



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA CUENCA LA PALCA, YOTALA – CHUQUISACA

Díaz, K.^c, Saavedra, N.^d, Zapata, R.^c, Hernández, C.^d

^a Consultor e investigador del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: kldiaz0112@gmail.com.

^b Consultor e investigador del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: nieves.sg@outlook.com.

^c Investigador Principal del Instituto de Aguas, Coordinador y Docente de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: zapatabo@yahoo.es.

^d Docente investigador del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. cori_h5@yahoo.es.

RESUMEN

La explotación de recursos hídricos subterráneos es cada vez más recurrente ante los escenarios de cambio climático, la hidrogeología cobra mayor interés a medida que los requerimientos hídricos aumentan, pero los procesos de flujo subterráneo son poco estudiados, especialmente durante la gestión y diseño preliminar para la extracción de agua subterránea.

El objetivo de esta investigación fue identificar las características del sistema de flujo en los acuíferos presentes en la cuenca La Palca, en base a la recopilación de niveles de agua en un sector de explotación mediante pozos excavados y perforados, aplicando una red de monitoreo en periodos mensuales y diarios, además de pruebas de infiltración para la parte superficial, pruebas de bombeo y estudios geofísicos para estimar los límites geológicos en profundidad. Los datos recopilados evidencian dos tipos de acuíferos predominantes, uno libre en lecho aluvial y otro confinado en roca fracturada. Los resultados muestran que la fuente principal de recarga de agua subterránea para el acuífero aluvial y fracturado es por precipitación directa, existiendo una conexión entre ambos. El flujo de agua subterránea en el sistema es de sur a norte, cambiando a una dirección nor-oeste en la zona de descarga que es el río Quirpinchaca. Las tasas de recarga correspondientes a la precipitación forman parte de la mejor opción para satisfacer las demandas actuales y posibles necesidades futuras para beneficiar a los actores locales.

Palabras clave: flujo de agua subterránea, recarga de acuíferos, monitoreo de nivel de agua, tasas de infiltración, prospección geofísica, roca fracturada.

ABSTRACT

The exploitation of underground water resources is increasingly recurrent in the face of climate change scenarios, hydrogeology becomes more interesting as the water requirements increase, but the underground flow processes are little studied, especially during the management and preliminary design for the groundwater extraction.

The objective of this research was to identify the characteristics of the flow system in the aquifers present in the La Palca basin, based on the collection of water levels in an exploitation sector through excavated and drilled wells, applying a monitoring network in periods monthly and daily, in addition to infiltration tests for the superficial part, pumping tests and geophysical studies to estimate the geological limits in depth. The data collected show two predominant types of aquifers, one free in alluvial bed and the other confined in fractured rock. The results show that the main source of groundwater recharge for the alluvial and fractured aquifer is by direct precipitation, with a connection between the two. The flow of groundwater in the system is from south to north, changing to a north-west direction in the discharge zone that is the Quirpinchaca River. Recharge rates for precipitation are part of the best option to meet current demands and possible future needs to benefit local stakeholders.

Key words: groundwater flow, aquifer recharge, water level monitoring, water level fluctuation, infiltration rates, geophysical survey, fractured rock.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea, por su naturaleza y abundancia, constituye un recurso estratégico frente a la disminución de los recursos hídricos superficiales y es una parte importante de los recursos totales de agua, por ser una de las fuentes de aprovisionamiento de mayor importancia para satisfacer diversas necesidades y potenciar el desarrollo económico en zonas áridas (De Vries y Simmers 2002; Ting et al., 1998).

Los acuíferos aportan entre el 25% y el 40% del agua para uso doméstico a nivel global y son una fuente muy importante de suministro de agua en todos los continentes (Vrba & van der Gun, 2004).

El desarrollo actual de la humanidad incrementa la necesidad de agua para el desarrollo agrícola e industrial, convirtiendo a la fuente subterránea en el principal recurso para satisfacer las necesidades de pequeñas y grandes urbes. En zonas áridas de todo el mundo el acceso al agua subterránea forma parte de la única fuente de agua para abastecer poblaciones o sostener la agricultura en épocas de sequía (Telmer and Best, 2004).

La explotación de agua subterránea comúnmente es realizada por medio de la excavación o perforación de pozos, los cuales amortiguan la escasez, y en algunos casos son la única fuente de acceso al recurso hídrico vital para el desarrollo de los pueblos. Las excavaciones de pozos someros son muy frecuentes en zonas áridas, donde los actores locales excavan manualmente pozos en material aluvial para extraer agua del flujo subterráneo, que naturalmente desemboca en los ríos aguas abajo como flujo base o recargan otros acuíferos naturales.

Un estudio hidrogeológico consistente, requiere cantidad y calidad de datos, un amplio conocimiento de la zona en cuestión y un planteamiento claro de que es lo que se va a hacer y cómo, tomando en cuenta la información y conocimiento previo (Clarke et al., 1996).

A pesar de ser uno de los componentes más importantes en estudios hidrogeológicos, la recarga es también uno de los menos comprendidos, en gran parte debido a que las tasas de recarga varían ampliamente en espacio y tiempo (Healy y Scanlon, 2010).

Zona de estudio

En Bolivia existen distintas unidades hidrogeológicas representando fuentes importantes de agua, principalmente en zonas semiáridas (Stimson et al., 2001).

En el departamento de Chuquisaca, el uso del agua subterránea cobra énfasis cada año que pasa, debido a la poca precipitación y elevadas temperaturas en época seca, problemas relevantes incluso en la misma ciudad capital, dejando sin acceso al elemento vital durante los periodos de sequía ("Crisis de agua potable desata preocupación en Sucre y Chuquisaca", 2017).

Situada en la posición geográfica de los valles, Chuquisaca se caracteriza por presentar zonas agrícolas importantes a nivel regional y nacional; sin embargo, a consecuencia del régimen hidrológico que presentan, caracterizado por un corto ciclo de lluvias y un largo periodo de estiaje (clima semiárido) se encuentran limitados en su desarrollo productivo y socioeconómico debido a la escasez de agua superficial; situación que se ha incrementado en los últimos años a consecuencia del cambio climático.

Si bien a través de proyectos gubernamentales en el departamento de Chuquisaca, se perforaron pozos profundos destinados a la dotación de agua para suministro y riego, muy pocos estudios hidrogeológicos fueron realizados y ninguno fue enfocado específicamente en el estudio de la física de acuíferos o de la recarga de aguas subterráneas.

El municipio de Yotala es uno de los 29 municipios del departamento de Chuquisaca, ubicándose al noroeste en la provincia Oropeza en la cual también se encuentra el municipio de Sucre, sede de la capital constitucional del país, la ciudad de Sucre. Yotala presenta un centro urbano localizado a orillas del río Quirpinchaca, río en el cual son vertidas las aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento "El Campanario", aguas residuales provenientes de la capital Sucre.

El recurso subterráneo en la localidad de Yotala se encuentra en uso constante por la población, especialmente en zonas donde la conexión domiciliaria de agua potable es deficiente (Plan de Desarrollo Municipal, 2013). La producción agrícola es escasa, ya que el agua superficial es casi nula, comprendiendo solo un río cercano al centro urbano, el cual se encuentra contaminado por aguas servidas. Sin embargo, se percibe que existe muy poca información y escaso entendimiento sobre la dinámica y los distintos procesos que intervienen en el comportamiento de este recurso, principalmente de los actores locales.

En la cuenca de La Palca en Yotala, presenta un área de 6.5 km², se asienta un centro urbano correspondiente a la Villa de Yotala y las comunidades de La Palca y Jatun Era (Figura 1), que dependen en gran medida del agua subterránea, extraída mediante pozos excavados por los mismos usuarios y pozos perforados, la cual, se ha constituido en el principal pero limitado paliativo, para abastecimiento de agua con fines doméstico y agrícola a pequeña escala.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para una mejor comprensión del o los acuíferos existentes en la zona de estudio, se necesita de un modelo hidrogeológico del lugar. Primeramente, fueron recopilados datos de los pozos existentes, posteriormente, fueron realizados estudios en geofísica mediante tomografías de resistividad eléctrica, medición de nivel de agua en pozos de la red de monitoreo, pruebas de infiltración, para finalmente, estimar las

características de los acuíferos y la red de flujo que conforman la cuenca La Palca.

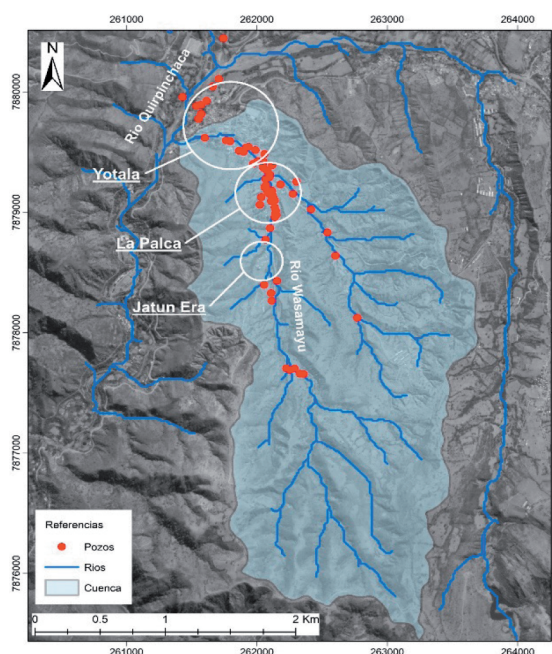


Figura 1. Inventario de pozos en la zona de estudio

El parámetro de recarga fue abordado desde diversas técnicas y métodos para la estimación, elegir los apropiados es a menudo difícil, entre las consideraciones a tener en cuenta para la selección, están la escala espacial y temporal debido a que el rango, fiabilidad de las estimaciones de recarga e incertidumbres asociadas a las mismas, generan la necesidad de aplicar diversos métodos y técnicas de estimación además de una comprensión completa de los mismos (Scanlon 2002).

La información básica necesaria para estimar la recarga es extremadamente valiosa, el desarrollo de un modelo conceptual para el proceso de recarga es indispensable como paso principal para la estimación de la misma (Healy y Scanlon, 2010).

Inventario de pozos y red de monitoreo

Establecer una red de monitoreo para la obtención de niveles de agua subterránea es de vital importancia para la caracterización de los acuíferos de extracción y la elaboración de un modelo conceptual sobre la hidrogeología de la zona (Fetter, 2001). El objetivo principal para la instrumentación de un sitio de estudio es el obtener datos representativos del agua subterránea, la adquisición e interpretación de niveles de agua en el tiempo, son esenciales para determinar la dirección, velocidad y regímenes de recarga-descarga del agua subterránea (Nielsen, 2006; Fetter, 2001).

En la zona de estudio fueron inventariados 60 pozos excavados y 6 perforados, distribuidos desde el río Quirpinchaca hasta la parte media-alta de la cuenca (Figura 1 y 2), intercalados a orillas de los causes con mayor presencia en el cauce principal, denominado río

Wasamayu, cabe resaltar que estos pozos fueron a los que el acceso fue permitido, teniendo muchos otros no registrados.

La ubicación exacta de los pozos inventariados fue obtenida con un levantamiento topográfico con el equipo GPS RTK, el cual consistió en la determinación de la posición en tiempo real (RTK, Real Time Kinematic), obteniendo coordenadas UTM con una precisión horizontal de ± 10 mm y vertical de ± 15 mm.

Medición de nivel de agua

La medición de niveles fue realizada de forma mensual y diaria, dependiendo el acceso y colocación del equipo. La medición de niveles de agua mensuales, fueron realizadas en campañas periódicas, utilizando sondas eléctricas milimetradas, obteniendo niveles estáticos en su mayoría, ya que algunos pozos son bombeados constantemente. Las campañas de medición fueron realizadas todos los meses desde marzo de 2017 hasta julio de 2018, además de la medición fueron recolectados datos sobre las características de los pozos, construcción, profundidad, tipo de extracción, cantidad de agua extraída, frecuencia de extracción y calidad observada por los actores locales.

La medición de niveles diarios fue realizada en 2 pozos perforados y 1 excavado (Figura 2): un pozo perforado en la comunidad de Jatun Era que sirve como abastecimiento de agua potable (P-03), extrayendo agua de roca fracturada hasta una profundidad de 100 m; un pozo perforado actualmente sin uso, en material sedimentario y una parte en roca fracturada (P-30); y un pozo excavado hasta los 12.2 m con diámetro de 1.4 m, excavado en material sedimentario compuesto de gravas y arenas en matriz limosa (P-56).

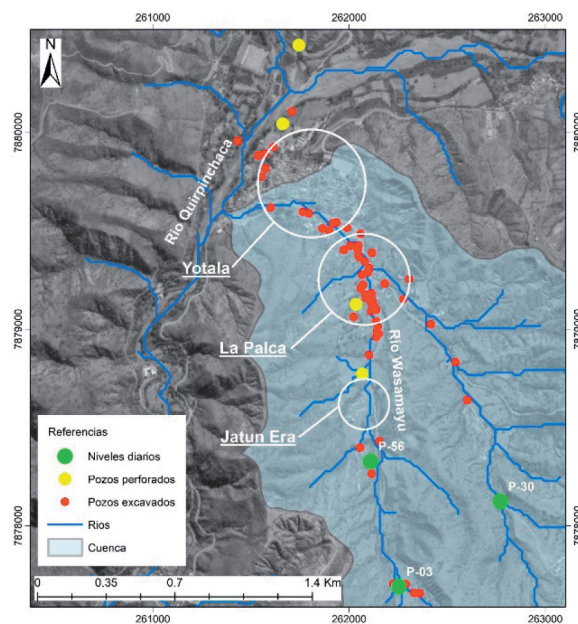


Figura 2. Pozos seleccionados para la lectura de niveles mensuales y diarios

Pozos perforados

En la zona de estudio existen 2 pozos de extracción para agua potable perforados en roca fracturada, estos bombean el agua que fluye a través de las fracturas. Según los perfiles los pozos presentan rejillas múltiples por los cuales ingresa el agua, penetrando la roca fracturada desde los 20 m donde acaba el material aluvial. La tasa de bombeo es de 1.418 l/s para el pozo de Jatun Era, medido con el método volumétrico observando el tiempo de llenado de un volumen conocido, para el pozo de La Palca la tasa de bombeo según la información en los perfiles es de 0.6 l/s.

El estudio de los acuíferos en medios fracturados presenta diferencias significativas, ya que en medios porosos el agua fluye a través de los espacios vacíos entre los granos que conforman el material, en acuíferos fracturados el agua fluye a través de grietas y fracturas conectadas entre sí. Estas diferencias hacen de las propiedades hidráulicas del acuífero sean distintas a las planteadas en las formulaciones más conocidas, observando diferencias en cuanto a rendimientos de pozos y características de recarga, un claro ejemplo es la reducción de la permeabilidad a medida que el acuífero fracturado se profundiza debido a que las fracturas se van reduciendo por el confinamiento de la roca (Misstear, 2012).

Pruebas de infiltración (Permeámetro de Guelph)

La medida de la conductividad hidráulica no saturada (Kfs) con el permeámetro de Guelph, es una técnica sencilla y relativamente rápida, aunque requiere un esfuerzo considerable en el caso de muestreos de gran cantidad de puntos (Reynolds et al., 1983). Para estimar las propiedades hidráulicas de la zona no saturada, se realizaron 24 medidas distribuidas en toda la cuenca (Figura 3), con un permeámetro de Guelph efectuadas entre agosto y septiembre de 2017.

Aunque con el permeámetro Guelph se puede medir la infiltración acumulada y la tasa de infiltración, usualmente se puede determinar in situ la conductividad hidráulica. La Ks medida es llamada comúnmente 'conductividad hidráulica no saturada en campo' "Kfs".

Esto es en reconocimiento del hecho que normalmente las burbujas de aire son atrapadas en el medio poroso cuando el suelo se satura por la infiltración de agua, particularmente cuando la infiltración ocurre en condiciones anegadas, por lo tanto, el contenido de agua del medio poroso a 'saturación de campo' es más bajo que a saturación completa o verdadera saturación (Reynolds y Elrick 1985, 1987). Dependiendo de la cantidad de aire atrapado, Kfs puede ser una o dos veces más bajo que la verdadera conductividad hidráulica saturada Ks.

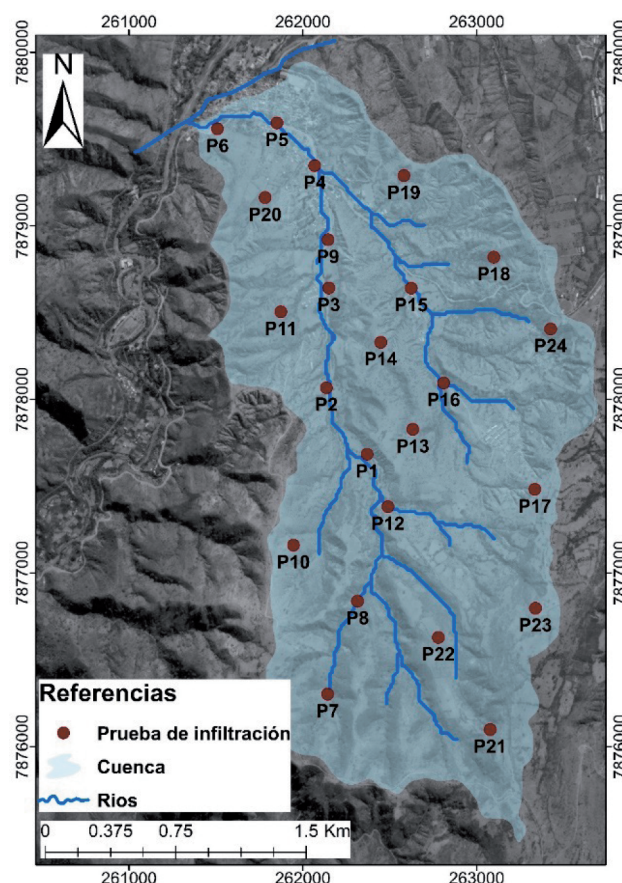


Figura 3. Ubicación pruebas de infiltración

Caracterización y estimación de parámetros hidrogeológicos de los acuíferos

Los acuíferos en la cuenca fueron identificados mediante los resultados de perfiles geofísicos y los datos recopilados sobre la red de monitoreo. La estimación de parámetros de los acuíferos fue realizada según los datos de nivel de agua del pozo de Jatun Era (P30) para el acuífero más profundo, y mediante pruebas de infiltración para el acuífero superficial.

Los niveles diarios en el pozo P-03, recopilaron información sobre la recuperación del pozo posterior a un evento de bombeo, estos datos fueron utilizados mediante el software AQTESOLV para el cálculo de parámetros de acuíferos fracturados. Para el acuífero profundo, fueron utilizados los criterios de Moench (1984) y Barker (1988) para métodos de cálculo en roca fracturada en la estimación de las características hidrogeológicas.

Las pruebas de infiltración permitieron estimar los parámetros en el acuífero superficial, para ello fue utilizado en permeámetro de Guelph, realizando un total de 24 pruebas de infiltración en la zona no saturada de la cuenca. La infiltración superficial puede dar información sobre recarga del sistema y ayudar en la caracterización espacial para un modelo conceptual (Nimmo et al., 2009).

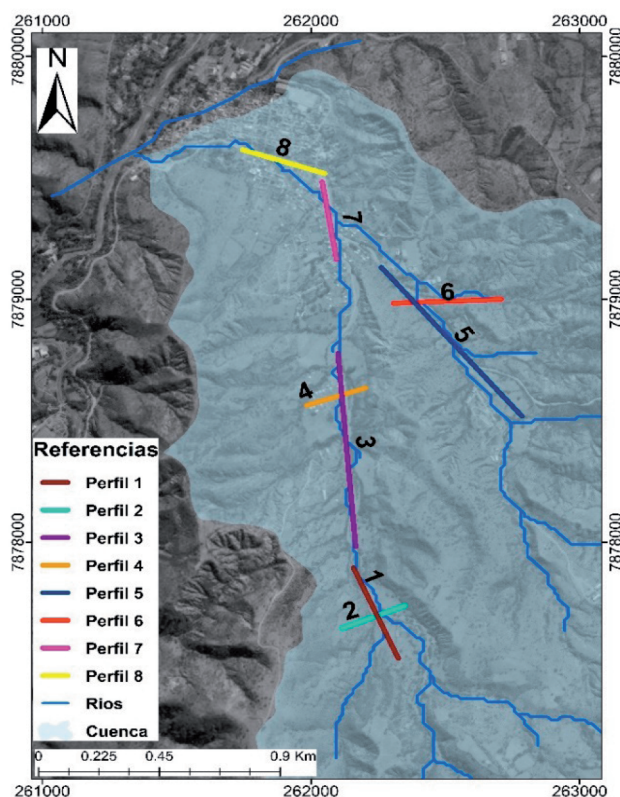


Figura 4. Ubicación de las tomografías en la zona de estudio

Para la delimitación de acuíferos y mejor entendimiento de la dinámica de la recarga en la zona de estudio, se realizaron 8 tomografías de resistividad eléctrica en líneas estratégicas de la cuenca (Figura 4), mediante una prospección geofísica con sondeos eléctricos verticales con el equipo de prospección ABEM Terrameter, con las cuales se pudo identificar las diferentes unidades hidrogeológicas existentes en la zona de estudio.

Redes de flujo

Los niveles de agua obtenidos en la red de monitoreo, permitieron la obtención de la carga hidráulica y posterior estimación de la red de flujo en el acuífero superficial. Las líneas de flujo son dibujadas cortando líneas equipotenciales, es decir de misma carga hidráulica, asumiendo que estas cortan perpendicularmente en acuíferos de materia uniforme (Fetter, 2001).

La carga hidráulica es obtenida a partir de los niveles estáticos, está gobernada dos componentes, por la elevación de la boca de pozo (Punto de medida) y el nivel de agua existente en el pozo en el momento de la medición (Freeze y Cherry, 1979). Se puede expresar la carga hidráulica con la siguiente ecuación:

$$h = z + \Psi \quad (1)$$

Dónde: h = carga hidráulica (m), z = carga de elevación (m.s.n.m), Ψ = carga de presión (m).

Los niveles mensuales fueron utilizados para la obtención de la carga hidráulica (Figura 5), estos permitieron la obtención de una red de interpolación para la construcción de una superficie potenciométrica de agua subterránea.

Estimación de recarga por el método de fluctuación de niveles

Para la determinación de la recarga del sistema acuífero en la cuenca La Palca se implementó el método de fluctuación de niveles de agua subterránea, basado en la premisa de que el incremento de los niveles en acuíferos no confinados es debido a la llegada de agua de recarga al nivel freático, se caracteriza por ser sencillo, de bajo costo, ampliamente usado en todo tipo de condiciones climáticas alrededor del mundo (Healy y Cook, 2002; Scanlon et al., 2002; Healy y Scanlon, 2010; Rasmussen and Andreasen, 1959; Gerhart, 1986; Hall and Risser, 1993; Crosbie et al., 2005; Lee et al., 2005; Coes et al., 2007; and Delin et al., 2007).

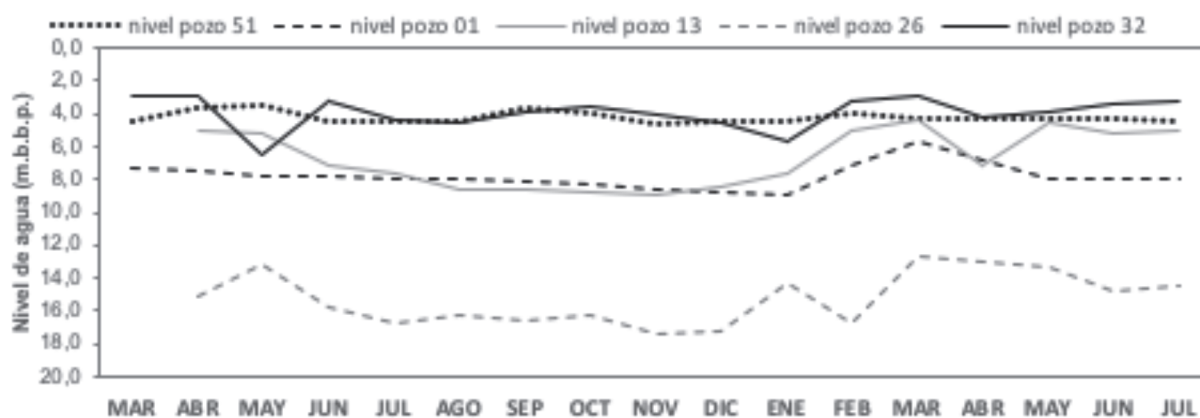


Figura 5. Niveles de agua mensuales en algunos de los pozos de monitoreo

Sin embargo, el método también presenta algunas desventajas como la incertidumbre respecto a la razón de las fluctuaciones ya que no todas indican recarga (Lee et al., 2005) y las dificultades en la estimación de rendimiento específico (Healy y Scanlon, 2010; Liskop y Allen, 2005; Healy y Cook, 2002; Delin et al., 2006; Scalón et al., 2002). El cálculo de la recarga según este método está definido por la siguiente ecuación:

$$R = S_y \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2)$$

Dónde: S_y = Rendimiento específico, Δh = Altura de agua desde el pico del hidrograma hasta el punto más bajo extrapolado de la curva de recesión (m), Δt = Periodo de tiempo (día), R = Recarga total (m/día).

La aplicación del método requiere la identificación de las subidas de nivel de agua atribuibles a la precipitación y otras fuentes, la estimación del coeficiente específico, mediciones temporales de nivel de agua subterránea y datos meteorológicos de la zona de estudio.

Rendimiento específico

El valor del rendimiento específico S_y , representa la fuente más significativa de incertidumbre en el cálculo de la recarga y la determinación experimental requiere de mucho trabajo y tiempo (Liskop y Allen, 2005; Healy y Cook, 2002; Delin et al., 2006; Scanlon et al., 2002).

Para la zona de estudio se utilizó el valor obtenido de recomendaciones de valores en tablas de investigaciones previas respaldadas en función del material que componen el sistema acuífero de la cuenca La Palca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la prospección geofísica (Figura 6), permitieron identificar los límites de dos tipos de acuíferos predominantes en el área de estudio, los perfiles obtenidos muestran que el acuífero profundo se encuentra aproximadamente a 20 m de profundidad, los cuales son descritos a continuación:

Perfil 1-1'

Longitud de 400 m. (SE-NO), muestra dos estratos litológicos bien marcados: uno en material cuaternario compuesto por arenas gruesas y finas, material limoso y otro conformado por lutitas y pizarras con un espesor de más de 50 metros.

Perfil 2-2'

Longitud de 250 m. (NO-NE), presenta tres estratos litológicos: el primero un material cuaternario compuesto por arenas gruesas y finas, material limoso de unos 20 metros de espesor en el lado NO; el segundo estrato un espesor considerable de lutitas y pizarras y un tercero muy pequeño de arenas.

Perfil 3-3'

Longitud de 800 m. (SO-NE) conformada por tres estratos: el primero es un material cuaternario compuesto por arenas medias y finas con material limoso, el segundo conformado por arcillas y el tercero conformado por lutitas en una cantidad mínima y a uno 80 metros de profundidad.

Perfil 4-4'

Longitud de 250 m. (NO-NE) presenta dos estratos: el primero superficial conformado por cantos rodados en una matriz limo-arenosa, el segundo es material cuaternario compuesto por arenas medias y finas y material limoso.

Perfil 5-5'

Longitud de 800 m. (SE-NO), ubicado en el ramal derecho de la cuenca, presenta cuatro estratos: el primero superficial compuesto por cantos rodados y una matriz limo-arenosa, el segundo conformado por material cuaternario (arenas medias a finas y material limoso), el tercer estrato arcilla en su totalidad y el cuarto un compuesto de arcilla y arena media.

Perfil 6-6'

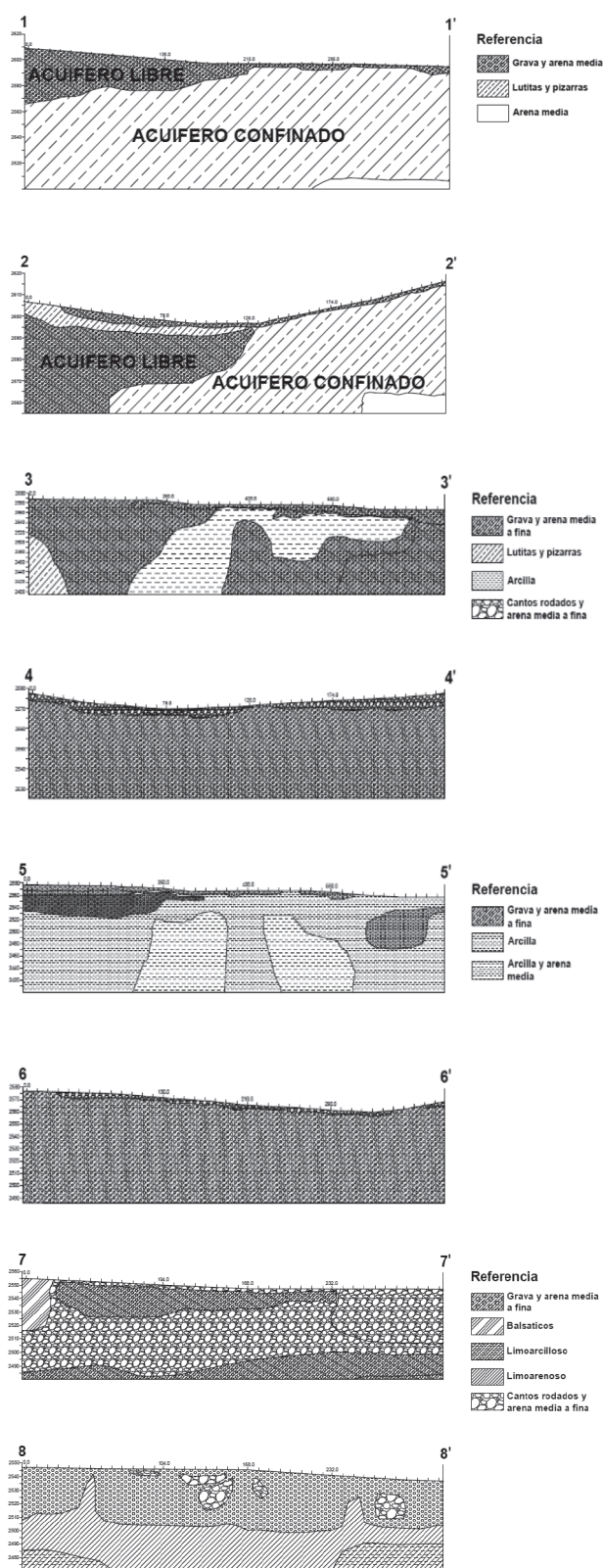


Figura 6. Cortes litológicos obtenidos en geofísica

Longitud de 250 m. con dirección (NO-NE) conformado por dos estratos: el primero superficial compuesto por cantos rodados y una matriz limo-arenosa, y el segundo conformado por arenas medias a finas y un material limoso.

Perfil 7-7'

Longitud de 320 m. (SE-NO) ubicado sobre el lecho del río Wasamayu, presenta tres estratos: el primero superficial compuesto por material aluvial, bolones, cantos rodados y arenas medias; el segundo conformado por material cuaternario de arenas medias a finas y material limoso y por último el tercer estrato conformado por arenas medias y rocas basálticas (Figura 6).

Perfil 8-8'

Longitud de 320 m. (SE-NO) presenta cuatro estratos: el primero de material cuaternario conformado por arenas medias a finas y limo, el segundo conformado por gravas y arenas medias; el tercer estrato compuesto por una matriz limo-arenosa y por último un estrato limo-arcilloso.

Acuíferos identificados en la cuenca de estudio

Fueron identificados 2 acuíferos en la zona: uno confinado con agua que fluye a través de los planos de fractura de roca consolidada compuesta por lutitas y pizarras; y otro acuífero libre (no confinado) que fluye a través de gravas y arenas en matriz limosa hasta profundidades de 10 a 20 metros. El flujo subterráneo tiende a seguir la topografía, en específico el flujo en el acuífero libre que empieza en la parte alta de la cuenca desembocando, y con dirección hacia el río Quirpinchaca.

Acuífero libre

El acuífero libre está compuesto por material cuaternario aluvial conformado por gravas y arenas en matriz limosa con material limo arcilloso, este se extiende desde la comunidad de La Palca hasta descargar al río Quirpinchaca en todo el largo del cauce principal.

Acuífero confinado

El acuífero confinado está compuesto por material ordovícico conformado por roca fracturada de lutitas y pizarra, ubicado en la parte media derecha de la cuenca en la zona del pozo perforado de la comunidad de Jatun Era. El espesor de este acuífero oscila entre los 50 a 70 metros de profundidad.

Obtención de redes de flujo y superficie potenciométrica

La superficie potenciométrica, fue construida con los niveles mensuales medidos en la red de monitoreo (Carga Hidráulica). Se contorneó en intervalos de 5 m para época lluviosa y época seca y una serie de líneas de flujo fueron trazadas perpendiculares a los contornos (Figura 7). El sistema muestra que el flujo tiene dirección SE hacia NO y que la zona de descarga es en gran parte hacia el río Quirpinchaca debido posiblemente a la topografía.

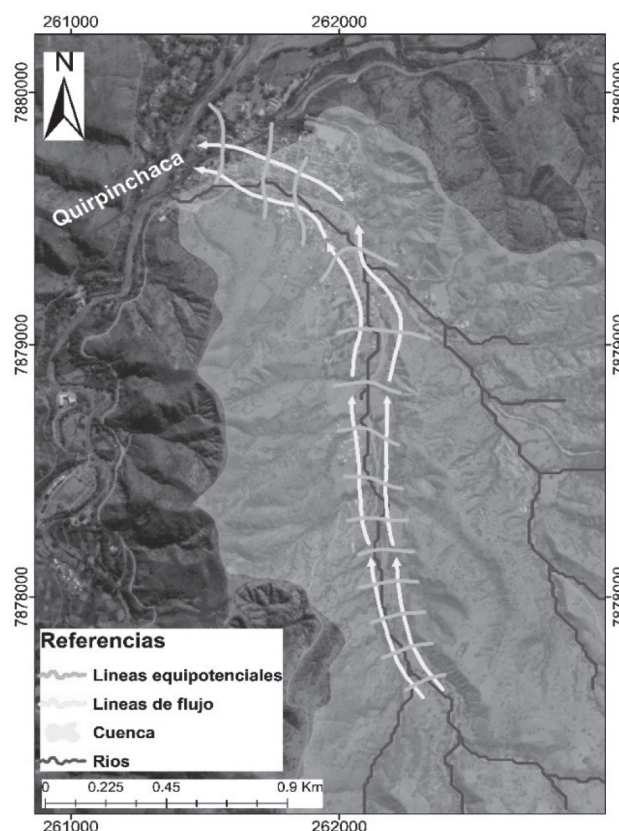


Figura 7. Red de flujo estimado en el acuífero libre en base a la superficie potenciométrica

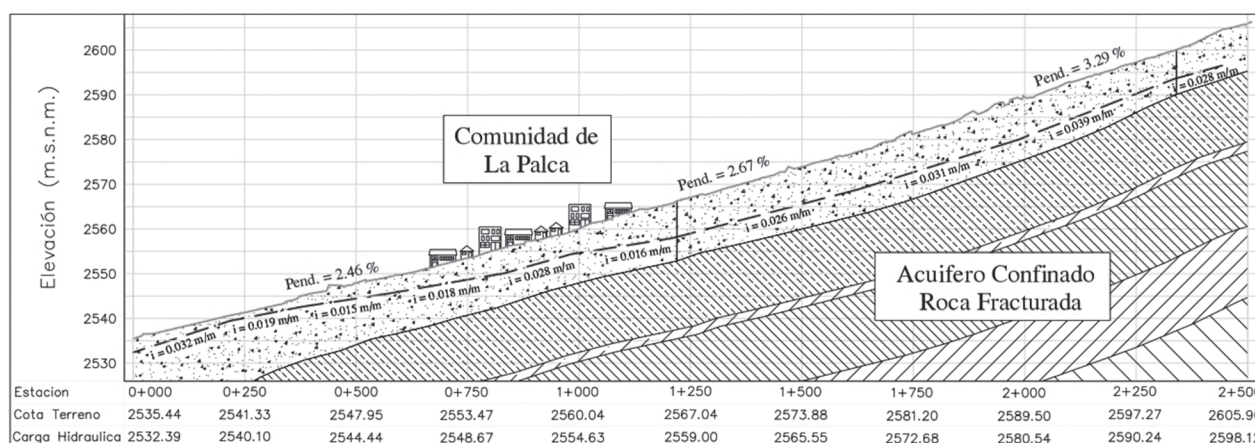


Figura 8. Nivel de agua en perfil y gradiente hidráulico en el curso principal de la cuenca

La red de flujo corresponde al acuífero libre en su totalidad, construido en base a la superficie potenciométrica obtenida a lo largo de 1 año de recopilación de datos, el gradiente hidráulico estimado varía de 0.015 a 0.039 m/m, y el nivel estático se encuentra en un rango de profundidad de 6 a 20 m, como se puede apreciar en la Figura 8.

Variabilidad de zonas de recarga y parámetros del acuífero libre

De acuerdo con los valores obtenidos mostrados en la Tabla 1, la media geométrica de la conductividad hidráulica en la zona no saturada corresponde con un valor de 75.1 m/día, consistente con los datos reportados Young (1991) quien obtuvo valores de 0.4 mm/h en suelos de textura fina (limos y arcillas), 0.4 a 40 mm/h, para suelos con buena estructura y > 40 mm/h para suelos de textura gruesa (arenas y gravas).

El valor máximo obtenido de conductividad hidráulica en la zona no saturada corresponde con un valor de 3.4 E-01 m/s adquirido de la prueba P5 ubicada en el lecho del Río Wasamay, el valor obtenido de conductividad concuerda con el material identificado en el lecho del río correspondiente con un suelo conformado por gravas en matriz arenosa, en cuanto al valor mínimo el mismo corresponde con un valor de 6.0 E-03 m/s el mismo fue adquirido de la prueba P14 ubicado en la parte central de la cuenca, correspondiente con un tipo de suelo limo arcilloso (Figura 9 y Tabla 1).

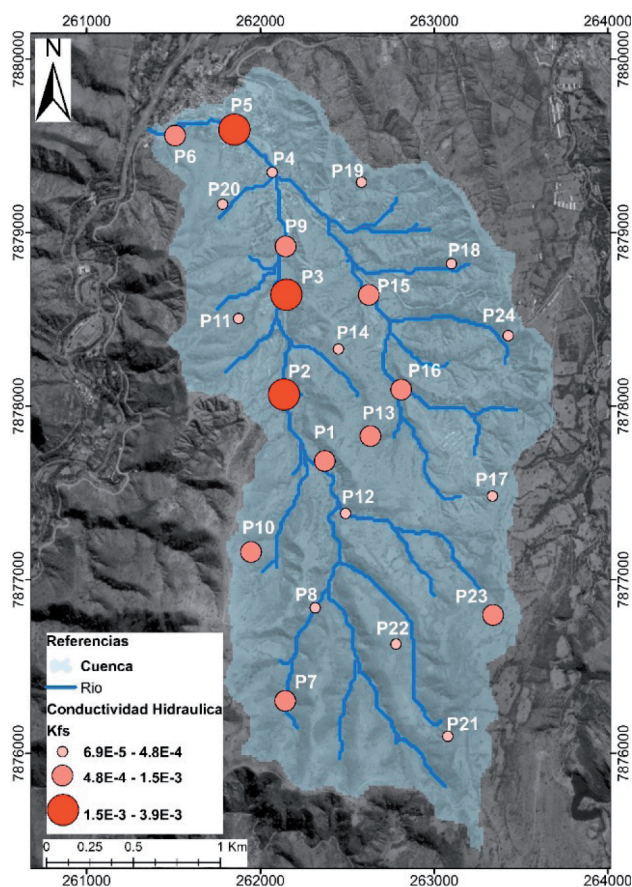


Figura 9. Conductividades hidráulicas para el acuífero libre.

Como resultados finales y de acuerdo a la zonificación y área de recarga puede ser verificado que el río Wasamayu es la principal área de recarga con una tasa de infiltración de 15.5 m/día, provenientes de precipitación; se deberá realizar estudios posteriores para determinar las tasas de recarga laterales provenientes de sistemas acuíferos contiguos.

Tabla 1. Conductividades hidráulicas en la zona no saturada.

ID	Kfs (m/día)	Kfs (m/s)	ID	Kfs (m/día)	Kfs (m/s)
P1	0.074	8.56E-07	P13	0.13	1.50E-06
P2	0.195	2.26E-06	P14	0.006	6.94E-08
P3	0.268	3.10E-06	P15	0.08	9.26E-07
P4	0.017	1.97E-07	P16	0.088	1.02E-06
P5	0.336	3.89E-06	P17	0.009	1.04E-07
P6	0.101	1.17E-06	P18	0.042	4.86E-07
P7	0.066	7.64E-07	P19	0.007	8.10E-08
P8	0.009	1.04E-07	P20	0.023	2.66E-07
P9	0.115	1.33E-06	P21	0.042	4.86E-07
P10	0.058	6.71E-07	P22	0.031	3.59E-07
P11	0.022	2.55E-07	P23	0.055	6.37E-07
P12	0.01	1.16E-07	P24	0.019	2.20E-07

Parámetros hidrogeológicos del acuífero profundo en roca fracturada

Las propiedades del acuífero confinado (roca fracturada) fueron obtenidos empleando el software AQTESOLV a partir del análisis de pruebas de recuperación en función a los niveles diarios (Figura 10) en el pozo perforado (P-03) para un bombeo de 4 a 6 horas continuas, mediante criterios de doble porosidad en roca fracturada (Moench, 1984; Barker, 1988).

El pozo se encuentra ubicado en la parte media de la cuenca con aproximadamente 90 metros de profundidad, 32 metros de largo total de rejillas (espesor asumido para Transmisividad) y con una tasa de bombeo constante de 1.418 l/s medido el 25 de septiembre de 2017 mediante el método volumétrico en un recipiente de 200 litros.

La Tabla 2 muestra los valores de conductividad hidráulica y almacenamiento específico, promediados para la roca fracturada, obtenidos para época seca y lluviosa mediante la metodología de Moench y Barker.

Tabla 2. Parámetros estimados para el acuífero de roca fracturada

PARÁMETRO	K [M/S]	SS [1/M]
Época seca	5.8 E-07	1.9 E-06
Época lluviosa	4.8 E-07	4.3 E-06
Promedio	5.3 E-07	3.1 E-06

Recarga por fluctuación de niveles

Los niveles estáticos diarios del pozo P-03 ubicado en la parte media de la cuenca en el ramal derecho fueron monitoreados desde octubre del 2017 hasta Julio del 2018. La Figura 11 muestra la relación entre los niveles estáticos registrados y la precipitación; en la cual se puede observar un incremento abrupto en el nivel estático a mediados del mes de febrero a consecuencia de la respuesta tardía a las lluvias, este es el evento más importante de recarga.

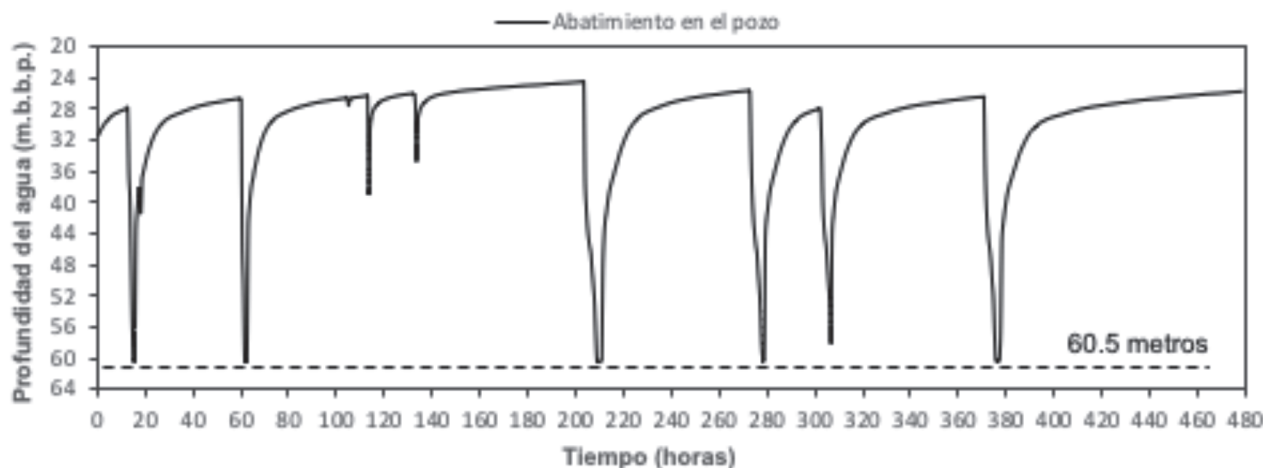


Figura 10. Niveles de agua diario en el pozo perforado (P03) en roca fracturada en Jatun Era

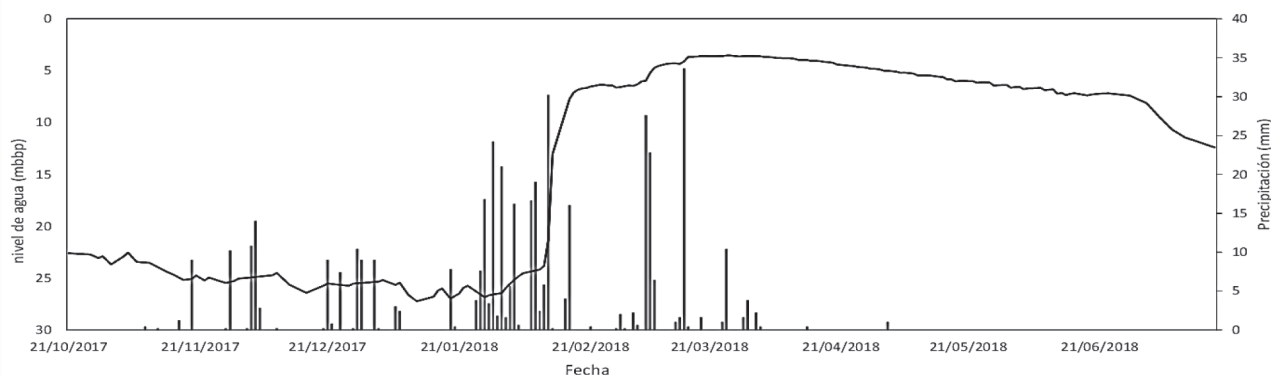


Figura 11. Variación de niveles diarios del pozo perforado P03 en el acuífero fracturado (Jatun Era)

La recarga por fluctuación de niveles en el acuífero fracturado en el pozo de monitoreo P-03 es de 260 mm/año correspondiente al 41% de precipitación en el área de estudio.

La Figura 12 muestra un crecimiento gradual en la época de lluvia de los niveles estáticos diarios del pozo de monitoreo P-30 ubicado en la parte media de la cuenca en el ramal izquierdo. Se pueden apreciar dos pequeños eventos de recarga en los meses de febrero y marzo respectivamente.

La recarga total en el acuífero libre (cuaternario, no consolidado) para esta zona de la cuenca según la fluctuación de niveles del pozo de monitoreo P-30 es de 11 mm/año correspondiente al 2 % de precipitación.

CONCLUSIONES

Fueron identificadas dos unidades hidrogeológicas: un acuífero libre de material cuaternario aluvial conformado por gravas y arenas en matriz limosa con material limo arcilloso, de la cual se extrae agua a partir de pozos excavados manualmente por los actores locales y un acuífero confinado de material ordovícico conformado por roca fracturada de lutitas y pizarra del cual también se extrae agua a través de pozos perforados, esta unidad es la menos explotada pero la de mayor potencial en cuestión de flujo subterráneo.

La realización e interpretación de la prueba de recuperación y datos de nivel en el pozo de Jatun Era (Figura 10) brindó información esencial sobre la transmisividad, almacenamiento y conductividad hidráulica para el acuífero en roca fracturada, utilizando los modelos de Moench y Barker en el software AQTESOLV fueron obtenidos parámetros para épocas seca y lluviosa.

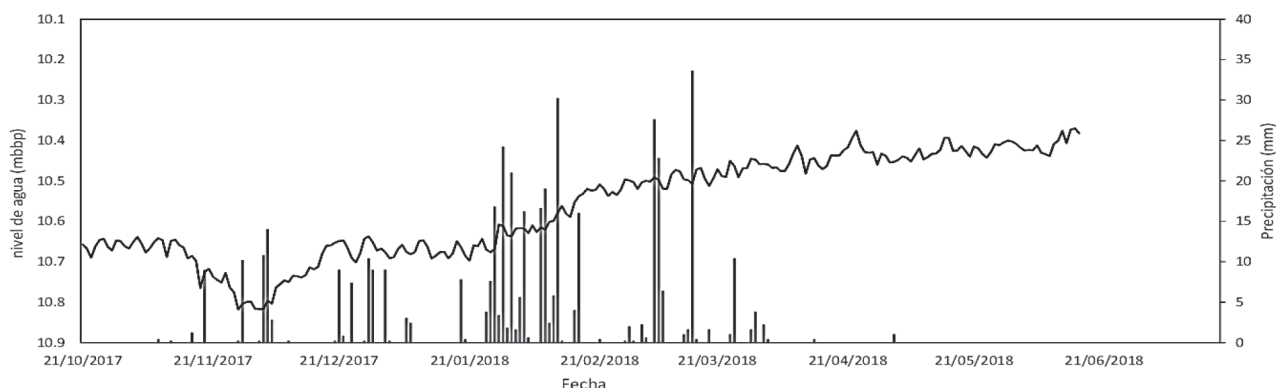


Figura 12. Variación de niveles diarios del pozo excavado P30 en el acuífero cuaternario (Jatun Era).

Los resultados obtenidos en las pruebas de infiltración en la zona no saturada y en el río Wasamayu, posicionan a las zonas potenciales de recarga para el sistema acuífero libre de la cuenca La Palca, primeramente, al río Wasamayu como principal agente de recarga debido a la infiltración elevada de la escorrentía en época lluviosa y la infiltración de precipitación en menor proporción en las otras zonas del área de estudio.

El sistema de flujo de agua subterránea, empieza en cuenca alta a través de infiltración por precipitación en el acuífero superficial, un porcentaje sigue su trayecto a profundidades mayores para recargar el acuífero profundo de roca fracturada. En el acuífero libre mayormente compuesto de material aluvial, el agua fluye siguiendo la topografía y teniendo flujo preferente en el lecho del río Wasamayu hasta desembocar al río Quirpinchaca.

La tasa de recarga es notablemente mayor a las tasas de extracción de agua subterránea en la zona (datos obtenidos en la red de monitoreo), por lo cual es una alternativa para mejorar la dotación de agua potable en las comunidades que abarcan la zona de estudio. La propuesta de un nuevo pozo de extracción puede ser viable bajo los resultados obtenidos en cuanto a recarga de agua, niveles de agua, y diferenciación de los diferentes tipos de acuíferos en la zona de estudio.

La situación actual en la zona de estudio demuestra que aún existe un problema ante la escasez de agua, aunque la fuente subterránea es explotada para amortiguar algunas falencias, no obtiene la atención técnica que debería, conforme al uso, cuidado, o funcionamiento de los pozos perforados que existen. Un estudio hidrogeológico es competente ante la baja comprensión actual por parte de los pobladores y personas encargadas de la explotación del recurso, el manejo sostenible del agua subterránea podría efectuarse obteniendo la información necesaria acerca del flujo y recarga de agua subterránea, así como la extracción gestionada por parte de la población.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barker, J. A. (1988). A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, 24(10), 1796-1804.
- Clarke, R., Lawrence, A. and Foster, S (1996) *Groundwater: A threatened resource*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme Environment Library No. 15.
- "Crisis de agua potable desata preocupación en Sucre y Chuquisaca". (2017), EL DEBER, available at: <https://www.eldeber.com.bo/bolivia/Crisis-de-agua-potable-desata-preocupacion-en-Sucre-y-Chuquisaca-20171126-0018.html> (accessed 29 September 2018).
- Crosbie, R. S., Binning, P., & Kalma, J. D. (2005). A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41(1).
- De Vries, J., Simmers, I. (2002) Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 5-17.
- Delin, G.N., Healy, R.W., Lorenz, D.L., Nimmo, J.R. (2007) Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Hydrogeology Journal*, Vol. 334, pp.231-249.
- Fetter, C.W. (2001), *Applied Hydrogeology*, Cuarta ed., Prentice Hall.
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (Englewood Cliffs). Princeton-Hall.
- Gerhart, J. M. (1986). Ground-water recharge and its effects on nitrate concentration beneath a manured field site in Pennsylvania. *Groundwater*, 24(4), 483-489.
- Healy, R.W., Cook P.G. (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 91-109.
- Healy, W.R. y Scanlon B.R. (2010) *Estimating Groundwater Recharge*. (1st ed.). New York: United States of America by Cambridge University Press.

- Lee, J. Y., Yi, M. J., & Hwang, D. (2005). Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment. *Geosciences Journal*, 9(3), 277-286.
- Liskop, T., & Allen, D. (2005). Observation Well Testing and Recharge Characterization of the Okanagan Basin, BC. Report prepared for BC Ministry of Water, Land and Air Protection.
- Misstear, B. (2012), "Some key issues in the design of water wells in unconsolidated and fractured rock aquifers", *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, Vol. 1 No. 2.
- Moench, A.F. (1984), "Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir With Fractured Skin", *Water Resources Research*, Vol. 20 No. 7, pp. 831-846.
- Nielsen, D. (2006) Environmental site characterization and groundwater monitoring. Segunda edición. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Nimmo, J. R., Schmidt, K. M., Perkins, K. S., y Stock, J. D. (2009). Rapid measurement offield-saturated hydraulic conductivity for areal characterization. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 142-149.
- Plan de Desarrollo Municipal. (2013), Gobierno Autónomo Municipal de Yotala, Chuquisaca.
- Rasmussen, W. C., & Andreasen, G. E. (1959). Hydrologic budget of the Beaverdam Creek basin, Maryland (No. 1472). USGPO.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Topp. G.C., 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.*, 136:250-268.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1985). In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil science*, 140(4), 292-302.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook P.G. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 18-39.
- Sterret, R.J. (2007), *Groundwater and Wells*, Tercera ed., Johnson Screens, New Brighton.
- Stimson, J. (2001) Isotopic and geochemical evolution of groundwaters in Cochabamba Valley, Bolivia. Tesis de Maestría. Universidad de Waterloo, Waterloo, Canadá.
- Telmer, K. and Best, M. (2004), "Underground dams: a practical solution for water needs of small communities in semi-arid regions", *Scientific Communications*, Vol. 1 No. 1, pp. 63-65.
- Ting C.S., Kerh T., Liao C.J. (1998) Estimation of groundwater recharge using the chloride mass-balance method, Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, Vol. 6, pp. 282-292.
- UNHCR. (2015) Tools and Guidance for Refugee Settings - Borehole Design for Fractured Rock. [WWW document] at: <https://wash.unhcr.org/wash-technical-designs/>
- Vrba, J., & van der Gun, J. (2004). The world's groundwater resources. *World Water Development Report 2*, Contribution to Chapter 4, Report IP 2004-1, System, 2, 1-10.