

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA

“ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL
ACUIFERO VIZCACHAS CON INFORMACIÓN DE PRUEBAS DE
RECUPERACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA DURACIÓN DE LA PRUEBA DE
BOMBEO”

Presentado por:

ZONIA ELIDA VERGARAY ROLDÁN

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO AGRICOLA

Lima – Perú

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA

“ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL ACUIFERO
VIZCACHAS CON INFORMACIÓN DE PRUEBAS DE RECUPERACIÓN Y
EXTENSIÓN DE LA DURACIÓN DE LA PRUEBA DE BOMBEO”

Presentado por:

ZONIA ELIDA VERGARAY ROLDÁN

Tesis para optar el título de

INGENIERO AGRICOLA

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ing. SEBASTIAN SANTAYANA VELA
Presidente

Ing. JOSÉ ARAPA QUISPE
Miembro

Ing. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA
Miembro

Ing. GUILLERMO AGUILAR GIRALDO
Patrocinador

DEDICATORIA

A mis queridos padres Abdías y Zonia, que
estuvieron constantemente apoyándome,
alentándome y exigiéndome para poder culminar este
objetivo.

A mis entrañables hermanos Marjory y Abdías, por
su gran apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a Dios por haberme dado las fuerzas para poder seguir adelante y rodearme de personas que hacen posible mi desarrollo profesional.

A mis padres por su esfuerzo y exigencias durante mis estudios y después de ellos; y por estar siempre velando por mi bienestar.

Al Ing. Guillermo Aguilar, por haberme dado la oportunidad de aprender, y hacer posible la culminación de esta tesis.

A mis hermanos que me alentaron y apoyaron durante toda esta etapa.

A mis familiares, amigos e ingenieros que de una u otra manera me incitaron a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
CAPITULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 El abatimiento en los acuíferos	3
2.2 Pruebas hidrodinámicas	4
2.2.1 Prueba de bombeo	4
2.2.2 Prueba de slug	4
2.2.3 Prueba de recuperación	4
2.3 Métodos de análisis de datos de pruebas hidrodinámicas	5
2.3.1 Prueba de bombeo	5
2.3.2 Prueba slug	10
2.4 Métodos de análisis de datos de prueba de recuperación	12
2.5 Principio de superposición en pruebas de bombeo	13
2.6 Estimación de coeficientes de almacenamiento con información del periodo de bombeo y el periodo de recuperación	14
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 Equipos y materiales	17
3.1.1 Equipos	17
3.1.2 Materiales	17
3.2 Características generales del área de estudio	17
3.2.1 Acuífero Vizcachas	17
3.2.2 Ubicación	18
3.2.3 Vías de acceso	18
3.2.4 Climatología	18
3.2.5 Geología local	20

3.3	Características de los pozos	24
3.3.1	Ubicación de los pozos	24
3.3.2	Características constructivas y diseño de pozos	26
3.3.3	Perfiles estratigráficos de los pozos	27
3.4	Metodología	28
3.4.1	Interpretación de los datos de prueba de bombeo y recuperación	28
3.4.2	Aplicación del principio de superposición para incrementar el periodo de duración de la prueba de bombeo	29
3.4.3	Interpretación de los datos extendidos mediante el principio de superposición	29
3.4.4	Determinación de los coeficientes de almacenamiento a partir de las pruebas de recuperación	29
	CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1	El acuífero vizcachas y los pozos de prueba	31
4.2	Elaboración y análisis de la extensión del tiempo de bombeo	32
4.3	Propiedades hidrodinámicas a partir de datos de prueba de recuperación	37
	CAPITULO V: CONCLUSIONES	44
	CAPITULO VI: RECOMENDACIONES	45
	CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

ÍNDICE DE CUADROS

Nº	Descripción	Pág.
1	Ubicación de los pozos	24
2	Propiedades hidrodinámicas del acuífero	31
3	Intervalos de tiempo	32
4	Propiedades hidrodinámicas estimadas con información de prueba de bombeo y prueba de bombeo extendido	37
5	Abatimiento residual para aplicación de los métodos de Chenaf para el Pozo PV-1	38
6	Propiedades hidrodinámicas en periodo de bombeo y periodo de recuperación	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Nº	Descripción	Pág.
1	Ploteo semilogarítmico de tiempo-abatimiento teórico de acuíferos no consolidados	3
2	Abatimiento y abatimiento residual	5
3	Ubicación del acuífero Vizcachas	19
4	Geología y geomorfología	22
5	Ubicación de pozos y piezómetros	25
6	Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-1	33
7	Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-2	34
8	Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-3	34
9	Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-5	35
10	Abatimiento observado y estimado – Piezómetro TDV-1	35
11	Abatimiento observado y estimado - Piezómetro TDV-3	36
12	Estimación de la transmisividad y coeficiente de Almacenamiento por el método residual normalizado de Chenaf - Pozo PV-1	39
13	Estimación de la transmisividad y coeficiente de Almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Pozo PV-1	40
14	Estimación de la transmisividad y coeficiente de Almacenamiento por el Método residual normalizado de Chenaf - Piezómetro TDV-1	40
15	Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Piezómetro TDV-1	41
16	Estimación de la transmisividad y coeficiente de Almacenamiento por el método residual normalizado de Chenaf - Piezómetro TDV-3	41
17	Estimación de la transmisividad y coeficiente de Almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Piezómetro TDV-3	42

ÍNDICE DE ANEXOS

- A Perfil litológico
- B Prueba del acuífero
- C Prueba hidrodinámicas con datos iniciales
- D Extensión del tiempo de bombeo (método de Van Der Kamp)
- E Prueba hidrodinámicas con datos extendidos
- F Coeficientes de almacenamiento (método de Chenaf)

RESUMEN

El presente trabajo contempla la estimación de las propiedades hidrodinámicas del acuífero Vizcachas, mediante el análisis de la información de las pruebas de bombeo y recuperación, así como la modificación de dicha información acorde con los requerimientos de información de nuevas metodologías propuestas por Van Der Kamp y Chenaf

Las propiedades hidrodinámicas del acuífero fueron determinadas con información recopilada en campo sin modificación alguna, los métodos utilizados para la interpretación de dicha información fueron Theis para acuíferos confinados y Neuman para acuíferos libres. Posteriormente, la información inicial fue modificada acorde con las exigencias del método de superposición propuesto por Van Der Kamp y el uso de la información de pruebas de recuperación para la determinación del coeficiente de almacenamiento.

La transmisividad estimada mediante el método de Theis y Neuman aplicada a la información de los pozos PV-1, PV-2, PV-3, PV5 y piezómetros TDV-1 y TDV-3 fueron 124 m²/d, 805 m²/d, 507 m²/d, 120 m²/d, 171 m²/d, 114 m²/d respectivamente, los coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico obtenidos fueron 3.9×10^{-4} , 6.1×10^{-2} , 1.8×10^{-2} , 5.02×10^{-2} , 1.54×10^{-3} y 8×10^{-5} , respectivamente.

Las transmisividades estimadas mediante el método de superposición de Van Der Kamp, fueron 123 m²/d, 785 m²/d, 444 m²/d, 117 m²/d, 157 m²/d y 96.9 m²/d para los pozos y piezómetros antes mencionados, así como los coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico fueron 4.9×10^{-4} , 6.1×10^{-2} , 1.8×10^{-2} , 5.3×10^{-2} , 1.67×10^{-3} y 1×10^{-4} , respectivamente.

Del análisis comparativo entre ambos resultados se observa que los valores de transmisividad disminuyen con el método de superposición de Van Der Kamp; sin embargo, el coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados y rendimiento específico en acuíferos libres aumentan ligeramente, considerándose similares.

Por otro lado, se estimó el coeficiente de almacenamiento del acuífero confinado por el método de Jacob, con datos sin modificación. Posteriormente, la información inicial fue modificada de acuerdo a los requerimientos del método abatimiento residual normalizado de Chenaf y el método de recuperación de Chenaf, empleando datos de prueba de recuperación.

Los coeficientes de almacenamiento estimados por el método de Jacob fueron 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} , para el pozo PV-1 y piezómetros TDV-1 y TDV-3, respectivamente.

Mediante el método abatimiento residual normalizado de Chenaf, los coeficientes de almacenamiento fueron 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} , y los coeficientes de almacenamiento residual fueron 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} , para el pozo y piezómetros, anteriormente mencionados.

Los coeficientes de almacenamiento residual estimado por el método de recuperación de Chenaf fueron 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} , para los pozos previamente señalados.

Comparando los tres métodos se observa que los valores de los coeficientes de almacenamiento estimados son similares.

ABSTRACT

This paper includes the determination of the hydrodynamic properties of the Vizcachas aquifer by analyzing information from pumping and recovery tests, and modification of such information in accordance with the requirements of new proposed methodologies by Van Der Kamp and Chenaf.

The hydrodynamic properties of the aquifer were determined with data collected in the field without any modifications; the used methods for the interpretation of this information were Theis for confined aquifers and Neuman for unconfined aquifers. Subsequently, the initial information has been modified according to the requirements of the superposition method proposed by Van Der Kamp and using recovery test's data for determining the storage coefficient.

The transmissivity estimated by the Theis and Neuman methods for wells PV-1, PV-2, PV-3, PV-5 and piezometers TDV-1 and TDV-3 were 124 m²/d, 805 m²/d, 507 m²/d, 120 m²/d, 171 m²/d, 114 m²/d respectively, the storage coefficients and specific yield were 3.9x10⁻⁴, 6.1x10⁻², 1.8x10⁻², 5.02x10⁻², 1.54x10⁻³ and 8x10⁻⁵, respectively.

The transmissivity estimated by the method of superposition of Van Der Kamp, were 123 m²/d, 785 m²/d, 444 m²/d, 117 m²/d, 157 m²/d y 96.9 m²/d for wells and piezometers mentioned above, the storage coefficient and specific yield were 4.9x10⁻⁴, 6.1x10⁻², 1.8x10⁻², 5.3x10⁻², 1.67x10⁻³ and 1x10⁻⁴ respectively.

The comparative analysis between the results show that the values of transmissivity decreases with Van Der Kamp method; however, the storage coefficient in confined aquifers and specific yield in unconfined aquifers increase slightly, so is considering as similar result.

In the other hand, the storage coefficient of the aquifer confined was estimated by the Jacob method without data modification. Subsequently, the initial information was modified according

to the requirements of the normalized residual drawdown method by Chenaf and Chenaf recovery method using test data recovery.

Storage coefficients estimated by Jacob method were 3×10^{-4} , 2×10^{-3} and 5×10^{-3} for the PV-1 well and piezometers TDV-1 and TDV-3, respectively.

By Chenaf normalized residual drawdown method, storage coefficients were 3×10^{-4} , 2×10^{-3} and 5×10^{-3} , and storage coefficients were 3×10^{-4} , 2×10^{-3} and 5×10^{-3} for the well and piezometers respectively.

Storage residual coefficients estimated by Chenaf recovery method were 3×10^{-4} , 2×10^{-3} and 5×10^{-3} , for the previously mentioned wells and piezometers.

Comparing the results of the three methods, the estimated values of the storage coefficient are similar.

I. INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

El proceso de cuantificación de las reservas de agua en los acuíferos, requiere del conocimiento de las propiedades del medio poroso o fracturado, dependiendo si el acuífero se encuentra en formaciones no consolidadas o consolidadas. Para cuantificarlas generalmente se recurre a pruebas hidrodinámicas, las cuales requieren se cumplan ciertos procedimientos elementales, así como de equipos de bombeo con características especiales, en tal virtud, encarecen considerablemente el desarrollo de los estudios hidrogeológicos.

Con el correr de los años se han diseñado diversos métodos de pruebas hidrodinámicas, el más común denominado “prueba de bombeo”, seguida por otros como la prueba “Slug”, y recientemente la prueba denominada “tomografía hidráulica” a través de la cual se colecta y se analiza información de manera distinta a las anteriores, y permite una mayor resolución y por consiguiente permite una mejor caracterización del medio poroso o fracturado.

Los métodos para estimar el coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados y rendimiento específico en acuíferos libres son limitados, se restringen a la interpretación de los datos de las pruebas de bombeo; en caso en que se usará datos de la prueba de recuperación para estimar el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico solucionaría el problema de costos, haciendo más factible los estudios hidrogeológicos.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general

- a) Estimar las propiedades hidrodinámicas del acuífero Vizcachas con información de pruebas de recuperación.

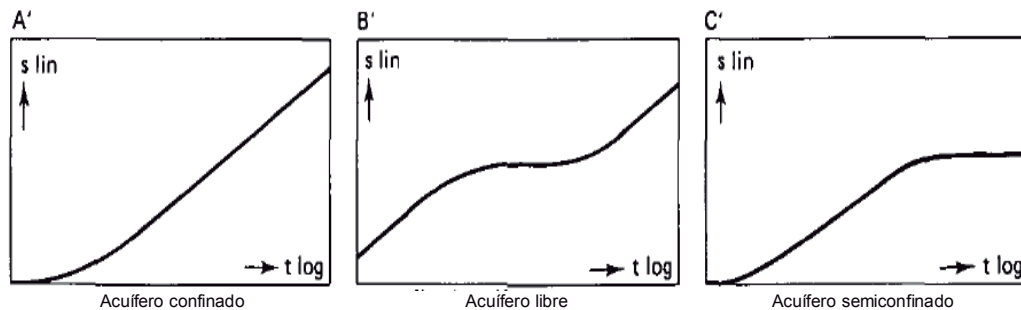
Objetivos específicos

- a) Estimar y comparar las propiedades hidrodinámicas del acuífero Vizcachas determinados con datos de pruebas de bombeo y duración extendida de prueba de bombeo en los pozos PV-1, PV-2, PV-3, PV-5 y piezómetro TDV-1.
- b) Estimar el coeficiente de almacenamiento con datos de pruebas de recuperación en los piezómetros TDV-1, TDV-3 y el pozo PV-1.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EL ABATIMIENTO EN LOS ACUIFEROS

El comportamiento del abatimiento con el tiempo en pozos ubicados en acuíferos confinados, libres y semiconfinados son como los mostrados en la Figura Nº 1. En la parte A' se observa que el abatimiento en el periodo inicial no es lineal, sin embargo con el transcurrir del tiempo se vuelve lineal que caracteriza el comportamiento del abatimiento versus el tiempo de un acuífero confinado; en la parte B', se muestra la curva de abatimiento versus el tiempo de un acuífero libre, homogéneo e isotrópico, en la cual se observa el abatimiento para un periodo inicial, intermedio de estabilización y posteriormente de descenso debido al drenaje del acuífero. En la parte C', se muestra la curva de abatimiento-tiempo para un acuífero semiconfinado con periodo inicial de abatimiento continuo hasta lograr su estabilización y aporte del acuitardo hacia dicho acuífero. (Kruseman,1991)



FUENTE: Kruseman (1991)

Figura Nº 1: Ploteo semilogarítmico de tiempo-abatimiento teórico de acuíferos no consolidados.

2.2 PRUEBAS HIDRODINÁMICAS

2.2.1 PRUEBA DE BOMBEO

Bear (1979) menciona que una prueba de bombeo es un campo experimental controlado para determinar los parámetros básicos del acuífero. Durante una prueba de bombeo, el pozo es bombeado a caudal constante, donde se observa la variación del abatimiento con respecto al tiempo en el pozo y/o en uno o más puntos de observación. La información observada del abatimiento $s=s(r,t)$ y el caudal Q es reemplazada en la fórmula de abatimiento correspondiente al tipo de acuífero, determinando los parámetros que aparecen en cada fórmula.

Las fórmulas se describen en métodos de análisis de las pruebas hidrodinámicas.

2.2.2 PRUEBA DE SLUG

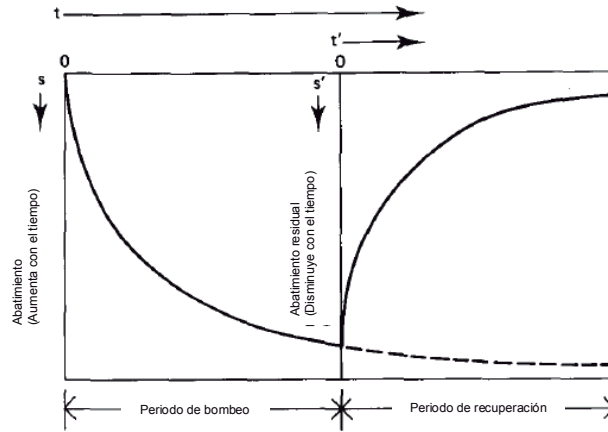
En una prueba de Slug, un pequeño volumen de agua es repentinamente extraído de un pozo, para luego medir la velocidad de recuperación del nivel de agua. Alternativamente, un pequeño volumen de agua es vertido dentro del pozo; la velocidad de ascenso y posteriormente la velocidad del descenso del nivel de agua es medida. Con estas medidas la transmisividad y la conductividad hidráulica del acuífero pueden ser determinadas. (Kruseman, 1991).

2.2.3 PRUEBA DE RECUPERACIÓN

Acorde con Kruseman (1991), el análisis de la prueba de recuperación está basada en el principio de superposición, el cual asume que luego de apagada la bomba, el pozo continúa bombeando a una descarga igual que la anterior, y con una recarga imaginaria igual a la descarga, e inyectada hacia el pozo. La recarga y la descarga se cancelan así mismas, resultando un pozo ideal requerido para el periodo de recuperación.

El ascenso del nivel de agua después de la etapa de descenso de la prueba de bombeo es conocida como abatimiento residual (s'), expresado como la diferencia entre el

nivel de agua original antes de empezar el bombeo y el nivel de agua medido en un tiempo (t') después del cese del bombeo (ver la Figura Nº 2).



FUENTE: Kruseman (1991)

Figura Nº 2: Abatimiento y abatimiento residual

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS DE PRUEBAS HIDRODINÁMICAS

2.3.1 PRUEBA DE BOMBEO

a. Método de Theis, acuífero confinado

Theis desarrolló una fórmula para flujo no permanente que introduce el factor tiempo y el almacenamiento. El notó que cuando se bombea un pozo a caudal constante en un acuífero confinado, la influencia de la descarga se prolonga hacia afuera con el tiempo. La velocidad de pérdida de carga, multiplicada por el almacenamiento y sumada el área de influencia, es igual a la descarga. La ecuación en régimen no permanente de Theis, fue derivado de la analogía entre el flujo de agua subterránea y la conducción de calor.(Kruseman, 1991).

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} \int_{\mu}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi KD} W(\mu) \quad (5.1)$$

Donde: s = Abatimiento en un piezómetro a una distancia r del pozo (m).
 Q = Descarga constante del pozo (m^3/d).
 KD = Transmisividad del acuífero (m^2/d).

$$\mu = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad S = \frac{4KDt\mu}{r^2} \quad (5.2)$$

Donde: S = Coeficiente de almacenamiento del acuífero.
 t = Tiempo desde el inicio del bombeo (d).

$$W(\mu) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

b. Método de Jacob para acuífero confinado

El método de Jacob está basado en la fórmula de Theis (ecuación 5.1). Cuando disminuye u , el tiempo de bombeo (t) se incrementa y la distancia del pozo (r) disminuye. En consecuencia, para los abatimientos observados cerca del pozo después de un tiempo de bombeo suficientemente largo, el término más lejano de $\ln u$ en la serie se hace pequeño y puede ser despreciado (Kruseman, 1991). Entonces para valores pequeños de u ($u < 0.01$), el abatimiento puede ser aproximado por:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4KDt} \right) \quad (5.3)$$

Después de cambiar en logaritmos la ecuación se reduce a:

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi KD} \log \frac{2.25KDt}{r^2 S} \quad (5.4)$$

Donde: s = Abatimiento (m).
 S = Coeficiente de almacenamiento del acuífero.
 KD = Transmisividad (m^2/d).

c. Método de Walton para acuífero semiconfinado

Con almacenamiento despreciable del acuitardo, el abatimiento del nivel de agua en un acuífero semiconfinado es descrito por la siguiente expresión:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u, \frac{r}{L}) \quad (5.5)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad (5.6)$$

Donde: L = Factor de infiltración (m).

r = Distancia del piezómetro al pozo (m).

d. Método punto de inflexión de Hantush para acuífero semiconfinado

Está basado en el método de Walton, usando al menos dos piezómetros para determinar la inflexión del abatimiento en el punto P. La curva de abatimiento (s) versus tiempo (t) en papel semi logarítmico tiene una inflexión en el punto P donde se mantiene la siguiente relación. (Kruseman, 1991).

$$s_p = 0.5s_m = \frac{Q}{4\pi KD} K_0(\frac{r}{L}) \quad (5.7)$$

Donde: K_0 = Función de Bessel modificado de segundo tipo y de orden cero.

s_m = Abatimiento del nivel de agua para flujo en régimen estacionario (m).

e. Método ajuste de curva de Hantush para acuífero semiconfinado

Hantush presentó un método de análisis, que tiene en cuenta los cambios de almacenamiento en el acuitardo. Para tiempos cortos de bombeo, Hantush da la siguiente ecuación de abatimiento para flujo no permanente.

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u, \beta) \quad (5.8)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad (5.9)$$

$$\beta = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{K'/D' S'}{KD * S}} \quad (5.10)$$

Donde: S' = Almacenamiento del acuitardo
 K' = Conductividad hidráulica del acuitardo (m/d).
 D' = Espesor del acuitardo (m).

f. Método de Neuman-Witherspoon para acuífero semiconfinado

Neuman and Witherspoon desarrollaron el método para determinar las características hidráulicas de los acuitardos en periodos cortos de bombeo cuando el abatimiento en el acuífero libre es despreciable. El método está basado en la teoría de acuíferos ligeramente permeables, donde la función del abatimiento en el acuífero bombeado está dado por la ecuación de Theis, ecuación (5.1), y el abatimiento en el acuitardo de muy baja permeabilidad está dado por: (Kruseman, 1991).

$$s_c = \frac{Q}{4\pi KD} W(u, u_c) \quad (5.11)$$

$$u_c = \frac{z^2 S'}{4K'D't} \quad (5.12)$$

Donde: z = Distancia vertical de límite de acuífero-acuitardo para piezómetro en el acuitardo (m).
 s_c = Abatimiento en el acuitardo (m).
 $K'D'$ = Transmisividad en el acuitardo (m²/d).

En el mismo lapso de tiempo y misma distancia radial, la relación del abatimiento en el acuitado y el abatimiento en el acuífero bombeado es:

$$\frac{s_c}{s} = \frac{W(u, u_c)}{W(u)}$$

g. Método curva ajustada de Neuman para acuífero libre

Neuman trata los acuíferos como un sistema comprensible y nivel freático como límite variable. Reconoce la existencia de componentes de flujo vertical y la solución general del abatimiento está en función de la distancia del pozo (r) y el aumento de la carga. Matemáticamente, Neuman simuló la respuesta retardada del nivel freático teniendo como constantes el coeficiente de almacenamiento (S_A) y el rendimiento específico (S_y). (Kruseman, 1991).

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_A, u_B, \beta) \quad (5.13)$$

Bajo la condición de tiempo inicial, esta ecuación describe el primer segmento de la curva abatimiento-tiempo y se reduce a:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_A, \beta) \quad (5.14)$$

$$u_A = \frac{r^2 S_A}{4KDt}$$

Donde: S_A = Coeficiente de almacenamiento

Bajo la condición de tiempo final, la ecuación (5.13) describe el tercer segmento de curva abatimiento-tiempo y se reduce a:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_B, \beta) \quad (5.15)$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4KDt}$$

Donde: S_y = Rendimiento específico

El parámetro de Neuman β es definido como:

$$\beta = \frac{r^2 K_v}{D^2 K_h} \quad (5.16)$$

Donde: K_v = Conductividad hidráulica para flujo vertical (m/d).

K_h = Conductividad hidráulica para flujo horizontal (m/d).

Para acuíferos isotrópicos $K_v = K_h$ y $\beta = r^2/D^2$.

2.3.2 PRUEBA SLUG

a. Método de Cooper para acuífero confinado

Un volumen de agua (V) instantáneamente retirado o inyectado en un pozo de diámetro finito ($2r_c$) causará un cambio instantáneo de la carga hidráulica en el pozo. (Kruseman, 1991).

$$h_o = \frac{V}{\pi r_c^2} \quad (5.17)$$

Después, la carga retornará gradualmente a su carga inicial. La siguiente solución de aumento y caída en la carga en el pozo con respecto al tiempo fue derivado por Cooper, para pozos con diámetro y longitud del pozo totalmente ubicado en un acuífero confinado.

$$h_1 = h_o F(\alpha, \beta) \quad o \quad \frac{h_1}{h_o} = F(\alpha, \beta) \quad (5.18)$$

$$\alpha = \frac{r_{ew}^2 S}{r_c^2} \quad (5.19)$$

$$\beta = \frac{KDt}{r_c^2} \quad (5.20)$$

- Donde: h_o = Cambio instantáneo de carga en el pozo en $t_o = 0$.
 h_1 = Carga en el pozo en tiempo $t > t_o$.
 r_c = Radio del pozo parte no ranurada donde la carga está variando.
 r_{ew} = Radio efectivo del pozo de la parte ranurada.

b. Método de Uffink para pruebas de oscilación para acuíferos confinados

En una prueba de oscilación, el pozo es sellado con una máquina envolvente inflable, a través del cual se inserta una manguera de aire a alta presión, de esta manera presuriza el agua a través de las rejillas dentro del acuífero y bajando la carga en el pozo. Después de cierto tiempo, cuando la carga ha sido bajada, la presión es repentinamente liberada. La reacción de la carga en el pozo para este repentino cambio puede ser descrito como una oscilación armónica exponencialmente amortiguada, el cual puede ser medido preferiblemente con un *data logger* automático. (Kruseman, 1991).

Esta reacción de oscilación está dada por Van der Kamp y Uffink (citados por Kruseman, 1991) como:

$$h_t = h_o e^{-\gamma t} \cos \omega t$$

- Donde: h_o = Cambio instantáneo en la carga hidráulica en un tiempo $t_o = 0$.
 h_t = Carga en el pozo en un tiempo t ($t < t_o$).
 γ = Constante de amortiguamiento de oscilación de la carga (tiempo⁻¹)
 ω = Frecuencia angular de oscilación de la carga (tiempo⁻¹)

2.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS DE PRUEBA DE RECUPERACIÓN

a. Método de recuperación de Theis para acuíferos confinados

El abatimiento residual después de una prueba de bombeo con una descarga constante es: (Kruseman, 1991).

$$s' = \frac{Q}{4\pi KD} \{W(u) - W(u')\} \quad (5.21)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad u' = \frac{r^2 S'}{4KDt'}$$

Cuando u y u' son suficientemente pequeños ($u < 0.01$), la ecuación (5.21) puede ser aproximada por:

$$s' = \frac{Q}{4\pi KD} \left(\ln \frac{4KDt}{r^2 S} - \ln \left(\frac{4KDt'}{r^2 S'} \right) \right) \quad (5.22)$$

- Donde:
- s' = Abatimiento residual (m).
 - r = Distancia del pozo al piezómetro (m).
 - KD = Transmisividad del acuífero (m²/d).
 - S' = Coeficiente de almacenamiento durante la recuperación.
 - S = Coeficiente de almacenamiento durante el bombeo.
 - t = Tiempo desde el inicio del bombeo (d).
 - t' = Tiempo desde que termino el bombeo (d).
 - Q = Caudal de descarga (m³/d).

b. Método de recuperación de Theis para acuíferos libres

En un acuífero libre, el retardo en la variación del nivel freático como reacción al bombeo es totalmente reversible de acuerdo a la teoría de Neuman de reacción retardada del nivel freático, porque el efecto de hysteresis no influye en esta teoría. Neuman mostró que el método de recuperación de Theis es aplicable a acuíferos libres, pero solo los últimos datos de recuperación. En el periodo final, los efectos de coeficiente de

almacenamiento se han disipado. Los datos de abatimiento residual se colocarán sobre una línea recta en papel semi-logarítmico s' vs t/t' usado en el método de recuperación de Theis (Kruseman, 1991). Ecuación (5.22).

2.5 PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN PRUEBAS DE BOMBEO

El principio de superposición se puede aplicar en cualquier problema de hidráulica subterránea siendo lineal e invariante en el tiempo. (Bear, 1979). La condición de invariable en el tiempo significa que la permeabilidad y el almacenamiento específico deben ser constante, y no debe variar con el tiempo en la geometría del sistema. (Van der Kamp, 1989).

Suponiendo que un pozo se bombea a caudal constante Q_0 , empezando cuando el tiempo $t = 0$; se asume que al variar el caudal de bombeo a Q_1 en un instante $t=t_1$, el pozo sigue bombeando a caudal Q_0 en el mismo instante $t=t_1$, por lo que agrega Q_1-Q_0 al caudal de bombeo. De forma similar si en tiempo $t=t_2$ el caudal de bombeo es cambiada a Q_2 el cambio puede ser tratado como un bombeo adicional a un caudal Q_2-Q_1 . Note que Q_1-Q_0 y Q_2-Q_1 , etc. puede ser negativo. Para la aplicación del principio de superposición, el abatimiento estimado para caudal escalonado de bombeo es:

$$s_0(t) = s(t) - \frac{Q_1 - Q_0}{Q_0} s_0(t - t_1) + \frac{Q_2 - Q_1}{Q_0} s_0(t - t_2) + \dots \quad (5.23)$$

- Donde: $S_0(t)$ = Abatimiento estimado para el bombeo a caudal constante Q_0 iniciando en tiempo $t=0$.
- $s(t)$ = Abatimiento observado durante la fase de recuperación y la fase de bombeo.
- t = Tiempo desde el inicio de bombeo.
- $Q_1, Q_2, \text{etc.}$ = Caudal constante de bombeo en los intervalos de tiempo de t_1 a t_2 , t_2 a t_3 , etc.

Reduciendo el caudal de bombeo a cero, puede ser tratado como un cambio de caudal, es decir $Q_1=0$; reemplazando en la ecuación (5.23) se obtiene:

$$s_o = s(t) + s_o(t - t_1) \quad (5.24)$$

- Donde: t_1 = Tiempo de bombeo.
 $s(t)$ = Abatimiento observado durante el periodo de bombeo y periodo de recuperación.
 s_o = Abatimiento estimado para el bombeo.

2.6 ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO CON INFORMACIÓN DEL PERIODO DE BOMBEO Y EL PERIODO DE RECUPERACIÓN

Chenaf (2002) dice que la determinación del coeficiente de almacenamiento, usando los datos de recuperación, no han recibido mucha atención desde el trabajo de Theis, pocas publicaciones han propuesto un método para evaluar este parámetro usando el abatimiento residual. A la vez, propone dos nuevos métodos para obtener la transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y coeficiente de almacenamiento en el periodo de recuperación (S') usando datos de abatimiento residual en acuíferos confinados.

a. Método de abatimiento residual normalizado: s'/s'_{ini} vs. t/t' en gráfico semi-logarítmico

Asume el abatimiento residual $s'(r,t)$ medido en algún punto de observación en el tiempo (t'). Cuando finaliza el bombeo en tiempo $t=t_A$ ($t'=0$), el abatimiento s_A representa el valor máximo para dicho bombeo y del abatimiento residual en el mismo tiempo. Esto corresponde al abatimiento residual inicial s'_{ini} producido en el tiempo $t'=0$.

$$s_A(t = t_A) = s'_{ini}(t' = 0) \quad (5.25)$$

Reemplazando $t=t_A$ en la ecuación (5.4) de Cooper-Jacob se obtiene:

$$s_A(r, t_A) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt_A}{r^2S}\right) \quad (5.26)$$

Desarrollando la ecuación (5.22) y dividiendo por la ecuación (5.26) resulta:

$$\frac{s'(t')}{s'_{ini}(r, t_A)} = \frac{\log\left(\frac{S't'}{Sr}\right)}{\log\left(\frac{2.25t_A T}{r^2 S}\right)} \quad (5.27)$$

- Donde: s' = Abatimiento residual (m).
 t' = Tiempo desde el inicio de la prueba de recuperación (min).
 t_A = Tiempo de la prueba de bombeo (min).
 s'_{ini} = Abatimiento al iniciar la prueba de recuperación $t'=0$ (m).
 T = Transmisividad (m^2/d).
 S = Coeficiente de almacenamiento.

En el gráfico semi-logarítmico $\frac{s'(t')}{s'_{ini}}$ versus $\left(\frac{t'}{t_A}\right)$ se obtiene la diferencia de abatimiento residual respecto al abatimiento residual en $t'=0$.

$$\Delta\left(\frac{s'(t')}{s'_{ini}}\right) = \frac{1}{\log\left(\frac{2.25t_A T}{r^2 S}\right)} \quad (5.28)$$

b. Método de recuperación: ($s'_{ini}-s'$) vs. t/t' en gráfico semi-logarítmico

Asume el abatimiento residual $s'(r,t)$ medido en algún pozo de observación en un tiempo t' . Cuando la bomba se detiene en tiempo ($t=t_A$), el abatimiento (s_A) representa el valor máximo del abatimiento de bombeo y residual al mismo tiempo. Esto corresponde al abatimiento residual inicial (s'_{ini}) producido en el tiempo $t'=0$. Este método tiene la ventaja de determinar el coeficiente de almacenamiento (S) sin ser acoplada al coeficiente de almacenamiento residual (S'). Del desarrollo de la ecuación (5.22), restando la ecuación (5.26) se obtiene:

$$s'_{ini} - s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{S'r^2}{2.25Tt_A} \frac{t'}{t}\right) \quad (5.29)$$

Al graficar la función $(s'_{ini}-s')$ vs (t/t') en un gráfico semi-logarítmico, se puede estimar la transmisividad $T=T'$, tal como se muestra:

$$T' = T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta(s'_{ini} - s')/\text{ciclo logarítmico}} \quad (5.30)$$

El coeficiente de almacenamiento residual (S') de la intercepción $(t/t')_o$:

$$S' = \frac{2.25Tt_A}{r^2 \left(\frac{t}{t'}\right)_o} \quad (5.31)$$

Las nuevas ecuaciones propuestas permiten la determinación de los coeficientes de almacenamiento de bombeo y recuperación (S y S' respectivamente) de los datos de recuperación sin ninguna asunción adicional, más allá de Theis y Cooper-Jacob.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 EQUIPOS

GPS

Sonda eléctrica para medición de niveles de agua de 80 metros

Wincha de 5 metros

Computadora e impresora

Software Aquifer Test, Strater, Microsoft Excel. Arc Gis

3.1.2 MATERIALES

Carta nacional 1:100 000 - cuadrícula 34V

Plano geológico Huaitire – cuadrícula 34V

Fichas con información de pruebas de bombeo

3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1 ACUÍFERO VIZCACHAS

El agua almacenada en el acuífero Vizcachas proviene de un conjunto de acuíferos complejos que se comportan como libres y confinados. (Barrera, 1994)

Actualmente, la municipalidad provincial de Tacna manifiesta que“la explotación del acuífero Vizcachas se realiza a través de los pozos VW-1, VW-2, VW-3 y VW-4 perteneciente a la compañía minera Southern Peru Copper Corporation, ocasionando la desaparición de los manantiales y otros afloramientos que abastecían de agua a la laguna de Vizcachas actualmente seca”.

3.2.2 UBICACIÓN

La zona de la Laguna Vizcachas se ubica políticamente en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y departamento de Moquegua (Figura № 3). Geográficamente, se encuentra entre las coordenadas UTM E364000m, N8136000m y E376000 m, N8124000m. A una altitud media de 4750 m.s.n.m.

3.2.3 VÍAS DE ACCESO

La zona del acuífero Vizcachas se encuentra interconectada con la ciudad de Tacna por medio de dos vías terrestres.

- Tacna – Aricota – Candarave – Vizcachas.
- Tacna – Tarata – Candarave – Santa Rosa – Vizcachas.

Estas vías continúan hacia Puno y los países vecinos de Chile y Bolivia. Además, existe comunicación con las principales ciudades del Perú y el exterior a través del aeropuerto de Tacna. Internamente, existen caminos carrozables que conducen a las estaciones de bombeo y existe acceso a la totalidad del área, con vehículos de tracción simple.

3.2.4 CLIMATOLOGÍA

a. Precipitación

Según el estudio realizado por Barrera (1994), determinó que la variación de precipitación oscila entre 1.08 mm y 124.30 mm, siendo el mínimo en julio y el máximo en enero. La precipitación total anual media es de 459.0 mm.

b. Temperatura

De acuerdo a la estación Suches, entre 1965-1990, se registró la variación de temperatura promedio anual entre 0.8 °C a 6.2 °C, siendo la mínima en julio y la máxima entre febrero y marzo.

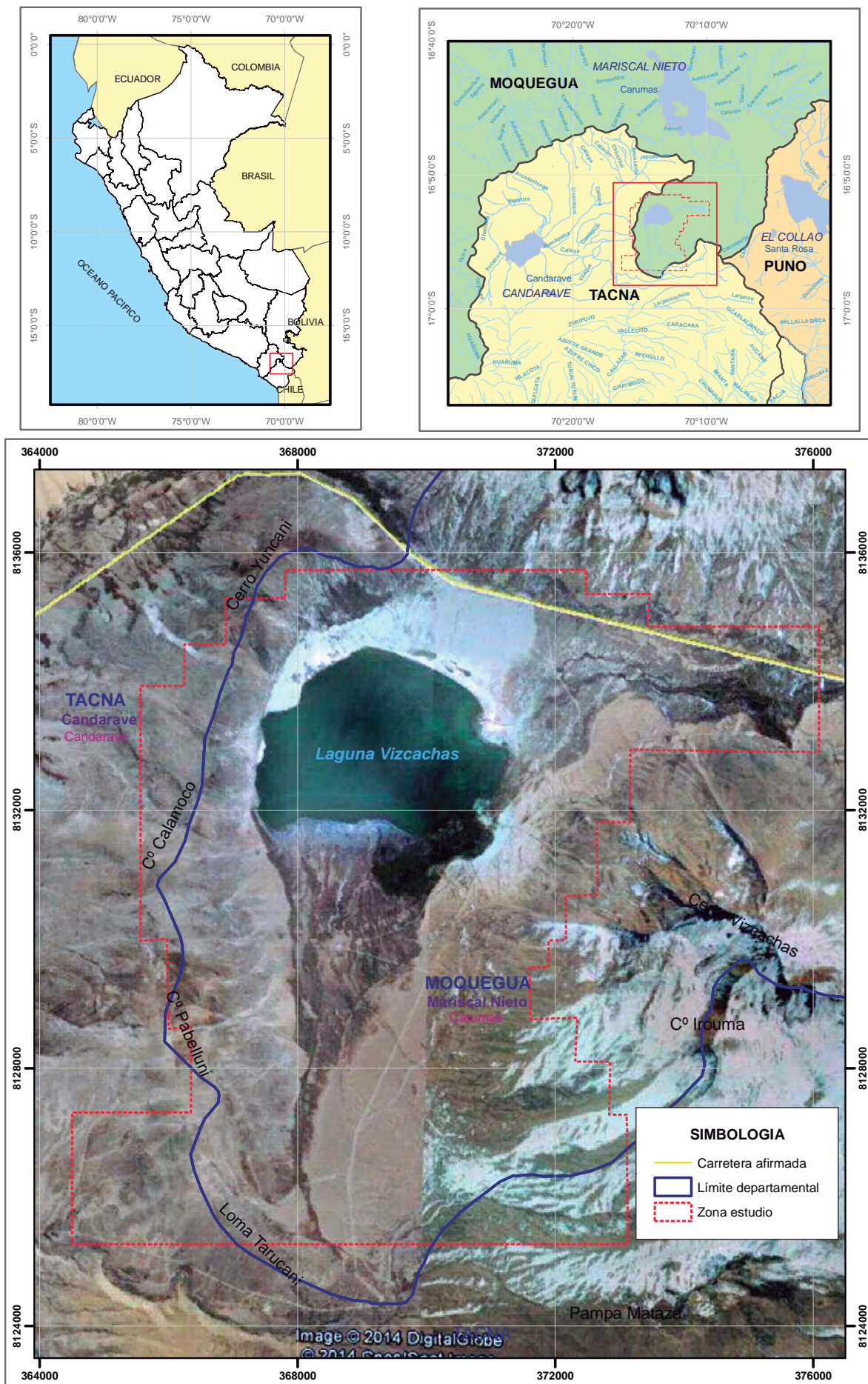


Figura N° 3: Ubicación del acuífero Vizcachas
 FUENTE: Barrera (1994); Carta Nacional 1:100 000 Cuadrícula 34V - Huatire, Google Earth

c. Evaporación

La estación Suches registró, entre 1965-1990, una evaporación promedio anual de 147.79 mm.

d. Humedad relativa

La humedad relativa promedio registrada en la estación Suches fue 70.68%, con un mínimo de 60.80% y un máximo de 82.20%.

e. Velocidad del viento

Para el periodo de 1980-1983, la velocidad del viento varió entre 12.61 km/h y 12.26 km/hr, en marzo y setiembre, respectivamente.

3.2.5 GEOLOGÍA LOCAL

a. Geología

Las formaciones geológicas Capillune, Barroso y los depósitos cuaternarios recientes forman el reservorio del acuífero Vizcachas.

Los estratos de la formación Capillune (Tp-ca) se encuentran en posición ligeramente inclinada, con buzamiento suave hacia el sur del cuadrángulo de Huitire. La disposición estructural de esta formación influye marcadamente en su función como acuífero, ya que permite tener recarga en zonas elevadas y puede transportar el agua a favor del buzamiento, a zonas de entrega más bajas o zonas de acumulación carentes de drenaje natural. El sistema de recarga está dada por la infiltración del agua proveniente de la lluvia a través de los planos de estratificación de los flujos volcánicos y de las numerosas fracturas de contracción que se han desarrollado por enfriamiento, que se corrobora con la presencia de manantiales.

Las rocas de formación barroso (Tq-vba) están constituidas por derrames, brechas y tufos de naturaleza traquítica y riolítica. Esta roca por su amplia distribución regional y por encontrarse a grandes alturas, constituye el sistema principal de captación de aguas

superficiales y de recarga para las capas acuíferas de la formación capillane subyacente, a través de las fracturas, fisuras y contactos verticales inherentes al desarrollo de los conos volcánicos, a su vez esta roca constituye el límite de la geometría del acuífero Vizcachas.

Los depósitos de arenas, grabas y arcillas, se encuentran depositadas en las faldas medias a inferiores de los conos volcánicos conformando los depósitos fluvio-glaciario (Qr-fg). Los sedimentos glaciares finos en los que predominan arcillas, cubren la mayoría de las planicies intermontañas y su deposición se efectuó en las lagunas que se formaron con aguas del deshielo glaciario, estos materiales facilitan la infiltración del agua proveniente de precipitación con una infiltración básica. Las zonas planas de la cuenca están cubiertas en un 60% por depósitos, lo que a su vez tiene un espesor promedio de 110 m.

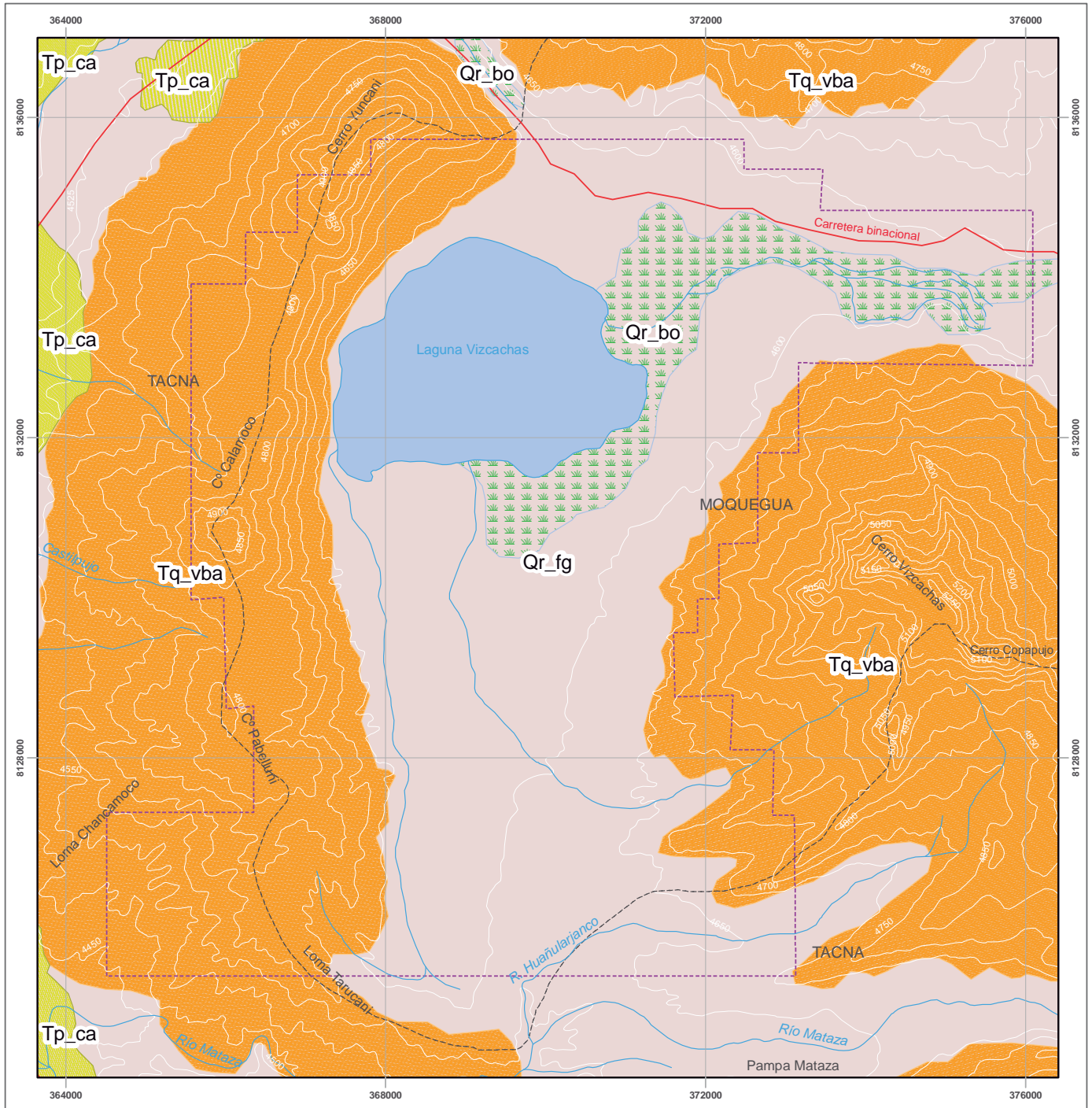
Los bofedales (Qr-bo) son pequeños depósitos de arenas arcillosas con material vegetal descompuesto en zonas pantanosas donde crecen variedades de pastos naturales que son la base de la alimentación de los camélidos andinos.

b. Geomorfología

Se aprecia sectores de suaves pendientes y superficies onduladas, que contrastan con otros agrestes caracterizados por ofrecer cerros de escarpados perfiles con grandes elevaciones.

Estos sectores altos que ofrecen planicies de superficies más o menos horizontales son interrumpidos por cerros volcánicos o cadenas de cerros, constituidas por rocas volcánicas que forman parte de la Cadena Occidental de Los Andes. De esta manera, en la Laguna de Vizcachas se encuentra ubicado las unidades geomorfológicas de la Cordillera Occidental de Los Andes y el Altiplano

El detalle geológico y geomorfológico se muestra en el [Figura Nº 4](#)



GEOLOGIA	
Símbolo	Descripción
	Qr_bo Bofedales
	Tp_ca Formación Capillune
	Tq_vba Volcanico barroso
	Qr_fg Depositos fluvioglaciares

LEYENDA	
	Zona estudio
	Ríos
	lagos
	Curvas de nivel
	Carretera binacional
	Departamentos

Figura N° 4: Geología y geomorfología

FUENTE: INGEMMET, Carta Nacional 1:100 000 cuadrícula 34 V- Huaitire, Barrera (1994)

3.2.6 CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

En base a las investigaciones geológicas y perforación de pozos y piezómetros de la zona de estudio, se conoce que se disponen de dos acuíferos, el primero superficial caracterizado como acuífero libre y el segundo profundo caracterizado como acuífero confinado.

a) Acuífero libre

El espesor promedio varía entre 18 m y 170 m, compuesto litológicamente por una mezcla de arcilla, grava y arena gruesa. La profundidad de la napa varía entre 2.1 m y 29.78 m. La fuente de recarga está constituido por la intensidad de lluvia que ocurre durante los meses de enero a marzo y del flujo lateral de las montañas que circundan la planicie de Vizcachas. Al Sur-Este en ciertos sectores, aún se observa áreas hidromórficas como productos del afloramiento de las aguas freáticas de los estratos superficiales.

Debido a la explotación del agua subterránea, la disminución de los períodos de lluvia y el descenso de la intensidad de precipitación ocasiona que las áreas hidromórficas se van reduciendo paulatinamente, tal como lo expresan las autoridades municipales de Tacna.

b) Acuífero confinado

Considerado también como acuífero profundo, que se ubica por debajo del acuífero libre, tiene como techo un estrato de arcilla compacta cuyo espesor varía entre 60 m a 80 m; por debajo de dicho estrato se ha identificado el acuífero confinado estratificado de espesor variable entre 40 m a 100 m. La zona permeable está constituida por material detrítico de origen volcánico compuesto por conglomerados de arenas de color gris, arenas finas a gruesas y en ciertas zonas con lentes de arcilla y rocas volcánicas.

La fuente de recarga está constituida por las aguas infiltradas en las formaciones geológicas que circundan el acuífero Vizcachas.

Debido a que las tuberías ranuradas de los pozos y piezómetros observados se encuentran tanto en los estratos del acuífero confinado y libre, las cargas hidráulicas observadas constituyen una mezcla de cargas hidráulicas de ambos acuíferos, lo que dificulta el análisis diferenciado de las propiedades hidrodinámicas de cada uno de los acuíferos.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS

3.3.1 UBICACIÓN DE LOS POZOS

Los pozos se encuentran ubicados en las coordenadas UTM (WGS 84) mostradas en el Cuadro Nº 1.

Cuadro Nº 1: Ubicación de los pozos

Pozo	Cota	Este	Norte
PV-1	4616.98	370447.69	8126387.60
PV-2	4604.52	370625.35	8128928.52
PV-3	4595.41	372636.82	8132857.96
PV-5	4585.26	368689.60	8129774.98
TDV-1	4617.78	370424.94	8126592.06
TDV-3	4585.14	368547.77	8129732.41

FUENTE: Barrera T., 1994.

En la Figura Nº 5 se muestra la ubicación espacial de los pozos y piezómetros; el piezómetro TDV-1 y los pozos PV-1 y PV-2 se encuentran al sur este de la cuenca Vizcachas entre la pampa Mataza y la loma Tarucani. El pozo PV-5 y piezómetro TDV-3 se encuentran al Sur de la laguna Vizcachas, y el pozo PV-3 se ubica al este de la laguna.

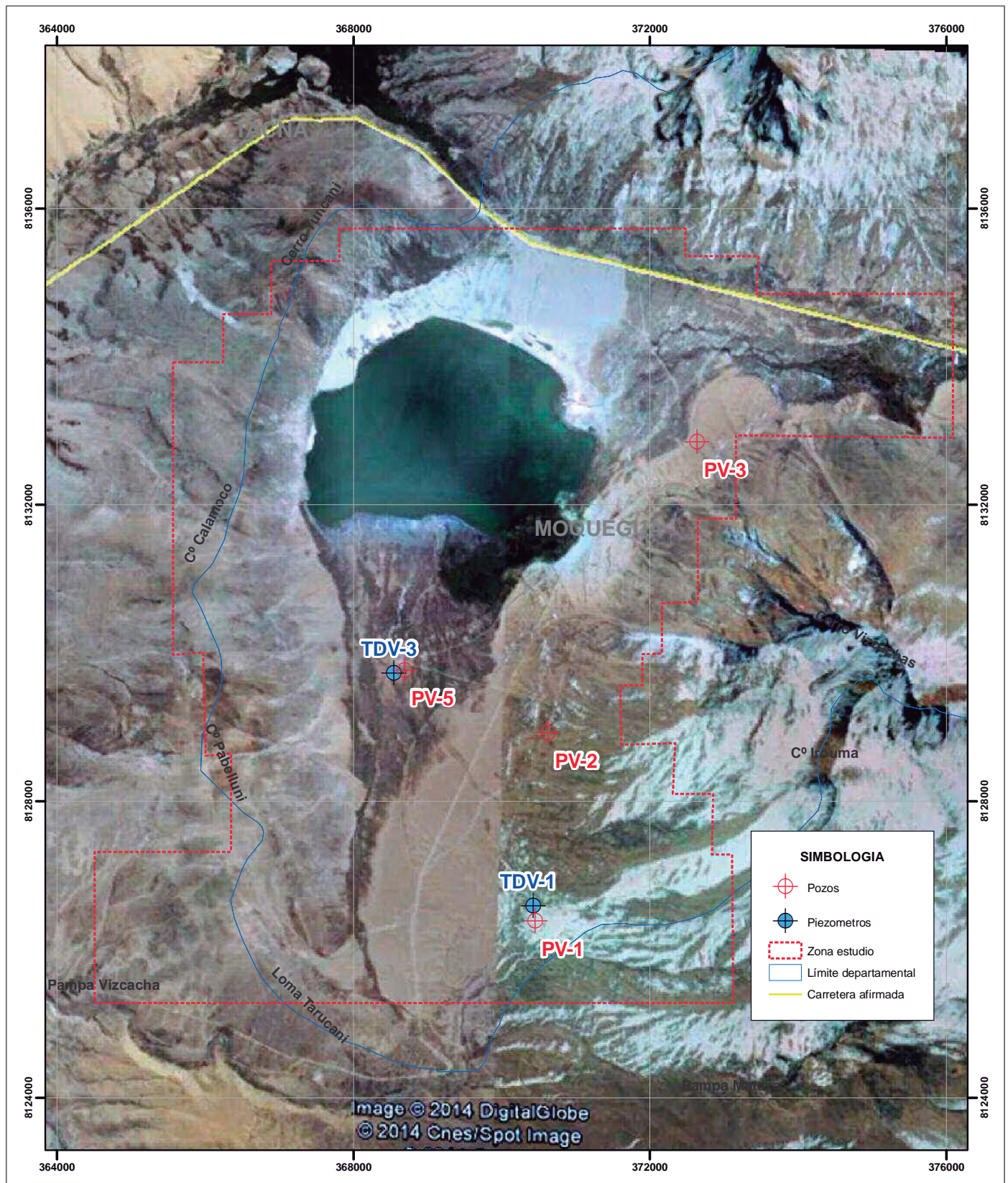


Figura N° 5: Ubicación de pozos y piezómetros

FUENTE: Barrera (1994), Google Earth

3.3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y DISEÑO DE POZOS

El pozo PV-1, tiene una profundidad de perforación de 256 m, los primeros 186 m con un diámetro de 21", a partir de los 186 hasta 256 m con un diámetro de 14". Al inicio de la perforación se encuentra revestido con tubería ciega de 18" de diámetro, a partir de los 13 hasta 186 m está revestido con tubería ranurada de 18"; entre los 186 y 256 m con tubería ranurada de 12" pulgadas de diámetro.

El pozo PV-2 alcanza una profundidad de perforación de 245 m, los primeros 208 m con un diámetro de 21", desde los 208 m hasta 245 m con un diámetro de 14", así mismo, se encuentra revestido con tubería ciega de 18", desde la superficie hasta 12 m de profundidad, continuando con tubería ranurada de 18" de diámetro hasta los 208 m, a partir de esta profundidad hasta los 245 m con tubería de 12" de diámetro.

El pozo PV-3, tiene una profundidad de perforación inicial de 140 m con 23" de diámetro, la perforación continua hasta 308 m con 18" de diámetro, se encuentra revestido con tubería ranurada de 18" de diámetro hasta los 140 m, a partir de esta profundidad hasta los 300 m continua con tubería de 12" de diámetro.

El pozo PV-5, tiene un antepozo revestido hasta los 25 m, la profundidad de perforación es 325 m, con un diámetro de 24" los primeros 180 m a partir de esta profundidad hasta los 325 m con un diámetro de 18". Seguido al antepozo se encuentra revestido con tubería ranurada de 18" de diámetro hasta 180 m, continuando con tubería de 12" de diámetro.

El piezómetro TDV-1, tiene 381 m de profundidad con un diámetro de 4 3/8" hasta los 360 m, a partir de los 360 hasta los 381 m con un diámetro de 3". Los primeros 30 m revestida con tubería ciega de 3" de diámetro, seguida por tubería ranurada hasta los 160 m, continuando hasta los 262 m con tubería ciega de 3" de diámetro, terminando con tubería ranurada de 3" hasta los 338 m; a partir de los 338 m se encuentra sin revestir.

El piezómetro TDV-3, tiene 332 m de profundidad con diámetro de 6" hasta los 156 m, a partir de esta profundidad con un diámetro de 3", los primeros 38 m se encuentra revestido por tubería ciega de 4" de diámetro, continuando con tubería ranurada de 4" de diámetro, el resto de la perforación se encuentra sin revestimiento.

En las figuras del **ANEXO A** se muestra las características constructivas mencionadas de cada pozo y piezómetro.

3.3.3 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS DE LOS POZOS

En los primeros 170 m del pozo PV-1 se encuentra arcilla, grava y arena, a partir de los 170 m se encuentra arcillas con presencia de pequeños lentes de arena e intercalaciones de tufo.

El pozo PV-2 está conformado por estratos de arena y grava entre 0 (cero) y 120 m, a partir de 120 m hasta 245 m con estratos de arcilla y arena.

El pozo PV-3, muestra estratos de conglomerados de arena y limo, además, de estratos de arena con presencia de limo hasta los 179 m, entre 179 y 191 m se observa la presencia de arcilla con arena, a partir de 191m hasta 308 m se encuentra intercalaciones de arena, limo y arcilla.

El pozo PV-5, muestra estratos de grava y arena gruesa en los primeros 85 m, entre los 85 y 328 m se encuentran estratos de arena y arcilla, a partir de esta profundidad hasta los 332 m se observa roca volcánica.

El perfil del piezómetro TDV-1 muestra formaciones fluvioglaciares en los 171 m. Entre 171 y 381.5 m presenta intercalaciones de estratos conformados por arcillas compactas y tufos volcánicos.

El perfil estratigráfico del piezómetro TDV-3 está constituido por grava y arena en los primeros 85 m, a partir de esta profundidad hasta los 155 m se encuentra arena con lentes

de arcilla; entre 155 y 242 m presenta arcillas y a partir de 242 m se encuentra estratos de arena fina y media.

Los perfiles litológicos de los pozos y piezómetros descritos se muestran en las figuras del **ANEXO A**.

3.4 METODOLOGÍA

La metodología a seguir para el logro de los objetivos de la presente investigación, contemplan la aplicación de método de superposición de Van Der kamp y el método de Chenaf, estos son detallados a continuación.

3.4.1 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE PRUEBA DE BOMBEO Y RECUPERACIÓN

En esta etapa se ha procesado la información de abatimiento versus tiempo y abatimiento residual versus tiempo, con lo cual se pudo identificar el sistema del acuífero según su comportamiento, comparando con las curvas teóricas para pruebas hidrodinámicas a caudal constante.

El cálculo de las propiedades hidrodinámicas fue realizado mediante las ecuaciones de Theis y Jacob, para acuíferos confinados haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

Ecuación de Theis:

Ecuación de Jacob:

De la misma manera, con el método de Neuman para acuíferos libres, con ayuda del *software Aquifer Test*.

La información de los datos de las pruebas de bombeo y pruebas de recuperación se recopiló del estudio realizado por Barrera (1994) en la zona de la laguna Vizcachas, la cual se

puede apreciar en los cuadros del **ANEXO B**.

3.4.2 APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN PARA INCREMENTAR EL PERIODO DE DURACIÓN DE LA PRUEBA DE BOMBEO

En esta etapa se hizo uso de los datos de bombeo, recuperación y el principio de superposición propuesto por Van der Kamp (1989) para pruebas a caudal constante (ecuación 5.24), extendiendo el tiempo de duración de la prueba de bombeo; el tiempo extendido es igual al tiempo de recuperación.

De acuerdo al método, los valores de abatimientos observados fueron interpolados para generar un periodo de observación constante $s(t)$.

3.4.3 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS EXTENDIDOS MEDIANTE EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Se analizó los datos extendidos de la prueba de bombeo, si sigue la tendencia de la curva de abatimiento, a la vez se verificó el grado de error que podría poseer cada curva.

3.4.4 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE LAS PRUEBAS DE RECUPERACIÓN

Mediante los métodos propuestos por Chenaf (2002), se calculó la relación del abatimiento residual en tiempo t' entre el máximo abatimiento de bombeo, ecuación 5.27.

El abatimiento residual (s') se observó en las pruebas de recuperación, la transmisividad se determinó en la pruebas de bombeo debido a que la transmisividad es la misma en ambas pruebas, posteriormente se calculó el coeficiente de almacenamiento (S).

De la misma forma, se calculó el coeficiente de almacenamiento residual (S') mediante el segundo método de Chenaf (2002), ecuación 5.29, este método tiene la ventaja de determinar el coeficiente de almacenamiento (S) sin ser acoplada al coeficiente de almacenamiento residual (S').

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 EL ACUÍFERO VIZCACHAS Y LOS POZOS DE PRUEBA

En las figuras del ANEXO B, se observa que el pozo PV-1 y los piezómetros TDV-1 y TDV-3 se encuentran en un acuífero confinado, mientras que los pozos PV-2, PV-3 y PV-5 se encuentran en acuífero libre.

Así mismo, se comprueba el tipo de acuífero con los valores de las propiedades hidrodinámicas que se estimaron por medio del *software Aquifer Test* (Ver ANEXO C). En el Cuadro Nº 2, se muestra los valores del coeficiente de almacenamiento estimados para el pozo PV-1 y piezómetros TDV-1 y TDV-3, siendo estos 3.9×10^{-4} , 1.54×10^{-3} y 8×10^{-5} , respectivamente. De igual manera los valores del rendimiento específico estimados para los pozos PV-2, PV-3 y PV-5 son 5.1×10^{-2} , 1.69×10^{-2} , 5.02×10^{-2} respectivamente; valores que corresponden a acuíferos libres.

Cuadro Nº 2: Propiedades hidrodinámicas del acuífero

Pozo o piezómetro	Transmisividad T (m ² /d)	Conductividad hidráulica K (m/d)	Coefficiente de almacenamiento S	Rendimiento específico Sy
PV-1	124	0.52	0.00039	-
PV-2	805	3.35	-	0.0510
PV-3	507	1.95	-	0.0169
PV-5	120	0.41	-	0.0502
TDV-1	171	0.95	0.00154	-
TDV-3	114	0.95	0.00008	-

FUENTE: Elaboración propia

4.2 ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE LA EXTENSIÓN DEL TIEMPO DE BOMBEO

a. Aplicación del principio de superposición para incrementar el periodo de duración de la prueba de bombeo

Para la estimación del abatimiento en una prueba de bombeo con duración extendida se interpolaron los datos de abatimiento en un intervalo de acuerdo al tiempo de bombeo. En el Cuadro № 3 se muestra los intervalos de tiempo de 160 y 97 minutos para pruebas de bombeo de 72 y 24.25 horas, respectivamente.

Cuadro № 3: Intervalos de tiempo

Pozo o Piezómetro	Tiempo bombeo		Intervalo de tiempo (min)
	hr	min	
PV-1	72	4320	160
PV-2	72	4320	160
PV-3	24.25	1455	97
PV-5	72	4320	160
TDV-1	72	4320	160
TDV-3	72	4320	160

FUENTE: Elaboración propia

Una vez interpolado los abatimientos respecto a un intervalo de tiempo, se estimó el abatimiento extendido para el bombeo mediante la siguiente expresión:

$$s_o = s(t) + s_o(t - t_1) \quad (4.1)$$

Donde:

t_1 = Tiempo de bombeo (min).

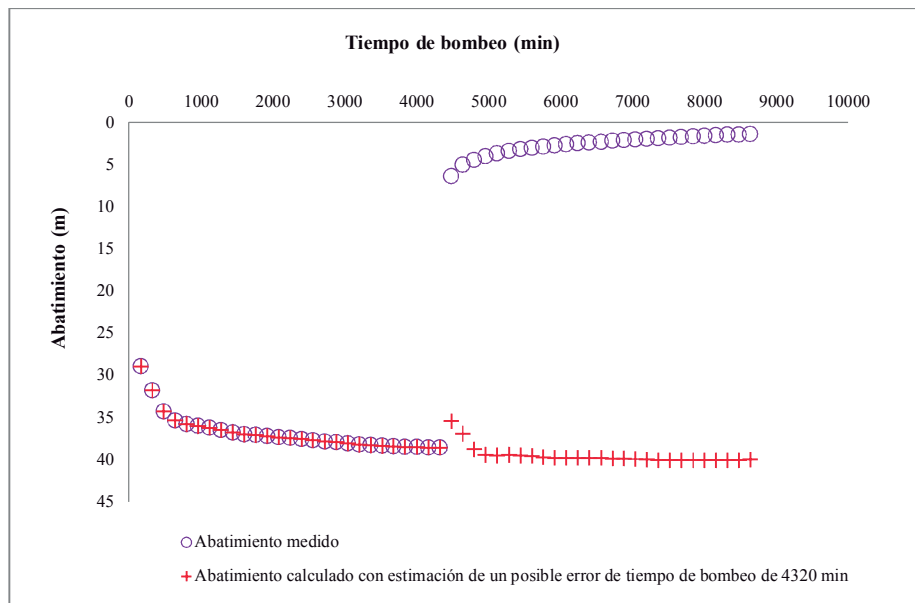
$s(t)$ = Abatimiento observado durante y después de la fase de bombeo (m).

s_o = Abatimiento extendido para el bombeo (m).

Los resultados del abatimiento extendido versus tiempo extendido para los pozos y piezómetros observados se detallan en los cuadros del ANEXO D, en los cuales se observa que el tiempo máximo que se puede extender es igual al tiempo de recuperación.

En las Figuras Nº 6 al 11, se muestran los gráficos de los abatimientos observados, abatimientos calculados, y abatimientos corregidos con un factor por el tiempo de bombeo en los pozos y piezómetros observados.

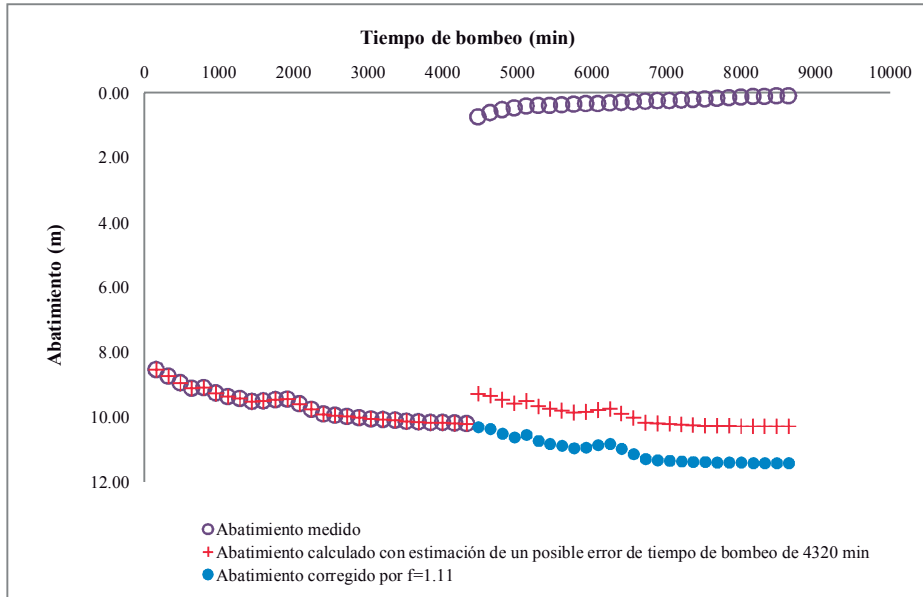
En el pozo PV-1 y piezómetro TDV-3 (Figura Nº 6 y 11) se observa que el abatimiento calculado a partir del abatimiento residual sigue la tendencia de la curva de la fase de bombeo.



FUENTE: Elaboración propia

Figura Nº 6: Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-1

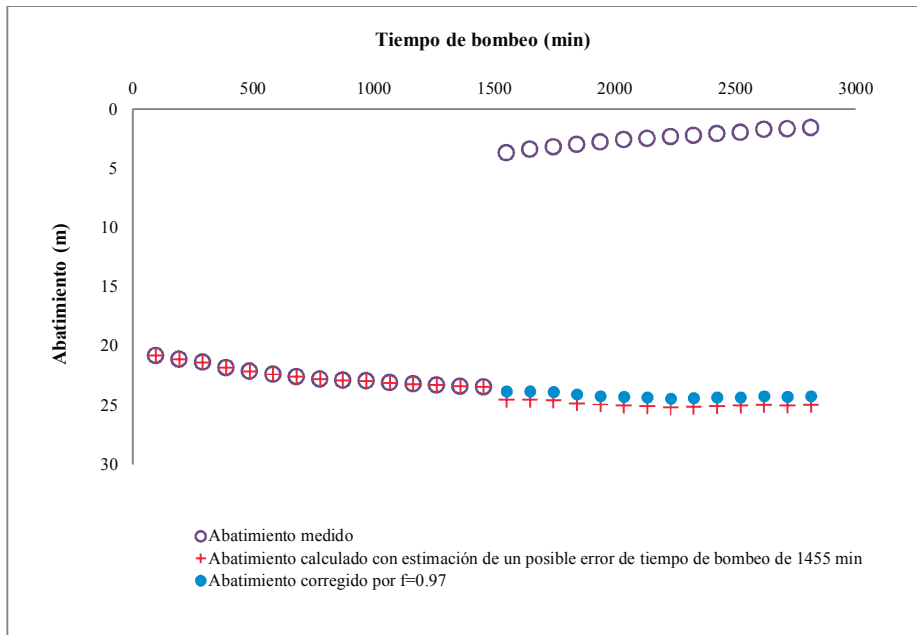
En el pozo PV-2 se observa que el abatimiento calculado a partir del abatimiento residual no sigue la tendencia de la curva de la fase de bombeo, debido a la presencia de un posible error por la variación del nivel estático durante el tiempo de duración de la prueba de bombeo, por lo que se multiplicó por un factor de corrección de 1.11 obteniendo una curva que sigue la tendencia de la curva de la fase de bombeo. Ver Figura Nº 7.



FUENTE: Elaboración propia

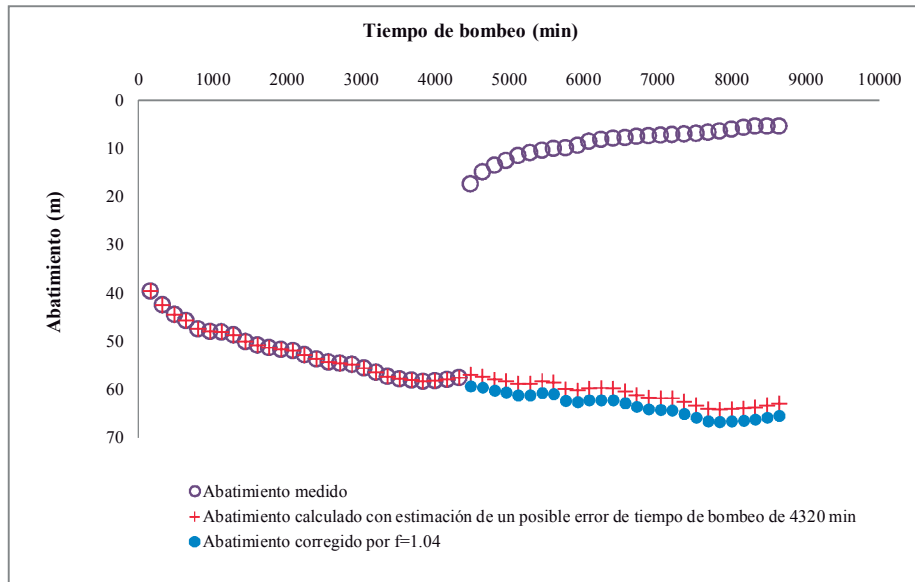
Figura Nº 7: Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-2

De la misma manera se procedió en los pozos PV-3, PV-5 y piezómetro TDV-1, con un factor de corrección de 0.97, 1.04 y 0.92, respectivamente, tal como se muestra en las Figuras Nº 8 al 10.



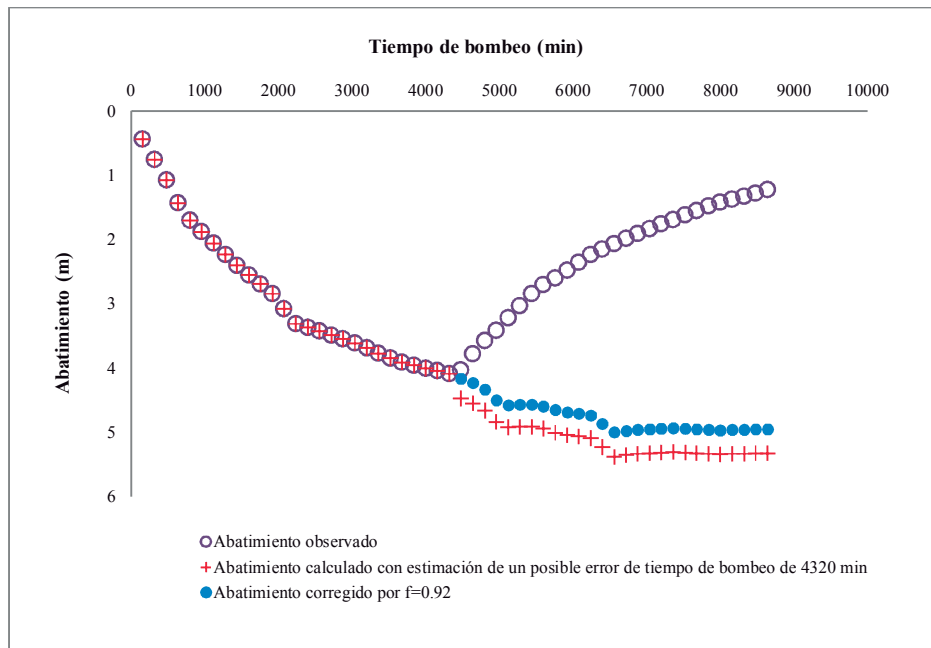
FUENTE: Elaboración propia

Figura Nº 8: Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-3



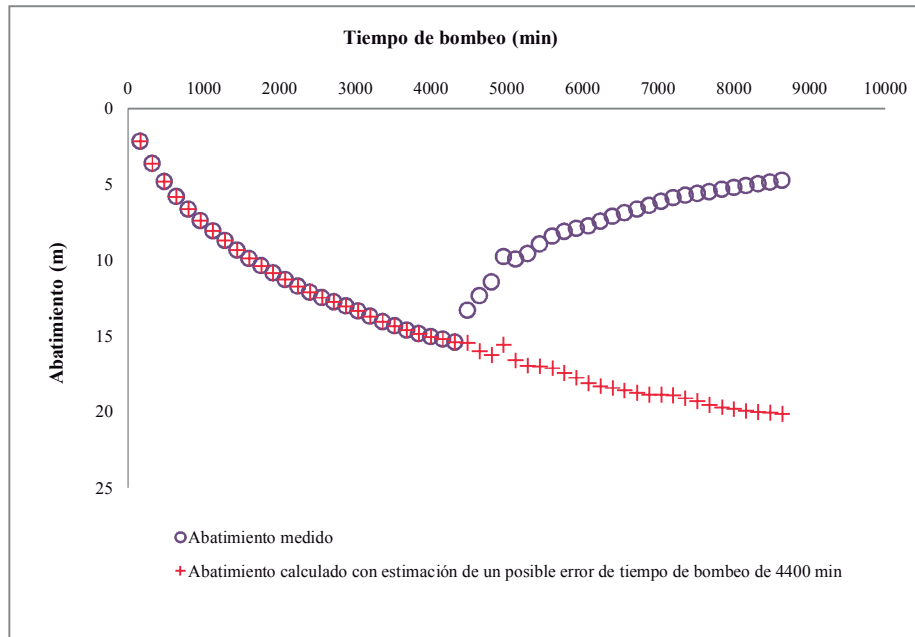
FUENTE: Elaboración propia

Figura Nº 9: Abatimiento observado y estimado - Pozo PV-5



FUENTE: Elaboración propia

Figura Nº 10: Abatimiento observado y estimado - Piezómetro TDV-1



FUENTE: Elaboración propia

Figura Nº 11: Abatimiento observado y estimado - Piezómetro TDV-3

Los datos corregidos se muestran en los cuadros del ANEXO D.

b. Análisis comparativo entre las propiedades hidrodinámicas con la información de prueba de bombeo y propiedades hidrodinámicas con duración extendida de la prueba de bombeo.

La estimación de las propiedades hidrodinámicas fue analizada con el método de Theis para acuíferos confinados y el método de Neuman para acuíferos libres con la ayuda del *software Aquifer Test*, cuyos resultados se pueden observar en el ANEXO E. En el Cuadro Nº 4 se aprecia que la transmisividad para tiempo de bombeo extendido tiende a disminuir o mantenerse constante respecto a la transmisividad inicial, estimada con datos sin extender; caso contrario sucede con el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico, es decir sus valores aumentan con los datos del bombeo extendido

Cuadro № 4: Propiedades hidrodinámicas estimadas con información de prueba de bombeo y prueba de bombeo extendido

Pozo Piezómetro	Transmisividad T (m ² /d)		Conductividad hidráulica K (m/d)		Coeficiente de almacenamiento S		Rendimiento específico Sy	
	Prueba		Prueba		Prueba		Prueba	
	Bombeo	Bombeo extendido	Bombeo	Bombeo extendido	Bombeo	Bombeo extendido	Bombeo	Bombeo extendido
PV-1	124	123	0.52	0.51	0.00039	0.00049	-	-
PV-2	805	785	3.35	3.27	-	-	0.0510	0.0610
PV-3	507	444	1.95	1.71	-	-	0.0169	0.0180
PV-5	120	117	0.41	0.40	-	-	0.0502	0.0530
TDV-1	171	157	0.95	0.87	0.00154	0.00167	-	-
TDV-3	114	96.9	0.95	0.81	0.00008	0.00010	-	-

FUENTE: Elaboración propia

4.3 PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS A PARTIR DE DATOS DE PRUEBAS DE RECUPERACIÓN

Siendo uno de los objetivos de la presente investigación, la estimación del coeficiente de almacenamiento en base a datos de una prueba de recuperación, se ha aplicado una metodología secuencial, análisis y verificación de los resultados.

a. Estimación de los coeficientes de almacenamiento a partir de pruebas de recuperación

La aplicación de la ecuación del método residual normalizado (5.28) y el método de recuperación (5.30 y 5.31) en gráficos semilogarítmico, han sido empleadas a fin de estimar la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y coeficiente de almacenamiento residual.

$$\Delta \left(\frac{s'(t)}{s'_{ini}} \right) = \frac{1}{\log \left(\frac{2.25 t_A T}{r^2 S} \right)}$$

$$T' = T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta(s'_{ini} - s') / \text{ciclo logarítmico}}$$

$$S' = \frac{2.25Tt_A}{r^2\left(\frac{t}{t}\right)_o}$$

Este método es aplicado para abatimientos en pozos ubicados en acuíferos confinados por lo que en el presente trabajo fue aplicado a datos de pruebas de recuperación del pozo PV-1 y piezómetros TDV-1 y TDV-3. En el Cuadro Nº 5 se aprecia el abatimiento residual en el pozo PV-1 para ser graficado en escala semilogarítmica y su posterior aplicación de los métodos de Chenaf; de la misma manera, se realizó para los datos de las pruebas de recuperación de los piezómetros. (Ver ANEXO F)

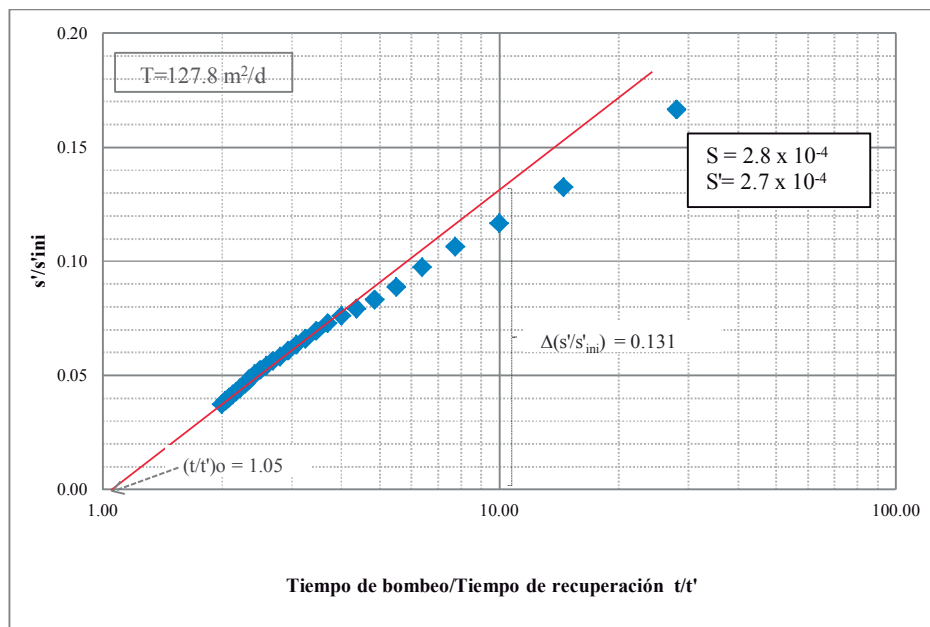
Cuadro Nº 5: Abatimiento residual para aplicación de los métodos de Chenaf para el Pozo PV-1

Tiempo t' (min)	t/t'	Abatimiento residual s' (m)	s'/s'ini	s'ini-s'
0	-	38.61	1.00	0.00
160	28.00	6.44	0.17	32.17
320	14.50	5.13	0.13	33.48
480	10.00	4.51	0.12	34.10
640	7.75	4.11	0.11	34.50
800	6.40	3.77	0.10	34.84
960	5.50	3.43	0.09	35.18
1120	4.86	3.22	0.08	35.39
1280	4.38	3.07	0.08	35.54
1440	4.00	2.95	0.08	35.66
1600	3.70	2.82	0.07	35.79
1760	3.45	2.69	0.07	35.92
1920	3.25	2.56	0.07	36.05
2080	3.08	2.46	0.06	36.16
2240	2.93	2.35	0.06	36.26
2400	2.80	2.25	0.06	36.36
2560	2.69	2.18	0.06	36.44
2720	2.59	2.10	0.05	36.51
2880	2.50	2.03	0.05	36.58
3040	2.42	1.95	0.05	36.66
3200	2.35	1.87	0.05	36.74
3360	2.29	1.80	0.05	36.81
3520	2.23	1.72	0.04	36.89
3680	2.17	1.66	0.04	36.95
3840	2.13	1.61	0.04	37.00
4000	2.08	1.56	0.04	37.05
4160	2.04	1.50	0.04	37.11
4320	2.00	1.45	0.04	37.16

FUENTE: Elaboración propia

- t : Tiempo de la prueba de bombeo, para el pozo PV-1 (min).
- s'/s'_{ini} : Relación abatimiento residual y abatimiento residual inicial para la aplicación del método residual normalizado (m/m).
- $s'_{ini}-s'$: Diferencia de abatimiento residual inicial y abatimiento residual para la aplicación del método de recuperación (m).

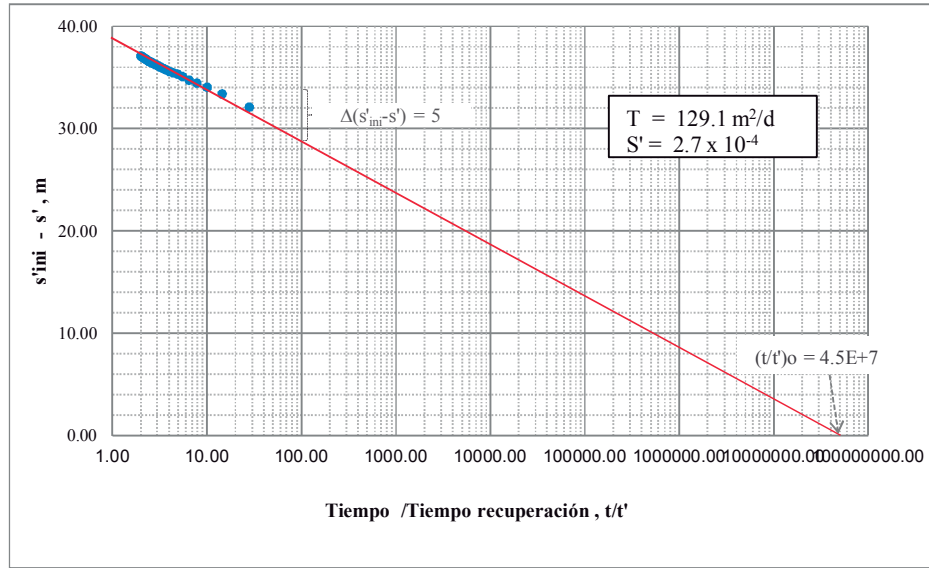
La transmisividad calculada por el método de recuperación de Theis es empleada en el método residual normalizado obteniendo el coeficiente de almacenamiento. En el pozo PV-1 con una transmisividad de $127.8 \text{ m}^2/\text{d}$, se obtuvo el coeficiente de almacenamiento de 2.8×10^{-4} y el coeficiente de almacenamiento residual de 2.7×10^{-4} , tal como se observa en la Figura N° 12.



FUENTE: Elaboración propia

Figura N° 12: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método residual normalizado de Chenaf - Pozo PV-1

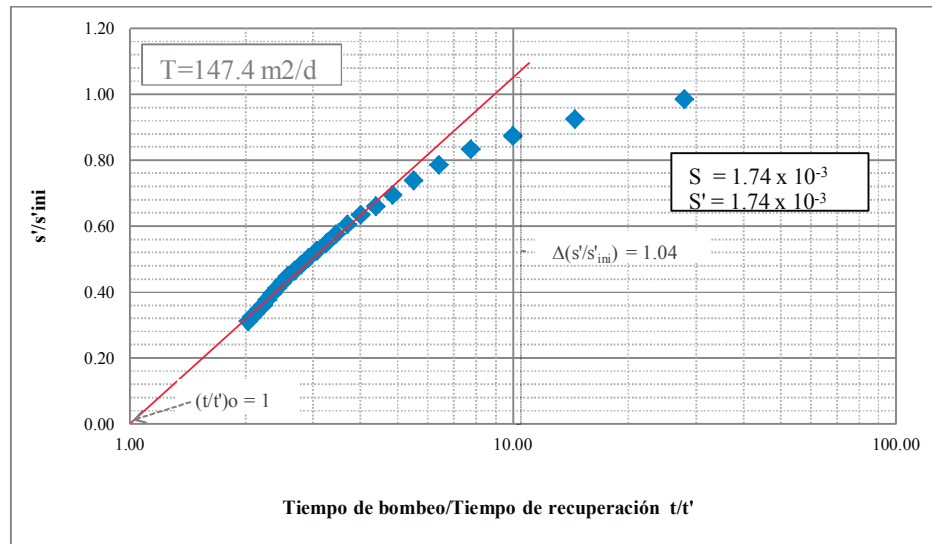
Aplicando el método de recuperación de Chenaf se obtiene la transmisividad de $129.1 \text{ m}^2/\text{d}$ en el pozo PV-1, así como coeficiente de almacenamiento de 2.7×10^{-4} (Ver Figura N° 13).



FUENTE: Elaboración propia

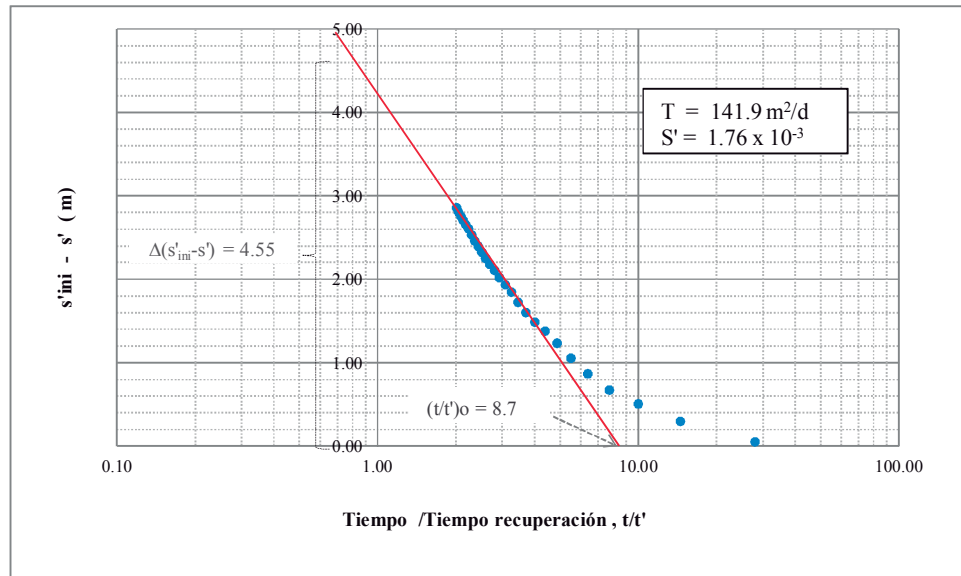
Figura № 13: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Pozo PV-1

Para el piezómetro TDV-1, el coeficiente de almacenamiento y coeficiente de almacenamiento residual es 1.74×10^{-3} , calculado con el método residual normalizado; por el método de recuperación de Chenaf, el coeficiente de almacenamiento es 1.76×10^{-3} y la transmisividad es $141.9 \text{ m}^2/\text{d}$. (Ver Figuras № 14 y 15).



FUENTE: Elaboración propia

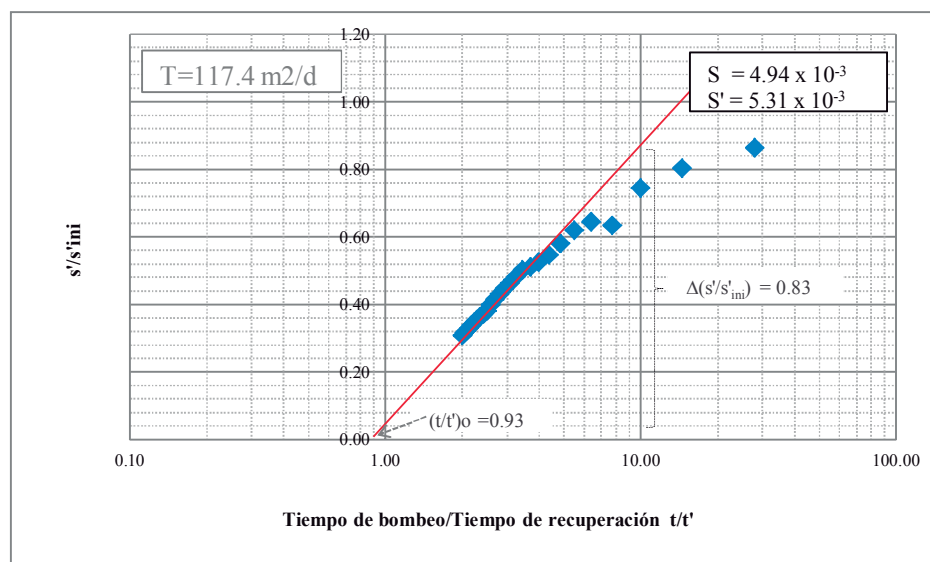
Figura № 14: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método residual normalizado de Chenaf - Piezómetro TDV-1



FUENTE: Elaboración propia

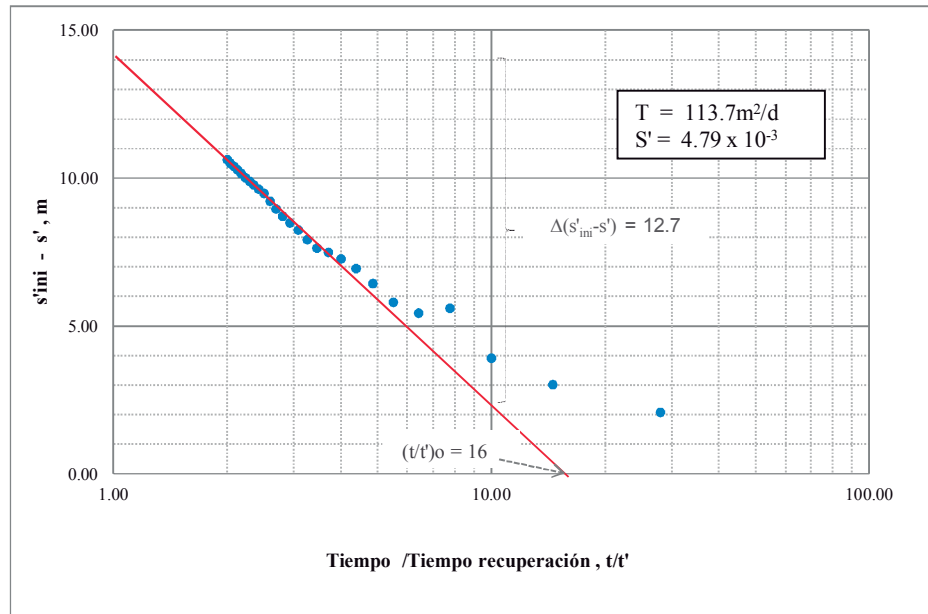
Figura № 15: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Piezómetro TDV-1

De la misma forma, para datos de recuperación del piezómetro TDV-3 el coeficiente de almacenamiento es 4.94×10^{-3} y el coeficiente de almacenamiento residual estimado, por el método residual normalizado es 5.31×10^{-3} (Figura № 16) y por el método de recuperación es 4.79×10^{-3} . (Figura № 17).



FUENTE: Elaboración propia

Figura № 16: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método residual normalizado de Chenaf - Piezómetro TDV-3



FUENTE: Elaboración propia

Figura № 17: Estimación de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento por el método recuperación de Chenaf - Piezómetro TDV-3

b. Análisis comparativo de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento estimado con los métodos propuestos

Para comparar la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento estimados por el método de Chenaf, se calculó las propiedades hidrodinámicas por el método de Jacob y recuperación de Theis, las que se describen en las figuras del ANEXO F.

En el Cuadro № 6 se observa, la transmisividad en el pozo PV-1 estimada por el método de Jacob es $124 \text{ m}^2/\text{d}$ y la transmisividad estimada por el método de Chenaf es $129.1 \text{ m}^2/\text{d}$ variando en 4%; en el piezómetro TDV-3 la variación de transmisividad entre el método de Jacob y Chenaf es 0.8%, siendo estos valores cercanos; sin embargo en el piezómetro TDV-1 la variación de transmisividad es 19.79% entre ambos métodos. Por otro lado, al comparar la transmisividad estimada entre el método de recuperación de Theis y el método de Chenaf se obtuvo una variación 0.8% en el pozo PV-1, 9.7% en el piezómetro TDV-1 y 3.78% en el piezómetro TDV-3, encontrándose en un rango de 10%.

En el caso de los coeficientes de almacenamiento estimados por los métodos de Jacob y Chenaf se obtuvo valores similares, siendo 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} para el pozo PV-1 y piezómetros TDV-1 y TDV-3 respectivamente. Debido a que los coeficientes de almacenamiento son similares se pueden aceptar estos métodos a partir de la prueba de recuperación.

Cuadro N° 6: Propiedades hidrodinámicas en periodo de bombeo y periodo de recuperación

Propiedad hidrodinámica	Método	Pozo o piezómetro		
		PV-1	TDV-1	TDV-3
Transmisividad	Jacob	124.1	176.9	112.8
	Recuperación Theis	127.8	147.4	117.4
	$s'_{ini}-s'$ (*)	129.1	141.9	113.7
Coeficiente de almacenamiento	Jacob	0.0003	0.002	0.005
	s'_{ini}/s' (**)	0.0003	0.002	0.005
Coeficiente de almacenamiento residual	s'_{ini}/s' (**)	0.0003	0.002	0.005
	$s'_{ini}-s'$ (*)	0.0003	0.002	0.005

(*) Método de recuperación de Chenaf

(**) Método abatimiento residual normalizado

FUENTE: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

1. La transmisividad estimada con datos de prueba de bombeo sin modificación alguna son $124 \text{ m}^2/\text{d}$, $805 \text{ m}^2/\text{d}$, $507 \text{ m}^2/\text{d}$, $120 \text{ m}^2/\text{d}$, $171 \text{ m}^2/\text{d}$ y $114 \text{ m}^2/\text{d}$ para los pozos PV-1, PV-2, PV-3, PV-5 y piezómetros TDV-1 y TDV-3, respectivamente; así mismo, el rendimiento específico en acuíferos libres y el coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados son 3.9×10^{-4} , 5.1×10^{-2} , 1.69×10^{-2} , 5.02×10^{-2} , 1.54×10^{-3} y 8×10^{-5} , respectivamente.
2. La transmisividad estimada con datos de prueba de bombeo extendidos de acuerdo al método de Van Der Kamp son $123 \text{ m}^2/\text{d}$, $785 \text{ m}^2/\text{d}$, $444 \text{ m}^2/\text{d}$, $117 \text{ m}^2/\text{d}$, $157 \text{ m}^2/\text{d}$ y $96.9 \text{ m}^2/\text{d}$ para los pozos y piezómetros antes mencionados; de la misma manera el rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento son 4.9×10^{-4} , 6.1×10^{-2} , 1.8×10^{-2} , 5.3×10^{-2} , 1.67×10^{-3} y 1×10^{-4} , respectivamente.
3. La variación de valores de transmisividad entre el método de Jacob y Chenaf es 4% en el pozo PV-1, 19.79% en piezómetro TDV-1 y 0.8% piezómetro TDV-3; sin embargo la variación de transmisividad entre el método de recuperación de Theis y Chenaf es 10%.
4. El coeficiente de almacenamiento estimado por el método de Jacob para datos de prueba de bombeo del pozo PV-1 y piezómetros TDV-1 y TDV-3 son 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} , respectivamente; y los coeficiente de almacenamiento estimado por el método residual normalizado de Chenaf son 3×10^{-4} , 2×10^{-3} y 5×10^{-3} para los pozos y piezómetros mencionados. Ambos resultados son similares.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda investigar la metodología propuesta por Van Der Kamp con información de pruebas de bombeo provenientes de pozos ubicados en acuíferos libres, tanto para periodos cortos y largos de pruebas de bombeo.
2. Se recomienda utilizar la metodología propuesta por Chenaf para la determinación del coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados, empleando el método de abatimiento residual normalizado de Chenaf o el método de recuperación de Chenaf.
3. Se recomienda investigar la aplicación de la metodología propuesta por Chenaf, para la determinación del rendimiento específico en acuíferos libres.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Barrera, Teresa. 1994. Estudio Hidrogeológico definitivo de la Cuenca de la Laguna Vizcachas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú.
2. Bear, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, Inc. New York. 152, 301 pp.
3. Chenaf, D. 2002. Methods to Determine Storativity of Infinite Confined Aquifers from a Recovery Test. Ground Water. Vol. 40. No. 4. pp 385-389.
4. Instituto Geográfico Nacional (IGN). Carta nacional 1:100 000. Cuadrícula 34V.
5. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Mapa geológico del cuadrángulo de Huatire-34V.
http://www.ingemmet.gob.pe/publicaciones/serie_a/mapas/34-v.htm. (Rev. 17-09-2013)
6. Kruseman, G. 1991. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands. 377 pp.
7. Municipalidad Provincial de Tacna. Efectos Producidos por la Explotación de Los Recursos Hídricos en Tacna. Presupuesto Participativo periodo 2013.
<https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CDQQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.munitacna.gob.pe%2Fdownload%2Fpp13%2FEXPOSICION%2520ALCALDE%2520PPTO.ppt&ei=UEBxU4eTIsmpsQSnm4GYAw&usg=AFQjCNHvdcl8F0XpyB6dvO92LW5gzJYfiA&bvm=bv.66330100.d.cWc>. (Rev. 27-04-2014)
8. Neville, C. y Van der Kamp, G. 2012. Using Recovery Data to Extend the Effective Duration of Pumping Tests. Ground Water. Vol. 50. No.5. pp 804-807.
9. Van der Kamp, G. 1989. Calculation of Constant-Rate Drawdowns from Stepped-Rate Pumping Tests. Ground Water. Vol. 27. No.2. pp 175-183.

