1983.

Las bajas precipitaciones históricas de los años 1980 – 83 (209 y 223 mm/año), coinciden con la ocurrencia del fenómeno de El Niño, considerados los más fuertes en las últimas tres décadas que afectaron a la producción y la seguridad alimentaria, la falta de alimentos tuvo su efecto en la migración de la población del Altiplano a regiones tropicales y ciudades. De la misma manera en 1992 (292 mm/año) y en 1998 (310,5 mm/año) se registraron bajas precipitaciones atribuidas al fenómeno ENSO.

El comportamiento histórico de 47 años (Figura 6), muestra hasta el 2009 un comportamiento cíclico de un año más seco cada 3 o 4 años. Posteriormente entre 2009 - 2013 se muestra la ocurrencia de 5 años húmedos con mayor precipitación con respecto al promedio, luego otro ciclo de 4 años secos (2014 – 2017) con menor precipitación respecto al promedio.

El análisis de correlación presenta una tendencia mínima del incremento de la precipitación en el tiempo, con una pendiente positiva, lo que significa un incremento de 1,04 unidades de precipitación por cada unidad de tiempo, lo cual significa que las precipitaciones se mantendrán en el tiempo, presentando anomalías atribuidas a la influencia del fenómeno del Niño, la variabilidad climática y los efectos del cambio climático.

Figura 6: Serie histórica de precipitación en Calacoto (La Paz, Bolivia), entre 1971 al 2018



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI.

El GMC (2005), menciona que el municipio de Corocoro presenta entre 200 a 405 mm de precipitación, por su parte Quintanilla *et al.* (2012), en el Altiplano Norte, llueve 1000 mm por año, el Altiplano Central entre 300 y 500 milímetros y el Altiplano Sur se registran precipitaciones que van de 100 a 250 milímetros por año.

Con respecto a la ocurrencia del fenómeno del Niño en 1980 y 1983, según PNUD (2011), el fenómeno afectó a siete de nueve departamentos, un total de 1,6 millones de afectados, causó una pérdida de 2.821 millones de dólares, 250.000 unidades productivas se han visto damnificadas y el impacto sobre el Producto Interno Bruto nacional fue del 7%, Gioda y Prieto (1998) en los Andes el déficit pluviométrico fue del 10 hasta 20% de lo normal.

Por su parte Andressen (2006), menciona que los eventos Niño producen excesos de precipitación en norte de Perú y en Chile central, mientras se observan deficiencias pluviométricas en el altiplano de Perú y Bolivia, con grandes amplitudes de variación de precipitaciones, como en Calcha de Lipez

en 1983 se tuvo 8.7 mm y en 1984 se registró 507 mm (un incremento de más de 5000 %). Los años Niña la tendencia es hacia fuertes lluvias en el Altiplano y sequía en los llanos del sur.

Estudios realizados por Dávila (2016), mencionan que para el caso de Puno (departamento del Altiplano peruano) se tienen registros de fuertes sequías durante “El Niño” de 1982/1983 mientras que en el “El Niño” 1997/1998 se presentaron sequías de corta duración, pero de mayor intensidad. El Niño también provoca el aumento de heladas en el Altiplano debido a la ausencia de nubosidad y cielos despejados que favorecen la pérdida de radiación de la superficie en las noches.

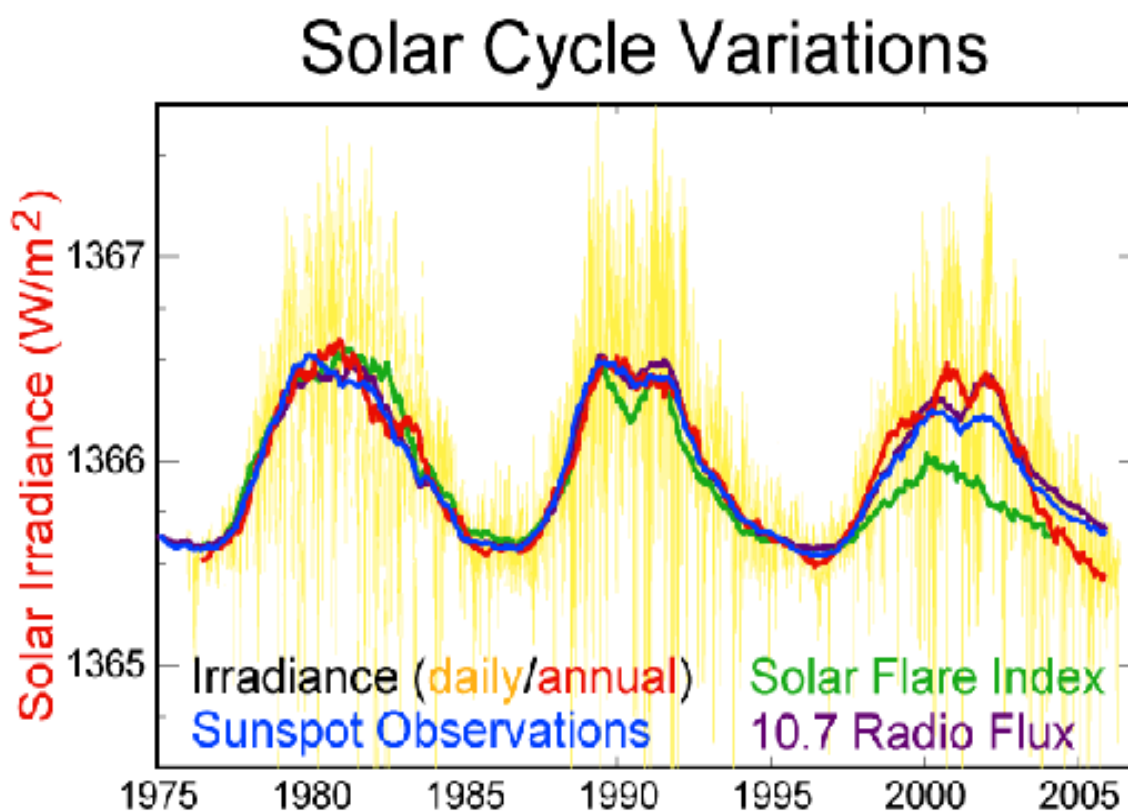
Según García *et al.* (2015), se tiene una marcada época de producción estrechamente relacionada con las precipitaciones, el adelanto o retraso de las lluvias condicionan el calendario agrícola de los cultivos.

El comportamiento de patrones de precipitación y ocurrencia del fenómeno de El Niño parecen estar influenciados por el ciclo solar, que se repite en promedio cada 11 años, observándose menores tasas de precipitación en años con mayor luminosidad solar (Figura 7) como se presentan en los años 1980 y 1983 (209.2 y 223 mm/año), 1992 (292 mm/año) y 1998 (310,5 mm/año).

Según ABC Ciencia (2020), cuando el sol este activo, el viento solar compuesto de partículas energéticas fluyen al espacio desde la superficie de la estrella, es fuerte, reduciendo el número de rayos cósmicos que pueden abrirse paso a través de él. Sin embargo, cuando el astro está menos activo, el viento solar es más débil y el flujo de rayos cósmicos aumenta.

El flujo de rayos cósmicos podría cambiar la conductividad eléctrica en la atmosfera superior o afectar a la química del ozono, lo que influiría en el proceso de formación de las nubes, alterar patrones de lluvia y evaporación.

Figura 7: Variación de luminosidad solar a lo largo del ciclo de manchas solares durante últimos 30 años.



Fuente: ABC Ciencia 2020.

En la Figura 7, se muestra que cada ciclo describe una curva ascendente con su cresta (máximo solar con sus manchas) y su valle (que sería el mínimo de la actividad solar con menos manchas).

Por otro lado, las proyecciones de modelamiento de escenarios sobre efectos del Cambio Climático, Lujano *et al.* (2016), en investigación de Cambios en la disponibilidad del recurso hídrico bajo escenarios de emisiones de Modelos Climáticos Globales (MCG) del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5), el Simulador del Sistema Terrestre y el Clima de la Comunidad Australiana versiones 1.0 y 1.3 (ACCESS1.0 y 1.3) y el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima versión 5 (MIROC5), simularon cambios de precipitaciones para concentraciones representativas (RCP4.5 y 8.5) a finales del siglo XXI, indican un ligero incremento de la precipitación anual en la cuenca Ramis y una disminución para la cuenca llave del Perú.

Los cambios proyectados bajo escenarios de emisiones RCP4.5 (bajas concentraciones de CO₂) y 8.5 (altas concentraciones de CO₂), indican para cuenca llave una disminución del recurso hídrico anual entre -48% y -24% para los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5.

Las variaciones de precipitación futura, muestran para el escenario RCP4.5 y horizonte 2071- 2100 disminuciones de precipitación en la mayor parte del Altiplano. Para el escenario RCP8.5 en el horizonte 2071 – 2100, se espera también ligeros incrementos (+8.5%) para la zona norte y disminuciones de precipitación (-30%) para la zona sur.

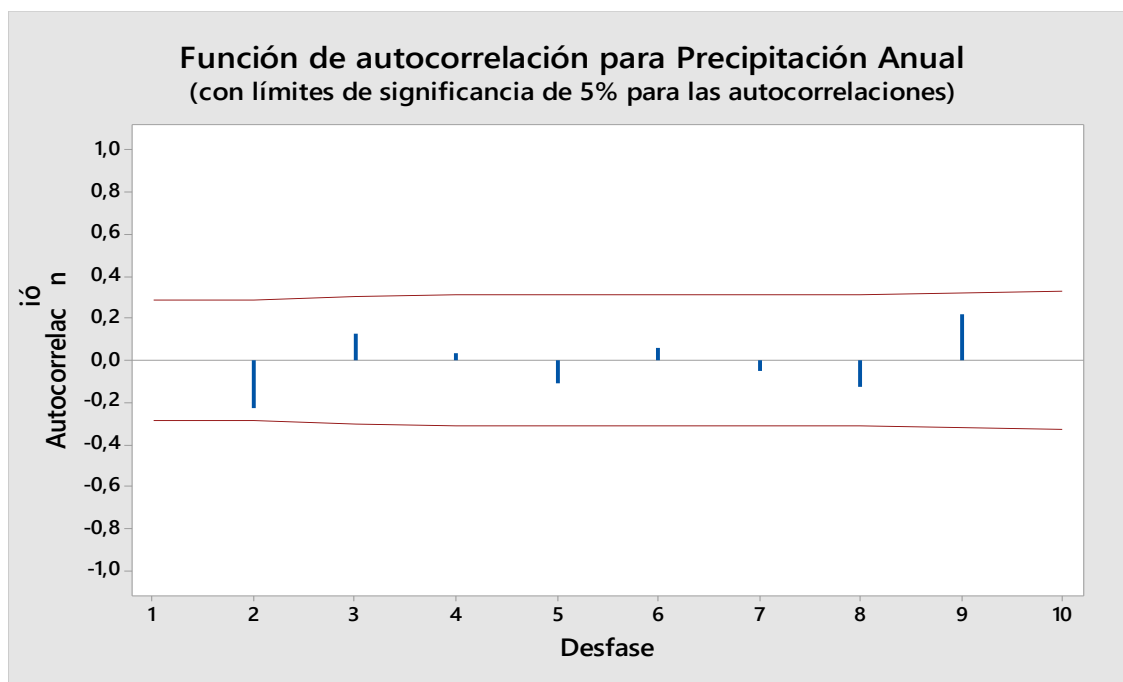
En base a los resultados del modelamiento de escenarios, se puede mencionar que, para finales del siglo XXI, la zona de estudio estaría sujeta a una disminución en los patrones de precipitación, como se está presentado en el comportamiento de la precipitación de los últimos 5 años.

5.1.3 Series de tiempo de precipitaciones

Para describir la presencia o ausencia de la dependencia de datos, y sí las observaciones pasadas influyen en las actuales se realizó el análisis de autocorrelación simple de series de tiempo de precipitación del periodo 1971 y 2018 con registros históricos de la Estación Meteorológica de Calacoto.

La Figura 8, muestra la autocorrelación de precipitaciones con un comportamiento no estacionario o acíclico, por tanto, no existe la posibilidad de una relación de repetición de ciclos de incremento o disminución de precipitaciones anuales, que puede indicar indicios de los efectos del cambio climático. La autocorrelación no significativa a un nivel de significancia o error límite del 5%, pueden atribuirse posiblemente al enmascaramiento de los efectos del cambio climático, se necesitaría series de tiempo relativamente más largas para analizar la variación de patrones de precipitación por efectos del cambio climático, que son percibidas por los agricultores de la zona en la intensidad y frecuencia de precipitaciones en menor tiempo.

Figura 8: Autocorrelación de la serie histórica de precipitación de Calacoto entre 1971 al 2018 (La Paz, Bolivia).



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI.

En referencia a patrones de precipitación histórica y la autocorrelación de series de tiempo, el clima del Altiplano según Quintanilla (2012), define “árido y frío”, con estaciones bien marcadas, una estación seca hacia el invierno y otra húmeda en verano. Este comportamiento puede presentar anomalías por la ocurrencia del fenómeno de El Niño que ocasiona precipitaciones positivas en el oriente, y anomalías negativas en el Chaco y en el Altiplano, lo que provoca sequias y heladas (PNUD, 2011). La Niña sin embargo causa un efecto inverso, provocando inundaciones en la zona altiplánica.

La variación en patrones de precipitación en el Altiplano, también tendría efectos negativos en cultivos, la biodiversidad, modificaciones en el uso y desertificación del suelo; al respecto Valdivia *et al.* (2013), el clima y la altitud de los Andes han hecho que la agricultura en esta región, siempre sea vulnerable a heladas, granizo, sequias e inundaciones.

5.2 Comportamiento histórico de la evaporación

5.2.1 Evaporación anual y mensual en tanque evaporímetro tipo A

Ante la falta de datos históricos de evaporación de la Estación Meteorológica de Calacoto, el análisis comparativo del comportamiento histórico mensual y anual de evaporación en tanque evaporímetro, se realizó con datos disponibles de estaciones meteorológicas de Patacamaya (periodo 1971 - 2016) y San Calixto de La Paz (periodo 1942 – 2017) en relación evaporación obtenida en tanque evaporímetro en la Comunidad Laka Pucara del Municipio de Corocoro, entre marzo del 2018 a febrero del 2019.

Mediante la Figura 9, se observa que la evaporación registrada durante el periodo de estudio en la Comunidad de Laka Pucara, es aproximado al comportamiento histórico de la estación meteorológica de Patacamaya, y superior al promedio histórico de San Calixto, presentando valores de 1763.75 mm/año en Laka Pucara (Corocoro), 1774.30 mm/año en Patacamaya y 1038.72 en San Calixto de la Ciudad de La Paz.

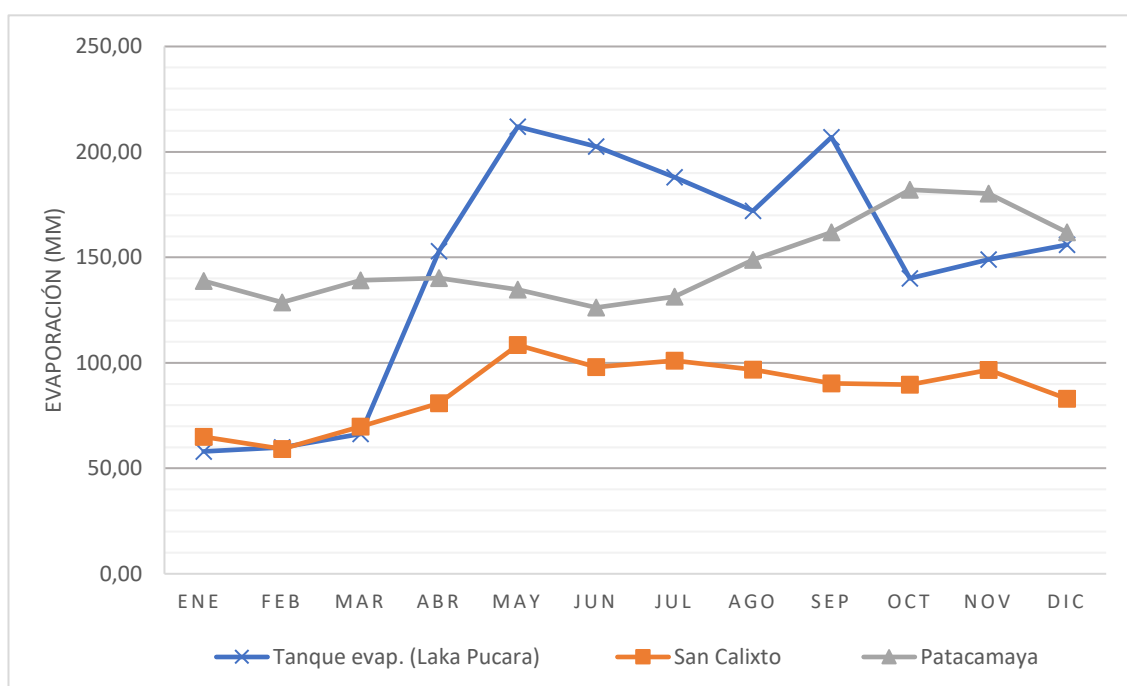
El menor volumen de evaporación histórico registrado en la Estación Meteorológica de San Calixto con respecto al registrado en Laka Pucara (Corocoro), se puede atribuir a las diferencias marcadas en distancia, ubicación geográfica en latitud, longitud, altitud y topografía que son muy distintas al área de estudio.

Por el contrario, el promedio de evaporación anual aproximado o similar de la Estación Meteorológica de Patacamaya a la zona de estudio, puede ser atribuida a la cercanía, ubicación geográfica, condiciones climáticas y topográficas similares a la zona.

También en la Figura 9, se observa que el comportamiento mensual de evaporación en tanque evaporímetro tipo A registrados en Laka Pucara, presenta una alta variabilidad de la evaporación, a pesar de estar dentro los márgenes del promedio histórico de Patacamaya, existe mucha variabilidad mensual que podría estar afectando por el comportamiento climático del periodo de estudio.

La evaporación mensual, muestra mayores volúmenes de evaporación entre los meses abril a diciembre con valores que oscilan entre 140 a 207 mm/mes, y menores volúmenes de evaporación entre enero, febrero y marzo con 58.0, 60.0 y 66.3 mm/mes. Situación similar, se puede observar en el comportamiento histórico de evaporación en las estaciones San Calixto y Patacamaya.

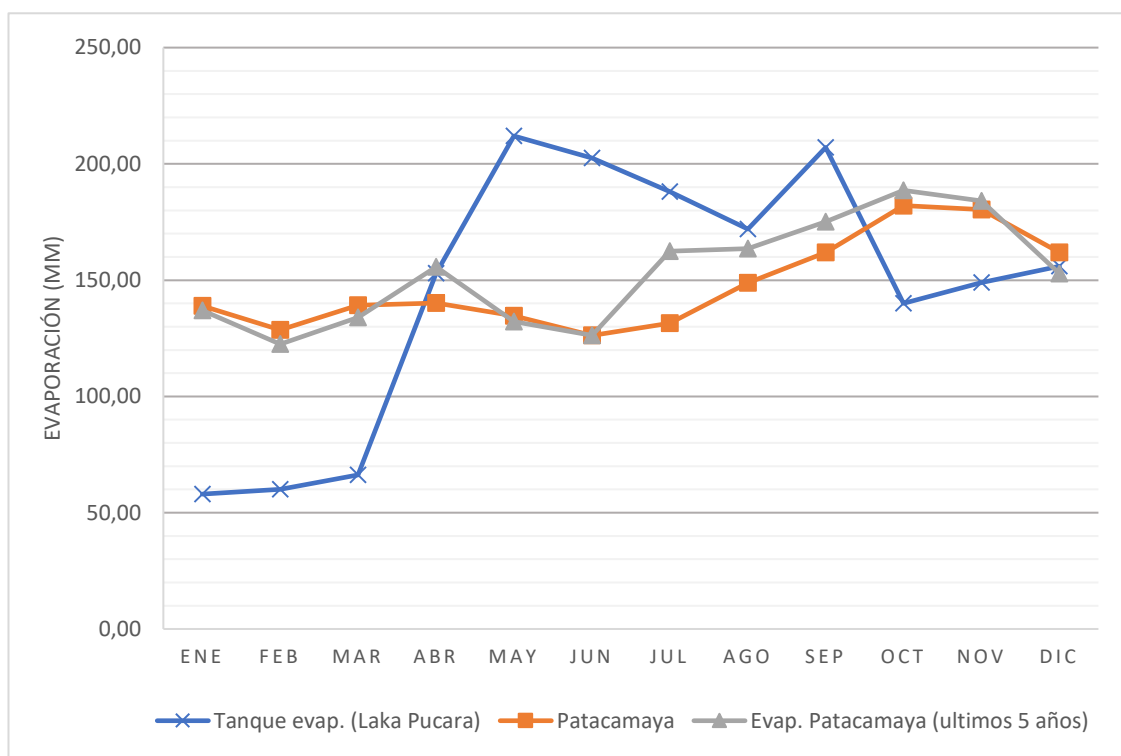
Figura 9: Evaporación histórica San Calixto (1942 -2017) y Patacamaya (1971 – 2016) y Laka Pucara - Corocoro (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI y registros de campo.

La Figura 10, muestra la evaporación promedio en últimos 5 años en Patacamaya que alcanza a 1862.70 mm/año, la misma es superior al promedio histórico de Patacamaya de 1774.30 mm/año y la evaporación registrada en Laka Pucara con 1763.75 mm/año, estos resultados muestran la tendencia al incremento de la evaporación en los últimos 5 años, por posibles efectos de incremento de la temperatura y menor precipitación atribuidos al cambio climático.

Figura 10: Evaporación histórica Patacamaya (1971 - 2016), (2012 - 2016) y Laka Pucara - Corocoro (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI y registros de campo.

El incremento de la evaporación, son percibidos en la disminución de niveles de agua, que en muchos casos no llegan alcanzar o abastecer la demanda hídrica del año para el consumo del ganado, por lo que las primeras precipitaciones de los meses de octubre, noviembre y diciembre son muy importantes para la cosecha y recarga de agua en atajados.

Los productores de acuerdo a su percepción, mencionan que el aumento de temperatura provoca la merma de los niveles de agua en reservorios, teniendo como consecuencia pérdidas en la producción y economía familiar, por la falta de agua para el brebaje del ganado y uso doméstico.

Las diferencias de evaporación mensual, está influenciada por la variación de la intensidad de radiación neta, velocidad del viento, humedad relativa y nubosidad, según condiciones climáticas de la época húmeda (diciembre a marzo), donde también se registran el 80% de las precipitaciones, y otra época seca, que se

caracteriza por la ocurrencia de escasas precipitaciones que alcanzan el 20%, la poca nubosidad, fuertes vientos, heladas y mayor radiación neta que provoca una mayor evaporación por el aumento de la temperatura en las superficies o cuerpos de agua libre.

Sobre el comportamiento de la radiación neta y su influencia en la evaporación Martinic *et al.* (1998), refieren una intensidad de radiación neta máxima en diciembre, con un promedio de 500 cal/cm² por día; de la misma manera APMT (2015), describe mayor radiación solar en la región en los meses de octubre a diciembre, con valores que van desde 27.3 a 27.2 MJ/m²/día, y Fernández y Morales (2012), las regiones del Altiplano y Valles Interandinos reciben una alta tasa de radiación solar, entre 5 y 6 kWh/m²/día, dependiendo la época del año.

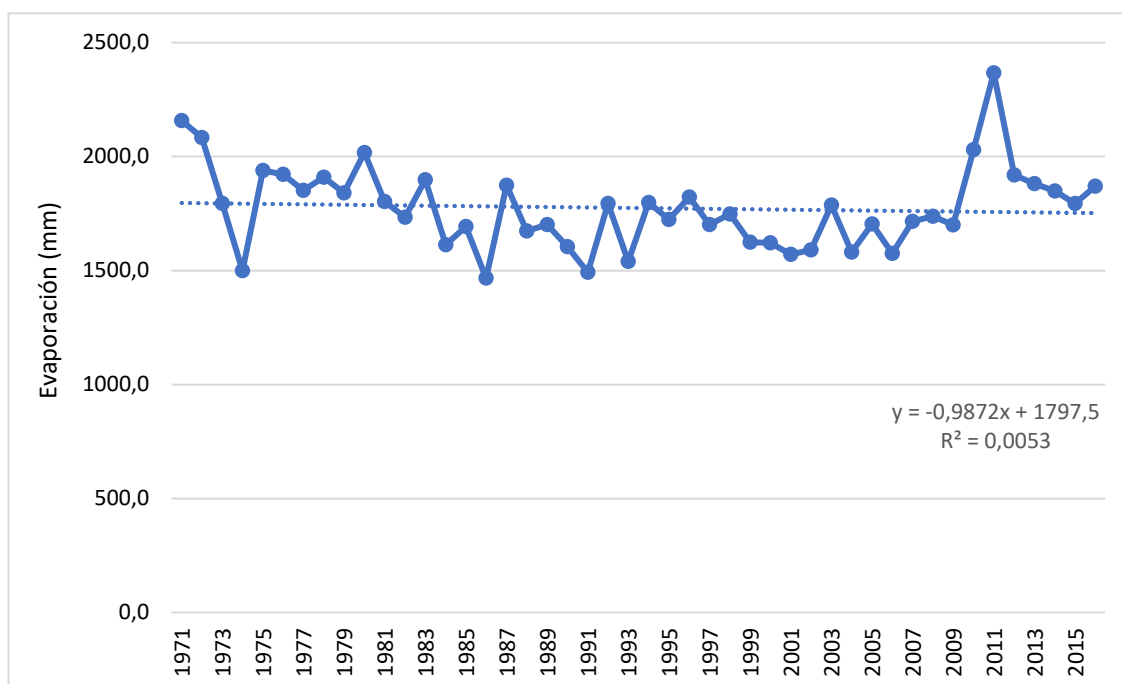
5.2.2 Comportamiento histórico de evaporación en tanque evaporímetro tipo A

Para este análisis, se tomó como referencia la estación meteorológica más cercana de Patacamaya. Los datos o registros históricos faltantes, se completaron mediante el uso del programa Excel, empleando la función “pronostico” que calcula o predice un valor futuro en una tendencia lineal usando valores existentes en “X” y “Y” conocidos (Gidahatari, 2019).

Mediante la Figura 11, se puede observar el comportamiento histórico de evaporación en tanque evaporímetro tipo A en la Estación Meteorológica de Patacamaya para el periodo 1971 – 2016, presenta un promedio anual de evaporación de 1774.30 mm/año, con una máxima de 2367.10 mm/año ocurrida en 2010 y una mínima de 1466.7 mm/año en 1986 que pueden estar relacionados directamente con el comportamiento o influencia de los elementos climáticos ocurridos en el periodo.

El análisis estadístico de la serie histórica de evaporación para el mismo periodo de 45 años, presenta una tendencia lineal con pendiente negativa (Figura 11), representando la ecuación una disminución mínima de 0,98 unidades de evaporación por cada unidad de tiempo, el valor R² (0,0053) calculado muestra que no existe una correlación significativa entre el tiempo y el comportamiento de la evaporación.

Figura 11: Comportamiento histórico de evaporación en tanque evaporímetro, Patacamaya (La Paz, Bolivia), entre 1971 al 2016.



Fuente: Elaboración propia en base a datos históricos del SENAMHI.

La falta de registros históricos más precisos y de periodos más amplios, no permiten realizar un análisis más exhaustivo sobre los efectos del cambio climático en la evaporación del agua, teniendo en cuenta que el aumento de la temperatura provoca una mayor evaporación del agua, por lo que una posible disminución de la tasa de evaporación estaría en discusión.

Al respecto de la evaporación anual promedio, estudios realizados por Quintanilla (2012), usando la ecuación de Ivanov Konstantinov y con datos diarios climáticos observados en la estación de Patacamaya, durante el año 2001 obtuvo 1665 mm/año, Dory (1998), menciona una evaporación al norte del país de 1400 mm/año, y un mínimo en el extremo sud-oeste con valores de 100 mm/año.

Sobre la evaporación de agua en superficies libres, estudios realizados por Johnson (2009) en el salar de Huasco de la Región de Tarapaca de Chile mencionan una evaporación de 1500 mm/año; Andressen *et al.* (2006), en estudio de Regímenes climáticos del Altiplano Sur de Bolivia menciona el registro

de evaporación de 4,9 mm/día (1788,5 mm/año) para la Estación Meteorológica de Uyuni.

Mamani (2011), en la evaporación de tanques de clase "A", presenta valores que fluctúan en promedio de 1450 mm/año, en cercanías y en el mismo Lago Titicaca, a 1900 mm/año por el sur del Sistema TDPS.

Sobre el efecto del fenómeno ENSO Dávila, C. (2016), menciona en zonas continentales, el efecto de oscilaciones climáticas del El Niño y La Niña, han sido un factor mucho más determinante para la evaporación que el calentamiento global. En temporadas de El Niño, las lluvias se ven reducidas drásticamente, lo que provoca una menor transpiración de plantas y mayor evaporación de cuerpos de agua libre.

Con respecto a la influencia del ciclo solar en la evaporación histórica, no se muestran claramente la relación de datos con los máximos y mínimos ciclos solares, excepto para 1980 donde se tiene una alta tasa de evaporación (2017 mm/año) que coincide con un máximo de ciclo solar y además y precipitación mínima de 209.2 mm/año. Estas anomalías también parecen estar relacionados con la ocurrencia del fenómeno ENSO, que coincidentemente se presentaron en estas gestiones, siendo el resaltante del año 1980 donde se presenta una mayor evaporación.

Según ABC Ciencia (2020), sobre la influencia del ciclo de la actividad solar en la evaporación, se menciona que cada 11 años, el sol registra un nuevo ciclo, un patrón de manchas que aparecen y desaparecen en la superficie del astro. Actualmente nos encontramos en el fin del ciclo 24 y en un mínimo solar. A partir de mediados de 2020 la actividad volverá a reanudarse. La mayoría de los expertos concuerdan en que el próximo ciclo solar será tan tranquilo como el que estamos abandonando.

En relación a proyección de modelamiento de escenarios, Corinne *et al.* (2013) para mediados del siglo XXI, refiere el incremento de la temperatura en 1,5 °C con la probabilidad de que para el año 2099 sea mayor a los 4 °C. Con el aumento en la temperatura hay una tendencia al incremento de la

evapotranspiración en el Altiplano norte y sur con el consecuente cambio en el régimen climático.

En el régimen de precipitaciones es probable que el principio de la estación lluviosa (septiembre - noviembre) sea más seco y que el punto más alto (enero - marzo) sea más húmedo, lo cual implica un cambio hacia una temporada de lluvia más fuerte y más tardía.

Sarricolea y Romero (2015), los aumentos de temperatura y la disminución sostenida de la precipitación suponen un aumento de la evaporación del agua. Esta afirmación se ampara en cifras de calentamiento mayores a 4°C y de una disminución de las precipitaciones por sobre un 32% respecto a las actuales.

Según Sanabria *et al.* (2009), en estudios realizados para el Altiplano peruano (Departamento de Puno) en el futuro 2071 – 2100, la precipitación proyectada por el modelo HadRM3 en el escenario A2 (altas concentraciones de CO₂) mostró incrementos de precipitación de hasta 2mm/día principalmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en el escenario moderado B2 (bajas concentraciones de CO₂) similares al patrón actual. Por otro lado, la temperatura proyectada, obtenida de la media aritmética de los modelos HadRM3 y el ETA CSS simularon para los escenarios A2 y B2 incrementos entre 2°C a 4°C, más aún al norte de lago con incrementos de hasta 6°C.

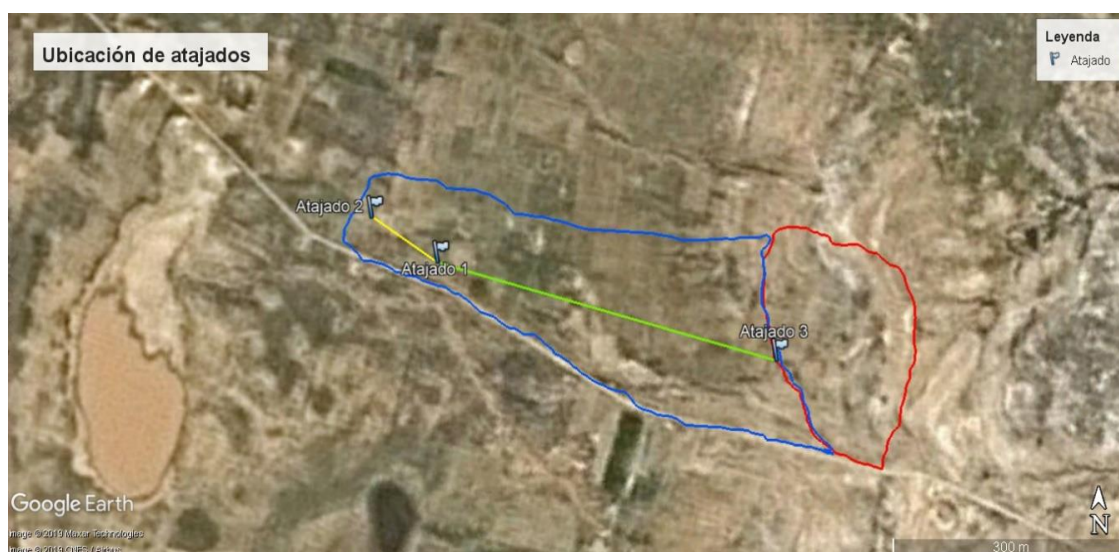
Estudios realizados por la NASA (2019), mencionan que el aumento de vapor de agua en la atmosfera conduce a temperaturas más cálidas y también una mayor absorción de vapor de agua en el aire.

5.2.3 Comportamiento mensual de evaporación en atajados y tanque evaporímetro

En la comunidad Laka Pucara, cada familia cuenta con 3 a 4 atajados, las reservas de agua en atajados son utilizados para el uso doméstico y principalmente para el brebaje del ganado, que en promedio cuentan con 5 bovinos y 40 a 60 ovinos por familia.

Para el estudio, se identificaron 3 atajados en acuerdo y consulta con la familia propietaria para evitar y minimizar el consumo de agua por el ganado.

Figura 12: Ubicación y área de aporte hídrico de atajados en Comunidad Laka Pucara, Municipio de Corocoro.



Fuente: Google Earth, image©2019 CNE/Airbus.

Mediante la Figura 12, se puede observar la ubicación de los atajados en estudio, las líneas demarcadas muestran el área de aporte hídrico de la microcuenca para cada atajado, importante para la recarga de agua por escorrentía después de las precipitaciones.

En el Cuadro 7, se muestran detalles del año de construcción, altura, ubicación geográfica y distancias entre atajados. Entre las variables se destaca el año de construcción, el atajado 1 construido en 1986 es más antigua con 34 años de vida, los atajados 2 y 3 construidos en 1997 cuentan con 23 años. Los sedimentos acumulados son limpiados cada 4 a 5 años dependiendo el nivel de colmatación, la cantidad de reserva de agua y disponibilidad de maquinaria en la zona.

La ubicación y altura sobre el nivel del mar, muestra que los atajados 1 y 2 se encuentran en la parte más baja de la microcuenca, constituyéndose en una planicie. La vegetación que estabiliza el terraplén o talud de los 3 atajados está compuesta por arbustos de thola (*Parastrephia lepidophylla*), paja brava (*Festuca orthophylla*) y paja sikuya (*Stipa ichu*). El atajado 3, está situado en la parte más alta y en ladera de la microcuenca, presentando una pendiente

aproximada del 30%. La distancia del atajado 1 al 2 es de 102 m, entre el atajado 1 al 3 de 440 m.

Cuadro 7: Características de atajados en estudio

Atajado	Año de construcción	Altura (msnm)	Ubicación geográfica	Distancia (Desde atajado 1) (m)
1	1986	3892	S1709.306 W6837.829	0
2	1997	3830	S1709.276 W6837.877	102
3	1997	3910	S1709.368 W6837.589	440

Fuente: Elaboración propia en base a datos de campo.

El Cuadro 8, muestra capacidad de almacenamiento de agua en reservorios, teniendo al atajado 3 con una capacidad de 1514.44 m³. Los atajados 1 y 2 presentan una capacidad de almacenamiento de 870.12 y 477.56 m³, como se puede apreciar en las fotografías 3, 4 y 5 (Anexo 10).

La superficie o área de aporte hídrico, está determinada por forma y topografía de la microcuenca, presentando 9.17 hectáreas de superficie de aporte hídrico para los atajados 1 y 2. El atajado 3 por la característica propia de la microcuenca cuenta 3.90 hectáreas de aporte hídrico suficientes para la recarga de agua en el reservorio.

Cuadro 8: Capacidad de almacenamiento y área de aporte hídrico.

Atajados	Capacidad de almacenamiento (m ³)	Área aporte (Ha)	Perímetro del área de aporte (m)
1	870,12	9,17	1612
2	477,56		
3	1514,44	3,90	789

Fuente: Elaboración propia en base a datos de campo.

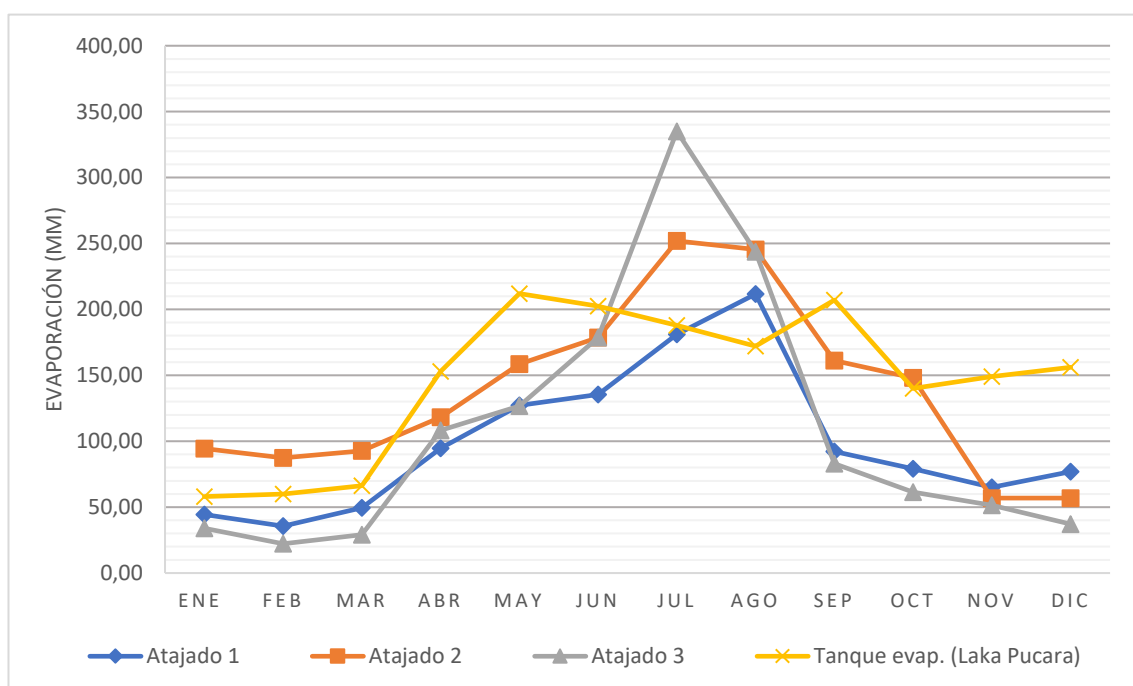
La Figura 13, muestra la comparación del comportamiento mensual de volúmenes de evaporación registrados en tanque evaporímetro tipo A y 3 atajados, entre marzo del 2018 a febrero del 2019 en la Comunidad Laka Pucara. En el tanque evaporímetro, se registraron mayores volúmenes de evaporación entre los meses de abril a diciembre en un rango de 140 a 212 mm/mes, y

menores pérdidas por evaporación entre enero, febrero y marzo con 58, 60 y 66.3 mm/mes.

En atajados, los mayores volúmenes de evaporación se registraron de manera coincidente en los meses de junio, julio y agosto: el atajado 1, se registran valores de 135.56, 181.19 y 211,61 mm/mes; en atajado 2 con 178.56, 251.95, 245.50 mm/mes; en atajado 3 con 178.65, 335.09 y 243.83 mm/mes respectivamente para los meses mencionados.

Los menores volúmenes de evaporación se registran en los meses de enero, febrero y marzo; en atajado 1 se tiene 44.35, 35.61 y 49.40 mm/mes, atajado 2 con 94.50, 87.30 y 92.75 mm/mes, atajado 3 con 33.93, 22.21 y 29.10 mm/mes respectivamente.

Figura 13: Evaporación mensual en atajados y tanque evaporímetro tipo A (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

La diferencia en tasas de evaporación mensuales, tanto del tanque evaporímetro y los atajados pueden estar afectados directamente por el comportamiento climático en el año, presentándose dos épocas bien marcadas, como es la época húmeda entre los meses de diciembre a marzo, caracterizada por mayor

nubosidad, precipitaciones y menor radiación solar neta. Al contrario, en la época seca se tiene poca nubosidad, mayor radiación neta, vientos y bajas temperaturas con heladas en los meses de junio, julio y agosto donde coincidentemente se tiene la mayor pérdida de agua por evaporación en los 3 atajados.

Sobre el comportamiento mensual de la evaporación Goetter (2010) y López, (2008), mencionan que la pérdida del agua por evaporación a lo largo de los meses de estiaje es alta, teniéndose a la temperatura como el parámetro más sensible o influyente en la evaporación del agua

5.3 Evaporación de agua en atajados y su relación con el tiempo de almacenamiento

5.3.1 Evaporación acumulada de agua en atajados

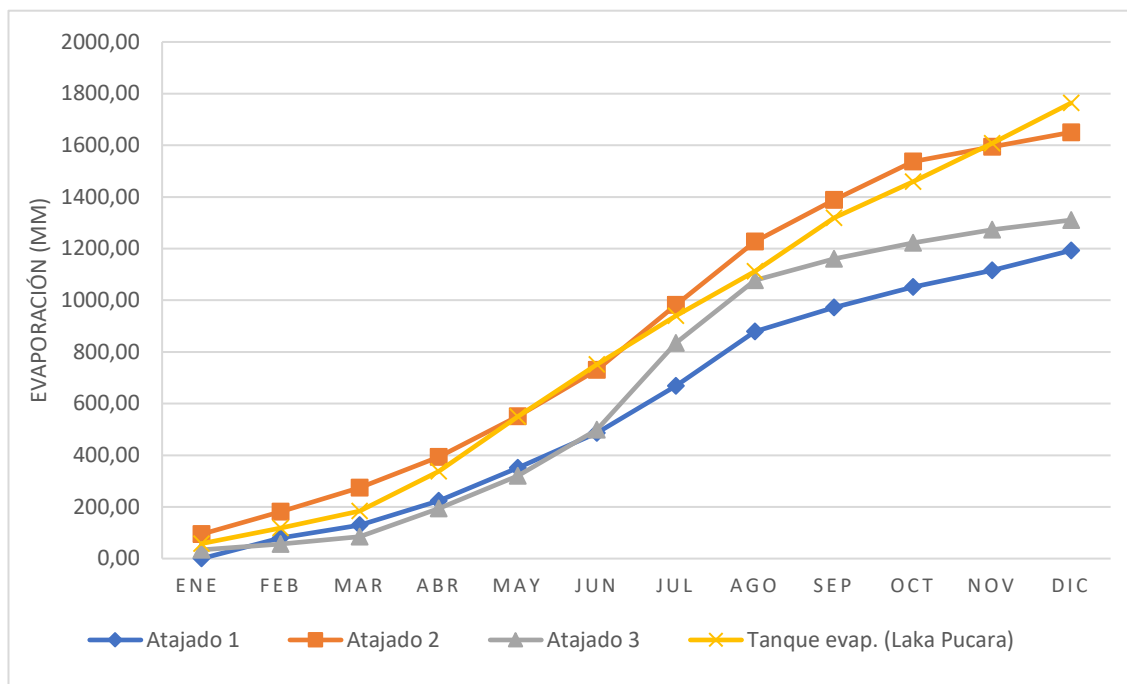
Mediante la Figura 14, se puede observar las pérdidas acumuladas por evaporación en tanque evaporímetro y 3 atajados en estudio. Los resultados comparativos muestran una tasa de evaporación superior en tanque evaporímetro de tipo A con 1763.75 mm/año; en reservorios, el atajado 2 presenta una mayor tasa de evaporación con 1650.33 mm/año, atajado 3 con 1310.58 y atajado 1 con 1192.84 mm/año.

La mayor evaporación en tanque evaporímetro con respecto a los atajados, puede estar afectado a los mencionados por Johnson (2009), a la cantidad de sólidos disueltos en agua de reservorios, que provoca disminución en su presión de vapor y por lo tanto una reducción en la evaporación. En tanque evaporímetro, Molina (2004) la evaporación es casi en fase con la radiación, debido a la escasa masa de agua existente con poco poder de almacenamiento de calor. En embalses, por el volumen de agua almacenada el almacenamiento de calor es muy importante, la evaporación puede presentar desfases, a veces de meses con la radiación solar.

Entre los atajados, el rango o la diferencia de tasas de evaporación pueden estar afectados por la ubicación topográfica de planicie (atajados 1 y 2) y en ladera el atajado 3, la cantidad de sólidos disueltos, el tipo de suelo, superficie evaporante

y principalmente a la capacidad de almacenamiento u tamaño del reservorio que determina la cantidad o volumen de agua que está almacenada en atajados.

Figura 14: Evaporación acumulado en atajados y tanque evaporímetro (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

Realizando el análisis estadístico de varianza y comparación de medias de Tukey de la superficie evaporante (Cuadro 9 y 10), se observa que la evaporación de volúmenes de agua en los 3 atajados no presentan diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

Por lo tanto, se puede afirmar que las diferencias observadas en la superficie evaporante, tamaño o capacidad de almacenamiento de agua en los 3 atajados, estadísticamente son iguales, no hay diferencias en las pérdidas por evaporación entre los atajados, el tamaño de superficie evaporante y capacidad de almacenamiento no influyen en la tasa de evaporación.

Cuadro 9: Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	9405	4703	0,83	0,443
Error	33	185868	5632		
Total	35	195273			

Fuente: Elaboración propia en base a registros de campo.

Cuadro 10: Comparaciones en parejas de Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
Atajado 2	12	137,5	A
Atajado 3	12	109,2	A
Atajado 1	12	99,4	A

Fuente: Elaboración propia en base a registros de campo.

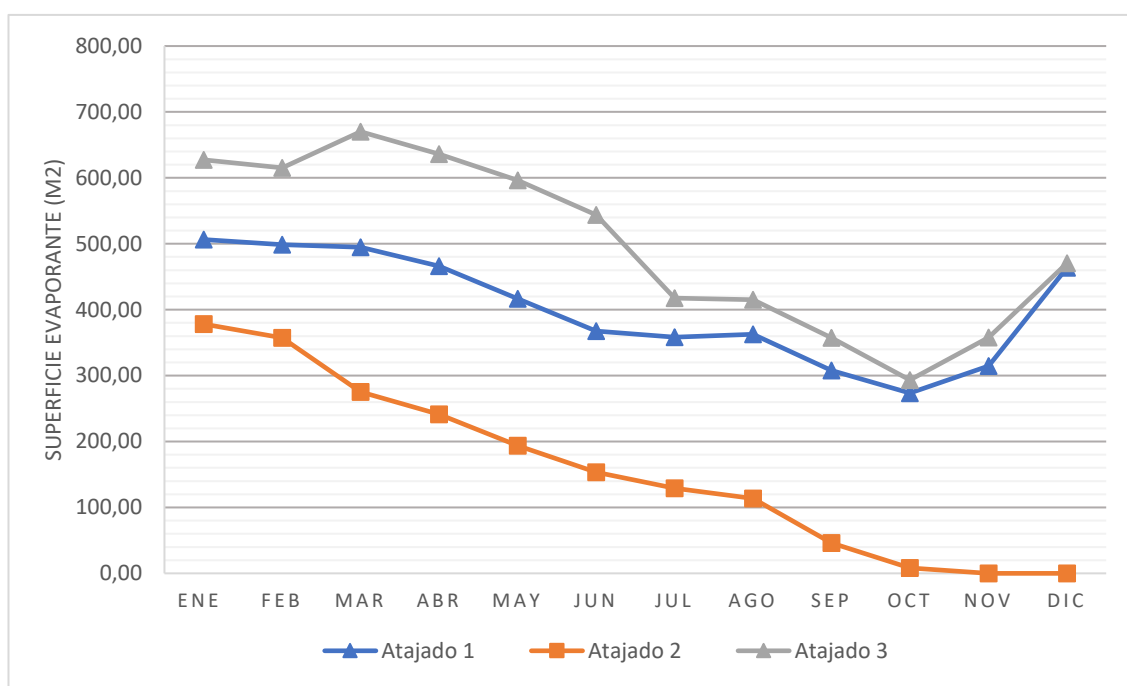
5.3.2 Superficie de evaporación de agua en relación al tiempo

El cálculo del área inundada o superficie evaporante de atajados, permiten estimar el tamaño y área del reservorio de agua que está en contacto con la atmósfera, y que está expuesta a la evaporación por efecto de la radiación neta, viento y otros elementos climáticos que varían de acuerdo a la época del año.

La Figura 15, muestra el comportamiento mensual de superficies evaporantes de agua libre de 3 atajados en estudio entre marzo del 2018 a febrero del 2019. El atajado 3, con mayor tamaño y capacidad de almacenamiento de agua, registró una superficie evaporante máxima de 670.09 m² en marzo y un mínimo de 293.42 m² en octubre; el atajado 1, alcanzó una superficie máxima de 506.45 m² para el mes de enero y un mínimo de 273.53 m² en octubre; en atajado 2, registró 378.21 m² en el mes de enero y 0.01 m² en noviembre y diciembre, siendo el atajado más pequeño y con menor capacidad que estuvo a punto de secar en noviembre y diciembre.

Los atajados 1 y 2, por estar ubicados en la parte superior de la microcuenca recibieron la recarga de agua, gracias a las primeras precipitaciones del mes de octubre y noviembre que permitió recuperar el nivel de superficie evaporante.

Figura 15: Superficie evaporante en atajados y su relación con el tiempo (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos, muestran que el comportamiento de las superficies de agua libre expuestas a la evaporación en atajados, presentan su máximo nivel en los meses de enero, febrero y marzo, siendo que las precipitaciones de la época permiten llenar o completar la capacidad de almacenamiento del atajado.

A partir del mes de abril, los niveles de agua y el área evaporante van disminuyendo hasta llegar al mínimo nivel en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, presentándose también en esta época los índices más altos de radiación neta. Luego de este periodo, las primeras lluvias de los meses de octubre, noviembre y diciembre permiten la recuperación del volumen de agua y superficie de evaporación.

Cuadro 11: Capacidad de almacenamiento y pérdidas por evaporación en atajados.

Variable	Atajado 1	Atajado 2	Atajado 3
Capacidad de almacenamiento (m ³)	870,12	477,56	1514,44
Evaporación (mm/año)	1192,84	1650,33	1310,58
Pérdida anual por evaporación (m ³)	461,21	250,25	620,73
Pérdida anual por evaporación (%)	53%	52%	41%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados en el Cuadro 11, corroboran que el atajado 3 presenta una mayor capacidad de almacenamiento de agua con 1514.44 m³, seguido del atajado 1 con 870.12 m³ y finalmente el atajado 2 con 477.56 m³.

Con respecto al volumen de agua perdido por evaporación, en relación a las pérdidas por infiltración, se tiene un porcentaje de evaporación de 53 y 52% para los atajados 1 y 2, y del 41% para el atajado 3. Los resultados obtenidos estarían cercanos a estudios reportados por Goetter (2010), que menciona pérdidas del agua por evaporación en atajados para la región de Aiquile y Mizque en un 63% del volumen total almacenado.

En el contexto y escenarios de cambio climático, López (2008) indica que un incremento medio de las temperaturas anuales de 2 °C, ocasionaría el incremento en las tasas de evaporación en un 10 al 20%. Por su parte el PNUD (2011), menciona que el clima es más impredecible y severo en situaciones de sequía y calor intenso. Las lluvias llegan más tarde y se ha acortado la época entre la primera y la última lluvia. Las precipitaciones son más fuertes y más cortas, los espacios entre una precipitación y otra son más largos.

5.3.2.1 Relación de evaporación y superficie de evaporante

Analizando la relación o dependencia de variables del comportamiento de tasas de evaporación y la superficie evaporante en atajados, mediante las Figuras 16, 17 y 18, se puede referir que existe una relación proporcional inversa entre el tamaño de la superficie evaporante y el volumen de evaporación acumulados. El tamaño de la superficie evaporante está dada por la capacidad de

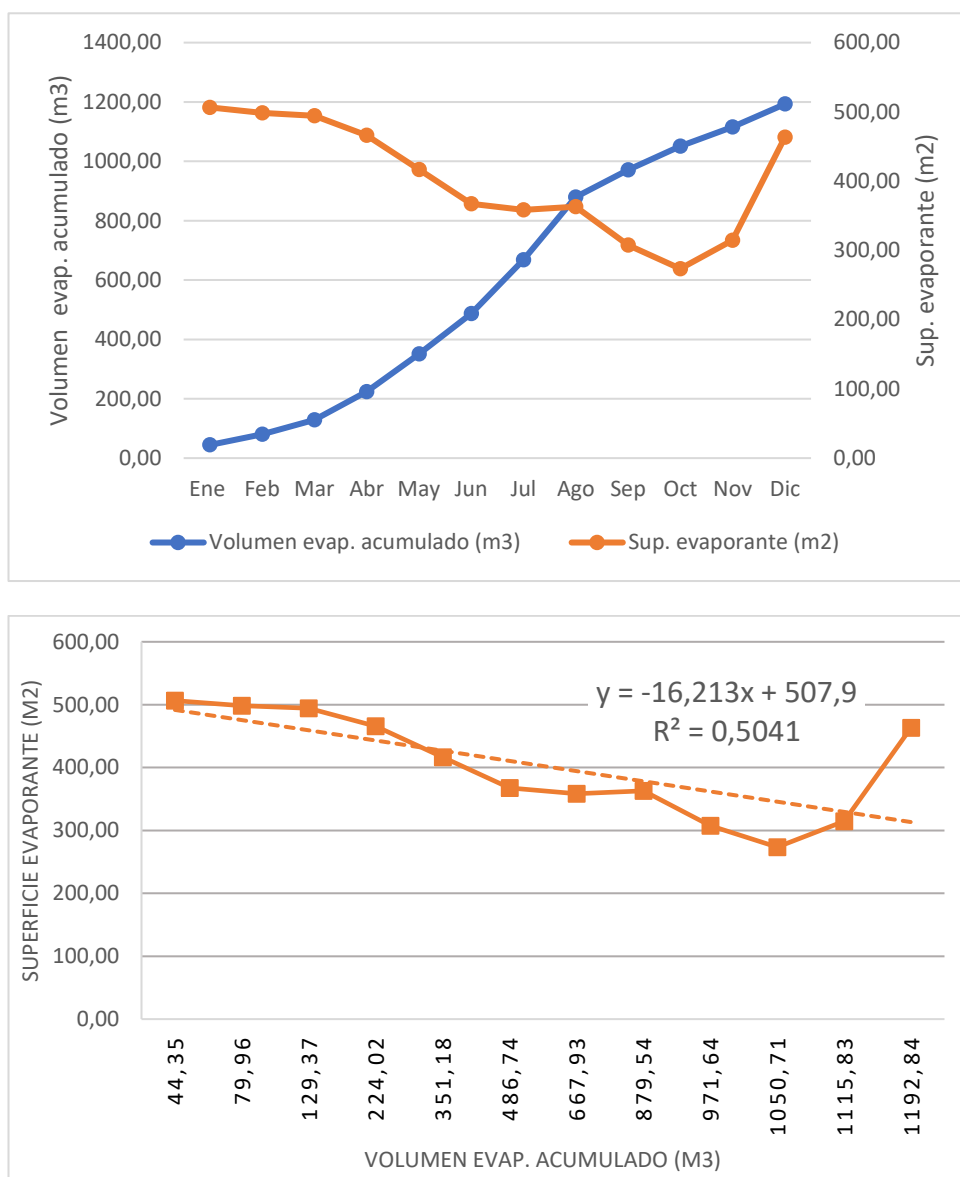
almacenamiento, siendo que atajados con mayor superficie evaporante también tienen mayor capacidad de almacenamiento o tamaño.

Representando que a mayor tamaño del reservorio de agua y superficie evaporante se tiene una menor evaporación del agua, la misma es respaldada por el análisis y valores de correlación (R^2) y líneas de tendencia de pendiente negativa.

El atajado 1 (Figura 16), con máxima superficie evaporante de 506.45 m² en el mes de enero, baja a un mínimo nivel de agua en octubre con 273.53 m². Registra una tasa de evaporación acumulado de 1192.84 mm/año, presentando un incremento considerable de evaporación entre los meses de mayo a diciembre, que repercutió directamente en la disminución del tamaño o superficie evaporante, excepto entre los meses de noviembre y diciembre donde se tiene la recuperación del nivel del agua por la recarga de las primeras precipitaciones de la época que fue favorecida por la ubicación media en la microcuenca.

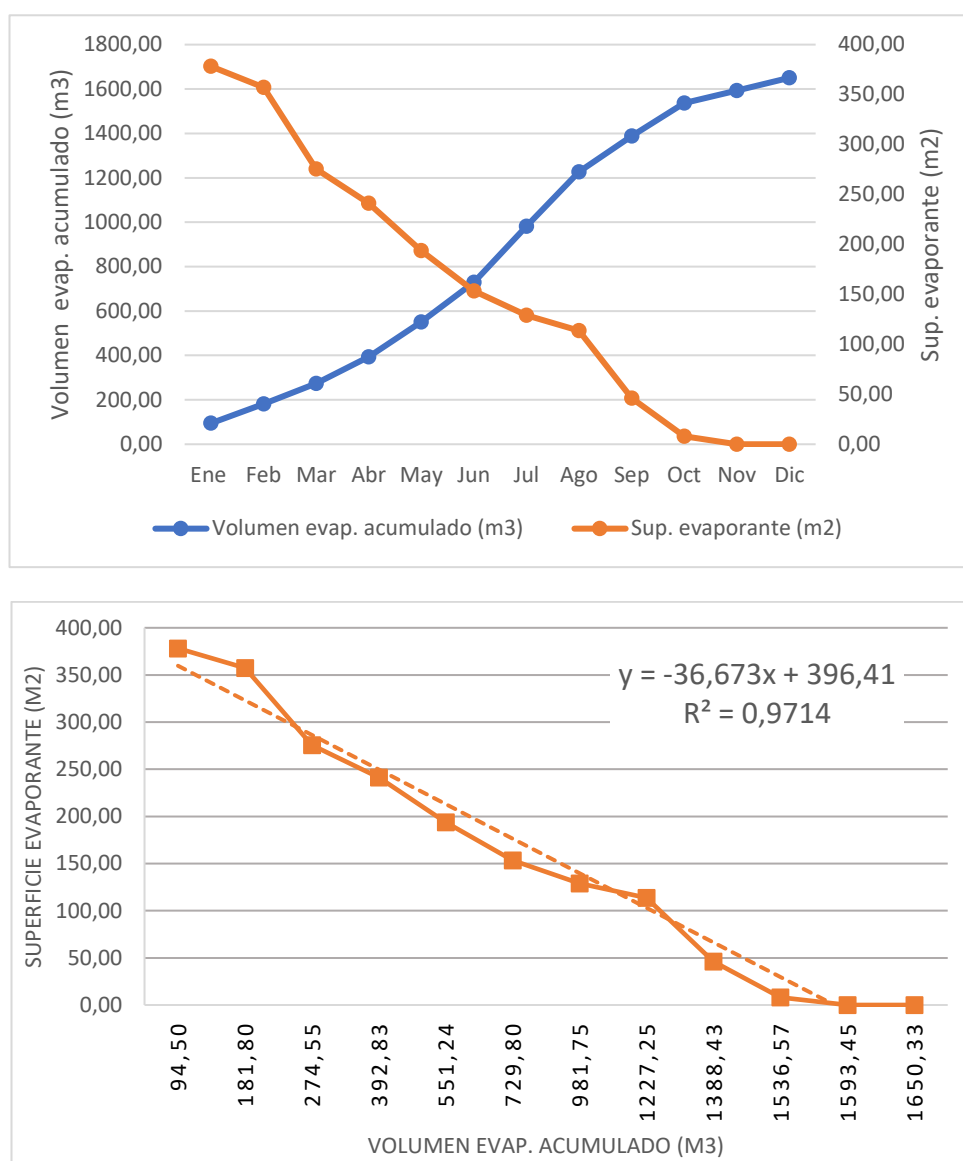
La correlación ($R^2=0,50$) y una tendencia mínima con pendiente negativa a la disminución de la superficie evaporante con respecto al volumen acumulado de evaporación, significa una disminución de 16.21 unidades de superficie evaporante por cada unidad de volumen evaporado. Confirmando la relación directa entre la superficie evaporante y la evaporación acumulada, teniendo mayor evaporación a menor superficie evaporante que esta dado por una menor cantidad de agua en el atajado, que coincide con la época de estiaje.

Figura 16: Atajado 1. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Atajado 2. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. Superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

El atajado 2 (Figura 17), presenta máxima superficie evaporante en el mes enero con 378.21 m² y las mínimas en los meses de noviembre y diciembre con 0.01 m², donde estuvo a punto de secarse y tampoco tuvo recarga de agua de las primeras precipitaciones por estar ubicado al final de microcuenca. El atajado registró la mayor tasa de evaporación anual de 1650.33 mm/año con respecto a 1192.84 y 1310.58 mm/año de los atajados 1 y 3, el mismo se atribuye

directamente a la menor superficie evaporante y capacidad de almacenamiento del reservorio.

La misma es coincidente por la alta correlación ($r^2 = 0,97$) o dependencia de variables, que representa una pérdida de agua por evaporación de 36.67 unidades de superficie evaporante por cada unidad de volumen evaporado.

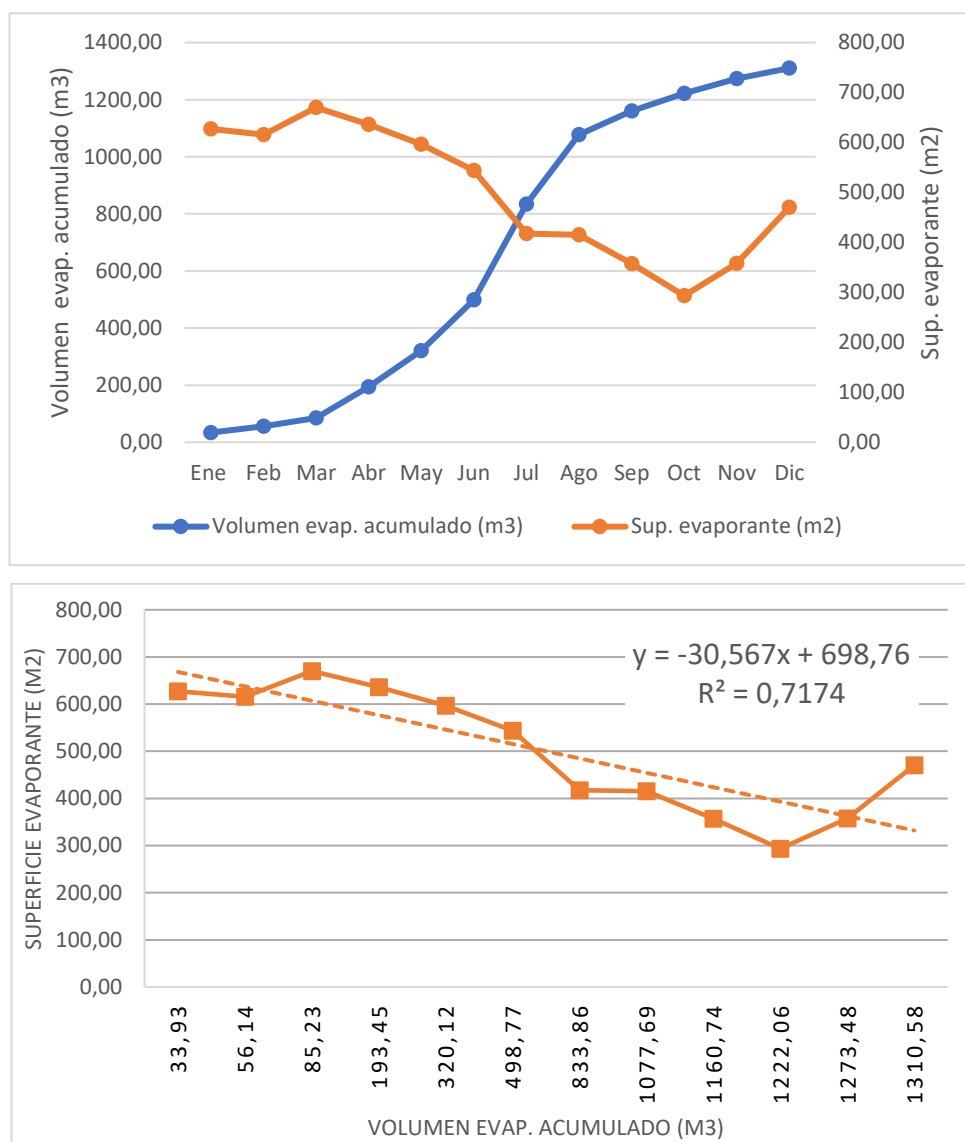
Al respecto Yugar y Cahuana, (2009) afirman que a menor superficie evaporante, se incrementa la magnitud de evaporación. Cuando la superficie evaporante crece, la magnitud de evaporación decrece, llegando a ser insignificante en grandes lagos.

El atajado 3 (Figura 18), reservorio de mayor tamaño, registró su máximo superficie evaporante en marzo con 670.09 m² y una mínima de 293.42 m² en octubre, por su ubicación de estar al inicio de la microcuenca tuvo recargas de agua de las precipitaciones a partir de los meses de noviembre y diciembre.

En el atajado 3, se presentó una evaporación anual de 1310.58 mm/año, y una alta correlación ($R^2=0,71$) de variables, que significan la pérdida de 30.56 unidades de superficie evaporante por cada unidad de volumen evaporado.

Los 3 atajados, en los meses de junio, julio y agosto muestran un punto de inflexión e intersección, entre la reducción de la superficie evaporante y el incremento del volumen de evaporación acumulado que es atribuido a la mayor radiación neta, heladas y vientos fuertes de la época seca que incrementan las tasas de evaporación.

Figura 18: Atajado 3. Relación del volumen de evaporación acumulado vs. Superficie evaporante (marzo 2018 a febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Volumen de infiltración y evaporación

Las pérdidas de agua por infiltración, se calculó mediante la obtención del índice de permeabilidad (K) en el suelo según la metodología descrita por la FAO (2019).

Cuadro 12: Índice de permeabilidad de suelos.

Atajado	Permeabilidad K (m/s)	Tipo de suelo
1	$2.39 \cdot 10^{-8}$	Arcilloso arenoso
2	$5,05 \cdot 10^{-8}$	Arcillo arenoso
3	$1,2 \cdot 10^{-8}$	Arcilloso

Fuente: Elaboración propia en base datos de campo.

En el cuadro N°12, se puede observar índices de permeabilidad obtenidos en campo, registrándose $2.39 \cdot 10^{-8}$ m/s, $5,05 \cdot 10^{-8}$ m/s y $1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s para los atajados 1, 2 y 3, que implicaría una mayor permeabilidad del suelo en el atajado 2.

Los resultados del índice de permeabilidad (K), están relacionados directamente con el tipo de suelo, los suelos arcillosos por su mayor capacidad de retención de agua y baja permeabilidad son considerados los más apropiados para la construcción de atajados.

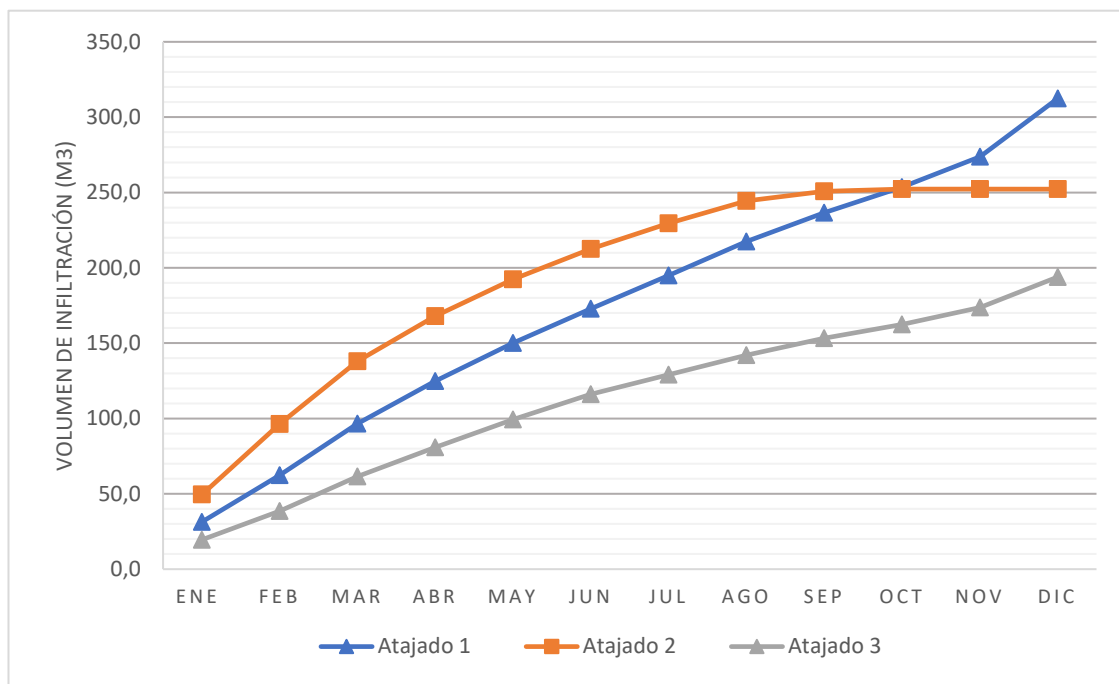
Los valores obtenidos pueden ser considerados buenos para la construcción de atajados, según Angelone *et al.* (2006) los valores de K, entre 10^{-6} a 10^{-9} , se clasifican como suelos prácticamente impermeables, es decir arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición. La permeabilidad aumenta en relación directa con el tamaño de las partículas que determina la porosidad.

En la Figura 19, se puede observar el volumen de pérdidas de agua por infiltración de 312.3 m^3 , 252.2 m^3 y $193,9 \text{ m}^3$ para los atajados 1, 2 y 3. La mayor tasa de infiltración en los atajados 1 y 2, se justifican por presentar un tipo de suelo arcillo arenoso, contrariamente en el atajado 3 se tiene menor volumen de infiltración por presentar suelo de tipo arcilloso, que se traduce en una mejor retención del agua. Para el caso, se menciona que los atajados nuevos presentaría una mayor infiltración en los primeros 3 años, para el presente estudio los atajados cuentan con más de 23 años de uso.

Asimismo, se puede observar que los volúmenes de infiltración están en relación a la cantidad de agua contenida en los reservorios, presentándose una

disminución del volumen de infiltración cuando se tiene menor volumen de agua en los atajados, como ocurre en el caso del atajado 2.

Figura 19: Volumen acumulado de infiltración en atajados (marzo 2018 y febrero 2019).



Fuente: Elaboración propia.

La retención de agua de un suelo que contiene gran cantidad de arcilla está estrechamente ligada a la presión osmótica. El hinchamiento de suelos arcillosos es causado por la elevada retención de agua debido a la presión osmótica, así como a las fuerzas moleculares entre la arcilla y el agua y a las fuerzas eléctricas de la doble capa alrededor de las partículas de arcilla (Maestre, 2006).

También estas diferencias del volumen de evaporación se pueden atribuir a la variabilidad de permeabilidad y/o infiltración del agua por el tipo de suelo durante el año, que está directamente relacionado con las precipitaciones y el periodo de estiaje.

CONCLUSIONES

- Para las condiciones de la Comunidad Laka Pucara del Municipio de Corocoro, la autocorrelación de series tiempo de precipitaciones, por presentar una serie acíclica y estadísticas no claras, por posible enmascaramiento de anomalías con respecto al promedio normal, no se acepta totalmente la hipótesis nula.
- La serie histórica de precipitación del periodo 1971 al 2018 muestra un promedio de 422.03 mm/año, presentándose una precipitación máxima de 785.6 mm en 1997, y mínimas de 209.2 mm y 223 mm en 1980 y 1983, que coinciden con la ocurrencia del fenómeno de El Niño, el máximo del ciclo solar y posibles indicios del cambio climático.
- La precipitación promedio de últimos 5 años (372.2 mm) es inferior a la precipitación histórica promedio de 422.03 mm/año. El comportamiento puede ser por la variabilidad climática y efectos propios del cambio climático, estudios de modelamiento de escenarios pronostican disminución de precipitaciones para el Altiplano a finales del siglo XXI.
- La evaporación histórica en tanque evaporímetro de la Estación Meteorológica de Patacamaya del periodo 1971 – 2016, muestra un promedio anual de 1774.30 mm/año, presentando una pendiente negativa de correlación, que expresa la disminución mínima de 0,98 unidades de evaporación por cada unidad de tiempo. El promedio de evaporación de últimos 5 años (1862.7 mm/año) es mayor al promedio histórico normal, representando esto un incremento de la evaporación, por posibles efectos del cambio climático.
- La evaporación en tanque evaporímetro de la Comunidad Laka Pucara, es aproximado a la evaporación histórica promedio de la estación meteorológica de Patacamaya, y superior al promedio histórico de San Calixto (La Paz), presentando valores de 1763.75 mm/año en Laka Pucara, 1774.30 mm/año en Patacamaya y 1038.72 en San Calixto de la Ciudad de La Paz. La aproximación del promedio de evaporación de Patacamaya, puede ser atribuida a la cercanía, condiciones climáticas y topográficas similares de ambas zonas.

- La evaporación mensual en tanque evaporímetro, es influenciada por el comportamiento climático del año (época húmeda y seca), teniendo como elementos sensibles a la radiación neta, nubosidad y precipitaciones. Los resultados muestran mayores volúmenes de evaporación entre abril a diciembre con valores que oscilan entre 140 a 207 mm/mes, y menor evaporación en enero, febrero y marzo con 58, 60 y 66.3 mm/mes.
- La mayor evaporación en tanque evaporímetro en relación a los atajados, se atribuye a la mayor capacidad de almacenamiento de agua y acumulación de calor, color y cantidad de sólidos suspendidos en agua de los atajados, que provoca una disminución en su presión de vapor y por lo tanto una reducción en la evaporación. El volumen de evaporación de agua en tanque evaporímetro de 1763.75 mm/año es mayor al registrado en los atajados (1192.84 mm/año, 1650.33 mm/año y 1310.58 mm/año para los atajados 1, 2 y 3).
- La evaporación en atajados, está relacionada con el tamaño del área evaporante y principalmente al tamaño del reservorio, siendo que atajados de mayor tamaño o capacidad de almacenamiento registran menores volúmenes de evaporación. El atajado 3, con mayor área evaporante de 627.22 m² en el mes de enero, presentó una evaporación de 1310.50 mm/año; el atajado 1, con área evaporante de 506,45 m² presentó 1192.84 mm/año y el atajado 2, con menor área evaporante de 378,21 m² presentó una mayor evaporación anual de 1650.3 mm/año.
- El análisis estadístico de comparación de medias de Tukey, sobre la evaporación en 3 atajados, no presenta diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%. Se concluye que las diferencias del tamaño y capacidad de almacenamiento de agua en los 3 atajados en estudio, estadísticamente no inciden en las pérdidas por evaporación.
- Mediante los resultados del análisis de estadístico de correlación (R^2) entre la superficie evaporante y evaporación, se concluye una relación proporcional inversa, donde a medida que se reduce la superficie evaporante se incrementa la evaporación acumulada.

- Las pérdidas del volumen de agua por evaporación, muestran una tasa de evaporación de 53% y 52% para los atajados 1 y 2, y del 41% para el atajado 3, que son atribuidas al tamaño del área evaporante, capacidad de almacenamiento y tipo de suelo que influye en la infiltración.

RECOMENDACIONES

- Continuar con estudios de variación de patrones de precipitación y posibles efectos del cambio climático en la evaporación del agua en reservorios y de riego.
- Ante escasos estudios de evaporación de agua en reservorios de cuerpo libre, se recomienda realizar otras investigaciones, tomando en cuenta los elementos del clima y el ciclo solar.
- Realizar estudios de modelamiento matemático de escenarios sobre la evaporación de fuentes de agua y la disponibilidad de agua para las actividades agrícolas.
- Promover innovaciones tecnológicas de adaptación al cambio climático, para disminuir la evaporación del agua, planteando diseños y construcciones con menor superficie evaporante y mayor capacidad de almacenamiento, uso de mallas semi sombras y otros.
- Realizar estudios del comportamiento de la infiltración del agua durante el año, efectuando el estudio de los coeficientes de permeabilidad tanto en campo y laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC Ciencia. El sol se acerca a un cambio de ciclo: ¿Qué consecuencias tendrá para la tierra? Madrid, España. [fecha de consulta: 6 marzo 2020] <https://www.google.com/amp/s/www.abc.es/ciencia>
- ANDERSEN, E. Y JEMIO, L.C. 2015. La dinámica del cambio climático en Bolivia. Fundación INESAD – BID. La Paz, Bolivia. 327 p.
- ANDRESSEN, L., MONASTERIO, M., TERCEROS, L. 2006. Regímenes climáticos del altiplano sur de Bolivia: una región afectada por la desertificación. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 48(1) 2007. 22 p.
- ANGELONE, S., GARIBAY, M., CAUHAPÉ, M. 2006. Geología y Geotecnia. Permeabilidad de suelos. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Rosario, Argentina. 39 p.
- APMT (AUTORIDAD PLURINACIONAL DE LA MADRE TIERRA), AGUA SUSTENTABLE. 2015. Manejo de Zonas de Vida más Vulnerables al Cambio Climático en la Región Sur del Altiplano del Departamento de La Paz "Proyecto Cambio Climático Altiplano Sur". La Paz, Bolivia. 302 p.
- APMT (AUTORIDAD PLURINACIONAL DE LA MADRE TIERRA). 2015. Política Plurinacional de Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. La Paz, Bolivia. 150 p.
- AYALA G., TORREZ E., VEIZAGA A., LIMACHI O. 2015. Las Ciencias Ancestrales como Mecanismo de Adaptación al Cambio Climático. Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, Agua Sustentable. Plural Editores. La Paz, Bolivia. 68 p.
- BARRERA, A. 2004. Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Universidad de Barcelona, Departamento de Astronomía y Meteorología. 96 p.
- BATEMAN, A. 2007. Hidrología Básica y aplicada. Grupo de investigación en transporte de sedimentos. 70 p. [fecha de consulta: 29 julio 2018] Disponible en <https://www.upct.es>

- BATES, B.C., Z.W. KUNDZEWICZ, S. WU Y J.P. PALUTIKOF, 2008. El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC. Ginebra. 224 p.
- BREÑA, A., JACOBO, M. 2006. Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 287 p.
- CASTILLO, C. 2005. Selección y calibración de indicadores locales y técnico para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cuscamá el Tuma – La Dalia Matagalpa. Trabajo Diploma. Universidad Nacional Agraria. Facultad de Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Managua Nicaragua. 91 p.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), BIB (Banco Interamericano de Desarrollo), 2014. La Economía del Cambio Climático en el Estado Plurinacional de Bolivia. 97 p.
- CHOW V. T., MAIDMENT D. R., MAYS L.W. 1999. Hidrología aplicada. Mc – Graw Hill latinoamericana. S.A.
- CORDERO, C. y GUTIERREZ, J. 2012. Conociendo el reto de la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario. Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO). La Paz, Bolivia. 23 p.
- CORINNE, V., SETH, A., JIMENEZ, E., CUSICANQUI, J. 2013. Cambio climático y adaptación en el Altiplano de Bolivia. CIDES, UMSA. Plurales editores, 1ra. Ed. La Paz, Bolivia. 257 p.
- DAVILA, C. 2016. Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la ocurrencia de Heladas en el Altiplano Peruano. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias. Tesis de Grado de Ingeniero Ambiental. 83 p.
- DORY, D. 1998. Características y variaciones del clima en Bolivia. En: Seminario el Fenómeno del Niño en Bolivia, evaluación, balance y perspectivas. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. La Paz, Bolivia. 281 p.

- DUHAU, S. 2010. Actividad solar y cambio climático. Departamento de Física, Facultad de Ingeniería - UBA. Buenos Aires, Argentina. 6 p.
- FAO. 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina. Santiago de Chile. 235 p.
- FAO. 2006. Evaporación de cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 298 p. [fecha de consulta: 10 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.fao.org> ISBN:92-5-304219-2
- FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ta. Ed. Roma, Italia. [fecha de consulta: 26 agosto 2018] Disponible en: <http://www.fao.org>
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. 272 p.
- FAO. 2019. Permeabilidad del suelo. [fecha de consulta: 20 abril 2019]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/FICDrom/FAO_Trair
- FERNÁNDEZ, F., MORALES, M. (2012). Costos de generación de electricidad fotovoltaica en Bolivia y barreras para su expansión. Universidad Mayor de San Simón, Programa de Doctorado en Energía / ENERGETICA. Cochabamba, Bolivia. 9 p.
- FLORES, C. 2012. Rescate y análisis de datos históricos de la precipitación de Chile central a partir de Anuarios Meteorológicos. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. 26 p. [fecha de consulta: 20 julio 2018]. Disponible en: <http://google.com//cybertesis.uach.cl>
- FLORES, L., ALCALÁ, J. 2010. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Departamento de Edafología. 56 p.
- FRÖDE B., SCHWEDERSKY T., 2011. Integrando la adaptación al cambio climático en la planificación del desarrollo. Manual de capacitación. Programa de la protección climática, GIZ. Eschborn, Alemania, 93 p.

- GAMC (GOBIERNO AUTONOMO MUNICIPAL DE COROCORO). 2016. Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI) del Gobierno Autónomo Municipal de Corocoro 2016 -2020. La Paz, Bolivia. 132 p.
- GARCÍA M., TABOADA C., YUCRA E., 2006: Evaluación de las tendencias del balance hídrico como indicador del cambio climático. Ministerio de Planificación del Desarrollo, PNCC. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Paz, Bolivia.
- GARCÍA, E., MENA, C., CONDE, E., ALVAREZ, E., LIMACHI, H., CUSI, I., CONDORI, J., VLADIVIA, J. y GUTIRREZ, K. 2015. Caracterización de la gestión del riesgo en cultivos agrícolas e indicadores de adaptación al cambio climático. Departamento de Investigación, Post Grado, Gestión e Interacción Social (DIPGIS) de la Universidad Mayor de San Andrés. 67 p.
- GARCÍA, E., MENA, C., CONDE, E., ALVAREZ, E., LIMACHI, H., CUSI, I., CONDORI, J., VLADIVIA, J. y GUTIRREZ, K. 2015. Evaluación de la vulnerabilidad y formulación de propuestas de adaptación al cambio climático con enfoque de sistemas de producción agrícola. Departamento de Investigación, Post Grado, Gestión e Interacción Social (DIPGIS) de la Universidad Mayor de San Andrés. 49 p.
- GIDAHATARI. 2019. Métodos de estimación para completar datos de precipitación. Lima, Perú. [fecha de consulta: 22 agosto 2018]. Disponible en: gidahatari.com/ih-es/métodos-estimacion-completar-datos
- GIODA, A. y PRIETO, M., 1998. Variabilidad climática y documentos históricos en la antigua Charcas (Bolivia) entre los siglos XVI y XIX. En Seminario: El Fenómeno del Niño en Bolivia, Evaluación balance y perspectivas. SENAMHI. La Paz, Bolivia. 281 p.
- GMC (GOBIERNO MUNICIPAL DE COROCORO). 2005. Plan de Desarrollo Municipal (PDM) de Corocoro 2005-2009 [en línea] La Paz, Bolivia: CONCURSUL SRL. [fecha de consulta: 26 agosto 2016]. Disponible en: http://es.slideshare.net/doctora_edilicia/pdm-corocoro

- GOETTER, J. 2010. Cambio climático y cosecha de agua como medida de adaptación. Cochabamba, Bolivia: Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO). 2010. 42 p.
- HERNANDEZ, A. 2007. Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 - 105 °C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. República de Colombia. 7 p. [fecha de consulta: 20 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co>
- HUNTINGTON T. G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *J. Hydrol.* 319: 83–95 p.
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change), 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático por sus siglas en inglés) (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, 104 p.
- JOHNSON, V. 2009. Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del Altiplano Chileno. Pontificia Universidad Católica de Chile. Tesis de grado de Magister de Ciencias de la Ingeniería. 180 p.
- LOPEZ, J.I. 2008. Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Perineo. Universidad de la Rioja. Instituto Pirenaico de Ecología. Zaragoza, España. 61-81 pp.

- LUCANO M., 2010. Atlas de Radiación Solar Global de Bolivia. Universidad Mayor de San Simón, Departamento de Física, Energética. Cochabamba, Bolivia. 2 p.
- LUCANO M., FUENTES I., 2010. Mapa Solar de Bolivia. Universidad Mayor de San Simón, Energética. Cochabamba, Bolivia. 1 p.
- LUJANO, E., SANCHEZ, L., AGUILAR, R., TAPIA, B. y LUJANO, A. 2016. Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 Y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el altiplano peruano. Revista de Investigación Alto Andina 2016; Vol. 18, N° 2: 195 – 204.
- MAESTRE, V. 2006. Modelo en red para la simulación de procesos de difusión de agua en suelos agrícolas. Cartagena, Colombia. 5 p.
- MAMANI, A. 2011. Relación entre la evapotranspiración de referencia con el déficit de presión de vapor influenciada por la velocidad del viento en la Estación Meteorológica Puno. Universidad Nacional del Altiplano Puno, Facultad de Ingeniería Agrícola. Tesis para optar título profesional de Ingeniero Agrícola. Puno, Perú. 118 p.
- MALDONADO, B. 2004. Determinación de la recarga hídrica y propuesta de lineamientos de protección de los recursos naturales, aldea Chojzunil, Santa Eulalia, Huehuetenango. Tesis Ing. Agr. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas. Guatemala. 109 p.
- MARTINEZ, V., MOLINA, J. M., BAILLE, A. 2003. Reducción de la evaporación con mallas de sombreado. Coeficientes experimentales y caracterización de las mallas. II Congreso de Agro ingeniería. Colombia. 6 p.
- MARTINIC, N. J., MAMANI, B., ROJAS, J. 1998. Aproximación Climática del Altiplano Norte. En: Seminario el Fenómeno del Niño en Bolivia, Evaluación, Balance y Perspectivas. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 38 – 49 p.
- MAURICIO, J.A. 2007. Análisis de series temporales. Universidad Complutense de Madrid, España. 295 p.

- MENDEZ, A. 2013. Series de tiempo: Una aplicación a registros hidrométricos en una cuenca del Estado de Oaxaca", Mexico.92 p.
- MOLINA, J. 2004. Caracterización y modelización de la evaporación en tanques evaporímetros y embalses de riego. Evaluación de los efectos de mallas de sombreo. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de ingeniería de alimentos y del equipamiento agrícola. Cartagena, Colombia. 234 p.
- MVOTMA (Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente), 2011. Manual de diseño y construcción de pequeñas presas. Volumen 1: Diseño Hidrológico/Hidraulico. Montivideo, Uruguay. 116 p.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), 2019. El vapor de agua confirmado como jugador principal en el cambio climático. [fecha de consulta: 26 agosto 2019]. Disponible en: https://www.nasa.gov/topics/earthfeatures/vapor_warming.html
- NORDGREN, M. 2011. Cambios Climáticos. Percepciones, efectos y respuestas en cuatro regiones de Bolivia. Centro de Investigación y Promoción del Campesinado (CIPCA). La Paz, Bolivia. 158 p. ISBN:978-99954-35-57-8
- PHI (Programa Hidrológico Internacional). 2018. El Ciclo del agua. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). [fecha de consulta: 20 julio 2018]. Disponible en: <https://www.water.usgs.gov/edu/>
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2007. Foro virtual cambio climático. Reducción del riesgo de desastres y su impacto en la seguridad alimentaria nacional. Documento de trabajo para el debate y la reflexión social. MDRyT. La Paz, Bolivia. 113 p.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2011. Tras las huellas del cambio climático en Bolivia. La Paz, Bolivia. 150 p.
- PROAGRO-GIZ (Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable – Agencia Alemana de Cooperación Técnica). 2012. Curso crédito “Cosecha de agua con atajados”. Identificación y diseño de proyectos integrales de

cosecha de agua con atajados con enfoque de adaptación al cambio climático.

QUNTANILLA, J., GARCIA, M.E., RAMOS, O., NIURA, A., LORINI, J., PELAEZ, C. y ROTTING, T. 2012. Síntesis del Diagnóstico Ambiental de la Cuenca del Lago Poopó Oruro, Bolivia. Instituto de Investigaciones Químicas, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 138 p.

REYES, P. 2007. Metodología de Análisis con Series de Tiempo.

RIOS, G. 2008. Series de tiempo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ciencias de la Computación. 52 p. [fecha de consulta: 3 diciembre 2017]. Disponible en: [https://www. u-cursos.cl](https://www.u-cursos.cl).

SANABRIA, J., MARENGO, J. y VALVERDE, M. 2009. Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). Revista Peruana Geo Atmosférica RPGA (1) 134 -149.

SARRICOLEA, P., ROMERO, H. 2015. Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. Departamento de Geografía, Universidad de Chile. Revista de Geografía Norte Grande. N° 62. Santiago de Chile.

SÁNCHEZ I., OJEDA W., VILLANUEVA J., DÍAZ G., VELÁSQUEZ M., MUÑOZ J. 2007. Clima y disponibilidad de agua: Análisis del pasado para prever el futuro. México. 8 p.

SANCHEZ, J. 2018. Precipitaciones. Departamento de Geología Universidad Salamanca. España. 10 p. [fecha de consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://hidrología.usal.es>

SEMTA (Servicios Múltiples de Tecnologías Apropriadas). 2000. Cartilla de uso y manejo del agua de lluvias. La Paz, Bolivia: Artes gráficas Sagitario. 27 p.

- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2013. Atlas Climatológico de Bolivia. La Paz, Bolivia. 250 p.
- TAMMES, B., VILLEGAS, E., GUAMAN, L. 2000. Atajados, Su Diseño y Construcción. Plural Editores. Cochabamba –Bolivia. 100 p. ISBN: 99905-62-41-5
- TAPIA, J. 2016 Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de un gradiente altitudinal. Tesis de grado Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca. Ecuador. 71 p.
- TORREGROSA, A. 2017. Análisis del ciclo de actividad solar y su influencia en la Tierra. Facultad de Ciencias - Sección de física, Universidad de La Laguna. Trabajo de Fin de Grado. Laguna, España. 47 p.
- VALDIVIA, C., SETB, A., JIMENEZ, E. y CUSICANQUI, J. 2013. Cambio Climático y adaptación en el Altiplano de Bolivia. Plural Editores. CIDES - UMSA. La Paz, Bolivia. 257 p.
- VILLEGAS, E., VILLEGAS, Á. 2006. Un Atajado como concepto, PGRSAP-GTZ, San Pedro de Buena Vista – Potosí, 2006.
- YUGAR W. y CAHUANA A. 2009. Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 414 p.

ANEXOS

**ANEXO 1. PRECIPITACIÓN HISTORICA ESTACIÓN METEOROLOGICA DE
CALACOTO (mm).**

ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1971	35	80	16	5	0	0,4	0	0	0	3	29	84	251,60
1972	132	67	109	13	0	0	0	0	28	14	27	47	436,40
1973	165	97	29	21	3	0	4,6	11	10	24	8,2	34	405,30
1974	173	231	65	35	0	2,1	0	68	3,4	5,9	19	42	644,30
1975	148	141	34	12	16	12	0	1,4	9,5	27	18	86	503,70
1976	98	59	40	15	0,8	0	9,3	37	26	3,1	5,6	25	317,60
1977	67	119	37	0	4,7	0	0	0	4,7	8,1	58	62	360,50
1978	99	71	24	12	0	0	1,2	4	0,1	6	40	190	446,40
1979	157	59	97	2,4	0,8	0,1	1,2	0	0	17	2	83	419,20
1980	48	24	59	0	6,2	0,1	3,6	1,3	9,5	15	15	28	209,20
1981	55	65	40	41	0	0	0	19	30	4	27	80	359,00
1982	132	69	86	6,2	1	2	0	0	21	15	49	51	432,40
1983	37	66	5,2	24	0	0	0	8,2	21	0,2	5,7	56	223,00
1984	177	51	90	3,1	5,8	15	0	5,5	0,3	28	84	52	510,67
1985	117	108	58	47	2,6	15	0,1	1,5	32	2,4	61	94	539,00
1986	61	48	88	40	0	0	0	0	0	0	0	79	315,80
1987	184	46	23	7	3	1	7,5	0	0	45	66	3	385,00
1988	152	38	141	48	23	13	0	0	0	11	0	54	478,10
1989	154	45	48	15	0	3	6	2	2,3	17	16	27	334,90
1990	80	43	22	15	5,8	40	0	16	2	64	21	79	387,40
1991	161	52	81	20	0	17	0	0,2	0,1	21	25	90	466,70
1992	90	29	17	3,1	0	0,8	0,5	20	1,2	33	35	62	292,00
1993	152	24	47	3	1,2	1,2	0	33	11	46	30	95	445,00
1994	80	171	26	14	0	1	0,1	0	0,4	1,4	22	94	408,60
1995	63	54	93	0	0	0	0	9,1	7,9	0	19	68	313,70
1996	163	54	24	49	9	0	0	23	1,5	1	43	167	534,70
1997	235	261	65	29	0	0	0	24	78	0	29	66	785,60
1998	94	95	19	31	0	8,9	0	0	2,5	6,6	37	17	310,50
1999	43	108	127	46	2,8	0	0	0	0	66	1	18	412,50
2000	133	66	115	0	0,7	1	0	0,5	0,7	25	0,2	78	421,10
2001	199	94	126	20	0	0	0	3	0	3,3	7	83	534,60
2002	72	114	45	31	2	16	7,2	5,2	0	40	23	66	422,50
2003	117	74	93	5	0	0	2,5	7	0,7	0	3,5	78	379,70
2004	163	91	65	6,9	5,3	0	39	35	1	0,3	13	35	453,90
2005	100	116	40	2,5	0	0	0	0	23	17	47	101	446,60
2006	260	81	53	9,3	0	0	0	0	1,5	32	41	73	550,50
2007	58	51	126	11	1,8	0	0	0	5,9	25	26	92	396,20
2008	200	44	37	1,6	0	0	0	4,6	0	22	7,9	104	420,20
2009	99	95	54	56	0	0	2,5	0	10	5,4	80	115	517,80
2010	143	90	42	35	23	0	0	3,5	29	43	4	47	458,50
2011	81	93	75	20	3,3	0	8	0	4,5	2	40	143	469,80
2012	122	140	99	19	0	0	4,1	0	0	2,5	15	110	510,16
2013	181	89	22	9,5	21	18	0	10	0	43	6	111	511,10

2014	148	66	23	17	3	0	0	0	7	12	34	44	353,40
2015	137	37	65	18	0	0	13	0	3,2	16	17	51	355,30
2016	36	97	37	58	0	0	2,8	0	0,2	5,2	6,5	77	318,20
2017	97	56	65	17	17	0	0	2,4	4,9	20	22	85	387,19
2018	131	81	65	23	5,1	2,5	4,1	2,1	4,7	20	22	86	447,15
Promedio 1971-2017	121,2	82,2	59,4	19,0	3,5	3,6	2,4	7,6	8,4	16,9	25,2	72,8	422,03

Fuente: Elaboración propia, en base a registros históricos del SENAMHI.

ANEXO 2. EVAPORACIÓN HISTÓRICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE PATACAMAYA (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1971	195,4	164,7	160,9	178,0	174,6	168,6	171,2	208,5	201,6	178,1	189,7	166,4	2157,7
1972	146,1	172,2	193,7	198,3	210	128,1	132,4	159,0	175,6	204,5	200,4	163,9	2084,2
1973	141,2	127,7	139,7	140,5	134,5	130,1	133,4	149,6	163,5	189,3	184,2	161,2	1794,7
1974	82,4	110,9	141,3	110,5	105,1	96,3	124,1	114,3	144,8	179,8	163,8	125,6	1499,0
1975	148,1	115,4	143,3	162,6	134	125,9	144,4	173,8	181,4	210,9	228,2	171	1939,0
1976	135	152,8	157	158,2	141,8	127,1	117,1	156	145,2	234,7	227,5	169,2	1921,6
1977	157,1	112,8	133,3	161,9	130,2	122,1	135,9	172,7	175,5	199,2	176,1	174,7	1851,5
1978	159	129,2	150,7	147	139,7	125,3	122,5	167,2	178,6	230,4	193,2	166,1	1908,9
1979	122,2	142,1	135,5	127,5	136,2	129,7	130,3	163,4	184,2	193	223,9	152,3	1840,3
1980	186,8	165,5	139,8	160,5	157,9	132,1	143,1	165	165,4	206	198	197,7	2017,8
1981	151,4	127,3	138,1	130,1	130,3	125,6	135,1	143,5	172,9	193,3	195,2	159,7	1802,5
1982	165,8	156,2	135,5	142,3	131,6	101,7	122,4	133,2	135,8	165	178,5	165,6	1733,6
1983	149,2	169	186,1	158,3	141,4	139,2	144,9	148,3	157,2	183,6	189,6	131,6	1898,4
1984	123,8	110,8	134,1	124,2	125,3	116,2	115,2	126,1	146,2	169,3	162,4	159,2	1612,8
1985	131,8	120,3	136,0	138	127,8	120,6	132,4	172,6	123,7	168,3	149,0	173,0	1693,5
1986	86	100,2	120,5	103	117,9	111,9	100,3	118,6	147,7	156,6	158,2	145,7	1466,7
1987	130,9	135,6	168,1	136	140,9	120,6	130,2	160,5	182,5	171,8	182,9	213,9	1873,9
1988	138	138,5	118,9	114,5	118,0	112,2	114,8	140,0	158,6	144,1	190	185,4	1673,0
1989	140,2	148,1	137,5	129,2	129,5	112,7	121,4	136,8	153,4	171,8	164,7	156,5	1701,6
1990	138,3	119,1	108,7	151,4	129,8	77,8	107,2	123,8	183,2	126,5	176,6	162,7	1605,1
1991	126,8	112,6	123,8	131	117,9	118,0	110,2	114,2	126,6	133,5	117,5	159,9	1492,1
1992	141,2	127,7	139,7	140,5	134,5	130,1	133,4	149,6	163,5	189,3	184,2	161,2	1794,7
1993	112,8	161,4	134,7	144,2	141,9	84,6	112,3	95,1	124,8	195,5	113,6	119,8	1540,7
1994	170,5	120,5	154,5	115,3	98,8	135,1	120,6	148,5	163,4	219,6	172,4	179,4	1798,6
1995	148,6	142,3	127,6	137,9	123,1	103,9	113,1	183,9	126,8	172,6	173,9	169,7	1723,4
1996	156,3	147,5	160,3	135,3	160,9	132,5	146	141,9	175,1	184,5	143	139,3	1822,6
1997	129,7	131,1	146,1	129,2	161	119	145,2	173,5	107,6	169,8	120,9	168,2	1701,3
1998	142,0	130,4	148,5	124,4	169,7	122,7	131,3	161,1	163,4	134,1	143,6	177,1	1748,3
1999	128,8	117,8	118	117,8	115,6	82,8	126	104,6	165,9	171,4	190,9	184,1	1623,7
2000	130,1	90,7	104,3	142	133,5	116	106,9	126,3	158,2	171,4	193,1	149,2	1621,7
2001	130,1	98,2	129,6	104,3	95	109,7	112,1	128,1	185,1	164,9	187,5	125,8	1570,4
2002	145,9	108,1	138,8	150,3	125,7	121,8	111,6	109,6	139,7	135,7	161	143,1	1591,3
2003	119,9	114,8	162,5	143,1	146,6	159,3	134,6	124,9	121,3	195,4	195	169,5	1786,9
2004	82,2	111,8	117,6	103,4	117,6	118,7	101	122,4	153	173,8	186,9	192,4	1580,8
2005	137	116,4	144,1	131,3	148,4	141,3	119,5	146,5	117,3	168,7	166,4	166,8	1703,7
2006	113	114,3	119,7	124,6	81,8	90,2	113,1	152,3	171,1	168,7	166,9	160	1575,7
2007	162	121,6	121,5	130,1	108,6	146,2	94,2	143,7	160,1	193,9	172,4	161,9	1716,2

2008	109,9	135,4	111,7	144,3	133,8	114,4	113,6	143,2	188,1	190,5	183,6	170	1738,5
2009	167,2	124,9	139,4	124,4	117	117,9	143,9	145,6	170,7	145,5	152,8	151,4	1700,7
2010	149,1	153,6	174,1	161,6	156,3	177,3	193	208,8	154,2	153	177	172,1	2030,1
2011	172,4	104,5	138	163,8	190,6	167	175	171,1	261,4	323,7	338,2	161,4	2367,1
2012	119,4	116,7	70,5	168,6	168,3	186,5	193,3	184,5	196,8	201,6	182,2	131,1	1919,5
2013	156,7	115	162,5	150,3	104,3	169,2	192,5	162	169	176,5	172	151,5	1881,5
2014	127,2	129,4	167,4	166,2	167,4	130,9	135,1	154,7	164,3	168,9	174,9	162,0	1848,4
2015	141,2	127,7	139,7	140,5	134,5	130,1	133,4	149,6	163,5	189,3	184,2	161,2	1794,7
2016	140,3	123,6	129,5	152,7	86,7	157,4	157,8	167,3	181,9	206,8	207,3	158,3	1869,6

Fuente: Elaboración propia, en base a registros históricos del SENAMHI.

ANEXO 3. COORDENADAS GEOGRÁFICAS Y ALTITUDES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.

Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Calacoto	-17.28	-68.63	3818
El Alto	-16.51	-68.20	4005
Nuestra Señora La Paz (San Calixto)	-16.50	-68.12	3565
Patacamaya	-17.24	-67.92	3793

**ANEXO 4. REGISTRO DIARIO DE EVAPORACIÓN EN TANQUE
EVAPORIMETRO TIPO A (mm/día)**

FECHA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0,00	0,00		5,00	5,00	3,00	5,00	8,00	17,00	10,00	5,00	15,00
2	0,00	0,00		4,00	6,00	7,50	5,00	8,00	10,00	5,00	5,00	10,00
3	0,00	0,00		6,00	6,00	4,50	5,00	6,00	5,00	0,00	5,00	10,00
4	0,00	0,00		5,00	6,00	0,00	5,00	0,00	5,00	10,00	2,00	10,00
5	0,00	0,00		5,00	5,00	0,00	5,00	0,00	5,00	5,00	3,00	0,00
6	3,00	0,00		5,00	5,00	3,00	5,00	10,00	5,00	2,00	5,00	5,00
7	5,00	0,00	2,00	5,00	7,00	4,50	5,00	10,00	10,00	2,00	0,00	6,00
8	10,00	10,00	0,00	4,00	7,00	4,50	5,00	8,00	10,00	1,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	4,86	4,00	6,00	3,00	12,00	12,00	5,00	10,00	3,00	10,00
10	10,00	0,00	0,00	4,00	6,00	15,00	18,00	10,00	5,00	5,00	5,00	10,00
11	0,00	0,00	3,24	7,00	6,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00	5,00	7,00
12	0,00	0,00	5,00	3,00	7,00	12,00	15,00	10,00	5,00	10,00	5,00	8,00
13	10,00	0,00	0,00	8,00	5,00	18,00	10,00	10,00	5,00	0,00	10,00	7,00
14	0,00	0,00	3,24	2,00	6,00	15,00	10,00	5,00	5,00	0,00	10,00	3,00
15	0,00	10,00	0,00	6,00	6,00	3,00	2,00	5,00	10,00	0,00	0,00	5,00
16	0,00	0,00	3,24	5,00	6,00	4,50	8,00	4,00	5,00	0,00	2,00	10,00
17	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	7,50	7,00	6,00	5,00	0,00	3,00	0,00
18	10,00	0,00	0,00	5,00	5,00	3,00	3,00	2,00	10,00	10,00	13,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	2,96	5,00	12,00	10,00	5,00	10,00	-8,00	2,00	0,00
20	0,00	0,00	3,24	5,00	5,00	3,00	0,00	2,00	0,00	3,00	2,00	10,00
21	0,00	10,00	0,00	6,00	6,00	3,00	0,00	1,00	10,00	15,00	6,00	0,00
22	0,00	0,00	2,43	6,00	6,00	4,50	0,00	5,00	10,00	5,00	0,00	10,00
23	0,00	0,00	6,00	6,00	8,00	4,50	0,00	5,00	10,00	5,00	13,00	10,00
24	0,00	10,00	3,00	6,00	7,00	3,00	0,00	9,00	0,00	5,00	10,00	0,00
25	10,00	10,00	4,00	6,00	6,00	4,50	5,00	8,00	10,00	5,00	10,00	0,00
26	0,00	0,00	0,00	5,00	8,00	7,50	3,00	3,00	10,00	5,00	10,00	0,00
27	0,00	10,00	4,05	5,00	6,00	7,50	4,00	2,00	5,00	5,00	10,00	0,00
28	0,00	0,00	6,00	6,00	10,00	7,50	8,00	3,00	5,00	10,00	-5,00	0,00
29	0,00		5,00	6,00	15,00	9,00	4,00	2,00	5,00	5,00	15,00	10,00
30	0,00		6,00	5,00	13,00	13,50	6,00	1,00	5,00	5,00	-5,00	0,00
31	0,00		5,00		12,00		8,00	2,00		5,00		0,00
MENSUAL	58,00	60,00	66,30	153,00	212,00	202,50	188,00	172,00	207,00	140,00	149,00	156,00

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

ANEXO 5. REGISTRO DE EVAPORACIÓN EN ATAJADOS, POR 10 DIAS Y MENSUAL ACUMULADO (mm)

Atajado 1:

Registro (C/ 10 días)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	9,02	8,97	22,01	28,91	30,70	35,05	43,74	87,19	30,70	26,36	13,32	52,43	
2	17,66	13,32	14,08	39,39	13,32	35,05	108,92	74,16	35,05	30,70	39,39	13,32	
3	17,66	13,32	13,32	26,36	35,05	65,47	28,53	50,26	26,36	22,01	12,40	11,27	
4					48,08								
Total	44,35	35,61	49,40	94,66	127,15	135,56	181,19	211,61	92,10	79,07	65,12	77,02	1192,84

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

Atajado 2:

Registro (C/ 10 días)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	24,48	23,31	32,00	45,59	36,34	45,03	49,38	29,41	49,38	58,07	18,96	18,96	
2	20,63	27,65	24,41	27,65	49,38	49,38	166,71	88,49	62,42	66,76	18,96	18,96	
3	49,38	36,34	36,34	45,03	40,69	84,15	35,86	127,60	49,38	23,31	18,96	18,96	
4					32,00								
Total	94,50	87,30	92,75	118,27	158,41	178,56	251,95	245,50	161,18	148,14	56,88	56,88	1650,33

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

Atajado 3:

Registro (C/ 10 días)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	7,75	4,51	4,51	38,37	4,51	30,58	26,23	61,00	26,23	26,23	5,78	13,20	
2	17,54	4,51	15,74	39,27	34,92	34,92	178,33	91,42	39,27	26,23	34,92	4,71	
3	8,64	13,20	8,85	30,58	34,92	113,15	130,53	91,42	17,54	8,85	10,71	19,19	
4					52,31								
Total	33,93	22,21	29,10	108,22	126,66	178,65	335,09	243,83	83,05	61,32	51,42	37,10	1310,58

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

Fechas de registro de datos en atajados:

Registro (C/ 10 días)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	6/1/2019	5/2/2019	6/3/2018	1/4/2018	1/5/2018	10/6/2018	10/7/2018	9/8/2018	8/9/2018	8/10/2018	7/11/2018	7/12/2018
2	16/1/2019	15/2/2019	16/3/2018	11/4/2018	11/5/2018	20/6/2018	20/7/2018	19/8/2018	18/9/2018	18/10/2018	17/11/2018	17/12/2018
3	26/1/2019	25/2/2019	22/3/2018	21/4/2018	21/5/2018	30/6/2018	30/7/2018	29/8/2018	28/9/2018	28/10/2018	27/11/2018	27/12/2018
4					31/5/2018							

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

**ANEXO 6. EVAPORACIÓN MENSUAL EN ATAJADOS Y TANQUE
EVAPORIMÉTRO (mm).**

MES	ATAJADO 1	ATAJADO 2	ATAJADO 3	TANQUE EVAP. (LAKA PUCARA)
ENE	44,35	94,50	33,93	58,00
FEB	35,61	87,30	22,21	60,00
MAR	49,40	92,75	29,10	66,29
ABR	94,66	118,27	108,22	152,96
MAY	127,15	158,41	126,66	212,00
JUN	135,56	178,56	178,65	202,50
JUL	181,19	251,95	335,09	188,00
AGO	211,61	245,50	243,83	172,00
SEP	92,10	161,18	83,05	207,00
OCT	79,07	148,14	61,32	140,00
NOV	65,12	56,88	51,42	149,00
DIC	77,02	56,88	37,10	156,00
ANUAL	1192,84	1650,33	1310,58	1763,75

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo - 2018 a febrero -2019.

ANEXO 7. REGISTRO SUPERFICIE EVAPORANTE EN ATAJADOS

MES	DIÁMETRO (m)			SUPERFICIE (m ²)		
	ATAJADO 1	ATAJADO 2	ATAJADO 3	ATAJADO 1	ATAJADO 2	ATAJADO 3
ENE	25,40	21,95	28,27	506,45	378,21	627,22
FEB	25,20	21,33	28,00	498,51	357,26	615,44
MAR	25,10	18,73	29,22	494,56	275,49	670,09
ABR	24,37	17,53	28,47	466,08	241,32	636,13
MAY	23,04	15,71	27,56	416,62	193,80	596,36
JUN	21,63	13,98	26,32	367,38	153,49	543,67
JUL	21,37	12,82	23,07	358,38	128,95	417,68
AGO	21,50	12,03	23,00	362,87	113,67	415,27
SEP	19,80	7,67	21,33	307,75	46,14	357,26
OCT	18,67	3,20	19,33	273,53	8,04	293,42
NOV	20,02	0,10	21,35	314,52	0,01	357,82
DIC	24,30	0,10	24,48	463,53	0,01	470,56

Fuente: Elaboración propia, en base a registros de campo entre marzo – 2018 a febrero -2019.

ANEXO 8. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (FAO, 2019)

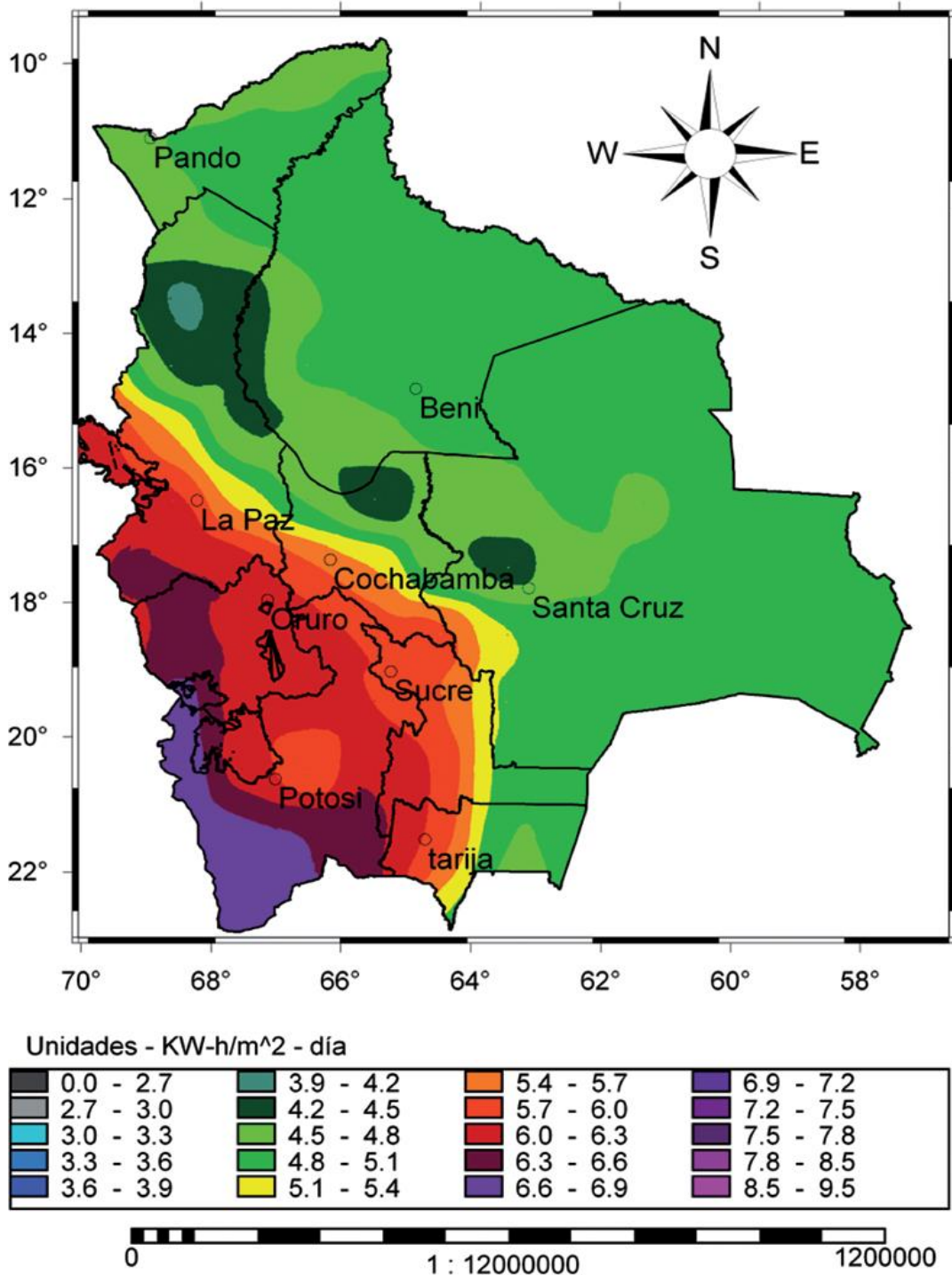
$$K = (D \div 2) \times \ln (h_1 \div h_2) / 2 (t_2 - t_1)$$

Donde:

- $(D \div 2)$, es el radio del hoyo o la mitad de su diámetro en metros.
- \ln , se refiere al logaritmo natural.
- h_1 y h_2 , son las dos profundidades consecutivas del agua en metros, h_1 al inicio y h_2 al final del intervalo de tiempo.
- $(t_2 - t_1)$, expresa el intervalo de tiempo entre dos mediciones consecutivas, en segundos.



ANEXO 9. MAPA SOLAR DE BOLIVIA



Fuente: Lucano y Fuentes (2010).

ANEXO 10. FOTOGRAFÍAS



Fotografía 1. Vista panorámica de cosecha de agua en atajados, Comunidad Laka Pucara.



Fotografía 2. Reconocimiento de campo y relevamiento de la información, Comunidad Laka Pucara.



Fotografía 3. Vista panorámica del atajado 1 (marzo 2018).



Fotografía 4. Vista panorámica del atajado 2 (marzo 2018).



Fotografía 5. Vista panorámica del atajado 3 (marzo 2018).



Fotografía 6. Instalación de la varilla de madera graduada de 150 cm (limnómetro).



Fotografía 7: Registro de altura o nivel de agua en limnómetro.



Fotografía 8. Vista panorámica de la caída de nevada y reserva de agua en atajado 2 (mes de julio).



Fotografía 9. Vista del atajado 1 y la disminución del volumen de agua (mes de octubre).



Fotografía 10. Vista del atajado 2, con poco volumen de agua a finales de octubre.



Fotografía 11. Recarga del nivel agua en tanque evaporímetro de Tipo A.



Fotografía 12. Registro del nivel de agua en tanque evaporímetro de Tipo A.



Fotografía 13. Excavación de hoyo para el cálculo de la permeabilidad del suelo.



Fotografía 14. Registro del nivel de agua y tiempo, para el cálculo de la permeabilidad del suelo.