

Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero la yarada media

Hydrogeological characterization to determine the deterioration of water quality in the a yarada media aquifer

Edwin Pino V.^{1*}, Fátima Coarita A.²

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

²Departamento de Ingeniería Geológica-Geotecnia, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

* Autor para correspondencia, e-amil: epino68@hotmail.com

REPORTE DE CASO

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 19-11-2017

Artículo aceptado: 30-09-2018

On line: 29-10-2018

PALABRAS CLAVES:

caracterización hidrogeológica,
deterioro calidad agua,
geología,
hidrodinámica,
hidroquímica.

CASE REPORT

INFORMATION OF ARTICLE

Artículo recibido: 19-11-2017

Artículo aceptado: 30-09-2018

On line: 29-10-2018

KEYWORDS:

hydrogeological characterization,
water quality deterioration,
geology,
hydrodynamics,
hydrochemistry.

RESUMEN

Se caracterizó hidrogeológicamente el acuífero La Yarada Media usando como parámetros las pruebas de bombeo de larga duración (métodos de Jacob y de recuperación de Theis); asimismo, se caracterizó la calidad del agua en función a los parámetros fisicoquímicos y la normatividad vigente verificándose el deterioro de la calidad del agua en el acuífero. Entre los años 2010 y 2015 se utilizaron 42 pruebas de bombeo, las cuales determinaron que la transmisividad al sureste fluctúa entre 602 y 4 235 m²/d (altas a muy altas), indicador que el acuífero es libre y presenta buenas condiciones hidráulicas; al noroeste fluctúa entre 53 y 494 m²/d, representando valores bajos y medios, relacionado con las tobas de la Formación Huaylillas —siendo la zona más afectada por el continuo descenso del nivel piezométrico. Al sureste la permeabilidad fluctúa entre 13 y 86 m/d; valores altos a diferencia del sector ubicado al noroeste donde la permeabilidad tiene una fluctuación entre 1 y 9,8 m/d, indicativo de valores bajos. La sobreexplotación del acuífero ha provocado que valores altos y medios de la transmisividad y permeabilidad cambien actualmente a medios y bajos, respectivamente, en el Asentamiento 4; debido a que este nivel estático se encontraba en los depósitos cuaternarios y ahora ha descendido hasta encontrarse en contacto con la Formación Huaylillas. Aún más, se ha provocado que la calidad del agua pase de aceptable a mala, evidenciando un deterioro que está relacionado con el incremento de los volúmenes de explotación y la disminución de la recarga secundaria de agua de buena calidad.

ABSTRACT

The aim is to hydrogeologically characterize the La Yarada Media aquifer using the parameters by means of long-term pumping tests (Jacob and Theis recovery methods), as well as to characterize the water quality referred to the physicochemical parameters according to the current regulations and verify the possible deterioration of water quality in the aquifer. Between 2010 and 2015, 42 pumping tests were used, determining that the transmissivity to the southeast fluctuates between 602 and 4 235 m²/d (high to very high), indicating that the aquifer is free and has good hydraulic conditions, to the northwest it fluctuates between 53 and 494 m²/d, representing low and medium values, related to the tuffs of the Huaylillas Formation —being the area most affected by the continuous decrease in the piezometer level—. To the southeast, the permeability fluctuates between 13 and 86 m/d, high values unlike the sector located to the northwest where the permeability has a fluctuation between 1 and 9.8 m/d, representing low values. The overexploitation of the aquifer has caused that high and average values of transmissivity and permeability, now change to means and lows respectively in Settlement 4, since this static level was in the Quaternary deposits and has now descended, being in contact with the Huaylillas formation. Even more, it has caused the water quality to go from acceptable to bad, evidencing its deterioration that is related to the increase of the exploitation volumes and the decrease of the secondary recharge of water of good quality.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es una fuente vital que proporciona suministros para las áreas urbanas y rurales; se usa en la economía agrícola y beneficia tanto a los peces como a los hábitats y ecosistemas. Durante las sequías, cuando los suministros de las aguas superficiales son limitados, las aguas subterráneas ofrecen un amortiguador crítico, proporcionando un porcentaje más alto del suministro de agua (Borchers et al., 2015).

La región de Tacna tiene como limitante principal para su desarrollo, la severa escasez de agua. Razón por la cual los agricultores establecidos en las pampas de La Yarada usan agua subterránea, resultando ser esta su única fuente de abastecimiento. En la actualidad, el acuífero La Yarada Media viene siendo sobreexplotado; lo que trae como consecuencia un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables y causando el fenómeno de intrusión marina en la Yarada Antigua (INRENA, 2003). Tacna —conocida como el valle del Caplina— se encuentra ubicada curiosamente en la zona más árida de la costa peruana, cabecera del desierto de Atacama, y se caracteriza por su escasez de recursos hídricos; lo cual dio lugar a que desde hace varias décadas se utilicen las aguas subterráneas existentes en su subsuelo, y de manera especial en las pampas de La Yarada, a fin de lograr el desarrollo de la agricultura, así como otras actividades económicas. Sin embargo, debido a la falta de un programa de explotación, el acuífero viene siendo sobreexplotado: hecho que ha traído como consecuencia un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables además de causar el fenómeno de la intrusión marina, debido a la alta concentración de pozos de explotación de aguas subterráneas en la zona próxima a la línea del mar (ANA, 2011). Según estudios realizados por ANA (2010) se determinó un área crítica de degradación de la calidad del agua subterránea en el acuífero, que comprende un área aproximada de 131 km² (60 km² correspondiente a intrusión marina), donde se ubican los valores más altos

de salinidad; lo que indica un aumento paulatino de esta en respuesta a la mayor penetración de la cuña salina, en las zonas más cercanas a la costa.

Ante esta problemática, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha elaborado un “Plan de ordenamiento de la explotación del agua subterránea en el acuífero Caplina” con el propósito de explotar el recurso hídrico de manera eficiente, organizada y sostenida. Uno de los programas del mencionado plan es la ejecución del estudio “Evaluación Hidrogeológica del Acuífero Caplina”, cuya finalidad es evaluar las condiciones y características hidrogeológicas del subsuelo del acuífero Caplina permitiendo de ese modo determinar la reserva explotable de agua en cantidad y calidad, factible de explotar en forma sostenible a largo plazo, además de proponer medidas para mejorar su gestión y conservación (ANA, 2009).

Las aguas subterráneas con fines de riego fueron clasificadas tomando como base las normas propuestas por el Laboratorio de Salinidad de Riverside, California EE.UU.; donde se considera la concentración total de sales, expresada en términos de la conductividad eléctrica y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Blasco & Rubia, 1973). El método elegido para la interpretación de las pruebas de bombeo fue el de Cooper & Jacob (1946), el cual es una simplificación del método de Theis (1935) para determinar el descenso (s) en cualquier punto a un tiempo (t). Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua (Villanueva & Iglesias, 1984).

En los diagramas de Stiff y Schoeller se disponen Na^+ + K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , siendo esta disposición apta para las aguas subterráneas y permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes o entre aniones; además se adapta muy bien a ser utilizado en mapas hidroquímicos y las comparaciones se pueden hacer con rapidez (Custodio & Llamas, 1976).

La necesidad de satisfacer la creciente demanda de agua es la principal impulsora de la recarga gestionada de los acuíferos, es una técnica estándar para reponer y/o mejorar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Uno de los objetivos de la recarga del acuífero es proporcionar acuíferos con buena calidad de agua, incluso cuando se utiliza agua de menor calidad para recargar el acuífero, por ejemplo, efluentes de plantas de tratamiento o agua de escorrentía (Valhondo et al., 2016). La expansión económica acelerada genera deterioro de la calidad del agua por la sobreexplotación del agua subterránea en zonas áridas, que normalmente tienen altas tasas de agotamiento. La integración de las investigaciones hidroquímicas se llevan a cabo para evaluar los factores que controlan la contaminación potencial del agua subterránea y la distribución espacial de los contaminantes muestra cómo se afecta a una amplia zona del acuífero (El Alfy et al., 2017).

Los principales acuíferos del mundo —de los que dependen cientos de millones de personas— se agotan a un ritmo alarmante, según la NASA. Es así que, de los 37 acuíferos más grandes del mundo, 21 de ellos han superado su punto de sostenibilidad; es decir, se ha extraído más agua de la que se ha incorporado a lo largo de diez años de observación. El estudio de la NASA confirma las sospechas que ya tenían numerosos investigadores, especialmente en los casos de acuíferos que no son recargables por la lluvia (Todd, 2015).

De esta manera, se pretende caracterizar hidrogeológicamente el acuífero La Yarada Media, bajo las condiciones actuales de explotación, interpretando las pruebas de bombeo para obtener los parámetros hidráulicos del acuífero. Asimismo, caracterizar la calidad del agua referida a los parámetros fisicoquímicos en función a la normatividad vigente y verificar el posible deterioro de la calidad del agua en el acuífero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El acuífero costero de La Yarada se encuentra ubicado en la región Tacna al sur de Perú, límite con Chile y Bolivia (Figura 1), región caracterizada por la escasez

de agua superficial; condición que se ha visto agudizada en las últimas décadas debido a la frecuente ocurrencia de sequías, la ampliación de la frontera agrícola con la consecuente incorporación de nuevos pozos de explotación de aguas subterráneas y el acelerado crecimiento poblacional de la ciudad de Tacna (ANA, 2011).

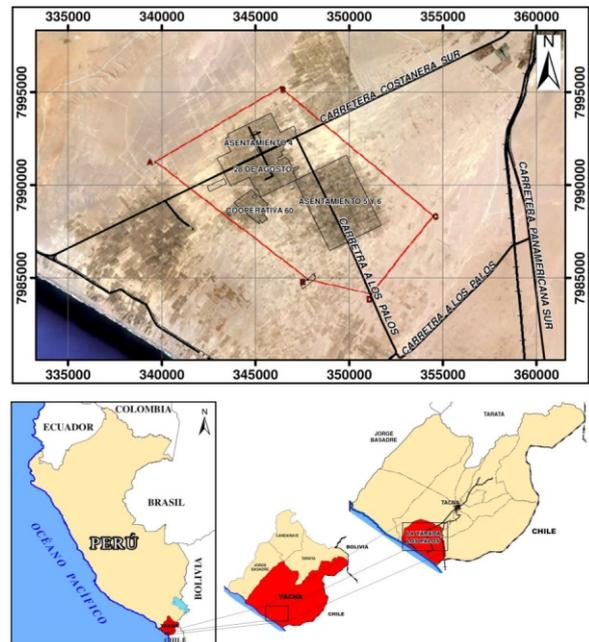


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

La metodología a seguir para el logro del objetivo contempla la recopilación de información histórica de estudios, reportes, campaña de monitoreo; a fin de efectuar el análisis de las interrelaciones entre la geología, hidrodinámica e hidroquímica existente. Con este enfoque integrado se buscará las interacciones entre los elementos mencionados para explicar la respuesta de los parámetros hidráulicos y la calidad de agua resultante, ante la sobreexplotación en el acuífero de La Yarada Media.

Recopilación de información y fuente de datos

Se recopiló información de diferentes instituciones públicas y privadas tales como el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), Autoridad Nacional del Agua (ANA), Proyecto Especial Tacna (PET), Hi Geoproject SRL, entre otros. La información fue seleccionada, ordenada, analizada y evaluada para disponer de datos confiables.

Evaluación geomorfológica

La zona de estudio se ubica geomorfológicamente en la unidad regional de las Planicies Costaneras, iniciándose a la altura de Magollo y extendiendo su desarrollo por 25 km hasta el litoral, entre los cerros de La Yarada y la frontera con Chile. El relieve de esta geoforma es llana, presentando una suave inclinación hacia el suroeste con una pendiente de 0,5 a 1% (INGEMMET y PET, 2008).

La zona de estudio tiene un ancho promedio de 12 km y se encuentra entre las cotas 70 a 130 msnm. En el subsuelo, esta superficie se encuentra cruzada por una serie de paleocauces: los que aparentemente están relacionadas con los pozos de mayor rendimiento. Las geoformas recientes están vinculadas al escaso escurrimiento de agua que existe en temporada de lluvias, y que dan origen a las pequeñas quebradas Caramolle y Honda; las cuales están íntimamente interconectadas con las zonas que tienen mejores características hidroquímicas.

Evaluación geológica

La historia geológica y la geomorfología del lugar dan como resultado un complejo sistema hídrico subterráneo en la cuenca del río Caplina. Los acuíferos, que se encuentran actualmente explotados, se ubican en sedimentos no consolidados; las cuencas que aportan a la recarga están constituidas en su mayoría por rocas volcánicas, rocas volcánico-sedimentarias, rocas metamórficas cuya litología y estructura, así como la actividad geotérmica condicionan tanto los regímenes hídricos superficiales como la calidad química de las aguas que alimentan los acuíferos (INGEMMET y PET, 2008). En el área de estudio afloran formaciones volcánicas, sedimentarias (Jaén & Ortíz, 1963). El miembro Superior está compuesto por una secuencia de conglomerados intercalados con niveles delgados

de limolitas, areniscas y tobas riolíticas – riodacíticas de color rosáceo (Acosta et al., 2008). Según los estudios realizados por Flores & Sempere (2002) y Flores et al. (2004) los sedimentos de esta unidad constan de conglomerados y areniscas de coloración gris oscura, con clastos mayormente andesíticos y niveles delgados evaporíticos.

También se encuentran depósitos antrópicos, conformados por zonas de cultivo y zonas habitadas; las áreas más apropiadas para la actividad humana comprenden zonas enmarcadas sobre los depósitos de sedimentos correspondientes a flujos aluviales antiguos de superficies sub horizontales, que se convierten en lugares con condiciones favorables para el emplazamiento de la ciudad de Tacna y la actividad agropecuaria, esencialmente por la presencia de aguas subterráneas en las pampas de La Yarada y Hospicio (Acosta et al., 2012).

Tectónicamente el área de estudio es bastante compleja, puesto que se encuentra ubicada dentro de la fosa de Tacna, formada por las deformaciones tectónicas profundas que modificaron la geoforma pre-existente y produjeron el hundimiento en bloques desde Calientes hasta el mar, dejando una profunda fosa que poco a poco se fue rellenando hasta tener su actual configuración.

Evaluación geológica del subsuelo

Se ha investigado la geología del subsuelo a través del estudio de los testigos de taladros diamantinos perforados y perfiles de los pozos, los cuales fueron proporcionados por el Proyecto Especial Tacna. Con la finalidad de determinar y visualizar la secuencia y continuidad de los diferentes estratos del subsuelo, se ha confeccionado el Mapa Isométrico Geológico (INGEMMET y PET, 2008) (Figura 2).

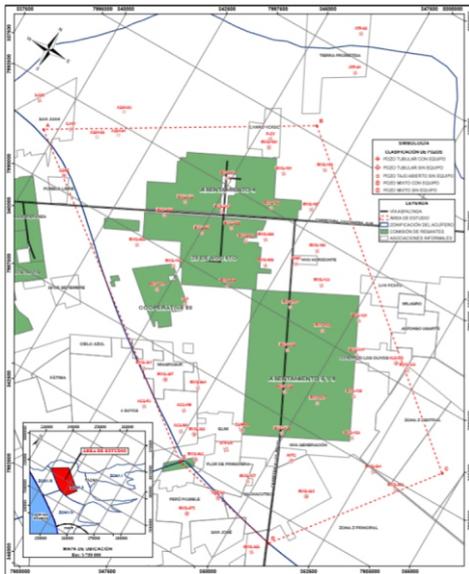


Figura 3. Zonas del acuífero La Yarada y La Yarada Media

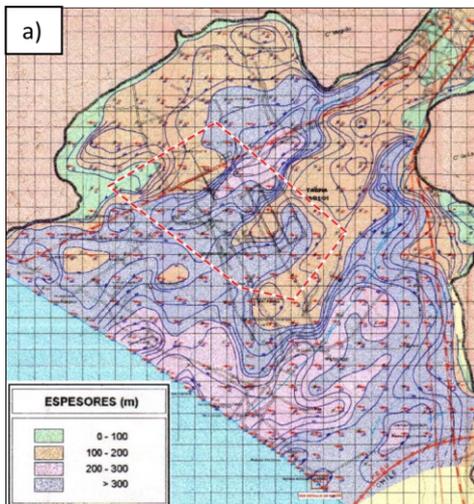


Figura 4a. Espesores del acuífero saturado

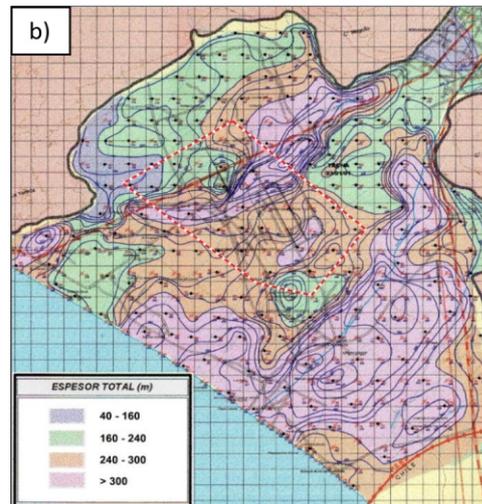


Figura 4b. Espesores totales del acuífero

La superficie freática

El acuífero de La Yarada tiene como fuentes principales de alimentación, las filtraciones de agua que se producen en el río Caplina, seguido por los aportes de agua provenientes de las precipitaciones pluviales que se producen en las cuencas de las quebradas de Palca, Vilavilani, Viñani, Cauñani, Espíritus y quebrada Honda; las cuales discurren y se infiltran en el valle y las pampas de La Yarada. La recarga también está constituida por las infiltraciones en los sectores de riego de Bajo Caplina, Uchusuma, Magollo, Copare y pérdidas en la red de agua potable, que en conjunto representa una recarga equivalente de 54 Hm³ (PET, 2006).

Con la información de estudios realizados anteriormente y los resultados de los monitoreos realizados entre los años 1999 y 2014, se analizó las variaciones de los niveles del agua en la zona de estudio con 24 pozos de control piezométrico, registrándose descensos anuales que varían entre 0,25 m y 0,67 m. En el sector de la Cooperativa 60 varía entre 0,43 m y 0,53 m; en el sector de 28 de agosto, entre 0,49 m y 0,67 m; en el Asentamiento 4, entre 0,25 m y 0,50 m; y en el Asentamiento 5 y 6, entre 0,40 m y 0,55 m anuales (Figura 5).

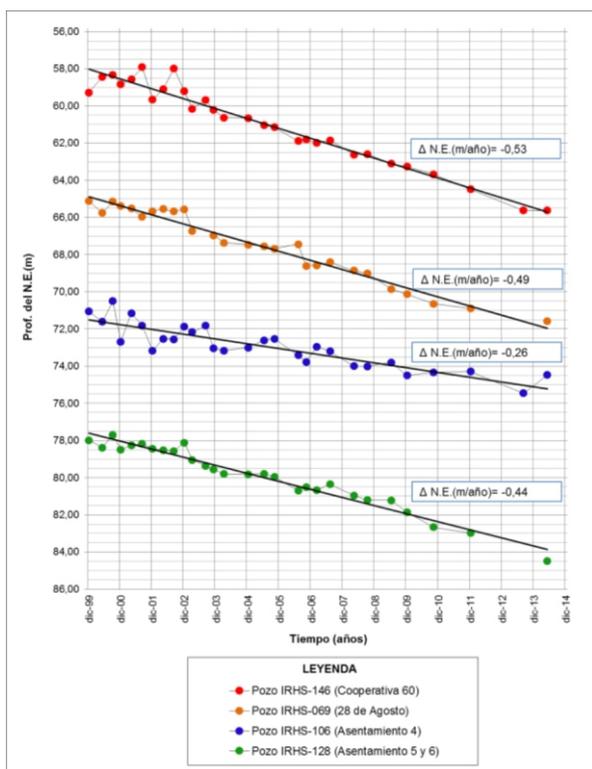


Figura 5. Variación de los niveles de agua (1999 – 2014).

Morfología de la superficie freática

El nivel de descenso de las capas acuíferas determina la superficie piezométrica actual en forma de curvas isopiezas (Custodio & Llamas, 1976). Las campañas de mediciones de niveles piezométricos realizadas

entre los años 2013 y 2015, referidas al nivel medio del mar, permitieron realizar el estudio de la morfología de la superficie freática, elaborándose el mapa de curvas isopiezas (Figura 6a) e isodinámicas (Figura 6b) correspondientes al acuífero superficial o Cuaternario.

Las curvas isopiezas muestran el sentido del flujo del agua subterránea, teniendo una dirección predominante de noreste a suroeste con una gradiente hidráulica promedio de 0,3% que corresponde a la recarga principal proveniente del río Caplina; y una recarga secundaria con orientación de norte a sur proveniente de la quebrada Honda, con una gradiente hidráulica promedio de 0,5%.

Los niveles dinámicos con respecto al nivel del mar representan la morfología de la superficie freática cuando el acuífero está en funcionamiento. Las curvas isodinámicas correspondientes al período 2013 – 2015, muestran que en el Asentamiento 4, el cono de depresión es más grande, formado por la presencia de las tobas de la Formación Huaylillas. Dicha depresión se manifiesta en los pozos IRHS-112 e IRHS-101, cuyos abatimientos están en el orden de 43,01 m y 46,63 m respectivamente.

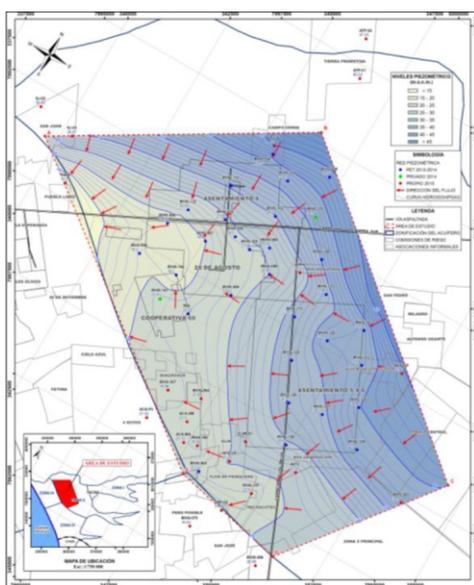


Figura 6b. Isodinámica (2013-2015).

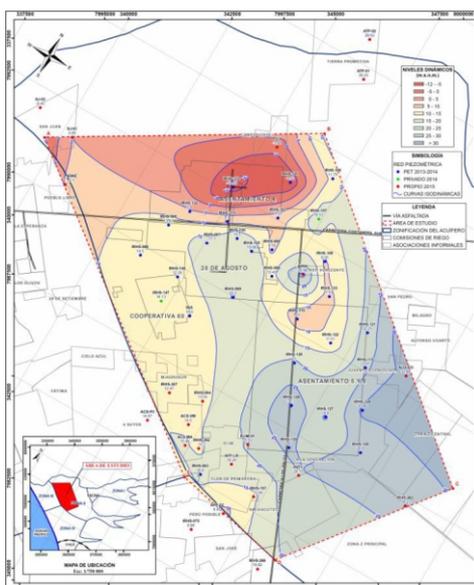


Figura 6a. Isopiezas (2013-2015).

Hidroquímica

En la cuenca Caplina, donde se encuentra emplazado el acuífero La Yarada Media, se identificaron fuentes de agua con influencia sobre la calidad del agua, siendo las geotermales Aruma y Paralocos en la cabecera de la cuenca, las que emanan aguas con alto contenido de Arsénico, Plomo y Sodio en concentraciones por encima de los valores del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) (Pino et al., 2017). La extracción intensiva continua de aguas subterráneas de más de 100 m de profundidad significa que los riesgos de la calidad del agua en el sistema acuífero profundo deben considerarse junto con las limitaciones de cantidad de agua (Lapworth et al., 2017). El análisis de calidad de agua permitirá conocer las características químicas actuales del agua almacenada en el acuífero y la evolución que experimenta con relación a la concentración salina. Se ha determinado los elementos iónicos mayoritarios disueltos en el agua (Cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio; Aniones: cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos); los cuales nos permitirán determinar la calidad del agua para su posterior uso con fines de riego y/o poblacional.

RESULTADOS

Caracterización hidrodinámica

Las pruebas de bombeo con frecuencia implican tasas de bombeo variables (Wen et al., 2017). Para analizar los resultados de parámetros hidráulicos del acuífero y realizar los mapas de variación espacial, se ha escogido los datos del ensayo de recuperación —por ser los más representativos— y fueron complementados con la recopilación de resultados de pruebas de bombeo ejecutadas entre los años 2010 y 2014 (Tabla 1) y entre 2013 y 2014 (Tabla 2).

La descripción geológica que se tiene del acuífero señala que las mejores características hidráulicas para almacenar y ceder agua están ubicadas al sureste; y en menor grado, al noroeste por la presencia de las tobas del Huaylillas. Hecho que coincide con los resultados obtenidos, pues los mayores valores para los

parámetros hidráulicos: Transmisividad (T) y Permeabilidad (K) son obtenidos en los pozos que no captan los niveles de tobas de la Formación Huaylillas.

Tabla 1 Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo

N°	Código de pozo	Jacob		Recuperación de Theis	
		T (m ² /d)	K (m/d)	T (m ² /d)	K (m/d)
1	IRHS-064	1667,390	37,185	1834,129	40,904
2	IRHS-075	1694,718	32,317	2203,134	42,012
3	IRHS-157	1897,322	40,455	2710,460	57,792
4	IRHS-263	602,871	13,250	602,871	13,250
5	IRHS-266	1628,569	60,362	1879,118	69,649
6	IRHS-307	1628,683	63,472	2124,369	82,789
7	IRHS-362	1807,081	49,618	2108,261	57,887
8	ACS-MA	1581,205	52,168	1694,149	55,894
9	ACS-P3	1474,245	35,252	1943,323	46,469
10	ACS-VM	1844,692	38,035	1936,927	39,937
11	AFP-LR	3487,840	70,848	4235,234	86,030
12	ALO-EO	970,607	55,023	818,950	46,426
13	APP-02	2676,835	63,014	3059,240	72,016
14	ASNE	373,719	5,645	342,576	5,175
15	ATP-01	453,982	9,863	314,295	6,828
16	ATP-02	494,288	9,837	494,288	9,837
17	AVNH	270,394	15,182	305,972	17,180
18	AVTC	591,346	20,412	739,183	25,515
19	ELIM-01	839,298	35,594	1154,035	48,941
20	P-CV	205,836	3,072	102,918	1,536
21	SJ-01	61,089	1,153	53,758	1,015
22	SJ-02	91,354	1,600	82,218	1,440

Tabla 2 Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo recopilados

N°	Código de pozo	Recuperación de Theis	
		T (m ² /d)	K (m/d)
1	IRHS-56A (**)	1581,120	23,599
2	IRHS-068 (*)	966,381	59,070
3	IRHS-69A (**)	1686,528	21,471
4	IRHS-088 (*)	1006,167	28,035
5	IRHS-089 (*)	1125,136	77,276
6	IRHS-101 (*)	106,202	1,512
7	IRHS-102 (*)	224,735	7,613
8	IRHS-105 (*)	967,273	24,371
9	IRHS-106 (*)	138,545	1,694
10	IRHS-107 (**)	282,343	5,577
11	IRHS-108 (*)	100,808	1,937
12	IRHS-112 (*)	105,408	1,802
13	IRHS-115 (*)	880,812	12,963
14	IRHS-121 (*)	1665,849	28,603
15	IRHS-122 (*)	1080,310	17,153
16	IRHS-126 (*)	1167,045	20,389
17	IRHS-127 (*)	1992,211	28,481
18	IRHS-133 (*)	100,914	2,631
19	IRHS-146 (*)	1445,192	58,415
20	IRHS-147 (**)	847,107	22,650

Fuente: (*) PET 2013-2014, (**) Privado 2010-2014

Con los resultados de parámetros hidráulicos de 42 pozos se han graficado las isocurvas de transmisividad y permeabilidad (Figuras 7a y 7b), en las que se puede observar que el mayor potencial hídrico lo constituye la zona sureste del área de estudio correspondiente a los asentamientos 5 y 6, 28 de agosto y Cooperativa 60; debido a que en este sector está localizado el mayor espesor de depósitos

cuaternarios que se encuentran en contacto con la Formación Moquegua. Sin embargo, estas características geológicas disminuyen a medida que se avanza hacia el noroeste en el Asentamiento 4, donde se observa que la presencia de la Formación Huayllillas incidió en el rendimiento de los pozos, siendo comparativamente más bajos; ya que estos paquetes representan horizontes impermeables.

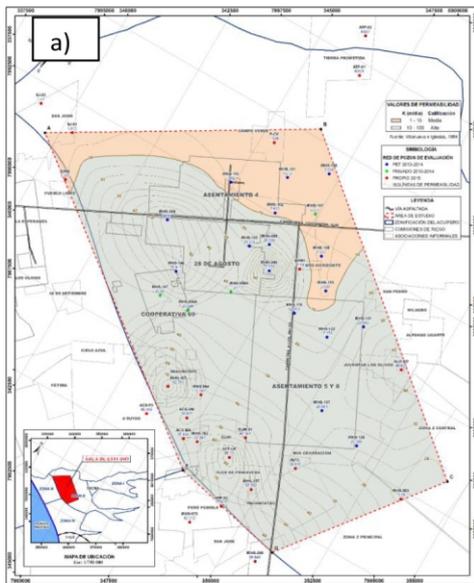


Figura 7a. Isotransmisividad

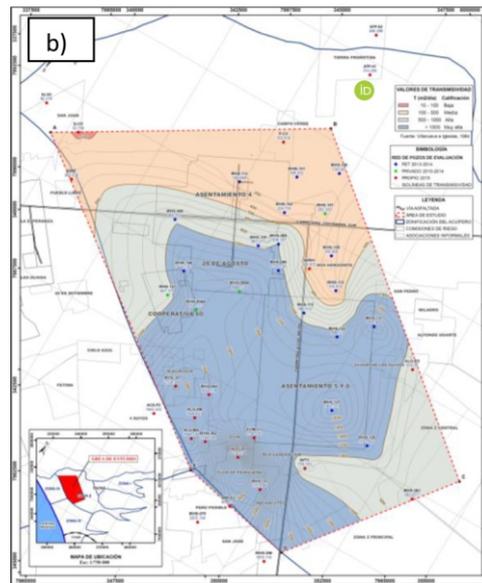


Figura 7b. Isopermeabilidad

Comparación de parámetros hidráulicos actuales con años anteriores

Si comparamos los parámetros hidráulicos actuales con la información existente de los parámetros hidráulicos del “Estudio hidrogeológico del valle de Caplina” elaborado por el INRENA (2003), se puede observar que los valores de transmisividad y permeabilidad obtenidos en la zona central del acuífero tienden a permanecer dentro de los rangos con valores altos a muy altos; pero en pruebas ejecutadas en el Asentamiento 4 presentan una considerable disminución en los valores de los parámetros hidráulicos, pues en el año 2002 el nivel estático se encontraba en los depósitos cuaternarios y actualmente ha descendido, encontrándose en contacto con la Formación Huayllillas; provocando que los rangos con valores altos y medios cambien a medios y bajos, respectivamente, afectando el rendimiento en estos pozos.

Caracterización hidroquímica

Para proporcionar una caracterización primaria de los procesos hidroquímicos y las rutas que controlan la evolución de la calidad del agua, se orienta la investigación a un complejo sistema de aguas subterráneas multicapa (Liu et al., 2017). Según los valores de conductividad eléctrica (Figura 8a), se puede observar que la calidad del agua subterránea tiende a mejorar hacia el noroeste por la recarga de la quebrada Honda y al sureste por la recarga de la quebrada Cauñani (menos de 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y a incrementarse hacia el centro (hasta 1 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$) debido a la recarga de las cuencas Uchusuma y Caplina, además de estar relacionado al lavado de estratos salinos por la intensa actividad agrícola. El ion cloruro (Figura 8b) es uno de los más conocidos por sus efectos de salinidad en el agua, se observa que su contenido en las aguas subterráneas fluctúa entre 81,65 y 380 mg/l. El estándar de calidad para agua

potable es de 250 mg/l, por lo que el 91% (53 pozos) de estas fuentes tienen buena calidad para ser usadas como agua potable; por el contrario, el 9% (5 pozos)

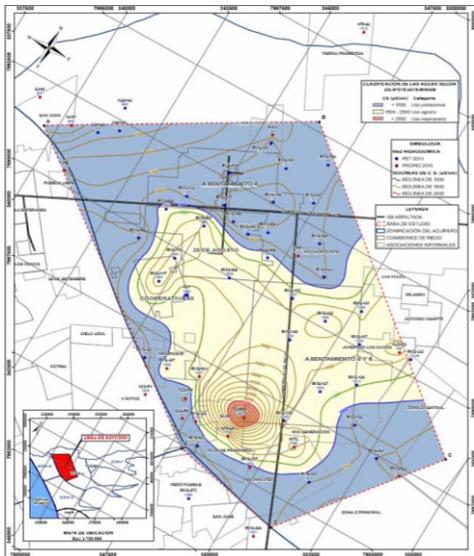


Figura 8a Isoconductividad eléctrica

Según los diagramas de Piper y Stiff (Figura 9a y 9b) se identifica el tipo de familias de calidad de agua que predominan dentro del área de estudio. Existen 4 familias, siendo la familia Sulfatada Cálctica la predominante (79%), seguida de la Sulfatada Magnésica (2%); además existen familias hidroquímicas que representan una alta vulnerabilidad debido a su elevada salinidad como la Sulfatada Sódica (16%) y Clorurada Sódica (3%) en menor incidencia.

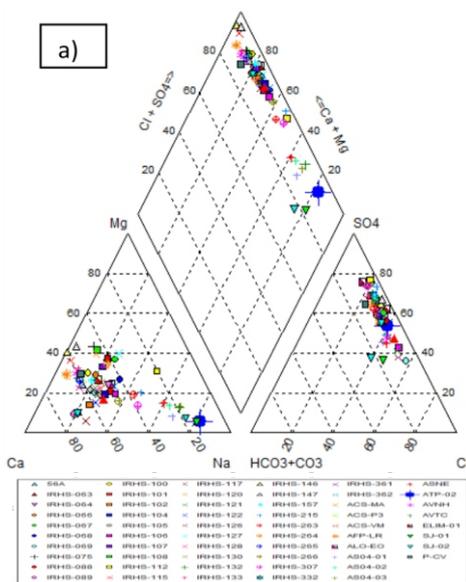


Figura 9a. Diagrama de Piper (2013-2015).

sobrepasa los estándares de calidad para fuentes de agua potable, pero estarían dentro de lo establecido en el ECA agua para la categoría 3 con fines agrícolas.

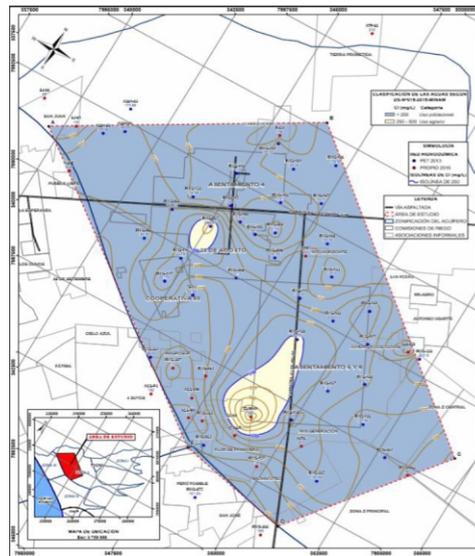


Figura 8b Isocloruros

La conformación de diferentes tipos de familia química de agua se debe a que en las recargas de las cuencas Uchusuma y Caplina, existe la presencia de actividad volcánica; es decir, presencia de manantiales de origen hidrotermal, la familia dominante en el acuífero La Yarada Media es la Sulfatada Cálctica. En el caso de la subcuenca quebrada Honda no presenta actividad volcánica actual, por lo que son aguas de buena calidad y la salinidad que ganan es por el contacto y el tiempo de residencia del flujo.

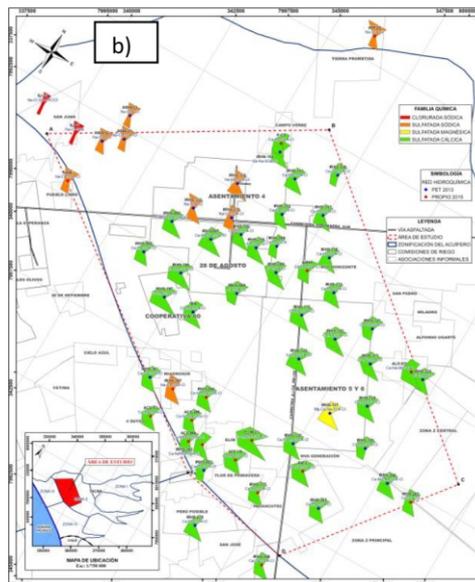


Figura 9b. Diagramas de Stiff (2013-2015).

DISCUSIÓN

Según los resultados de los análisis físicoquímicos, se generaron mapas de isoconductividad eléctrica, isocloruros y clasificación hidroquímica; además de diagramas de potabilidad y aptitud de riego. El análisis integrado de estos resultados permitió zonificar la calidad hidroquímica del agua subterránea, dando como resultado que las de mejor calidad tienden a mejorar hacia el noroeste y sureste debido a la recarga secundaria de filtraciones de lluvia en la quebrada Honda y Viñani. Carrillo-Rivera et al. (2002), analizaron el origen de las altas concentraciones de sales en las aguas subterráneas, indicando la existencia de flujos termales profundos, portadores de altas concentraciones de este elemento. Estos flujos se mezclan con aquellos superficiales y de menor concentración de sales en diferentes proporciones, dependiendo del régimen de explotación, condiciones hidrogeológicas locales, diseño y operación de los pozos de explotación. En la zona de estudio no se presenta actividad volcánica actual; por tanto, son aguas de buena calidad y la salinidad que adquieren se puede atribuir al contacto, tiempo de residencia y tránsito del flujo.

La evaluación del contorno freático se realizó teniendo en consideración los períodos críticos de estiaje de los ríos y las mínimas precipitaciones ocurridas en la parte alta de la cuenca del Caplina, que son las principales fuentes de recarga del acuífero.

La caracterización de los principales procesos hidrogeoquímicos y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en los acuíferos costeros se han llevado a cabo mediante el uso combinado de diferentes indicadores hidrogeoquímicos junto con datos de isótopos (Argamasilla et al., 2017). La disolución de calcita y las reacciones de intercambio catiónico son los principales procesos que afectan la evolución química del agua subterránea en una cuenca; esto ha proporcionado una base para una mejor comprensión de la configuración hidrogeológica en áreas de poca información (Ahmed & Clark, 2016).

De esta manera, en el acuífero La Yarada Media, la calidad del agua tiende a degradarse cuando circula hacia el centro del acuífero, debido al incremento de la actividad agrícola y operatividad de nuevos pozos en el sector de la quebrada Honda y Viñani; los cuales progresivamente están disminuyendo la recarga secundaria de agua de buena calidad, perjudicando a los Asentamientos 5 y 6, 28 de Agosto y Cooperativa 60, en razón a que estos únicamente podrían recibir la recarga principal del río Caplina donde existe actividad volcánica provocando que sean de menor calidad.

CONCLUSIONES

Con el análisis de los parámetros hidráulicos y análisis físicoquímico de los pozos ubicados en la zona de estudio se ha logrado caracterizar e interpretar la hidrodinámica e hidroquímica en el acuífero de La Yarada Media. Se obtuvo los parámetros hidráulicos de 42 pozos, donde la transmisividad fluctúa entre 602 y 4 235 m²/d al sureste del área evaluada, valores que constituyen transmisividades altas a muy altas: lo que permite indicar que el acuífero es libre y presenta buenas condiciones hidráulicas; a diferencia del sector ubicado al noroeste, en el cual la transmisividad tiene una fluctuación entre 53 y 494 m²/d, valores que son indicadores de transmisividades bajas y medias, relacionada con la unidad de tobas de la Formación Huaylillas y que simboliza la zona más afectada por el continuo descenso del nivel piezométrico. Así mismo, se determinó que la permeabilidad fluctúa entre 13 y 86 m/d al sureste del área evaluada, valores que significan permeabilidades altas; a diferencia del sector ubicado al noroeste donde la permeabilidad varía entre 1 y 9,8 m/d. La sobreexplotación del acuífero ha provocado que la transmisividad y permeabilidad con valores altos y medios cambien a medios y bajos, respectivamente, en el Asentamiento 4; el nivel estático se encontraba en los depósitos cuaternarios y en la actualidad ha descendido, encontrándose en contacto con la Formación Huaylillas.

Se obtuvo los parámetros fisicoquímicos de 58 pozos muestreados, mediante un análisis integrado que permitió la zonificación de la mejor calidad hidroquímica en el noroeste y sureste: atribuible a las recargas secundarias de la quebrada Honda y Viñani; y en menor calidad, al centro del área de estudio por recibir la recarga principal del río Caplina, el cual tiene incidencia de actividad volcánica.

La sobreexplotación del acuífero ha provocado que la potabilidad del agua considerada aceptable cambie a mediocre en estos tiempos, evidenciando el deterioro en la calidad del agua; lo cual podría considerarse directamente relacionado con el incremento de la actividad agrícola y operatividad de nuevos pozos en el sector de la quebrada Honda y Viñani, lo que progresivamente está disminuyendo las recargas secundarias de agua de buena calidad, perjudicando a los Asentamientos 5 y 6, 28 de Agosto y Cooperativa 60, pues como ya se señaló anteriormente, estos se verían limitados a recibir la recarga principal del río Caplina, donde existe actividad volcánica en la naciente de la cuenca: hecho que trae como resultado el deterioro de la calidad del agua; sin embargo, pese a todo, la clasificación de agua para riego se mantiene invariable con el pasar de los años.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a las autoridades del Gobierno Regional de Tacna, Proyecto Especial Tacna, Autoridad Nacional del Agua y Autoridad Local del Agua Caplina-Locumba, por brindar las facilidades logísticas y material bibliográfico utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, H., Benavente, C., Cotrina, G., Peña, F., & Alván, A. (2008). Estudio geológico del valle del río Caplina Tacna-Peru, base para el estudio hidrogeológico de compatibilización del reservorio acuífero de la Yarada Tacna-Perú. *Convenio PET-INGEMMET*, 82.

Acosta, H., Mamani, M., Alvan, A., & Rodríguez, J. (2012). Geología de los cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas: (hojas 37-u, 37-v y 37-x). *Boletín N°145 Serie A - Carta Geológica Nacional*, 87.

Ahmed, A., & Clark, I. (2016). Groundwater flow and geochemical evolution in the Central Flinders Ranges, South Australia. *Science of The Total Environment*, 572, 837-851. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.123

ANA. (2009). *Caracterización Hidrogeológica del acuífero del valle del Caplina La Yarada*. Lima: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

ANA. (2010). *Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero Caplina*. Lima: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

ANA. (2011). *Informe Técnico N° 03 Calidad de agua Cuenca Caplina Tacna*. Lima: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

Argamasilla, M., Barberá, J., & Andreo, B. (2017). Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain. *Science of The Total Environment*, 580, 50-68. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.173

Blasco, F., & Rubia, J. (1973). *Guía para clasificar las aguas en relación con su calidad para el riego*. Madrid: Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA).

Borchers, J., Carpenter, M., Grabert, V., Dalgish, B., & Cannon, D. (2015). *Land Subsidence from Groundwater Use in California*. Groundwater. California: California Water Foundation.

Carrillo-Rivera, J., Cardona, A., & Edmunds, W. (2002). Use of abstraction regime and

- knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), 24-47. doi:10.1016/S0022-1694(01)00566-2
- Cooper, H., & Jacob, C. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *American Geophysical Union Transaction*, 27(4), 526-534.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea* (Vol. 2). Barcelona, España: Omega.
- El Alfy, M., Aref, L., Fathy, A., & Abdulaziz, A.-B. (2017). Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques. *Environmental Pollution*, 229, 760-770. doi:10.1016/j.envpol.2017.05.052
- Flores, A., & Sempere, T. (2002). Avances sobre la historia geológica del valle de Tacna (CD_ROM). *Congreso Peruano de Geología. Trabajos científicos-Sociedad Geológica del Perú*, 11.
- Flores, A., Sempere, T., & Fornari, M. (2004). Síntesis actualizada de la estratigrafía del Cenozoico en el extremo sur del Perú. *Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos - Sociedad Geológica del Perú*, 444-447.
- INGEMMET y PET. (2008). *Estudio Hidrogeológico de Compatibilización del Reservorio Acuífero La Yarada*. Lima, Perú.
- INRENA. (2003). *Estudio Hidrogeológico Valle del Caplina*. Lima.
- Jaén, H., & Ortíz, G. (1963). Geología de los cuadrángulos de La Yarada y Tacna : (hojas 37-u y 37-v). *Boletín 6 - Comisión Carta Geológica Nacional; Boletín*, 1-2.
- Lapworth, D., Krishan, G., MacDonald, A., & Rao, M. (2017). Groundwater quality in the alluvial aquifer system of northwest India: New evidence of the extent of anthropogenic and geogenic contamination. *Science of The Total Environment*, 599-600, 1433-1444. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.04.223
- Liu, P., Hoth, N., Drebenstedt, C., Sun, Y., & Xu, Z. (2017). Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions — Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1-14. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.146
- PET. (2006). *La Yarada en Emergencia*. Tacna: Dirección de Estudios.
- PET. (2013). *Diagnóstico situacional del acuífero Caplina en el ámbito del sector la Yarada*. Tacna: Dirección de Estudios.
- Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Valle, A., Chávarri, E., Ascencios, D., & Mejía, J. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Ciencia y Tecnología del Agua*, 8(6), 77-99. doi:10.24850/j-tyca-2017-06-06
- Theis, C. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Transaction*, 519-524.
- Todd C., F. (16 de junio de 2015). New NASA data show how the world is running out of water. *The Washington Post*, págs. 1-2. Obtenido de <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/>

[wp/2015/06/16/new-nasa-studies-show-how-the-world-is-running-out-of-water/?utm_term=.b2c38780176d](https://www.nasa.gov/press/2015/06/16/new-nasa-studies-show-how-the-world-is-running-out-of-water/?utm_term=.b2c38780176d)

Valhondo, C., Martínez-Land, L., Carreras, J., Hidalgo, J., Tubau, I., De Pourcq, K., & Ayora, C. (2016). Tracer test modeling for characterizing heterogeneity and local scale residence time distribution in an artificial recharge site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 4209-4221.

Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y Acuíferos: Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Wen, Z., Zhan, H., Wang, Q., Liang, X., Ma, T., & Chen, C. (2017). Well hydraulics in pumping tests with exponentially decayed rates of abstraction in confined aquifers. *Journal of Hydrology*, 548, 40 - 45 . doi:10.1016/j.jhydrol.2017.02.046