

Propuesta de reglas de operación de una Qocha con fines de aprovechamiento hídrico

Melqui Miranda-Dávila¹, Wilder Ruíz-Olarte¹, Ada Arancibia Samaniego, PhD¹

¹ Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201819261@upc.edu.pe, u20151c155@upc.edu.pe, pcciadar@upc.edu.pe

Abstract— *In the Peruvians high Andean areas, structures for traditional use to store water with recharge purposes have been identified; these are small reservoirs called Qochas. In these areas, the only water source is rain, which occurs during the year's wet season. The high Andean inhabitants identify the Qochas as sources of water to be used during the seasons and dry times. This work presents a proposal for operating rules of a Qocha to have water resources for use by the high Andean inhabitants, maintaining its filtration function as part of the rainwater harvesting.*

The process included the characterization of the operation of a Qocha through operation simulations to define the stored volume, discharge volume, and infiltration. Four different climatic scenarios were considered, namely wet, dry, and their combination, to identify the volume stored and the minimum infiltration. These results make it possible to propose an operation rule to have a usable volume while the Qocha maintains its original functions and purposes in water harvesting. The methodology was applied to a Qocha located in the Department of Ayacucho at 3700 m.a.s.l. The results show that the beneficiaries of the area of influence can take advantage of part of the stored volume during the dry season without taking away its function in rainwater harvesting.

Keywords— *rainwater harvesting, ponds, Andes, natural infrastructure, ancient techniques, water harvesting.*

Resumen— *En las zonas altoandinas del Perú se han identificado estructuras de uso tradicional para almacenamiento de agua con fines de recarga, se trata de pequeños reservorios llamados Qochas. En estas zonas la única fuente de agua es la lluvia, que se presenta durante la estación húmeda del año. Los pobladores altoandinos identifican a las Qochas como fuentes de agua a ser aprovechada durante las estaciones y épocas secas. Este trabajo presenta una propuesta de reglas de operación de una Qocha con el objetivo de disponer de recursos hídricos para su aprovechamiento por los pobladores altoandinos, manteniendo su función de siembra de agua (filtraciones).*

El proceso incluyó la caracterización del funcionamiento de una Qocha a través de simulaciones de operación para definir el volumen almacenado, volumen de vertimiento e infiltración. Se consideraron cuatro diferentes escenarios climáticos, a decir húmedos, secos y la combinación de estos, con la finalidad de identificar el volumen almacenado e infiltración mínima. A partir de estos resultados se puede plantear una regla de operación para disponer un volumen aprovechable, mientras la Qocha mantiene sus funciones y fines primigenios de siembra de agua. La metodología se aplicó a una Qocha ubicada en el Departamento de Ayacucho a 3700 m.s.n.m. Los resultados muestran que es posible que los beneficiarios de la zona de influencia puedan aprovechar parte del volumen almacenado, durante la época seca sin quitarle su función de siembra de agua.

Palabras clave— *Captación de agua de lluvia, estanques, andes, infraestructura natural, técnicas ancestrales, siembra de agua.*

I. INTRODUCCIÓN

La creciente presión por el uso de los recursos hídricos es un problema global, pero es más crítico en las zonas montañosas. Las zonas montañosas son más sensibles a los efectos del cambio climático, sobre todo en las zonas tropicales, que se ven afectadas por los deshielos [1]–[3] como es el caso de los andes peruanos. Por consiguiente, los pobladores de estas zonas altoandinas son los más afectados, pues dependen de estos recursos.

Las situaciones de estrés hídrico han llevado a la comunidad en general a utilizar diferentes técnicas para aprovechar mejor el escaso recurso, incluyendo el rescate de prácticas y técnicas ancestrales [4].

Es así como en zonas muy áridas como en el Medio Oriente se logra obtener, conservar y luego usar considerables cantidades de agua para consumo doméstico, para riego y para otros fines. Estos sistemas son conocidos como *Qanat* o *Kariz* en Irán, Afganistán y Pakistán; *Foggara* en el noroeste de África, *Khadin* en India, *Negarim* en Israel o *Qochas* en Perú. *Negarim* conduce y concentra el agua de lluvia hacia los árboles (Israel). Los *Qanat*, infraestructura hidrogeológica capta el agua subterránea (Medio Oriente). El *Khadin*, es una poza de percolación que recarga las aguas subterráneas en los pozos (India). La *Qocha*, es un dique o muro hecho de terrones y champa (pastos) con fines de infiltración. Las *Foggaras* son galerías drenantes (noreste de África) [5].

Este tipo de estructuras son empleadas como parte de las técnicas de siembra y cosecha del agua. Han sido utilizados desde épocas ancestrales por las poblaciones altoandinas, con la finalidad de incrementar el almacenamiento y retención del agua de lluvia en las temporadas de altas precipitaciones. El agua se almacena en los reservorios de la Qocha, para ser utilizadas en las temporadas de estiaje; con el objeto de crear una reserva de agua natural, incrementando la recarga acuífera, con descargas más regulares en el transcurso del año, en una zona aguas abajo.

Realidades similares se viven en Latinoamérica y una experiencia resaltante es la situación de Bolivia, en cuyas regiones áridas de los valles interandinos bolivianos prima la agricultura a secano. La cosecha de maíz, trigo y papa, entre los cultivos más importantes, está destinada principalmente al autoconsumo. Frecuentemente, los productores sufren la

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.389>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

merma o pérdida de su cosecha causada por sequías o eventos climáticos extremos como lluvias torrenciales, heladas a destiempo y granizadas. Estas pérdidas ponen en peligro la seguridad alimentaria de las familias campesinas, desmotivan a los productores a seguir con la actividad agrícola y ocasionan efectos de migración permanente hacia los centros poblados u otras regiones con demanda de mano de obra no calificada.

El uso de estas tecnologías ayuda en la producción agrícola, por ejemplo, un *atajado* de una capacidad de aproximadamente 1300.00 m³ permite regar 13000.00 m² dos veces en los “veranillos” durante la siembra de año (noviembre a abril) o 2000.00 m² seis veces en la siembra de invierno (junio a octubre) o “de mishka” (febrero a mayo), como ha mostrado un estudio realizado en la zona de Aiquile, departamento de Cochabamba [6].

En el Perú sólo alrededor del 1% de las aguas precipitadas (lluvia) son destinadas al uso consuntivo en actividades económicas particularmente para “riego” y uso “poblacional”, el resto se va al Océano Pacífico o Atlántico, o se evapora nuevamente hacia la atmósfera [7].

En las zonas altoandinas, como se mencionó anteriormente, el agua es escasa y surge la necesidad de evaluar y/o proponer alternativas orientadas a satisfacer los diferentes motivos que demanda el recurso hídrico, ya sea consumo humano y/o agropecuario. Además de considerar posibles modificaciones de los patrones de lluvia con periodos prolongados de falta de agua.

En este contexto, a través de la simulación de operación de una Qocha existente, para diferentes escenarios con presencia de años secos y húmedos, se busca determinar la oferta hídrica y su temporalidad, para así poder establecer reglas de operación de una Qocha, con fines de aprovechamiento y recarga.

En el ítem II se presenta la metodología empleada, seguida del ítem III donde se presenta la aplicación de esta metodología para una Qocha en Ayacucho, presentando las características de la Qocha y la representación del proceso de infiltración considerado. En el ítem IV se presentan los resultados y finalmente en el ítem V se presentan las conclusiones de este estudio que demuestran la posibilidad de un uso “combinado” de la Qocha para la siembra del agua por medio de la infiltración y para el aprovechamiento superficial.

II. METODOLOGIA

La metodología empleada se desarrolla a través de cuatro etapas de análisis, como se muestra en la Figura 1.

En la primera etapa, se identificaron las características geométricas de la Qocha, (curva área, altura y volumen), los

volúmenes y niveles característicos, así como la información meteorológica (evaporación y precipitación).

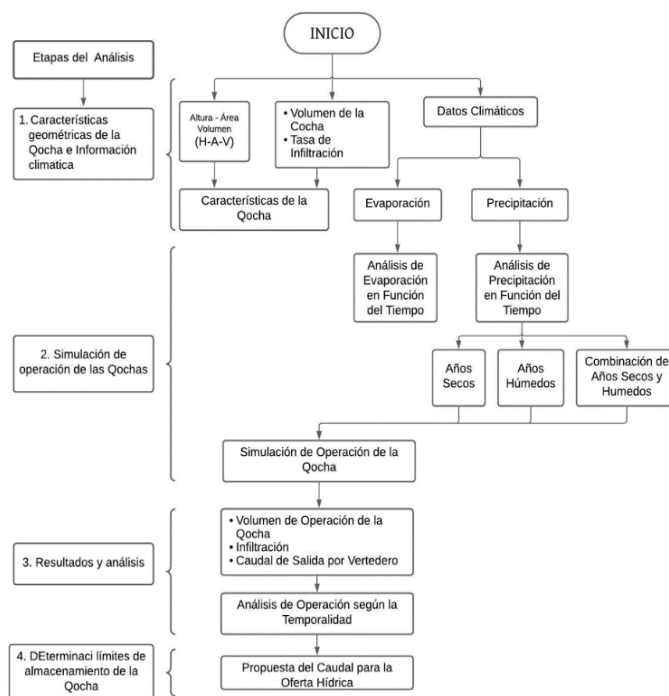


Figura. 1 Etapas de análisis.

En la segunda etapa, después del análisis de la información meteorológica, se determinan cuatro escenarios climáticos. Cada escenario climático está conformado por cuatro años con diferentes características climáticas. Así se construyeron los siguientes escenarios: a) secuencia de cuatro años secos; b) secuencia de cuatro años húmedos, c). primer año húmedo, seguido de tres años secos y d) secuencia de tres años húmedos seguido de un año seco. De esta forma se simulará la operación de la Qocha en condiciones climáticas extremas e intermedias.

La simulación se realiza considerando la ecuación de operación de la Qocha, que resume el balance hídrico a nivel de la Qocha y se expresa mediante la siguiente relación:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - E_t - Inf_t - Vert_t$$

Donde:

S_t : almacenamiento en el periodo t.

S_{t+1} : almacenamiento en el periodo t+1.

P_t : precipitación en el periodo t.

E_t : evaporación en el periodo t.

Inf_t : infiltración en el periodo t.

$Vert_t$: vertimientos desde la Qocha en el periodo t.

La conceptualización del modelo se presenta en la Figura 2.

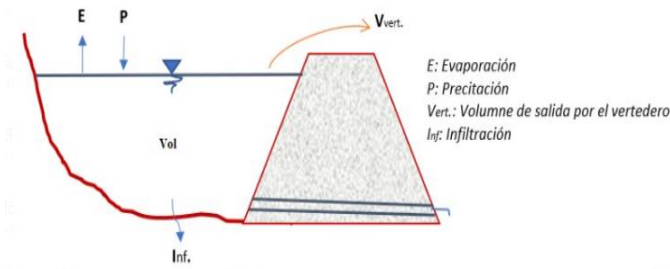


Fig. 2. Balance Hídrico en la Qocha

En la tercera etapa, se analizaron los resultados de la simulación de operación de la Qocha, generados en la segunda etapa. El análisis se enfocó en la variación de los volúmenes de almacenamiento, vertimiento e infiltraciones, para los diferentes escenarios.

Finalmente, se determinan los límites del almacenamiento mínimo que debería tener la Qocha, para conservar su finalidad primigenia de infiltrar.

III. APLICACIÓN

La metodología presentada se aplicó para la Qocha Ingalaqocha ubicada en la comunidad de Pillpicancha - Jatumpampa - Satica, distrito de los Morochucos, provincia Cangallo, departamento Ayacucho, en los Andes centrales del Perú. Los parámetros geomorfológicos de la subcuenca donde se ubica la Qocha tienen las siguientes características: área de 78 km², cota máxima 3788 m.s.n.m. y cota mínima de 3711 m.s.n.m. Ubicada entre las coordenadas UTM: Este 581572.86 y Norte 8511979.60. En la figura 3, se muestra una vista en planta y la vista satelital.

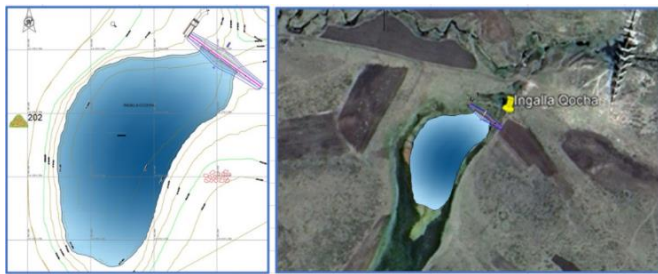


Fig. 3. Planta y vista satelital de la Qocha Ingalaqocha

Otra información relevante de la Qochas es la curva Altura-Área-Volumen, en la figura 4 se presentan estas curvas para la Qocha Ingalaqocha. A partir de esta curva se determina el área de espejo de agua (m²) y el volumen acumulado (m³), respecto a las cotas del reservorio.

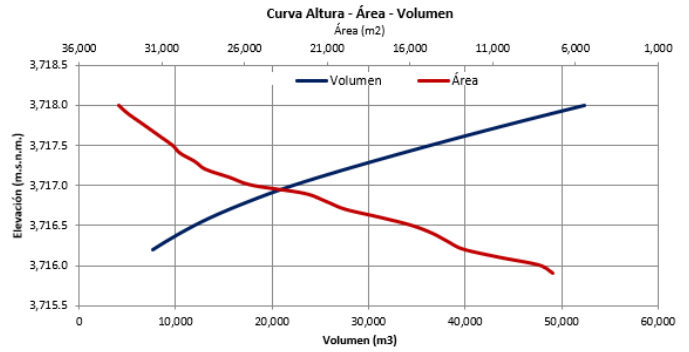


Fig. 4. Curva Área - Volumen - Altura del vaso Ingalaqocha

Para la estimación de la infiltración se utilizó la ecuación de Darcy como se muestra en la figura 5 con los siguientes valores:

- constante de permeabilidad (k) igual a 1.11 E-6m/s, medido en campo,
- distancia hacia el posible punto de descarga l = 352 m,
- altura del reservorio h = varía en función del volumen.

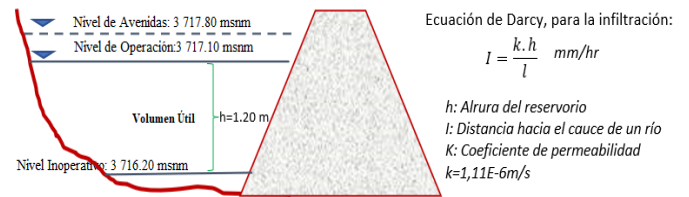


Fig. 5. Ecuación de Darcy para el cálculo de la infiltración.

Los datos climatológicos se obtuvieron del estudio hidrológico “Estudio Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Pampas” elaborado en el año 2010, por la Autoridad Nacional del Agua-ANA, del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Se seleccionó la estación climática Vilcashuaman con información comprendida en el periodo de análisis de 1980-2014, y a través del modelo HEC-4 del Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, se generó la proyección de las precipitaciones al año 2020. Esta información se presenta en resumen en la figura 6 y la tabla 1. A partir de la información de la figura 6 se seleccionaron la secuencia de años húmedos y secos para la construcción de los escenarios de análisis.

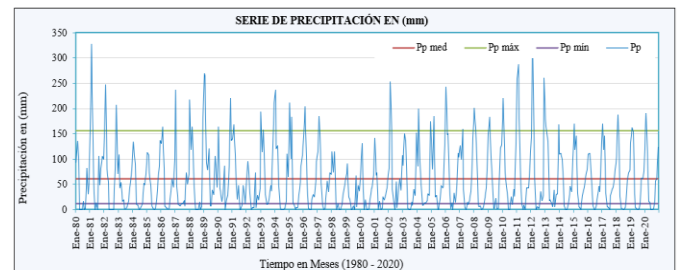


Fig. 6. Serie de precipitaciones durante los últimos 40 años.

Tabla 1: Información de evaporación media (mm) para los años húmedos y secos

EVAPORACIÓN MEDIA								
Meses	1989	1993	1998	1999	2000	2001	2011	2012
ENE	0.992	0.868	0.744	0.868	0.868	0.868	0.868	0.992
FEB	0.840	0.735	0.630	0.735	0.735	0.735	0.735	0.840
MAR	0.923	0.807	0.692	0.807	0.807	0.807	0.807	0.923
ABR	1.085	0.950	0.814	0.950	0.950	0.950	0.950	1.085
MAY	1.315	1.150	0.986	1.150	1.150	1.150	1.150	1.315
JUN	1.392	1.218	1.044	1.218	1.218	1.218	1.218	1.392
JUL	1.507	1.318	1.130	1.318	1.318	1.318	1.318	1.507
AGO	1.499	1.311	1.124	1.311	1.311	1.311	1.311	1.499
SET	1.459	1.276	1.094	1.276	1.276	1.276	1.276	1.459
OCT	1.437	1.258	1.078	1.258	1.258	1.258	1.258	1.437
NOV	1.368	1.197	1.026	1.197	1.197	1.197	1.197	1.368
DIC	1.133	0.992	0.850	0.992	0.992	0.992	0.992	1.133

Luego se realizó la simulación de operación de la Qocha, considerando un estado inicial del volumen de la Qocha a 2/3 de su capacidad de almacenamiento (17,121.81 m³), considerando las infiltraciones estimadas por unidad de área, para los escenarios previamente establecidos.

Para el procesamiento de los datos meteorológicos y modelamiento hidrológico se utilizaron: El Hidroesta, El HEC – HMS además del Modelo matemático de precipitación escorrentía Lutz Scholz, para el tratamiento de la información topográfica se utilizó el Autocad Civil 3D, y para la simulación de operaciones de la Qocha el MS Excel.

IV. RESULTADOS

Los resultados de los cuatro escenarios evaluados son presentados en forma gráfica, con dos tipos de diagramas diferentes: barras (figura 7 a figura 10) y box plot (figura 11 y figura 12).

De las presentaciones en diagrama de barras, visualizamos los escenarios extremos con la finalidad de identificar los límites máximos, mínimos de volumen en el reservorio y volúmenes de infiltraciones.

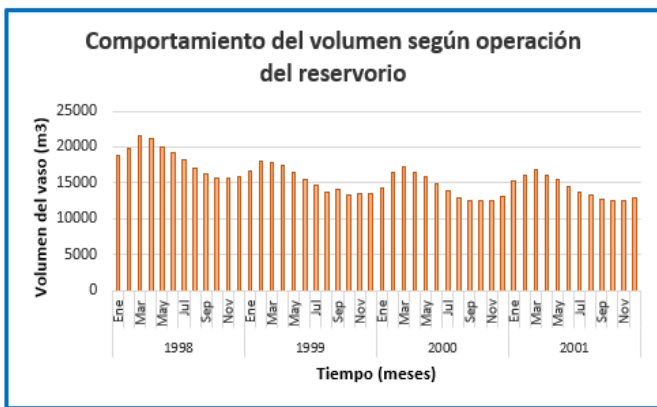


Fig. 7. Volumen de reservorio, años de menores precipitaciones – Años secos: 1998, 1999, 2000 y 2001.

En las figuras 7 y 8, se observan los resultados para el escenario de años secos. El volumen de almacenamiento máximo es de 21,915.06 m³ y el mínimo es 14,535.18 m³. Para el caso de las infiltraciones el valor máximo es 0.0406 m³ y el mínimo es 0.0382 m³. Se puede observar que las infiltraciones mayores se dan cuando los volúmenes son mayores, esto debido a la mayor carga que representan estos volúmenes.

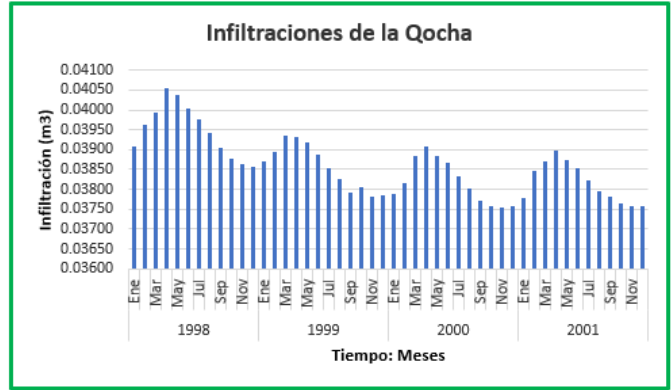


Fig. 8. Volumen de infiltraciones, años de menores precipitaciones – Años secos: 1998, 1999, 2000 y 2001.

En la figura 9 y 10, se observan los resultados para el escenario de años húmedos. El volumen de almacenamiento máximo es de 25,681.21 m³ y el mínimo es 21,328.07 m³ y para el caso de las infiltraciones el valor máximo es 0.0419 m³ y el mínimo es 0.0391 m³.

De forma similar se procedió con los otros escenarios.

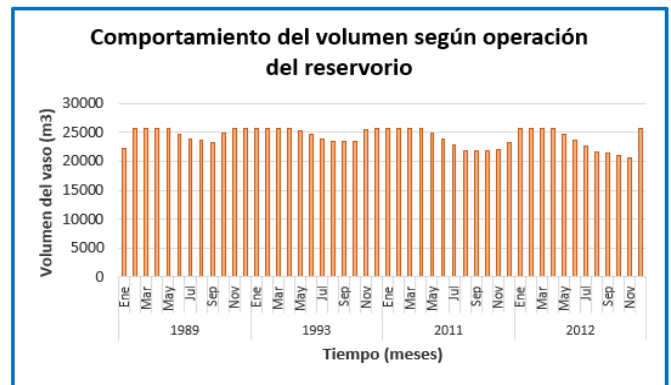


Fig. 9. Volumen de reservorio, años de máximas precipitaciones – Años húmedos: 1989, 1993, 2011 y 2012.

En la figura 11 se puede visualizar el resumen de los resultados de la evaluación de los cuatro escenarios en función de la variación de los volúmenes almacenados en el periodo de análisis. Se identifica que el escenario de cuatro años secos como el más extremo, y su valor de almacenamiento de 14,535.18 m³ como el más crítico, lo que representa aproximadamente un 56.6% de capacidad de almacenamiento de la Qocha.

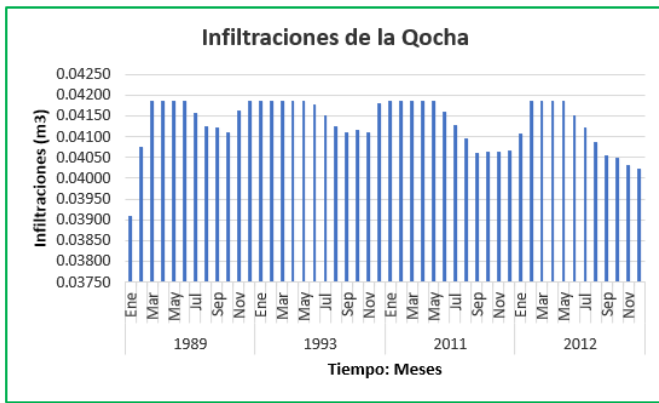


Fig. 10. Volumen de infiltraciones, años de máximas precipitaciones – Años húmedos: 1989, 1993, 2011 y 2012.

En la figura 12 se presentan los resultados consolidados de la variación de los volúmenes de infiltración de la Qocha, a lo largo del periodo de análisis para los cuatro (4) escenarios simulados, se puede apreciar que el valor mínimo del volumen de infiltración es $0.0385 \text{ m}^3/\text{mes}$.

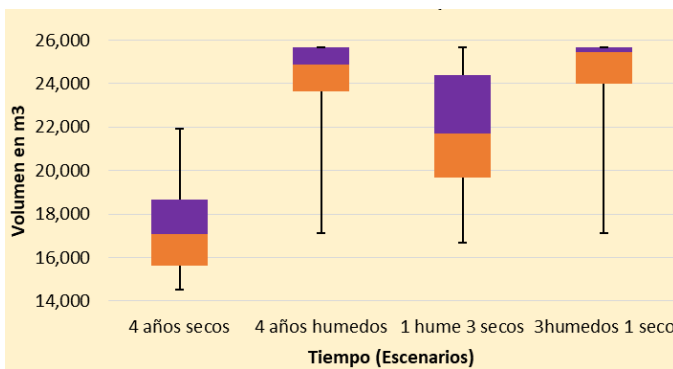


Figura 11. Variación de volúmenes de la Qocha para los 4 escenarios

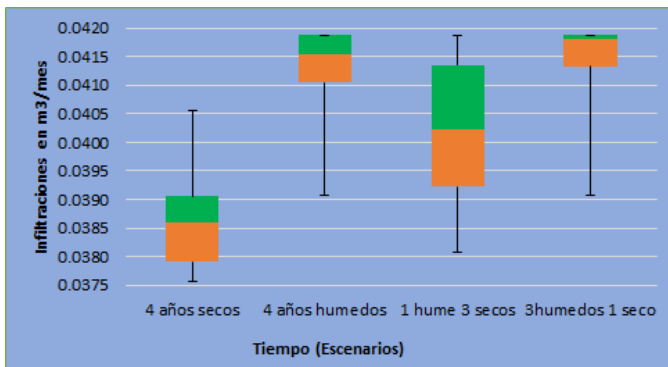


Figura 12. Variación de las infiltraciones de la Qocha para los cuatro escenarios evaluados

Se puede observar una concordancia de las variaciones de volúmenes e infiltraciones en la Qocha para los 4 escenarios analizados.

Entonces se propone que para establecer la regla de operación de la Qocha se considere preservar en la Qocha el volumen correspondiente al menor valor de infiltración que se obtiene de los escenarios evaluados.

En general considerando las premisas establecidas en este estudio, corresponderá al escenario más desfavorable, establecido a partir de los registros históricos, con un volumen de $14,535.18 \text{ m}^3$.

Respecto de los valores obtenidos en este estudio, uno de los factores importantes a tomar en cuenta, es la tasa de infiltración. En este trabajo se realizaron pruebas de campo y se obtuvo un valor de 0.4 cm/h (1.11 E-6 m/s), observando un suelo saturado, como se puede observar en la fotografía 1, estos valores corresponderían a suelos arcillosos [8].



Fotografía 1. Pruebas de Percolación

Otros estudios como el de [8], refieren mayores tasas de infiltración de hasta 14.57 cm/h , en las nacientes de las cuencas altoandinas (cabecera de cuenca). Es así como se resalta la importancia del estudio de este parámetro, así como de entender la mecánica del proceso de infiltración en una Qocha.

Investigaciones futuras deben enfocarse en ese proceso, a través del monitoreo de cambios de niveles y volúmenes en la Qocha así como la variación del flujo subterráneo. Estos estudios pueden complementarse con estudios como los

realizados por [9] que incluyen análisis isotópicos, físico químico y bacteriológico de muestras de agua de manantiales.

IV. CONCLUSIONES

De los escenarios analizados, podemos manifestar que el volumen mínimo es de 14,535.18 m³, lo que representa aproximadamente un 56.6% de capacidad de almacenamiento de la Qocha. Para fines del caso estudiado este será el valor límite que garantice la funcionalidad proyectada de la Qocha.

Respecto a la infiltración, el valor mínimo es de 0.0385 m³/mes, por lo que consideramos que es el valor mínimo necesario para mantener el comportamiento de la Qocha. Entonces a valores superior de este umbral de infiltración, se podría disponer de parte del volumen de agua almacenado, siempre que se mantenga el nivel de infiltración mínima.

A razón del comportamiento climático de las comunidades de Pillpicancha - Jatumpampa y Satica, distrito de los Morochucos, provincia Cangallo, departamento Ayacucho y entendiendo que los meses de escasa precipitación son entre mayo y setiembre, se deberá dar una condicional que, la demanda está relacionada a estos meses y es cuando debemos vincular la infiltración con el volumen almacenado, entendiendo que el volumen de 15000 m³ referencia a una infiltración igual o superior a 0.0385 m³/mes, pudiendo en estas condiciones disponerse parte del volumen almacenado.

Se recomienda realizar mayores estudios respecto de las tasas de infiltración pues estas son un factor importante para fijar los umbrales de uso de los recursos en las Qochas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad Ejecutora 036-001634 “Fondo Sierra Azul” del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) del Perú por facilitar la información empleada en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] K. Paerregaard, “Power in/of/as water: Revisiting the hydrologic cycle in the Peruvian Andes,” *WIREs Water*, vol. 5, no. 2, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1002/wat2.1270.
- [2] C. Zogheib *et al.*, “A methodology to downscale water demand data with application to the Andean region (Ecuador, Peru, Bolivia, Chile),” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 66, no. 4, pp. 630–639, 2021, doi: 10.1080/02626667.2021.1890749.
- [3] A. Motschmann, “Water resource risks in the Andes of Peru : an integrative perspective,” University of Zurich, 2021.
- [4] C. Zouré *et al.*, “Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in Northern Burkina Faso,” *Catena*, vol. 173, no. March 2018, pp. 59–70, 2019, doi: 10.1016/j.catena.2018.10.002.
- [5] J. Hendriks, “La cosecha de agua. Una aliada de la agricultura familiar,” *LEISA revista de agroecología*, pp. 5–8, Nov-2018.
- [6] J. Goetter and P. H. Joachim, “Adaptación al Cambio Climático : Cosecha de Agua de Lluvia con ‘ Atajados ’ en Bolivia,” 2009.
- [7] MINAGRI, *Rumbo a un Programa Nacional de Siembra y Cosecha*

de Agua: Aportes y reflexiones desde la práctica, Ministerio. Lima, 2016.

- [8] T. Mallma Capcha, “Recarga de acuíferos con la construcción de qochas en cabecera de cuencas,” *Prospect. Univ.*, vol. 16, no. 1, pp. 77–81, 2021, doi: 10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2019.16.1028.
- [9] R. Rojas, M. Montoya, E. Mamani, E. Montoya, and Ó. Baltuano, “Origen de los manantiales de La Costa Verde,” *Rev. ECIPeru*, pp. 22–26, 2019, doi: 10.33017/reveciperu2012.0016/.