

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“PRUEBA DE BOMBEO Y VERTICALIDAD DEL POZO QR-05A, EN  
EL ACUÍFERO CHILLÓN”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL  
PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**FRANCISCO JAVIER QUINTANA PALACIOS**

**LIMA – PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“PRUEBA DE BOMBEO Y VERTICALIDAD DEL POZO QR-05A, EN EL  
ACUÍFERO CHILLÓN”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**FRANCISCO JAVIER QUINTANA PALACIOS**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. TERESA OLINDA VELÁSQUEZ BEJARANO  
Presidente

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO  
Asesor

Mg. Sc. RICARDO APAELLA NALVARTE  
Miembro

Mg. Sc. KENYI GLICERIO CAVALCANTI CÁRDENAS  
Miembro

LIMA – PERU

2020

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. PRESENTACIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
3.1. Objetivo principal.....	6
3.2. Objetivos específicos.....	6
<b>IV. DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	<b>7</b>
4.1. Conceptos aplicados .....	7
4.1.1. Formaciones geológicas .....	7
4.1.2. Tipos de acuíferos .....	8
4.1.3. Propiedades hidrodinámicas.....	9
4.1.4. Abatimiento en los acuíferos.....	10
4.1.5. Prueba de bombeo .....	11
4.1.6. Métodos de análisis de la prueba de rendimiento .....	12
4.1.7. Prueba de verticalidad .....	16
4.2. Metodología del trabajo ejecutado .....	18
4.2.1. Ubicación .....	18
4.2.2. Vías de acceso .....	18
4.2.3. Inducción de seguridad y salud ocupacional.....	18
4.2.4. Charla de cinco minutos .....	19
4.2.5. Materiales y herramientas .....	20
4.2.6. Características técnicas del equipo de bombeo .....	21
4.2.7. Perfil litológico del pozo tubular.....	23
4.2.8. Características constructivas y diseño técnico del pozo tubular .....	23
4.2.9. Aspectos a considerar previo a la prueba de bombeo .....	24
4.2.10. Sobrebombeo (desarrollo del pozo) .....	25
4.2.11. Prueba de rendimiento.....	26
4.2.12. Prueba de verticalidad .....	37
4.3. Experiencias y aportes al trabajo profesional.....	39
4.3.1. Contribuye a la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa. ....	39
4.3.2. Contribuye al centro laboral en términos de las competencias y habilidades	

adquiridas durante su formación profesional. ....	40
4.3.3. Explica el nivel de contribución al centro laboral a partir de la solución de situaciones problemáticas.....	41
<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>44</b>
5.1. Conclusiones .....	44
5.2. Recomendaciones.....	44
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>
<b>VII. ANEXOS .....</b>	<b>48</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Perfil litológico del pozo QR-05A .....	23
Tabla 2: Diseño técnico del pozo QR-05A.....	24
Tabla 3: Resultados de la prueba de rendimiento del pozo QR-05A .....	27
Tabla 4: Eficiencia hidráulica del pozo QR-05A .....	29
Tabla 5: Calidad del agua in situ (prueba de rendimiento).....	30
Tabla 6: Resultados de la prueba de contenido de arena .....	32
Tabla 7: Propiedades hidrodinámicas.....	37
Tabla 8: Registro de niveles del primer escalón.....	55
Tabla 9: Registro de niveles del segundo escalón .....	55
Tabla 10: Registro de niveles del tercer escalón .....	56
Tabla 11: Datos de campo de la prueba de verticalidad.....	58
Tabla 12: Desviaciones orientación Norte-Sur.....	59
Tabla 13: Desviaciones orientación Este-Oeste .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ploteo semilogarítmico de tiempo-abatimiento teórico de acuíferos no consolidados .....	11
Figura 2: Prueba de rendimiento con estabilización de niveles.....	14
Figura 3: Prueba de rendimiento sin estabilización de niveles.....	14
Figura 4: Prueba de rendimiento con escalones de desigual duración .....	15
Figura 5: Prueba de rendimiento real con extrapolación .....	15
Figura 6: Datos de la prueba de rendimiento de la figura 5 referidos al mismo origen .....	16
Figura 7: Esquema de la verticalidad de un pozo .....	17
Figura 8: Vías de acceso al pozo QR-05A .....	18
Figura 9: Identificación de actos sub estándares .....	19
Figura 10: Profesional SSOMA verificando cumplimiento y uso de EPP.....	20
Figura 11: Tubería de PVC de alta densidad de 3" de diámetro .....	21
Figura 12: Motobomba Yamaha.....	21
Figura 13: Electrobomba sumergible Pedrollo (25 HP) .....	22
Figura 14: Tubería filtro ranurada de PVC.....	24
Figura 15: Poza de rebombeo .....	25
Figura 16: Agua cristalina al final del sobrebombeo.....	26
Figura 17: Prueba de rendimiento del pozo QR-05A .....	27
Figura 18: Curva característica del pozo QR-05A .....	28
Figura 19: Ecuación de abatimiento del pozo QR-05A.....	29
Figura 20: Medida In-situ de los parámetros físico-químicos.....	31
Figura 21: Monitoreo de la conductividad eléctrica (durante prueba de rendimiento) .....	31
Figura 22: Analizador Rossum.....	33
Figura 23: Eficiencia hidráulica del pozo QR-05A .....	34
Figura 24: Prueba de rendimiento (tiempo en escala logarítmica) .....	34
Figura 25: Análisis del primer escalón de la prueba rendimiento .....	35
Figura 26: Análisis del segundo escalón de la prueba de rendimiento.....	36
Figura 27: Análisis del tercer escalón de la prueba de rendimiento .....	36
Figura 28: Registro de las desviaciones (prueba de verticalidad) .....	38
Figura 29: Prueba de Verticalidad al pozo QR-05A.....	38
Figura 30: Prueba de rendimiento del pozo QR-05A .....	52

Figura 31: Curva característica del pozo QR-05A .....	53
Figura 32: Método Analítico .....	54
Figura 33: Abatimientos de cada escalón referidos al mismo origen de coordenadas .....	57
Figura 34: Desviaciones orientación Norte-Sur .....	61
Figura 35: Desviaciones orientación Este-Oeste .....	62
Figura 36: Instalación del equipo de izaje (gata hidráulica).....	63
Figura 37: Electrobomba sumergible PEDROLLO (25 HP/18.50 KW).....	64
Figura 38: Instalación de la columna de extracción .....	65
Figura 39: Poza de rebombeo .....	66
Figura 40: Motobomba Yamaha.....	66
Figura 41: Variador de frecuencia, medidor de caudal y tubería guía .....	67
Figura 42: Monitoreo de los niveles dinámico en el pozo QR-05A.....	67
Figura 43: Monitoreo de la calidad del agua .....	68
Figura 44: Instalación del trípode (prueba de verticalidad).....	69
Figura 45: Prueba de Verticalidad .....	70

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PLANO DE UBICACIÓN DEL POZO QR-05A .....	49
ANEXO 2: PERFIL LITOLÓGICO DEL POZO QR-05A .....	50
ANEXO 3: DISEÑO TÉCNICO DEL POZO QR-05A .....	51
ANEXO 4: PRUEBA DE RENDIMIENTO .....	52
ANEXO 5: PRUEBA DE VERTICALIDAD .....	58
ANEXO 6: FOTOGRAFÍAS .....	63

## I. PRESENTACIÓN

La Ingeniería Agrícola cumple un rol importante en la gestión integral de los recursos hídricos, ya que, brinda las herramientas adecuadas para el manejo y aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas a lo largo del tiempo.

El desempeño de las funciones asignadas se basó en la interrelación de los conocimientos adquiridos durante la formación profesional, destacando el curso de Aguas Subterráneas por la aplicación directa de conceptos como: el movimiento del agua a través de un medio poroso, propiedades hidrodinámicas, análisis e interpretación de las pruebas de bombeo, entre otros.

En la empresa **ROW INGENIEROS ASOCIADOS S.R.LTDA.** se desempeñó la función de asistente en ingeniería teniendo las siguientes responsabilidades:

- **Supervisor de mantenimientos preventivos y correctivos de pozos tubulares.** Es responsabilidad del supervisor garantizar el desmontaje y montaje del equipo de bombeo y columna de extracción del agua, uso de cámara de televisión para realizar el diagnóstico y cumplimiento estricto de los procedimientos a fin de lograr el objetivo esperado.
- **Supervisor de pruebas de bombeo,** es responsabilidad del supervisor la correcta instalación del equipo de bombeo y columna de extracción del agua a fin de garantizar la ejecución de la prueba sin ningún contratiempo. Realizar adecuadamente la toma de datos según la metodología y elección del método interpretativo para analizar la información registrada.

- **Elaboración de expedientes técnicos para el trámite de licencia de uso de agua subterránea y estudios hidrogeológicos**, es menester del asistente la recopilación de información que antecede a la fuente de agua a evaluar; así como, ejecución de los trabajos de campo con el propósito de elaborar una memoria descriptiva que cumpla los requisitos establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), basándose en el Reglamento de procedimientos administrativos para el uso de agua y autorizaciones de ejecución de obras en fuentes de agua naturales (Resolución Jefatural N°007-2015-ANA).

Dicho esto, posterior a la construcción del pozo QR-05A, es decir a la perforación y entubado del mismo; la empresa QUIMPAC S.A. solicitó la ejecución de las pruebas de bombeo y verticalidad del pozo QR-05A con el propósito de determinar las condiciones óptimas de explotación y presentar los lineamientos base para su correcto equipamiento.

Se realizó la supervisión y elaboración del informe correspondiente donde se detalla las etapas previas a la ejecución y desarrollo de las mismas, así como la metodología aplicada para la interpretación.

En definitiva, al concluir la malla curricular de Ingeniería Agrícola, se obtiene los conceptos necesarios para el desempeño de la profesión en los diversos campos temáticos. Ahora bien, según lo expuesto líneas arriba, los cursos de mayor participación son: Dibujo en Ingeniería, Topografía, Percepción Remota y SIG, Motores y Maquinas Eléctricas, Mecánica de Fluidos, Hidráulica, Geología, Hidrología, Aguas Subterráneas, Abastecimiento de Agua Potable, Ingeniería del Agua y Gestión del Agua. Dichos cursos sirvieron de base para cumplir eficientemente las tareas encomendadas, tales como:

- Elaboración y llenado de fichas de campo correspondiente a los pozos inventariados.
- Elaboración de mapas temáticos como: ubicación de fuentes de agua subterránea, hidroisohipsas, isoprofundidad, isoconductividad hidráulica, isotransmisividad, etc.
- Análisis e interpretación de las pruebas de bombeo con el propósito de conocer las propiedades hidrodinámicas del medio poroso.
- Interpretación de los análisis del laboratorio a fin de caracterizar el agua subterránea

según las familias hidrogeoquímicas.

- Conocimiento del flujo del agua a través del medio poroso para así comprender las zonas de recarga y descarga del acuífero.
- Cálculo de la oferta y demanda de agua.
- Cálculo de las reservas explotables.
- Elaboración de expedientes técnicos gracias al conocimiento de la administración del recurso hídrico a nivel nacional.

## II. INTRODUCCIÓN

Es sabido que el cambio climático ocasiona un fuerte impacto en los recursos hídricos, modificando la tasa de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos. Si bien esta recarga se renueva continuamente mediante su ciclo natural, es finita o agotable. Las aguas subterráneas contribuyen a satisfacer las diversas demandas y al sostenimiento de corrientes, lagos, humedales y otros ecosistemas asociados.

Debido a ello, el agua subterránea es considerada un bien valioso que se debe preservar para las futuras generaciones a fin de evitar la sobre explotación del acuífero y protegerlo de cualquier posible contaminación teniendo un uso responsable y sostenible a lo largo del tiempo.

La empresa QUIMPAC S.A. ubicada en el cono de deyección del río Chillón, dedicada a la producción y comercialización de sal para consumo humano e industrial, soda cáustica, cloro líquido, fosfato bicálcico y productos químicos; solicitó la ejecución de la prueba de bombeo (prueba de rendimiento) y verticalidad del pozo QR-05A a ROW INGENIEROS ASOCIADOS S.R.LTDA., a fin de recabar la información idónea para el equipamiento del pozo.

Esta prueba de bombeo que también es conocida como prueba de rendimiento o caudales escalonados es, en esencia, un método de análisis del pozo de captación de agua subterránea y permite una primera aproximación de las propiedades hidrodinámicas del acuífero en el que se encuentra. Esta prueba consiste en bombear el pozo, a diferentes caudales, siguiendo la evolución de los niveles del agua a través del tiempo, tanto en el pozo de bombeo como en piezómetros o pozos de observación, cuando los hubiere.

El análisis e interpretación de la prueba de rendimiento permite determinar el nivel y caudal recomendable de explotación del pozo, los mismos que sirven de insumo para la selección del equipo de bombeo. La estimación de las propiedades hidrodinámicas, como la conductividad hidráulica y transmisividad del acuífero, permiten tener una orden de magnitud de los mismos, ya que existen diversas metodologías desarrolladas explícitamente para la evaluación del acuífero, que son las pruebas de bombeo a caudal constante y de larga duración. Las propiedades hidrodinámicas dan información sobre: el grado de comunicación entre la zona acuífera inmediata al pozo y otras lejanas, existencia de barreras o bordes impermeables cercanos, zonas de recarga, caracterización el medio fracturado o poroso, cálculo de las reservas de agua, aforo subterráneo y tiempo de tránsito.

La prueba de verticalidad y alineamiento indica si el pozo se encuentra recto y a plomo, indicando si se presentaría alguna dificultad en el montaje del equipo de bombeo especialmente si se tratara de una bomba tipo turbina vertical, mientras que una electrobomba sumergible se adapta a los desvíos tolerables de la verticalidad y alineamiento.

## **III. OBJETIVOS**

### **3.1. Objetivo principal**

Prueba de bombeo y verticalidad del pozo QR-05A, en el acuífero Chillón.

### **3.2. Objetivos específicos**

- Determinar el caudal recomendable y nivel dinámico de operación, ecuación y eficiencia del pozo.
- Estimar la conductividad hidráulica y transmisividad.
- Determinar la verticalidad del pozo.

## **IV. DESARROLLO DEL TRABAJO**

### **4.1. Conceptos aplicados**

#### **4.1.1. Formaciones geológicas**

Desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeológico, se distinguen las siguientes formaciones geológicas.

##### **a. Acuífero**

Se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para satisfacer sus necesidades. Si se analiza detenidamente esta definición, (del latín aqua = agua y fero = fuga), se aprecia que el agua encerrada en una formación geológica cualquiera (gravas de un río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas) puede estar ocupando, ya sea los poros o vacíos intergranulares que presenta la misma, ya sea en las fracturas, diaclasas o grietas que también pueden darse (Custodio y Llamas, 1983).

##### **b. Acuícludo**

Se denomina acuícludo (del latín claudere = encerrar o cerrar) como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación (Custodio y Llamas, 1983).

##### **c. Acuitardo**

Se denomina acuitardo (del latín tardare = tardar), hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten la recarga vertical de otros acuíferos (Custodio y Llamas, 1983).

#### **d. Acuifugo**

Se denomina acuifugo (del latín fugere = huir) a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como, por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación (Custodio y Llamas, 1983).

#### **4.1.2. Tipos de acuíferos**

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de acuíferos: porosos, fisurados y kársticos. Asimismo, de acuerdo a la presión hidrostática, se pueden clasificar en: acuíferos libres, acuíferos cautivos o confinados y acuíferos semiconfinados.

##### **a. Acuíferos porosos**

Constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y, principalmente, arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente en formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidados (Collazo y Montaña, 2012).

##### **b. Acuíferos fisurados**

Formados por rocas duras de origen ígneo o metamórfico. La porosidad de estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y circular. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas (Collazo y Montaña, 2012).

##### **c. Acuíferos kársticos**

Compuestos por rocas de origen carbonático (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria, por disolución del carbonato. El agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que los acuíferos porosos y fracturados (Collazo y Montaña, 2012).

#### **d. Acuíferos libres**

Son aquellos en los que existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y, por lo tanto, a presión atmosférica. En éstos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forma una superficie real o freática (Custodio y Llamas, 1983).

#### **e. Acuíferos cautivos o confinados**

En los acuíferos confinados el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Por ello, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición (Custodio y Llamas, 1983).

#### **f. Acuíferos semiconfinados**

Pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos confinados, en los que el límite inferior y/o el superior, que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir un material que permita una filtración vertical del agua, muy lenta, que alimente el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo. Como es lógico, este paso vertical de agua sólo es posible cuando existe una diferencia de potencial entre ambos acuíferos (el que recarga y el recargado) y puede hacerse en uno u otro sentido, e incluso variar con el tiempo según sea la posición relativa de los niveles piezométricos de los mismos (Custodio y Llamas, 1983).

### **4.1.3. Propiedades hidrodinámicas**

#### **a. Conductividad hidráulica (K)**

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, es la constante de proporcionalidad en la Ley de Darcy. Se define como el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura fija y determinada. La conductividad hidráulica puede tener cualquier unidad de longitud/tiempo, por ejemplo, m/d (Kruseman y De Ridder, 1994).

### **b. Transmisividad (T)**

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica media por el espesor del acuífero. Es representativa de la capacidad que tiene un acuífero para ceder agua. Por tanto, la transmisividad es el caudal del flujo de agua que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente hidráulico unitario a una temperatura fija y determinada. Se designa por el símbolo  $KD$  o  $T$ . Tiene como dimensiones de (longitud/tiempo) x longitud, o lo mismo que decir longitud<sup>2</sup>/tiempo; viene expresado, por ejemplo, en m<sup>2</sup>/d (Kruseman y De Ridder, 1994).

### **c. Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S)**

El coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico vienen definidos ambos como el volumen de agua liberada o almacenada por unidad de superficie de acuífero, para un cambio de una unidad en la carga hidráulica perpendicular a la superficie. Ambos vienen definidos por el símbolo  $S$  y son adimensionales.

El coeficiente de almacenamiento está referido únicamente a las partes confinadas de un acuífero y depende de la elasticidad del material del acuífero y del fluido. Su orden de magnitud es de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$ .

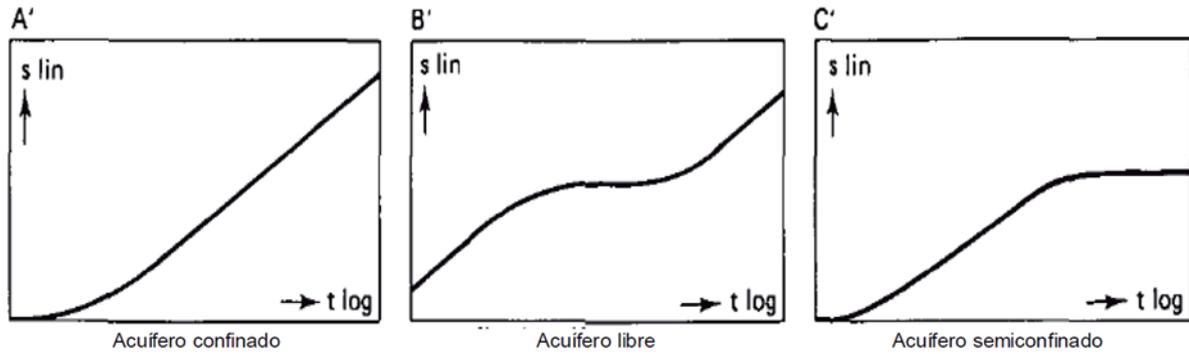
El rendimiento específico está relacionado con las zonas libres de un acuífero. En la práctica, se puede considerar igual a la porosidad efectiva o al espacio drenable ya que en acuíferos libres, los efectos de la elasticidad del material del acuífero y del fluido son generalmente despreciables.

Hay que tener en cuenta que los poros pequeños, no contribuyen al espacio poroso efectivo, ya que en ellos las fuerzas de retención son mayores que el peso del agua. Para arena el rendimiento específico es del orden de 0,1 a 0,2 (Kruseman y De Ridder, 1994).

#### **4.1.4. Abatimiento en los acuíferos**

La Figura 1 muestra las relaciones teóricas de tiempo-abatimiento en pozos localizados en acuíferos confinados, libres y semiconfinados. En la parte A', se observa que la relación tiempo-abatimiento no es lineal, no obstante, con el transcurrir del tiempo la curva se linealiza, caracterizando al acuífero como confinado. La parte B' muestra la curva de tiempo-abatimiento de un acuífero libre, homogéneo e isotrópico, donde el abatimiento en un periodo inicial sigue el comportamiento de un acuífero confinado, pasando por un periodo intermedio de bombeo, donde se observa un segmento plano que refleja la recarga del

acuífero superpuesto, menos permeable que estabiliza el abatimiento, finalizando con un descenso debido al drenaje del acuífero. La parte C' muestra la curva de un acuífero semiconfinado con periodo inicial de abatimiento continuo hasta lograr su estabilización y aporte del acuitardo hacia dicho acuífero (Kruseman y De Ridder, 1994).



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

FUENTE: Adaptado de Kruseman y De Ridder (1994).

#### 4.1.5. Prueba de bombeo

##### a. Prueba de rendimiento o prueba de bombeos escalonados

Villanueva e Iglesias (1984) señalan que, el método de bombeos escalonados (caudal variable) es el más usual para el cálculo de los coeficientes de la fórmula general de abatimiento:

$$s = BQ + C Q^n \quad (1)$$

Introducidos los valores de un bombeo (Q y s) en la fórmula general, son tres las incógnitas a conocer: B, C y n, siendo necesario, al menos, una terna de valores para poder resolver el sistema:

$$\begin{aligned} s_1 &= BQ_1 + CQ_1^n \\ s_2 &= BQ_2 + CQ_2^n \\ s_3 &= BQ_3 + CQ_3^n \end{aligned} \quad (2)$$

Esta terna de valores se obtendrá a partir de tres bombeos realizados con diferentes caudales y, de ser posible, de la misma duración. Para mayor seguridad conviene realizar cuatro o más bombeos ante la posibilidad de producirse anomalías en alguno de ellos, eliminando aquellos resultados que no se ajusten a la alineación definida por los demás. Los caudales de bombeo serán crecientes, guardando una cierta relación entre ellos. No conviene realizar incremento de caudales muy dispares, ya que puede pasarse de un régimen laminar a otro turbulento al aumentar excesivamente el caudal entre los mismos, haciendo inviable la aplicación del método por variar el valor de  $n$  entre un caudal y el siguiente. La duración del bombeo escalonado puede ser distinta según el comportamiento de cada pozo.

El mecanismo operativo consistiría en lograr la estabilización de los niveles por cada uno de los caudales. Sin embargo, este régimen estacionario no suele conseguirse con facilidad en la mayoría de las ocasiones, y su intento puede conducir a bombeos largos con costos no justificados, ya que puede llegarse a los mismos resultados con escalones de una o dos horas.

#### 4.1.6. Métodos de análisis de la prueba de rendimiento

##### a. Método Analítico

Villanueva e Iglesias (1984) señalan que, en el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} s_1/Q_1 &= B + CQ_1^{n-1} \\ s_2/Q_2 &= B + CQ_2^{n-1} \\ s_3/Q_3 &= B + CQ_3^{n-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Eliminando  $B$  y  $C$ , se tiene:

$$\frac{\frac{s_2}{Q_2} - \frac{s_1}{Q_1}}{\frac{s_3}{Q_3} - \frac{s_2}{Q_2}} = \frac{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}} \quad (4)$$

Bastará ensayar con distintos valores de  $n$ . Hasta encontrar el que mejor cumpla a igualdad establecida anteriormente. Con el valor de  $n$  obtenido pueden calcularse, por sustitución  $B$  y  $C$ .

### **b. Eficiencia hidráulica del pozo**

En base a la determinación de la ecuación del abatimiento del pozo, la eficiencia hidráulica se determina relacionando el abatimiento debido a las características de la formación con el abatimiento total, según la siguiente expresión:

$$EH = BQ / (BQ + CQ^n) \quad (5)$$

### **c. Caudal específico del pozo**

Según Custodio y Llamas (1983), es el rendimiento del pozo por cada unidad de descenso del nivel del agua en el pozo y está representado por la siguiente expresión:

$$\text{Caudal Específico} = Q / s \quad (6)$$

Si el caudal está en l/s y el abatimiento total en m, el caudal específico se expresa en l/s/m. Si se dispone de información histórica de medidas del caudal y niveles de agua (estático y dinámico) las variaciones del caudal específico proporcionan indicios de presencia de pérdidas de carga en el pozo atribuibles a la obstrucción de las aberturas de los filtros; lo que permite efectuar mantenimientos oportunos del pozo.

Así mismo, este parámetro permite definir si la disminución del caudal se debe a problemas del pozo y/ o a su equipo de bombeo. Si la disminución del caudal va acompañada de una profundización del nivel dinámico indica problemas en la captación del pozo; mientras que, si a tal disminución del caudal corresponde también una disminución de la profundidad del nivel dinámico, la causa se atribuye a problemas en el equipo de bombeo. Es una importante herramienta para programar y ejecutar programas de mantenimientos, rehabilitación de pozos y reparación o renovación de los equipos de bombeo.

### **d. Estimación de propiedades hidrodinámicas**

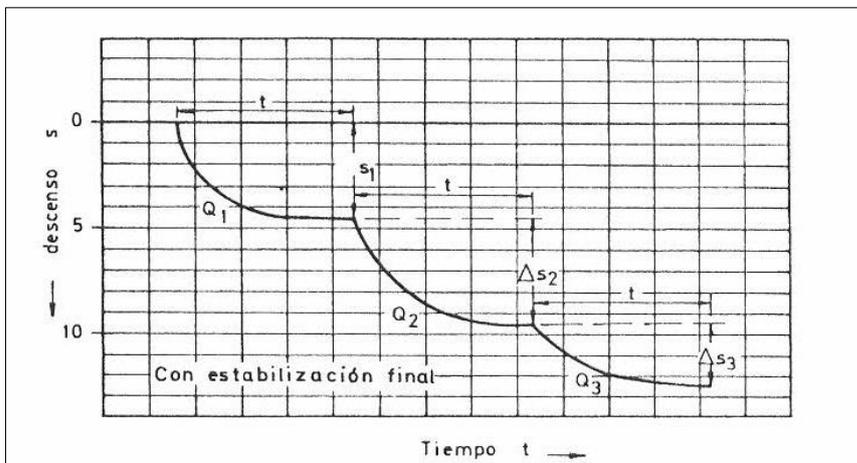
Según Custodio y Llamas (1983), el descenso provocado en el pozo de bombeo producto del primer escalón a caudal  $Q_1$  es  $s_1$  y su obtención es inmediata. El segundo escalón, se ha provocado un descenso de  $\Delta s_2$  producto del incremento de caudal  $Q_2 - Q_1$ , por lo que el descenso correspondiente al caudal  $Q_2$  será:

$$s_2 = s_1 + \Delta s_2 \quad (7)$$

y el correspondiente al caudal  $Q_3$  será:

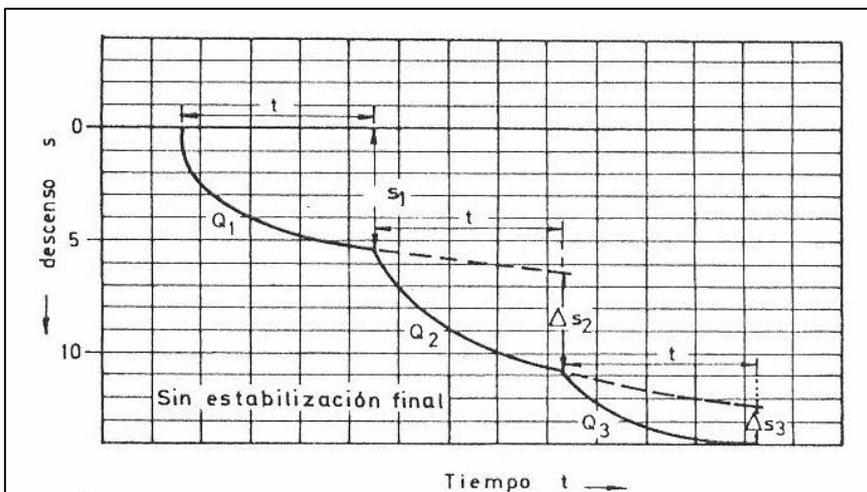
$$s_3 = s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 \quad (8)$$

Si al término de cada escalón los niveles están prácticamente estabilizados, no hay dificultad en leer los valores  $\Delta s_2$  y  $\Delta s_3$  (Ver Figura 2). No obstante, es frecuente que al final de esos escalones no se haya alcanzado ninguna estabilización. Entonces debe medirse  $\Delta s_2$  a partir de la extrapolación de los descensos correspondientes al segundo escalón (Ver Figura 3).



**Figura 2: Prueba de rendimiento con estabilización de niveles**

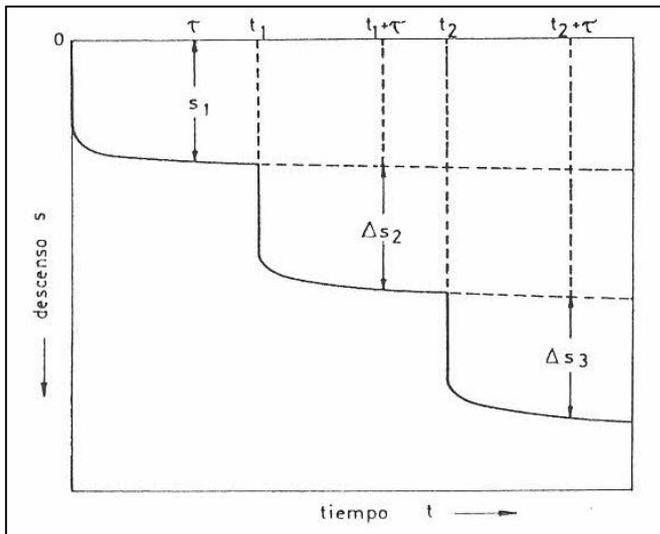
Fuente: Custodio y Llamas (1983)



**Figura 3: Prueba de rendimiento sin estabilización de niveles**

Fuente: Custodio y Llamas (1983)

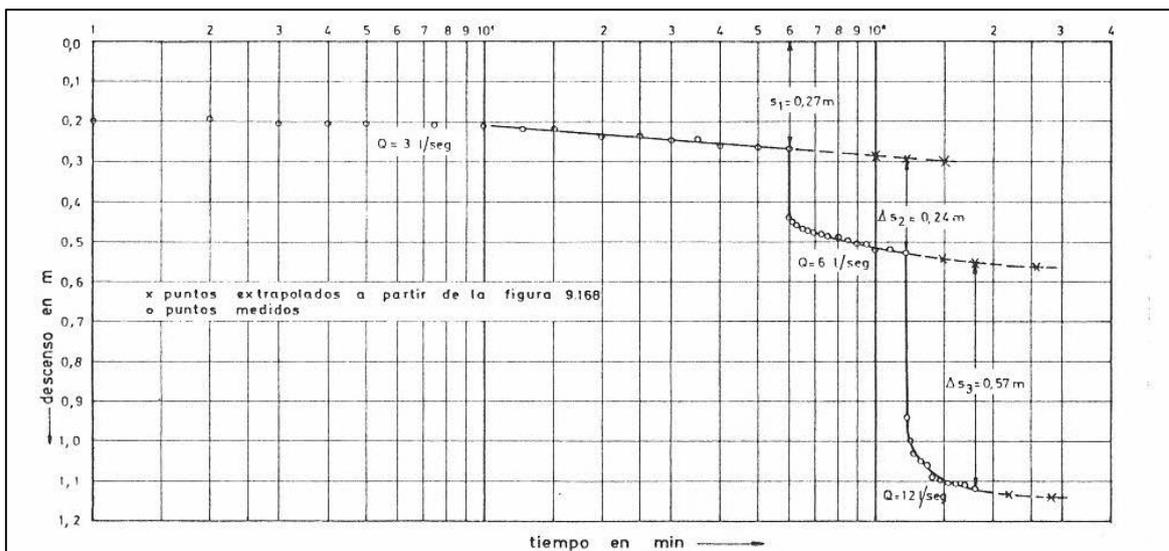
No es necesario que la duración de cada escalón sea igual al tiempo de referencia, basta con leer los descensos en el momento correspondiente (Ver Figura 4).



**Figura 4: Prueba de rendimiento con escalones de desigual duración**

Fuente: Custodio y Llamas (1983)

Para tener mayor precisión en las extrapolaciones, se dibujan los descensos en escala lineal y los tiempos, contados desde el inicio de la prueba, en escala logarítmica (Ver Figura 5), aunque ello supone que los datos del último escalón queden representados en poco espacio. Si bien, no siempre es necesario, la extrapolación puede hacerse con más garantía si se dibujan los descensos tomando para cada escalón (Ver Figura 3) y así sucesivamente en caso de tener más escalones.



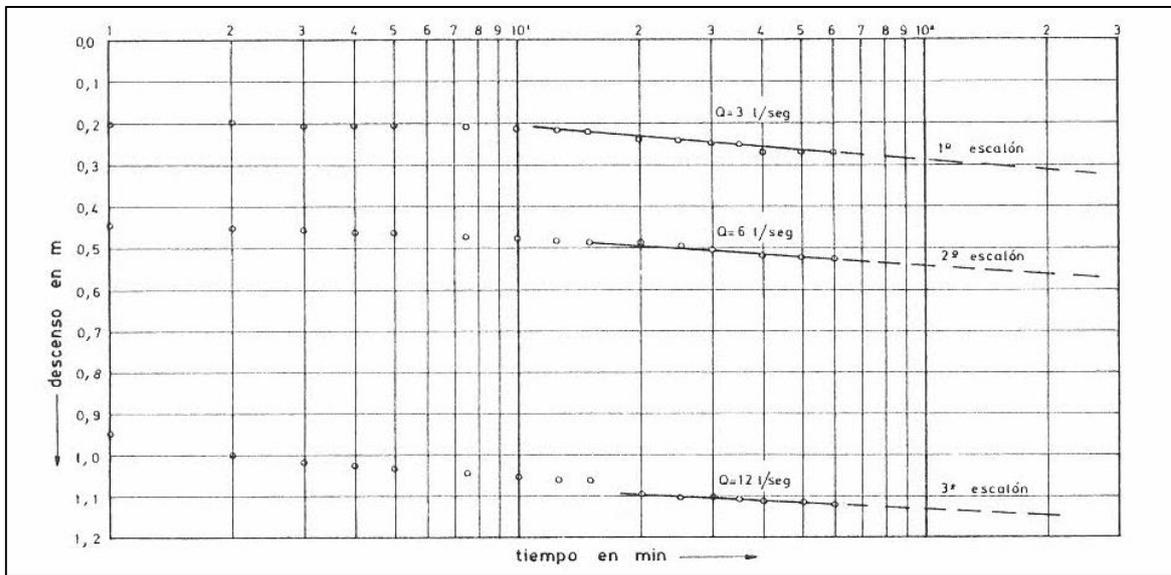
**Figura 5: Prueba de rendimiento real con extrapolación**

Fuente: Custodio y Llamas (1983)

En general, las porciones extrapoladas son cada vez más pendientes, y no corresponden teóricamente a una recta. Los errores en las extrapolaciones pueden afectar notablemente los resultados obtenidos. La extrapolación dibujando un gráfico extenso (Ver Figura 6) para cada escalón da más garantía. Obtenidas las pendientes de la recta se emplea la fórmula:

$$T = \frac{2,3*Q}{4\pi(\Delta s)} \quad (9)$$

Obtenidas las transmisividades para cada escalón se establece un orden de magnitud en un rango determinado.



**Figura 6: Datos de la prueba de rendimiento de la figura 5 referidos al mismo origen**

Fuente: Custodio y Llamas (1983)

#### 4.1.7. Prueba de verticalidad

Para determinar cuánto se ha desviado un pozo de la vertical y en qué magnitud se desplaza éste de una línea recta, se aplican métodos especiales para cuantificar estas desviaciones, siendo posible medir tanto la desviación de la vertical, como la rectitud o alineación mediante el uso de una plomada testigo especialmente diseñada a tal efecto, así mismo se puede investigar cualquier colapso o aplastamiento del pozo y a qué profundidad se encuentra.

Aunque puede instalarse en un pozo que sea recto, cualquier tipo de bomba, cuando la

desviación de la vertical es mucha, se puede afectar la operación y acortar la duración de la bomba de turbina, por esta razón la verticalidad del pozo no debe exceder de 0,15 m por cada 50 m de profundidad, según especificaciones de SEDAPAL.

Se aplica la siguiente relación:

$$DS = (h+H)/h*ds \quad (7)$$

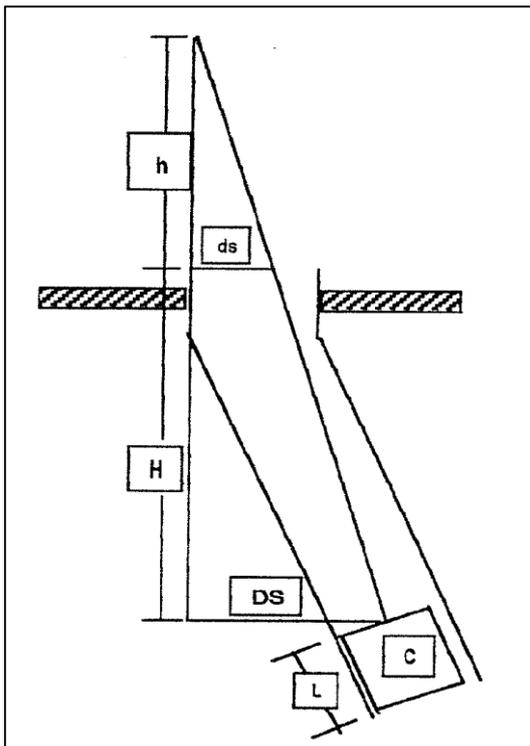
C: diámetro exterior del calibrador

L: longitud del calibrador

H: profundidad del pozo

h: altura del trípode

Profundidad alcanzada por el fondo del calibrador



**Figura 7: Esquema de la verticalidad de un pozo**

Fuente: Memoria descriptiva de la obra Perforación de cuatro pozos tubulares para el aprovechamiento de las aguas subterráneas del río Chillón, distrito Carabaylo.

## 4.2. Metodología del trabajo ejecutado

### 4.2.1. Ubicación

QUIMPAC S.A., se ubica en la Av. Néstor Gambeta N° 8585, urbanización Oquendo, Callao-Perú. El pozo tubular QR-05A se encuentra dentro de las instalaciones de la planta N° 2. Políticamente está en el departamento de Lima, provincia Constitucional del Callao, distrito Callao (Ver ANEXO 1).

Geográficamente el pozo QR-05A se ubica en las siguientes coordenadas UTM:

Este: 268 065 m; Norte: 8 675 347 m; Altitud: 8 m.s.n.m. (Datum WGS-84); 18L Sur

### 4.2.2. Vías de acceso

El acceso, se realiza a través de la avenida Néstor Gambeta 8585, urbanización Oquendo, Callao - Perú (dentro de las instalaciones de la Planta N° 2 de Quimpac).



**Figura 8: Vías de acceso al pozo QR-05A**

### 4.2.3. Inducción de seguridad y salud ocupacional

Dentro de las Políticas del Sistema de Gestión Integrado de QUIMPAC S.A., conformado por los sistemas de: calidad, inocuidad, medio ambiente, seguridad y salud ocupacional, seguridad portuaria y seguridad de la cadena de suministro del comercio internacional. La capacitación en el sistema de seguridad y salud ocupacional, ha sido un requisito indispensable para el inicio de labores dentro de las instalaciones de la empresa, la cual debe

ser aprobada obligatoriamente. Por ello, la empresa asignó un día para que el personal ejecutor de los trabajos asista a sus instalaciones a recibir dicha capacitación.

Los objetivos de la inducción han sido los siguientes:

- Brindar los lineamientos básicos para prevenir accidentes de trabajo.
- Identificar los actos y condiciones sub estándar como origen de los accidentes.
- Conocer las normas generales de seguridad y salud ocupacional aplicables al trabajo.
- Identificar los documentos obligatorios para realizar los trabajos en la planta.
- Conocer los estándares para trabajos de alto riesgo.
- Conocer las acciones a tomar en caso de emergencia.
- Describir la correcta disposición de residuos sólidos.
- Conocer las sanciones por incumplimiento de las normas.



**Figura 9: Identificación de actos sub estándares**

#### **4.2.4. Charla de cinco minutos**

Previo al inicio de los trabajos dentro de la planta, se llevó diariamente una charla de cinco minutos a cargo del ingeniero supervisor de Seguridad y Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SSOMA), en la cual, de manera práctica resumió los temas más relevantes de la inducción como: identificación de peligros, riesgos, acciones a tomar frente a un accidente o incidente, entre otros. Además, del reporte del personal en una ficha donde se registró el cumplimiento de los equipos de protección personal como: zapatos punta de acero, lentes, casco, guantes, chalecos reflectores, respiradores y protectores auditivos (Ver Figura 10).



**Figura 10: Profesional SSOMA verificando cumplimiento y uso de EPP**

#### **4.2.5. Materiales y herramientas**

Durante la ejecución de las pruebas de bombeo del pozo se utilizaron los siguientes materiales y herramientas.

- Cuerpo de bomba de 3" x 09 impulsores marca Pedrollo.
- 60 metros de tubería de impulsión de PVC de alta densidad de 03" de diámetro (Ver Figura 11).
- Linterna de descarga de 03".
- Equipo de izaje.
- 02 sondas eléctricas de 150 m para medir niveles, marca Solinst.
- Abrazaderas.
- Tubería de acero de 4" con rosca.
- Llave de cadenas.
- Caudalímetro, marca McCROMETER.
- 60 metros de Tubería guía de PVC de 1", para introducir sonda eléctrica.
- 60 metros de mangas de polietileno.
- 01 multiparámetro marca Hanna para monitoreo calidad del agua (CE, TDS, pH y temperatura).
- Cronómetro y formatos para registro de la prueba de rendimiento y acuífero.
- Herramientas para montaje y desmontaje de sistema de bombeo (Abrazaderas, elevadores, llaves, etc).
- Cintillos de seguridad de plástico.
- Motobomba YAMAHA (Ver Figura 12).



**Figura 11: Tubería de PVC de alta densidad de 3" de diámetro**



**Figura 12: Motobomba Yamaha**

#### **4.2.6. Características técnicas del equipo de bombeo**

La electrobomba sumergible es una bomba que se sumerge en el agua, que contiene uno o varios impulsores sellados dentro de su carcasa, que permite bombear el agua en el que se encuentra sumergida hacia el exterior (Ver Figura 13). Por otro lado, la instalación del tablero de control (variador de frecuencia) regula la velocidad de los motores eléctricos permitiendo el incremento o disminución de los caudales.

##### **a. Tablero de control**

- Variador de frecuencia (30-60 Hz), Marca SENSORELESS VECTOR TYPE YX2000/3000/3300, con botoneras de encendido y parada, así como diversos

controles de seguridad y alarmas de nivel.

**b. Electrobomba sumergible**

- Motor eléctrico: Trifásico 380 V - 60 Hz
- Marca: Pedrollo
- Diámetro de descarga: 3"
- Modelo: 6SR225G/250-HYD
- Caudal: 17,05 l/s - 225 U.S. gpm
- ADT: 55m
- Potencial: 25Hp / 18,5 kW
- Frecuencia: 60 Hz / 3450 rpm
- Cuerpo de impulsión: Hierro fundido niquelado
- Válvula de Retención: Acero Inoxidable AISI 304
- Soporte: Hierro fundido niquelado
- Rodetes: Noryl FE1520PW y cubiertas de goma especial
- Difusores: Noryl FE1520PW
- Caja porta difusor: Acero inoxidable AISI 304
- Eje bomba: Acero inoxidable AISI 304
- Rodamientos bomba: Parte fija elastómero especial y rotatoria en acero.
- Casquillo: Acero inoxidable AISI 420
- Filtro: Acero inoxidable AISI 304
- Protector cable: Acero inoxidable AISI 304



**Figura 13: Electrobomba sumergible Pedrollo (25 HP)**

#### 4.2.7. Perfil litológico del pozo tubular

El pozo QR-05A, tiene la siguiente conformación litológica (Ver Tabla 1 y ANEXO 2).

**Tabla 1: Perfil litológico del pozo QR-05A**

Profundidad de .... m a .... m		Descripción Litológica
0,00	3,00	Material de relleno con arcilla limosa en buena cantidad
3,00	4,10	Piedra chacada de relleno
4,10	6,90	Arena fina salobre
6,90	13,00	Arena fina y arcilla
13,00	15,10	Cantos rodados medianos y grandes con poca arena
15,10	16,00	Arena fina
16,00	17,60	Cantos rodados medianos y grandes
17,60	20,20	Arena fina con poca arcilla
20,20	23,80	Cantos rodados medianos y chicos subredondeados
23,80	27,60	Arcilla arenosa y pocos rodados chicos
27,60	28,40	Cantos rodados subredondeados
28,40	29,40	Arena gruesa
29,40	30,90	Cantos rodados medianos y poca arena
30,90	37,70	Cantos rodados medianos y chicos intrusivos, rodados grandes
37,70	40,70	Arena arcillosa y cantos rodados medianos y chicos
40,70	41,50	Arena arcillosa
41,50	43,90	Arena arcillosa y cantos rodados medianos
43,90	49,40	Cantos rodados de diversos tamaños con poca arena y poca arcilla
49,40	56,30	Cantos rodados medianos y chicos en arena compactada
56,30	58,60	Cantos rodados grandes y medianos algo compactados
58,60	60,00	Arena arcillosa con rodados medianos algo compactados

#### 4.2.8. Características constructivas y diseño técnico del pozo tubular

La empresa proporcionó el diseño técnico del pozo QR-05A, este tiene una profundidad de 62,65 m. Los primeros 40 m con un diámetro de 26” y a partir de los 40 m hasta los 62,65 m con un diámetro de 19”. El pozo se encuentra revestido con tubería ciega de PVC de 14” de diámetro y 6 mm de espesor, de los +0,30 hasta los 40,85 m de profundidad. La tubería filtro tipo ranurada de fábrica de PVC de 14” de diámetro y 6 mm de espesor está de los 40,85 hasta los 59,65 m de profundidad (Ver Figura 14). El último tramo de tubería ciega de 14” de diámetro y 6 mm de espesor, va de los 59,65 a 62,65 m de profundidad (Ver Tabla 2 y ANEXO 3).

**Tabla 2: Diseño técnico del pozo QR-05A**

Pozo	Profundidad de la perforación (m)	Longitud del entubado (m)	Díametro (pulg)	Entubado					
				Tubería ciega		Tubería Filtro			
				Longitud (m)	Material	Tipo	Longitud (m)	Material	Ubicación de filtros de ... m a ... m
QR-05A	62,65	62,00	14,00	43,20	PVC	Ranurado	18,80	PVC	40.85 - 59.65



**Figura 14: Tubería filtro ranurada de PVC**

#### **4.2.9. Aspectos a considerar previo a la prueba de bombeo**

Antes de iniciar la prueba se verificó y coordinó lo siguiente:

- Evacuación del agua bombeada
- Cese del funcionamiento de pozos cercanos
- Instalación del flujómetro
- Instalación del analizador Rossum (contenido de arenas)
- Instalación de la tubería guía (medición de niveles del agua)
- Medición del nivel estático y profundidad del pozo
- Polaridad de la bomba para el giro correcto de los impulsores
- Aprovechamiento de agua destilada para el lavado del sensor de la sonda eléctrica (control de niveles) y multiparámetro (medidor de parámetros físico químicos in situ)

Por consiguiente, se concertó con el ingeniero responsable de la fábrica una fecha donde la ejecución de las pruebas se desarrolle de manera continua sin interrupciones.

La prueba de bombeo se realizó con una electrobomba sumergible marca Pedrollo, con capacidad de 17 l/s, motor de 25 HP y canastilla de la bomba instalada a 55,00 m de profundidad. Para la evacuación del agua, se usó la poza de lodos impermeabilizada de aproximadamente 27 m<sup>3</sup> de capacidad como poza de rebombeo (Ver Figura 15), y de esta, se evacuó el agua a una cisterna subterránea de 360 m<sup>3</sup> ubicada a 30 m del pozo.



**Figura 15: Poza de rebombeo**

#### **4.2.10. Sobrebombeo (desarrollo del pozo)**

Previo a la prueba de rendimiento, se realizó un sobrebombeo para lograr la estabilización de los niveles, evacuación de arenas y partículas finas.

Consiste en la estimulación del acuífero por bombeo, a caudales similares o mayores a los previstos según la información de los pozos similares del sector en su etapa de operación.

La canastilla de la electrobomba sumergible (Pedrollo, 25 HP) fué instalada a 55,00 m de profundidad con un variador de frecuencia (permite la variación del caudal).

En esta etapa de sobrebombeo, se empezó a un caudal bajo y se fue incrementando progresivamente. Se inició a un caudal de 5,00 l/s hasta los 15,00 l/s, el agua bombeada salió clara y cristalina con trazas de sedimentos al inicio del incremento de los caudales (Ver Figura 16). Se ejecutó un total de 8 horas de sobrebombeo el 14 de abril del 2018.



**Figura 16: Agua cristalina al final del sobrebombeo**

#### **4.2.11. Prueba de rendimiento**

De acuerdo al programa de trabajo y coordinaciones efectuadas con el representante de la empresa Quimpac S.A., se realizó la prueba de rendimiento el 15 de abril del 2018, obteniendo los siguientes resultados.

Primer escalón, hora de inicio, 09:00 horas, caudal de bombeo de 2,00 l/s a 17 Hz de frecuencia, con un nivel estático respecto al suelo (NE/S) de 7,24 m y nivel dinámico respecto al suelo (ND/S) de 13,40 m, con tiempo de bombeo de 3,50 horas.

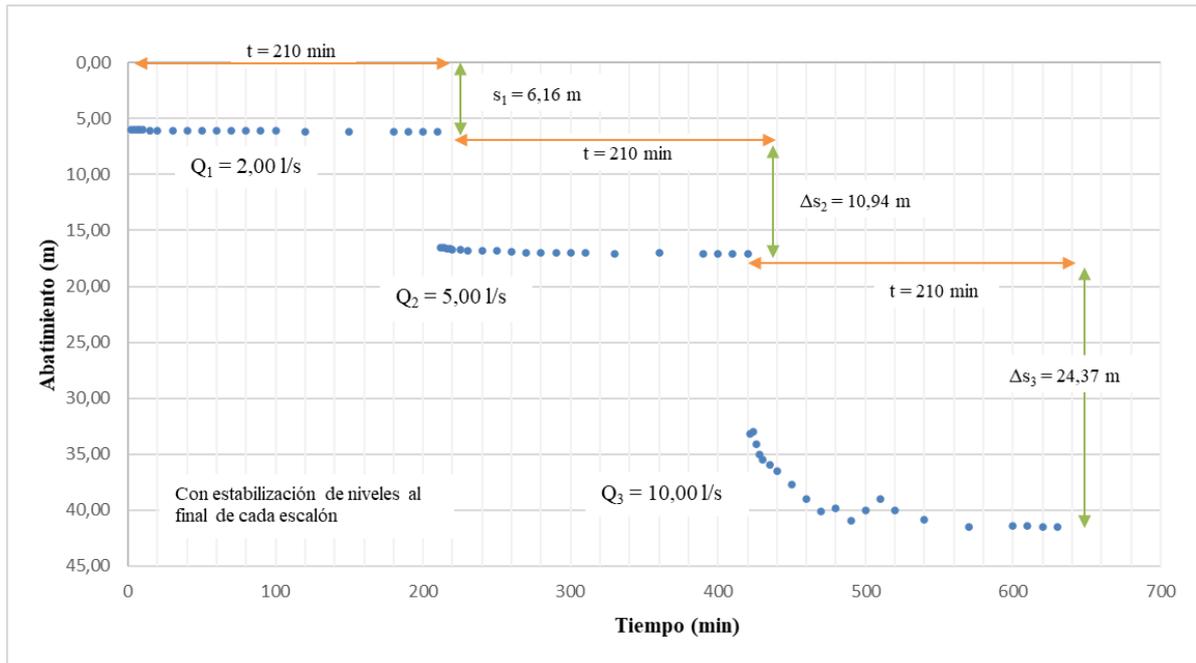
Segundo escalón, hora de inicio, 12:30 horas, caudal de bombeo de 5,00 l/s a 33 Hz de frecuencia y un ND/S de 24,34 m, con tiempo de bombeo de 3,50 horas.

Tercer escalón, hora de inicio, 16:00 horas, caudal de bombeo de 10,00 l/s a 49 Hz de frecuencia y un ND/S de 48,71 m, con tiempo de bombeo de 3,50 horas.

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 10,50 horas logrando la estabilización de los niveles al término de cada escalón (Ver Tabla 3 y Figura 17).

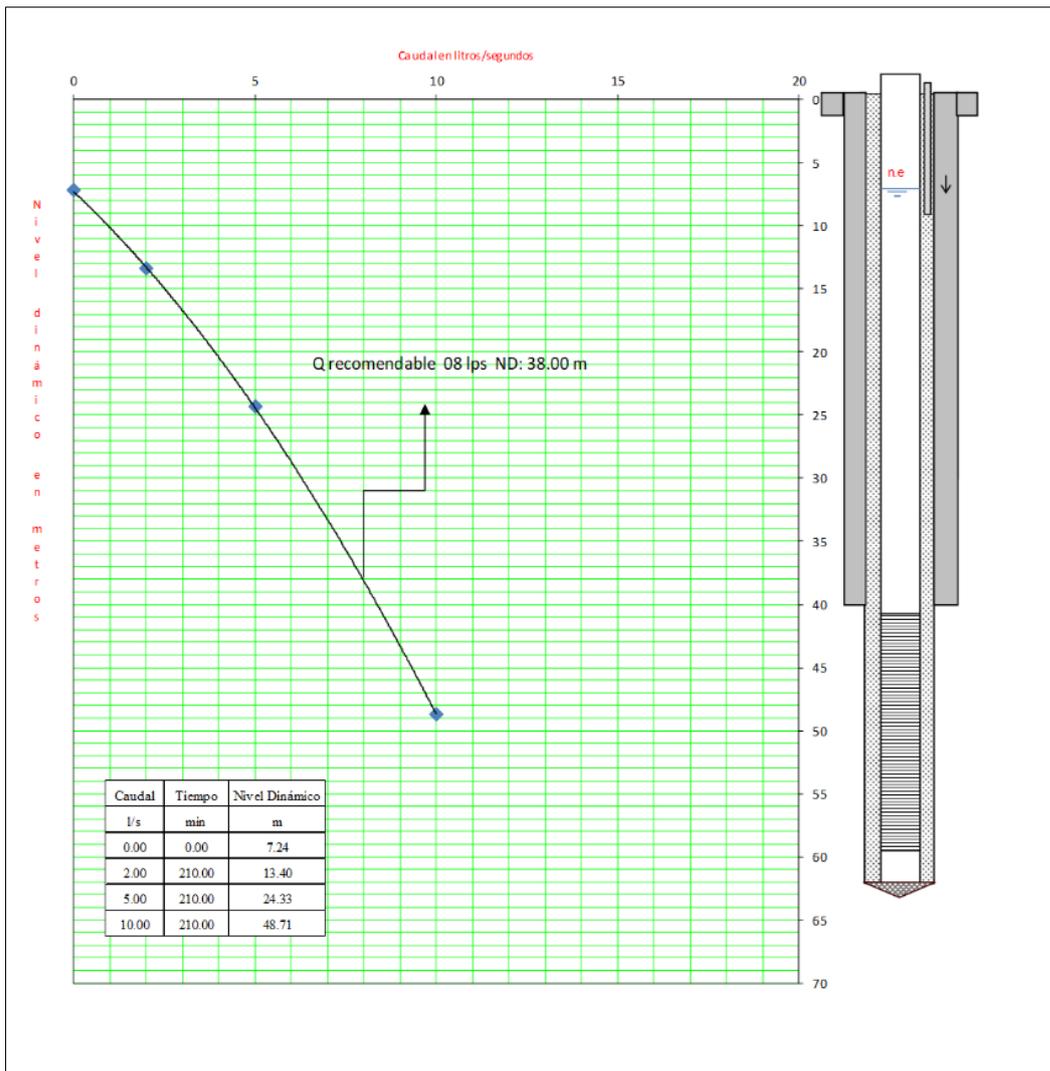
**Tabla 3: Resultados de la prueba de rendimiento del pozo QR-05A**

Escalón	Caudal Q		Tiempo (min)	NE/S (m)	ND/S (m)	Abatimiento s (m)	Caudal Específico
	(m <sup>3</sup> /s)	(l/s)					Q/s (l/s/m)
				7,24			
I	0,002	2,00	210		13,40	6,16	0,32
II	0,005	5,00	210		24,34	17,10	0,29
III	0,010	10,00	210		48,71	41,47	0,24



**Figura 17: Prueba de rendimiento del pozo QR-05A**

De los resultados obtenidos en campo se graficó la curva de rendimiento del pozo QR-05A, en la cual se observa que, a una profundidad de bomba de 55,00 m, el ND/S correspondiente al tercer, se estabiliza a los 48,71 m de profundidad dejando en desuso 7,86 m de tubería filtro (Ver ANEXO 4). Por ello, es recomendable explotar el pozo a un caudal donde se aproveche la mayor parte de filtros (Ver Figura 18). Además, se ha obtenido caudales específicos de 0,32, 0,29 y 0,24 l/s/m; que servirán de referencia para la programación de mantenimientos, ya que indica la producción por metro lineal, y de esta se concluye si existe obstrucciones en los filtros o problemas con el equipo de bombeo (Ver Tabla 3).



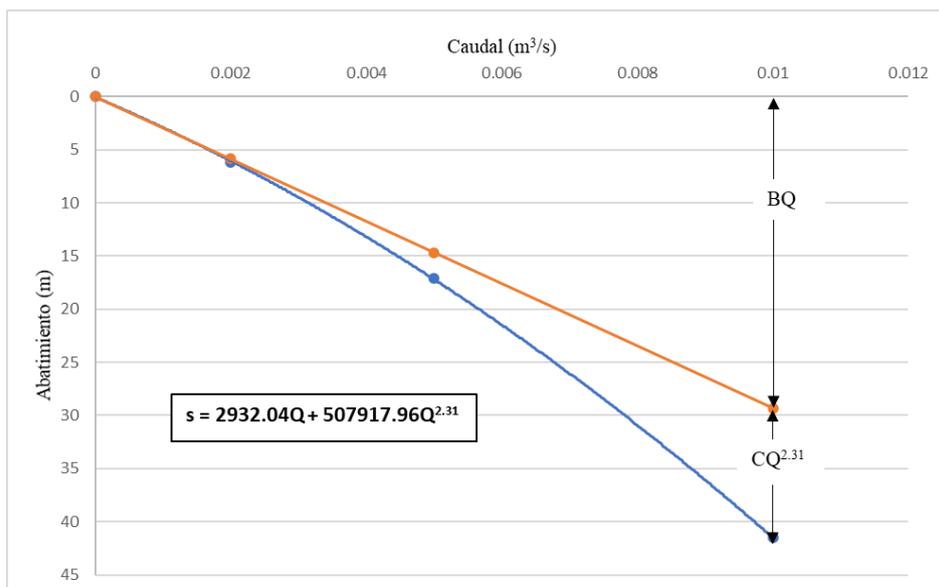
**Figura 18: Curva característica del pozo QR-05A**

**a. Ecuación de abatimiento del pozo**

Esta ecuación permite estimar el abatimiento en función del caudal. Las unidades del caudal (Q) deben estar en m<sup>3</sup>/s y el abatimiento (s), en metros.

Para determinar dicha ecuación ( $s = BQ + CQ^n$ ), se empleó el método analítico para el cálculo del “n”, siendo este **2,31** (Ver ANEXO 4). Así mismo, se obtuvo los valores de 2932,04 s/m<sup>2</sup> y 507917,96 s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup> correspondientes a B y C. En consecuencia, la ecuación de abatimiento es la siguiente:  $s = 2932.04Q + 507917.96Q^{2.31}$ .

Esta ecuación se representa gráficamente como la sumatoria de las pérdidas de cargas debido a la formación geológica (BQ) y debido al pozo (CQ<sup>2,31</sup>). Ver Figura 19 y Tabla 4.



**Figura 19: Ecuación de abatimiento del pozo QR-05A**

**b. Eficiencia hidráulica**

De la ecuación de abatimiento del pozo se obtuvo la eficiencia hidráulica, esta se calculó relacionando las pérdidas de carga debidas a la formación (BQ) con el abatimiento total (BQ + CQ<sup>n</sup>), según la siguiente expresión:  $EH = BQ / (BQ + CQ^n)$ .

La eficiencia hidráulica del pozo QR-05A para el primer escalón fue de 95,20%; para el segundo 85,65%; y, para el tercero, 70,64% (Ver Tabla 4). Estos valores indican que el diseño de los filtros ha sido correcto y que las aberturas de los filtros no están obturadas por el lodo de perforación usado en la etapa constructiva del pozo.

**Tabla 4: Eficiencia hidráulica del pozo QR-05A**

Escalón	Caudal Q (m³/s)	Pérdidas de Carga		Abatimiento s (m)	Eficiencia Hidráulica BQ / (BQ + CQ <sup>2.31</sup> ) (%)
		Formación BQ (m)	Pozo CQ <sup>2.31</sup> (m)		
I	0,002	5,86	0,30	6,16	95,20
II	0,005	14,66	2,46	17,12	85,65
III	0,010	29,32	12,18	41,50	70,64

### c. Variación de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua subterránea durante la ejecución de la prueba, permitió registrar la variación de los parámetros físico químicos en el tiempo. Se procedió a medir los siguientes parámetros: potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (°C) y total de sólidos disueltos (TDS) con un multiparámetro digital marca Hanna Instruments modelo HI 98130.

En los tres escalones, respecto al pH, las aguas han sido clasificadas como ligeramente ácidas y la temperatura promedio fué de 24°C. La CE varió en 1,78% al pasar del primer al segundo escalón (16,81 a 16,56 mS/cm) y en 5,39% al pasar de 16,56 a 15,62 mS/cm, del segundo al tercer escalón, clasificándolas como aguas altamente salinas. Se observó que a mayor caudal de bombeo la conductividad eléctrica y el total de sólidos disueltos disminuyeron (Ver Tabla 5).

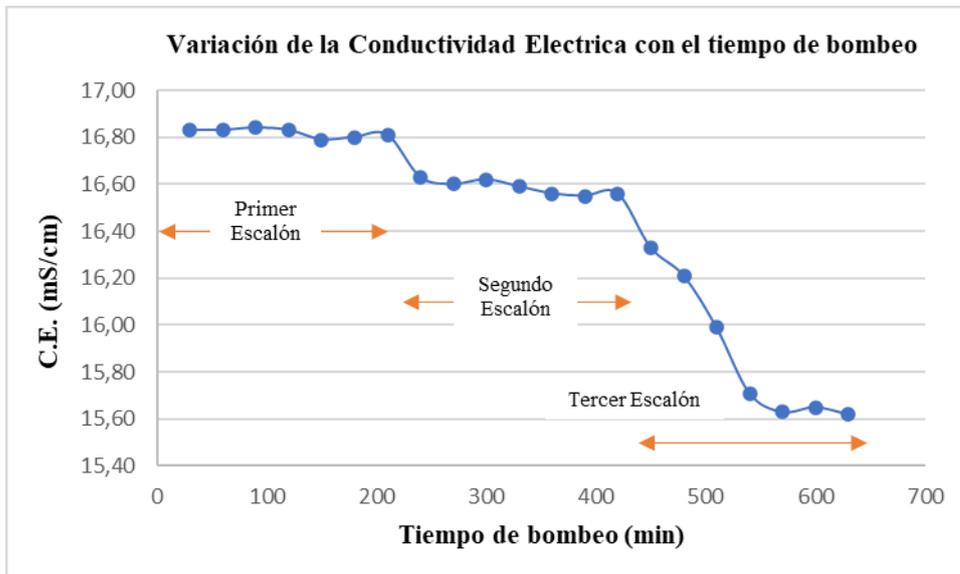
**Tabla 5: Calidad del agua *in situ* (prueba de rendimiento)**

Escalón	Parámetros			
	Potencial Hidrógeno pH (unidad de pH)	Conductividad Eléctrica C.E. (mS/cm)	Temperatura T (°C)	Total de Sólidos Disueltos TDS ppt
I	6,31	16,81	24,10	8,40
II	6,37	16,56	24,10	8,39
III	6,62	15,62	24,00	7,94



**Figura 20: Medida In-situ de los parámetros físico-químicos**

El registro de la conductividad eléctrica durante la prueba de rendimiento fue cada 30 minutos; por ello, la Figura 21 muestra la variación en el tiempo (630 minutos).



**Figura 21: Monitoreo de la conductividad eléctrica (durante prueba de rendimiento)**

#### d. Prueba de contenido de arenas con el analizador Rossum

Durante la prueba de rendimiento se procedió a medir la cantidad de arena extraída con ayuda de un analizador Rossum, el cual permitió calcular el contenido de arenas en ppm. Se programó medir el contenido de arena cada 30 min de bombeo (Ver Tabla 6 y Figura 22).

Para el primer escalón se obtuvo 0,00 ppm de arenas en el transcurso de 210 minutos de bombeo, para el segundo escalón el contenido de arenas fluctuó entre 0,35 y 6,16 ppm; y finalmente en el tercer escalón el contenido de arenas disminuyó de 1,40 a 0,00 ppm. Los valores del contenido de arenas para los tres escalones no exceden los límites máximos aceptables (1,00-15,00 ppm) según la *American Water Works Association (AWWA)*.

**Tabla 6: Resultados de la prueba de contenido de arena**

Caudal Q (l/s)	Volumen Vol. (ml)	Tiempo t (min)	$\Delta$ Volumen $\Delta$ Vol. ml	$\Delta$ Tiempo $\Delta$ t min	$\Delta$ Vol./ $\Delta$ t ml/min	ppm
0	0,000	0	0,00	0	0,00	0,00
2	0,200	30	0,20	30	0,01	3,52
2	0,200	60	0,00	30	0,00	0,00
2	0,200	90	0,00	30	0,00	0,00
2	0,200	120	0,00	30	0,00	0,00
2	0,200	150	0,00	30	0,00	0,00
2	0,200	180	0,00	30	0,00	0,00
2	0,200	210	0,00	30	0,00	0,00
5	0,350	240	0,350	30	0,012	6,164
5	0,370	270	0,020	30	0,001	0,352
5	0,400	300	0,030	30	0,001	0,528
5	0,500	330	0,100	30	0,003	1,761
5	0,530	360	0,030	30	0,001	0,528
5	0,660	390	0,130	30	0,004	2,290
5	0,720	420	0,060	30	0,002	1,057
10	0,800	450	0,030	30	0,001	0,528
10	0,850	480	0,050	30	0,002	0,881
10	0,930	510	0,080	30	0,003	1,409
10	0,958	540	0,028	30	0,001	0,493
10	0,960	570	0,002	30	0,000	0,035
10	0,980	600	0,020	30	0,001	0,352
10	0,980	630	0,000	30	0,000	0,000

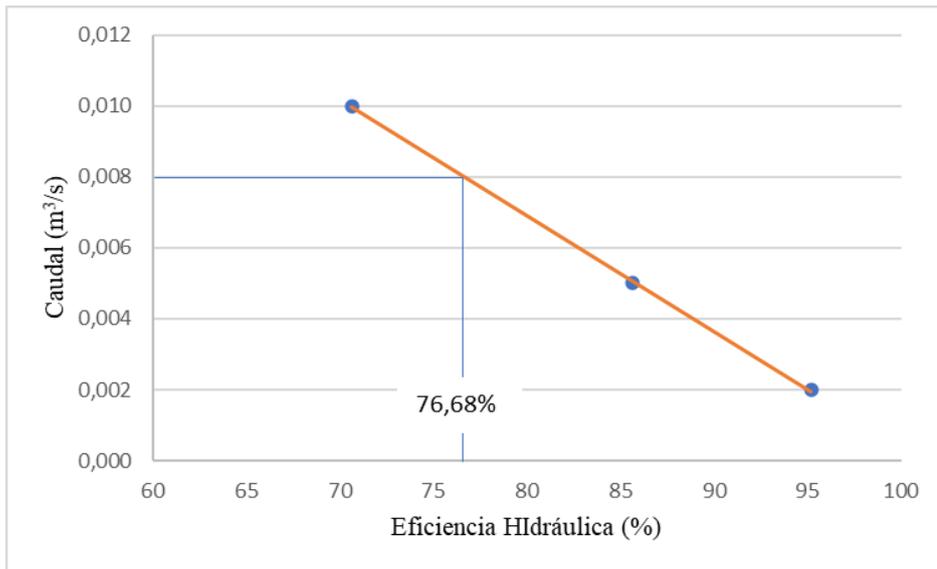


**Figura 22: Analizador Rossum**

**e. Caudal recomendable**

Se calculó el caudal recomendable teniendo en cuenta los siguientes criterios: mayor aprovechamiento de las tuberías filtro, sumergencia de la bomba, menor arrastre de arenas y material fino, menor conductividad eléctrica y una adecuada eficiencia hidráulica.

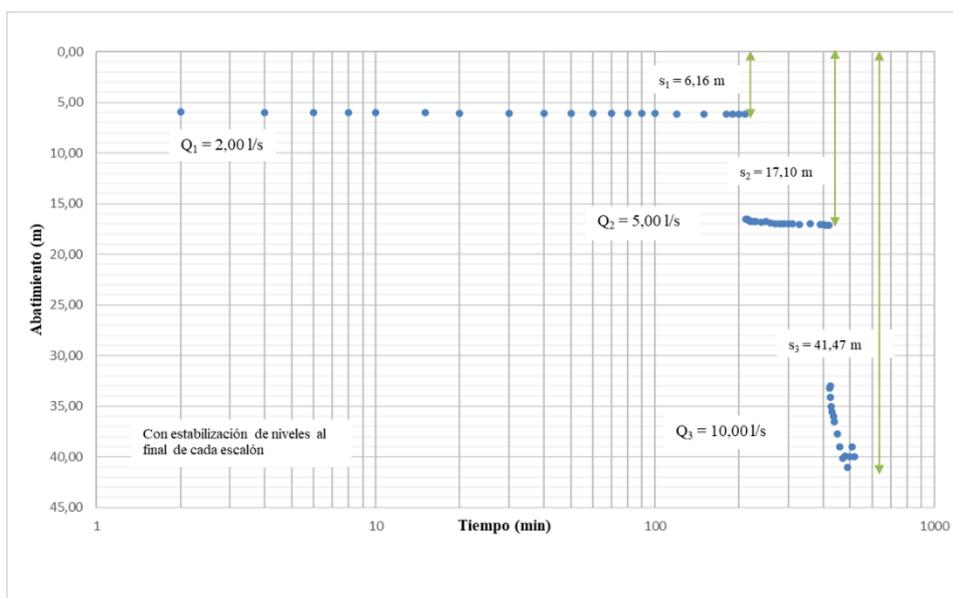
Por ello, para una profundidad de bomba de 55,00 m y un caudal recomendado de 8,00 l/s el nivel dinámico desciende hasta los 38,00 m de profundidad con una eficiencia hidráulica de 76,68% (Ver Figura 23), asegurando la sumergencia de la bomba en 17 m.



**Figura 23: Eficiencia hidráulica del pozo QR-05A**

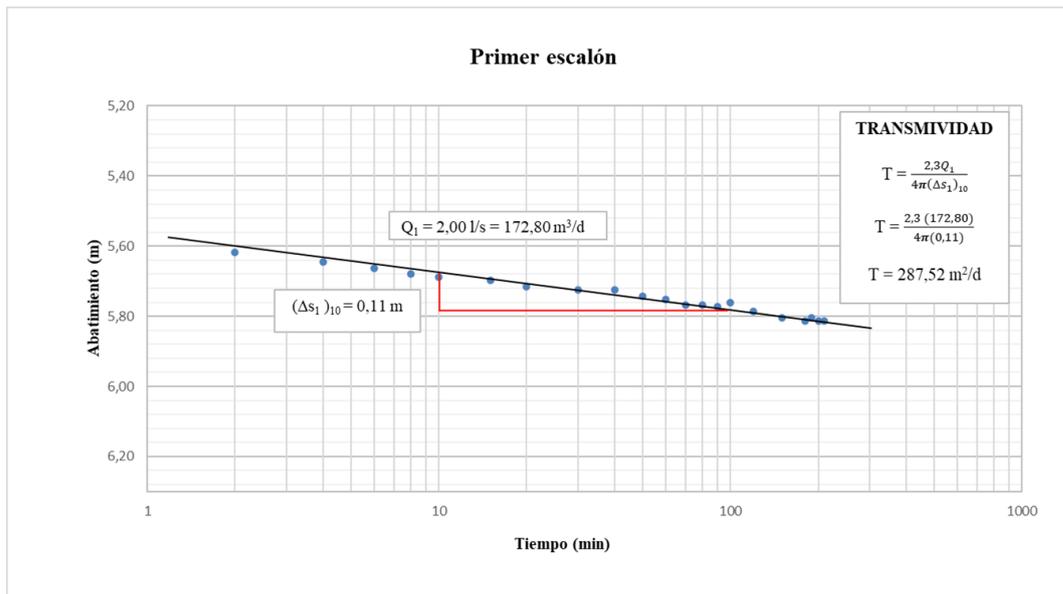
**f. Estimación de las propiedades hidrodinámica**

Las propiedades hidrodinámicas del acuífero explorado han sido estudiadas en base a la prueba de rendimiento. Se utilizó el método de Jacob con la corrección de Dupuit para acuíferos libre. La estabilización de los niveles al término de cada escalón permitió el análisis de los datos sin la extrapolación de los abatimientos. Los niveles en el tiempo han sido representados en un gráfico semilogarítmico con el objeto de calcular la variación del abatimiento en un ciclo (Ver Figura 24). Para una mejor visualización, los abatimientos de cada escalón han sido referidos al mismo origen (Ver Figuras 25, 26 y 27).



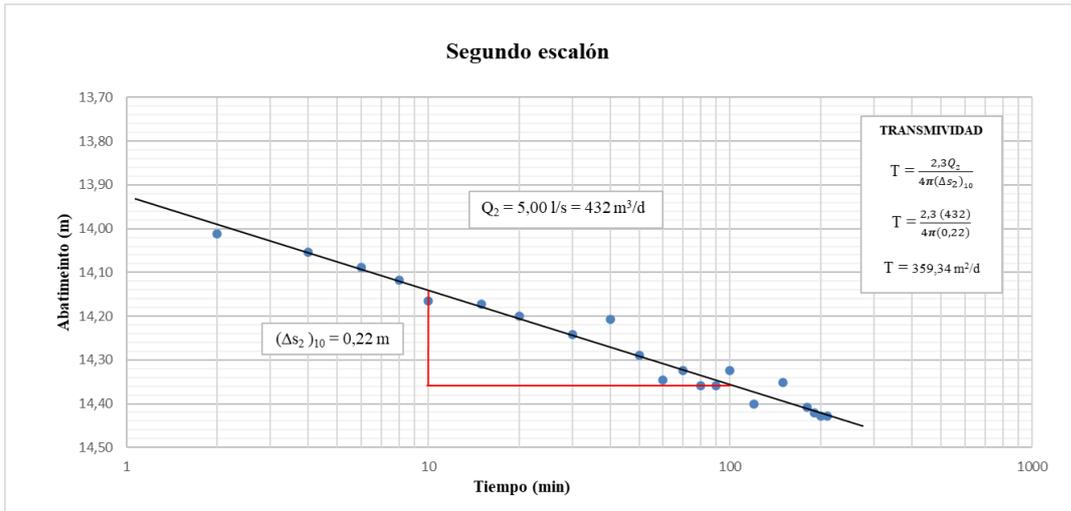
**Figura 24: Prueba de rendimiento (tiempo en escala logarítmica)**

Para el primer escalón de 210 minutos de bombeo, se obtuvo un nivel estabilizado de 13,40 m a partir de los últimos 30 minutos. Su representación en un gráfico semilogarítmico permitió calcular la variación del abatimiento en un ciclo, siendo este 0.11 m (Ver Figura 25). Se obtuvo una transmisividad de 287,52 m<sup>2</sup>/d, clasificada como media a alta (Villanueva e Iglesias, 1984).



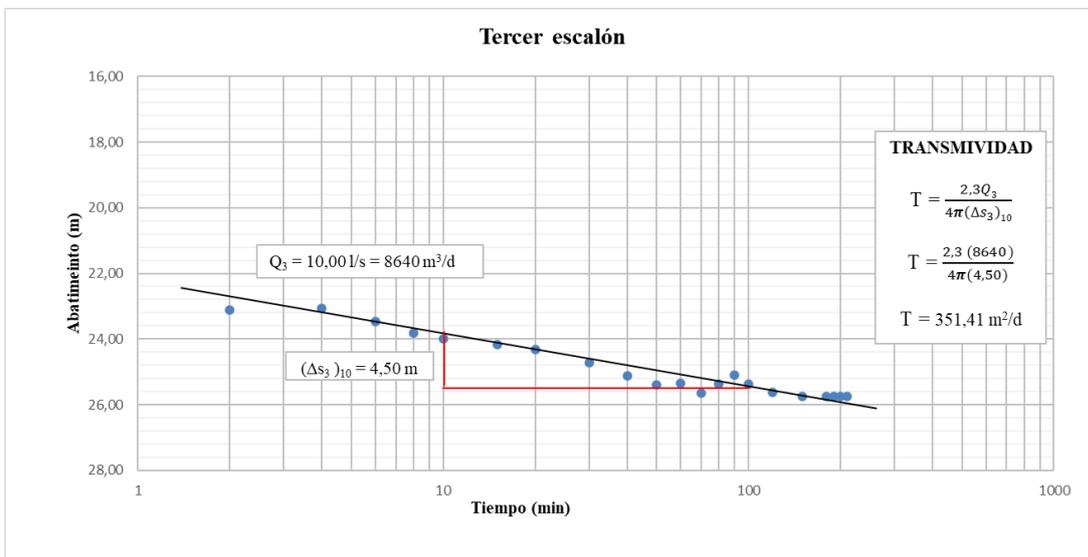
**Figura 25: Análisis del primer escalón de la prueba rendimiento**

Para el segundo escalón de 210 minutos de bombeo, se obtuvo un nivel estabilizado de 24,34 m a partir de los últimos 30 minutos. Su representación en un gráfico semilogarítmico permitió calcular la variación del abatimiento en un ciclo, siendo este 0.30 m (Ver Figura 26). Se obtuvo una transmisividad de 359,34 m<sup>2</sup>/d, clasificada como media a alta (Villanueva e Iglesias, 1984).



**Figura 26: Análisis del segundo escalón de la prueba de rendimiento**

Para el tercer escalón de 210 minutos de bombeo, se obtuvo un nivel estabilizado de 48,71 m a partir de los últimos 30 minutos. Su representación gráfica en papel semilogarítmico permitió calcular la variación del abatimiento en un ciclo, siendo este 4,50 m (Ver Figura 27). Se obtuvo una transmisividad de 351.41 m<sup>2</sup>/d, clasificada como media a alta (Villanueva e Iglesias, 1984).



**Figura 27: Análisis del tercer escalón de la prueba de rendimiento**

Se calculó las conductividades hidráulicas del acuífero en estudio con un espesor saturado de 54,72 m (Ver Tabla 7); para el primer escalón se obtuvo 5 m/d, para el segundo 6,57 m/d

y para el tercero 6,42 m/d; este rango de conductividades hidráulicas es clasificado como medianamente permeables (Villanueva e Iglesias, 1984).

**Tabla 7: Propiedades hidrodinámicas**

Escalón	Caudal Q		$\Delta s$ m	Tansmividad T m <sup>2</sup> /d	Conductividad Hidráulica K m/d
	l/s	m <sup>3</sup> /d			
I	2	172,80	0,11	287,52	5,25
II	5	432,00	0,30	359,34	6,57
III	10	8640,00	4,50	351,41	6,42

#### 4.2.12. Prueba de verticalidad

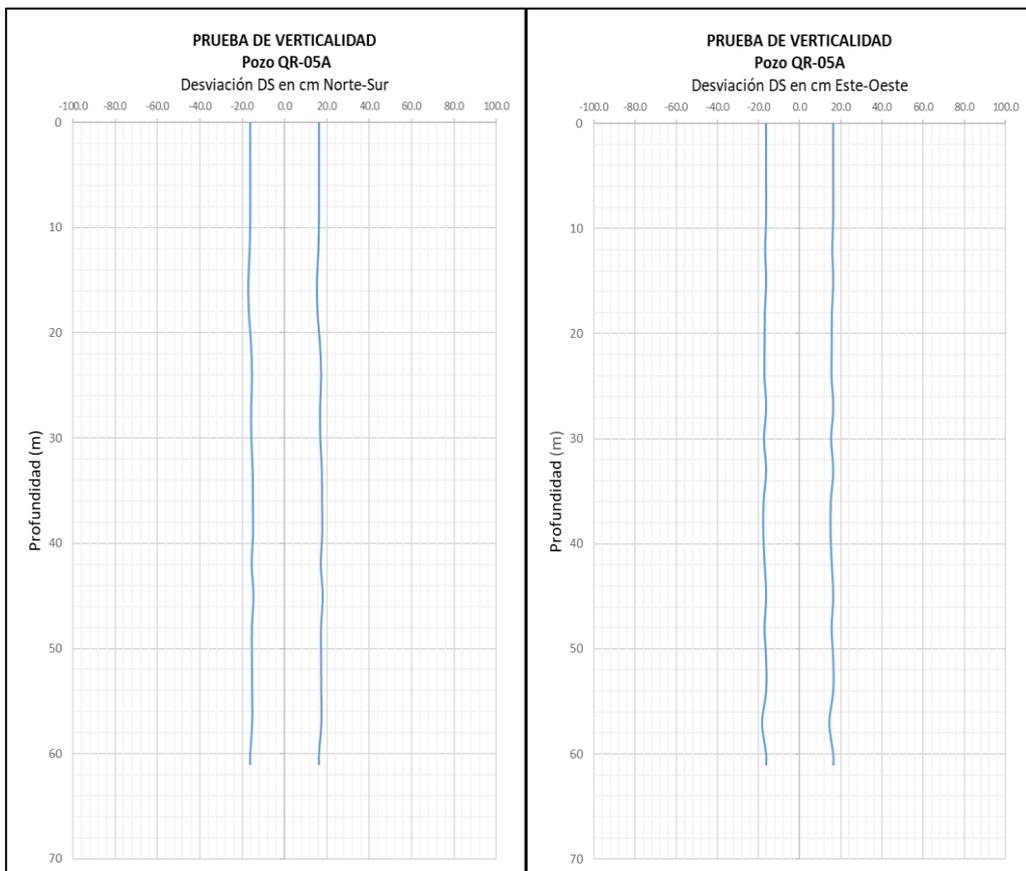
Para esta prueba se dispuso de un trípode, de 3,50 m de altura, que suspende la polea por la cual se desliza el cable que sostiene un calibrador de 0,30 m de diámetro exterior y 1,00 m de longitud. Las mediciones se realizaron cada 3,0 m en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, iniciando las medidas en la parte superior del calibrador, coincidiendo con la boca del pozo.

Las desviaciones (DS) calculadas en cada punto de medida se han obtenido multiplicando la desviación (ds) de la boca a los pozos con la relación  $(H+h)/h$ , donde (h) es la distancia en metros entre el centro de la polea en suspensión del cable y la boca del pozo y (H) es la profundidad en metros de la boca del pozo al límite superior del calibrador.

Los resultados de las desviaciones de la verticalidad en el pozo QR-05A, ya sea en la orientación Norte-Sur como Este-Oeste, no sobrepasan los 2 cm, estando dentro de los límites permisibles según especificaciones técnicas de SEDAPAL, al no exceder los 15 cm por cada 50 m de profundidad (Ver Figura 28 y 29; y ANEXO 5).



**Figura 28: Registro de las desviaciones (prueba de verticalidad)**



**Figura 29: Prueba de Verticalidad al pozo QR-05A**

### **4.3. Experiencias y aportes al trabajo profesional**

#### **4.3.1. Contribuye a la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa.**

La contribución a la solución de problemas de la empresa ROW INGENIEROS ASOCIADOS S.R.LTDA. es la siguiente:

- Tener conocimiento del diseño técnico del pozo es importante porque indica la disposición de la tubería ciega y filtro proporcionando elementos de juicio sobre a qué profundidad se debe colocar la bomba; considerando el nivel dinámico, filtro y sumergencia de la bomba para evitar la cavitación de la misma. En caso de no contar con este diseño, se recomienda pasar cámara de televisión al pozo a fin de conocer las características constructivas y diseño del mismo. Realizar esta actividad, permite saber en qué condiciones se encuentra la estructura del pozo como: el taponamiento de las aberturas de los filtros debido a un mal desarrollo o a las incrustaciones típica de carbonatos, sulfatos de calcio y magnesio, etc; y si la tubería presenta rotura o desprendimiento.
- Respecto a la evacuación del agua, se coordinó y gestionó con el ingeniero encargado de planta, el consumo de sus reservas de agua para que estas se encuentren al mínimo tolerable antes de iniciar la prueba y así no se vea interrumpida por motivos de evacuación de las mismas, ya que, la red de alcantarillado no tiene la capacidad para ello.
- En cuanto al registro de los niveles, estos no deben verse afectados por el funcionamiento de pozos cercanos, ya que distorsionaría el comportamiento natural del acuífero. Por ende, se solicitó y gestionó el cese del funcionamiento de los pozos cercanos al QR-05A a fin de obtener registros sin interferencias, ya que la fábrica trabaja de forma continua durante todo el año.
- El registro del caudal es importante durante la ejecución de la prueba por ello la instalación de un flujómetro es indispensable. Sin embargo, en base a mi experiencia, creo conveniente corroborar las lecturas mediante el aforo volumétrico, las veces que sean necesarias, ya que los flujómetros se descalibran con el uso.
- El funcionamiento de las sondas eléctricas se ve afectado por la salinidad de las aguas produciendo falsas lecturas al cerrarse el circuito eléctrico y para ello se recomienda el lavado del sensor con agua destilada.

- Con el objeto de evitar lecturas erróneas debido a las turbulencia e infiltraciones por un mal empalme entre tuberías se recomienda instalar la tubería guía de PVC para evitar estos inconvenientes.
- Con el objeto de evitar accidentes se coordinó y determinó el perímetro de protección del área de trabajo.
- En la inspección con cámara de televisión, a menudo después del desmontaje del equipo de bombeo y columna de extracción, el agua permanece turbia dificultando la visualización. Por ello, prever el abastecimiento de sulfato de aluminio es importante, debido, a que su reacción con el agua acelera la precipitación de las impurezas hacia el fondo del pozo.

#### **4.3.2. Contribuye al centro laboral en términos de las competencias y habilidades adquiridas durante su formación profesional.**

La contribución en termino de competencias y habilidades a la empresa ROW INGENIEROS ASOCIADOS S.R.LTDA., es la siguiente:

- Selección de la correcta metodología, ya que, para determinar la ecuación de abatimiento del pozo se utilizó el método analítico para determinar el valor de “n”. Este no asume el valor de 2 como la resolución propuesta por Jacob. Los valores obtenidos producto de la iteración están en el rango de 1 y 3,5 (Villanueva e Iglesias, 1984).
- Los registros de los niveles de la prueba de rendimiento pueden ser evaluados para obtener las propiedades hidrodinámicas del acuífero, pese a que el tiempo de bombeo no sea el apropiado según la metodología explícitamente diseñada. Se utilizó el método de Jacob aplicando la corrección de Dupuit (Custodio y Llamas, 1983), ya que el método ha sido concebido para acuíferos confinados. Esta corrección permite el análisis de la información de un acuífero libre. Como norma se admitirá que no será necesaria la corrección, cuando el abatimiento sea inferior al 10% del espesor saturado inicial (Villanueva e Iglesias, 1984).
- Con los conocimientos adquiridos durante la formación profesional sobre nuevas alternativas en cuanto al registro de niveles de agua, se propuso a la empresa la adquisición de sensores de medición de presión hidráulica (*dataloggers*), estos sensores realizan un registro automático de la variación de niveles con intervalos de tiempo según su programación (cada minuto, hora, etc.) y en algunos modelos la

información es obtenida a tiempo real sin la necesidad de un técnico de campo. La instalación correcta del equipo asegura un registro fidedigno reduciendo el error humano. Por ello, se solicitó la cotización de un dataloggers a la empresa HIGH TECH SERVICE S.A.C., marca SOLINST CANADA, modelo 3001 LTC Levellogger M100, con las siguientes características: batería de litio (10 años de duración), carcasa hermética de acero inoxidable, con revestimiento de PVD a base de titanio, alta resistencia a la corrosión, sensor de presión robusto, memoria de hasta 120000 lecturas y profundidad de sumersión de 100 m.

- Durante la formación profesional aprendimos el uso de *softwares* diseñados para la interpretación de pruebas de bombeo. Por ello, se cotizó la adquisición de *softwares* como: AquiferTest, Aqsolve o PIBE, estos permiten analizar la información con una variedad de métodos para los distintos tipos de acuíferos. Tanto el AquiferTest como el Aqsolve son *softwares* comerciales, mientras que PIBE es de uso libre. A diferencia del *software* libre, el comercial permite la fácil integración de la información obtenida de los *dataloggers*. Sin embargo, el más versátil es el AquiferTest elaborado por Waterloo Hydrogeologic, ya que adicionalmente cuenta con servidores abiertos como *Open Street Map* o servidores de mosaicos comerciales como los alojados por ESRI, Bing o Google. Además, cuenta con soporte técnico y grupos de usuarios donde comparten conocimientos del uso y manejo del mismo.
- El desarrollo y enfoque de los estudios han sido también desde la óptica del administrador del recurso hídrico a nivel nacional (Autoridad Nacional del Agua), ya que, los cursos impartidos como Gestión del Agua y Manejo de Cuencas otorgan concepción a nivel macro de la gestión integrada de los recursos hídricos. Por ello, la correcta ejecución e interpretación de estas pruebas son un insumo para el desarrollo del modelo numérico y elaboración de la memoria descriptiva para obtener la licencia de uso de agua subterránea.

#### **4.3.3. Explica el nivel de contribución al centro laboral a partir de la solución de situaciones problemáticas.**

El nivel de beneficio de la empresa ROW INGENIEROS ASOCIADOS S.R.LTDA. es la siguiente:

- Liderazgo al dirigir las pruebas. Tener un grupo de colaboradores bajo responsabilidad requiere de una correcta programación e indicaciones claras; por

ello, conocer la metodología del trabajo de campo es indispensable para la obtención de valores fidedignos.

- Fiabilidad y confianza en el trabajo realizado, asegurando un producto de calidad.
- Fluidez con la que se ejecutó las pruebas, ya que no fué necesario la repetición de las mismas. Esto se traduce en ahorro de tiempo y dinero al no exceder el cronograma de actividades.
- Previo a los trabajos de campo, se capacitó al personal técnico a fin de uniformizar conocimientos y conceptos para desarrollar un trabajo eficiente para evitar tiempos muertos.
- Previo a las inducciones impartidas por las empresas, se capacitó al personal técnico con conceptos de seguridad y salud ocupacional y medio ambiente, con el propósito de que los técnicos de campo vayan a la inducción y evaluación con conocimientos para evitar la desaprobación del examen, ya que, ocasionaría retrasos según lo planificado.
- Se elaboró una base de datos con información hidrogeológica de los proyectos, estudios y otros servicios brindados por la empresa, mejorando la administración y gestión de la información. Como resultado, las cotizaciones y toma de decisiones fueron en corto tiempo.
- El correcto desarrollo de las pruebas como el análisis e interpretación de los resultados, permitió a la empresa contar con información fidedigna al elaborar las memorias descriptivas a fin de obtener las licencias de uso de agua subterránea. Esta información ha permitido aumentar la base de datos de la empresa, caracterizar el acuífero y sobre todo aportar elementos de juicio sobre un futuro estudio hidrogeológico y posibles perforaciones en la zona de estudio.
- Se elaboró un instructivo, es decir un listado de herramientas y materiales para la ejecución de las pruebas de bombeo.
- Se elaboró un instructivo, es decir, un listado de herramientas y materiales para la ejecución de mantenimientos preventivos y correctivos.
- Se elaboró un listado del equipo básico de protección personal para operarios, técnicos de campo y supervisores, el cual consta de: botines de punta acrílica, lentes de seguridad, casco de seguridad y protector auditivo, guantes de cuero, pantalón denim, camisa denim, manga corta o larga, polo y chaleco de fosforescente.
- Se elaboró un listado de equipos de protección personal para la aplicación de productos químicos (desincrustante/desinfectante), adicional al equipo básico de

protección se debe contar con: máscara completa con cartucho para gases, mandil de plástico, guantes, botas de jebe.

- Se elaboró un listado de equipos de protección personal para realizar trabajos de oxicorte y soldadura eléctrica, adicional al equipo básico debe contar con: mandil, mangas, guantes, escaarpines, casaca y gorra de cuero cromo; protector facial para soldar, máscara de gases, lentes de oxicorte.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El caudal recomendado es de 8,00 l/s y profundidad del nivel dinámico 38,00 m; la eficiencia hidráulica es 76,68% y la ecuación de abatimiento es  $s = 2932,04Q + 507917,96Q^{2.31}$ .
- La conductividad hidráulica es del orden de 5,25 – 6,57 m/d, clasificada medianamente permeable. La transmisividad es del orden de 287,52 – 359,34 m<sup>2</sup>/d, clasificada como medianamente a altamente transmisivo.
- El pozo se encuentra vertical y alineado dentro de los límites tolerables.

### 5.2. Recomendaciones

- Creación de bitácoras a los pozos para tener registro de todas las actividades que se ejecuten.
  - Mantenimiento preventivo (rasqueteo, cepillado, cctv, etc).
  - Mantenimiento correctivo (parchado, encamisado, etc).
  - Monitoreo de niveles del agua (estático y dinámico) y caudal de explotación.
  - Monitoreo de la calidad del agua (análisis físico-químico).
  - Control de los sólidos en suspensión (arenas)
  - Control y mantenimiento del sistema eléctrico.
- Se recomienda no explotar al pozo a caudales superiores a los 8,00 l/s, a fin de evitar arrastre de arenas.
- Se recomienda instalar la bomba a 55,00 m de profundidad para asegurar la sumergencia de la misma y de esa forma aprovechar la mayor cantidad de filtros.

- Se recomienda realizar análisis físico químico completo para tener un registro base y así determinar la evolución de los parámetros a través del tiempo y así programar el mantenimiento preventivo y correctivo de ser necesario.
- Se recomienda realizar una prueba de acuífero de caudal constante y larga duración para contrastar las propiedades hidrodinámicas obtenidas de la prueba de rendimiento.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Collazo, A. & Montaña, J. (2012). Manual de agua subterránea. Montevideo, Uruguay: Denad Internacional. p. 121.
- Custodio, E. & Llamas, MR. (1983). *Hidrogeología subterránea*. (2da ed.). Barcelona, España: Omega.
- Davis, S.N. & De Wiest, R. (1971). *Hidrogeología*. Barcelona, España: Ariel. p. 563.
- Delleus, J. (2007). *The Handbook of groundwater engineering*. (2da ed.). United States of America: CRC Press. p. 1342.
- D'IMPULL S.A. (1998). Informe final de la perforación del pozo P-17 en el acuífero Chillón. Lima, Perú: D'IMPULL S.A.
- Fetter, C.W. (2001). *Applied hydrogeology*. (4th ed.). New Jersey, United States of America: Prentice Hall. p. 615.
- Gibson, U. & Singer, R. (1974). *Manual de pozos pequeños*. (2da ed.). México: Editorial Limusa.
- GMB S.A. (1999). Memoria descriptiva de la perforación de cuatro pozos tubulares para el aprovechamiento de las aguas subterráneas del río Chillón, distrito de Carabayllo. Lima, Perú: GMB S.A.
- Johnson, E. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Minnesota, Estados Unidos de Norte América: Johnson división.

Kruseman, G. & De Ridder, N. (1975). *Analysis and evaluation of pumping test data*. (2da ed.). Donezar, M. (Trad.). Wageningen, The Netherlands: Veeman Drukkers.

Kruseman, G. & De Ridder, N. (1994). *Analysis and evaluation of pumping test data*. (2da ed.). Verweig, J. Wageningen, The Netherlands: Veeman Drukkers.

Villanueva, M. & Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos*. Madrid, España: Ibergesa.

## **VII. ANEXOS**

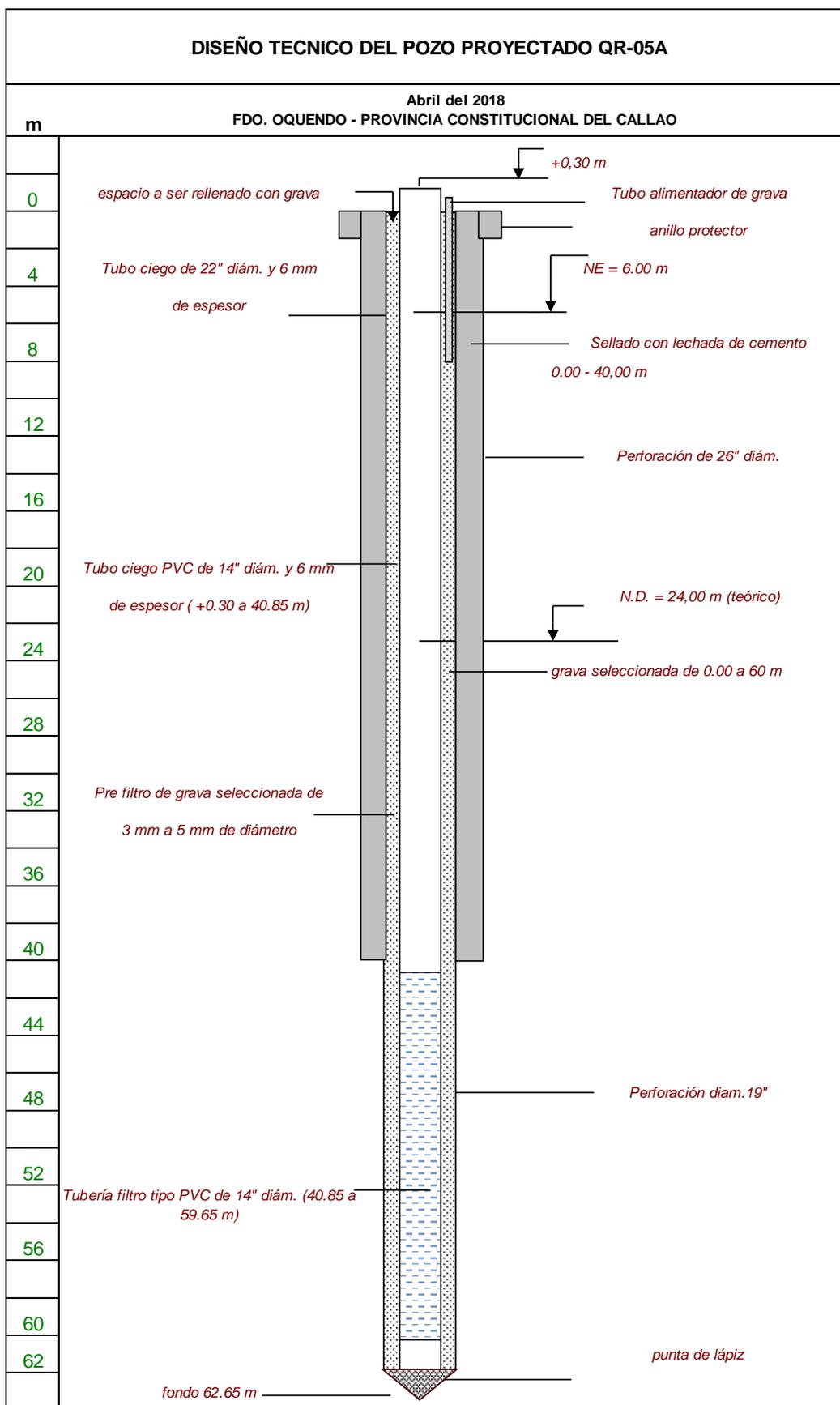
# ANEXO 1: PLANO DE UBICACIÓN DEL POZO QR-05A



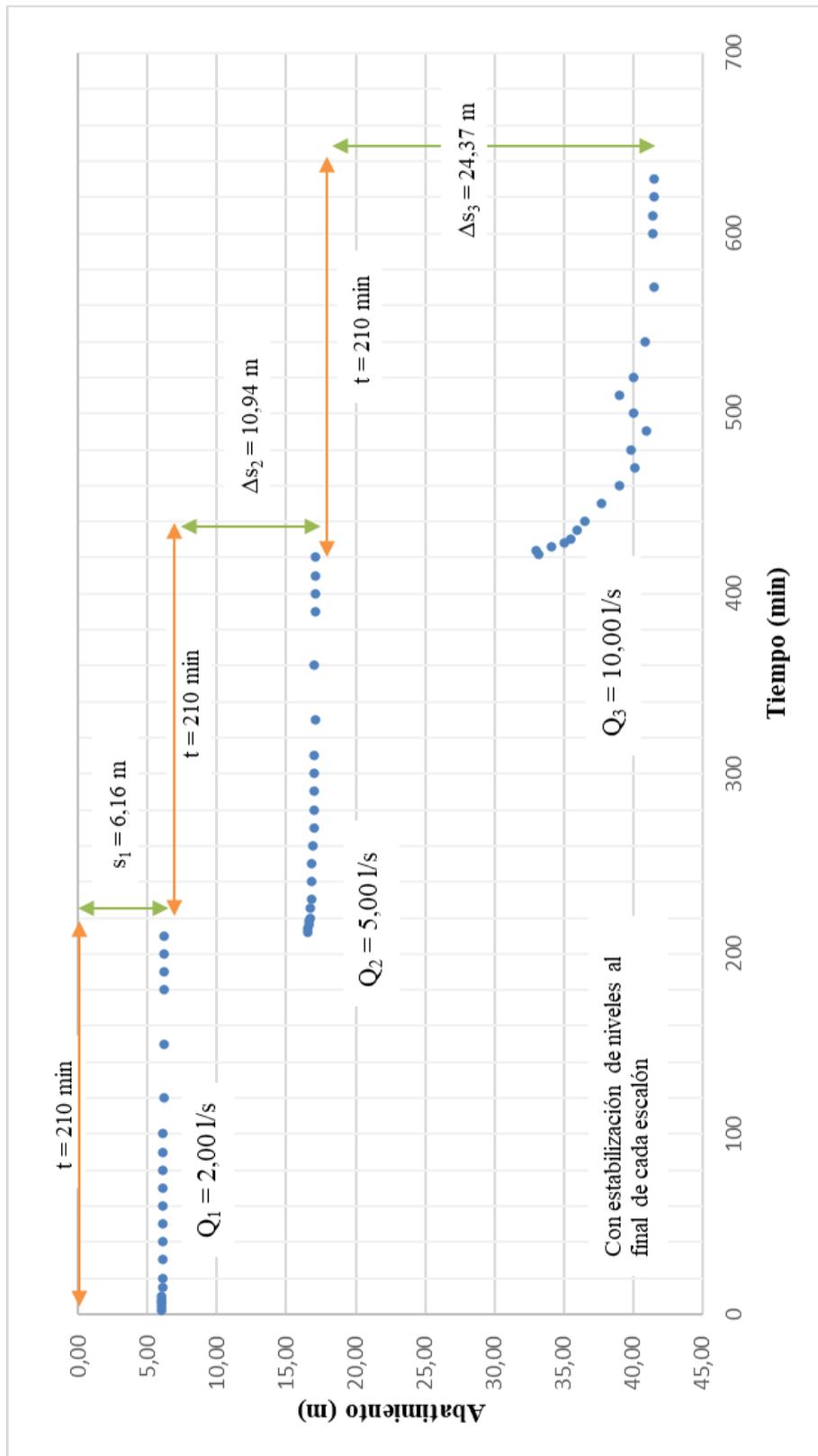
## ANEXO 2: PERFIL LITOLÓGICO DEL POZO QR-05A

<b>CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DEL POZO PERFORADO QR-05A</b>		
Descripción litológica	m	Litología
	0	
<i>Material de relleno con arcilla limosa en buena cantidad (0-3 m)</i>		
<i>Piedra chancada de relleno (3.00-4.10m)</i>	5	
<i>Arena fina salobre (4.10 - 6.90 m)</i>		
<i>Arena fina y arcilla (6.90 - 13.00 m)</i>	10	
<i>Rodados medianos y grandes poca arena (13.0-15.10 m)</i>	15	
<i>Arena fina (15.10-16.00 m)</i>		
<i>Rodados medianos y grandes (16.00-17.60 m); arena fina, con algo de arcilla (17.60-20.20 m)</i>	20	
<i>Rodados medianos y chicos sub redondeados, poca arena(20.20-23.80 m)</i>		
<i>Arcilla arenosa, algo de rodados chicos (23.80-27.60m)</i>	25	
<i>Rodados chicos sub redondeados (27.60-28.40 m), arena gruesa (28.80.29.40 m)</i>	30	
<i>Rodados medianos, poca arena (29.40-30.90 m)</i>		
<i>Rodados medianos y chicos intrusivos, al de rodados grandes (30.90-37.70 m)</i>	35	
<i>Arena arcillosa y rodados medianos y chicos (37.70 - 40.70 m)</i>	40	
<i>Arena arcillosa (40.70-41.50 m)</i>		
<i>Arena arcillosa y rodados medianos (41.50-43.90 m)</i>	45	
<i>Rodados de diversos tamaños co algo de arena y poca arcilla (43.90-49.50 m)</i>		
<i>rodados medianos y chicos en arena compactada (49.40-56.30 m)</i>	50	
<i>Rodados grandes y medianos algo compactados (56.30 - 58.60m)</i>	55	
<i>Arena arcillosa con rodados medianos algo compactados (58.60-60.00m)</i>	60	

### ANEXO 3: DISEÑO TÉCNICO DEL POZO QR-05A



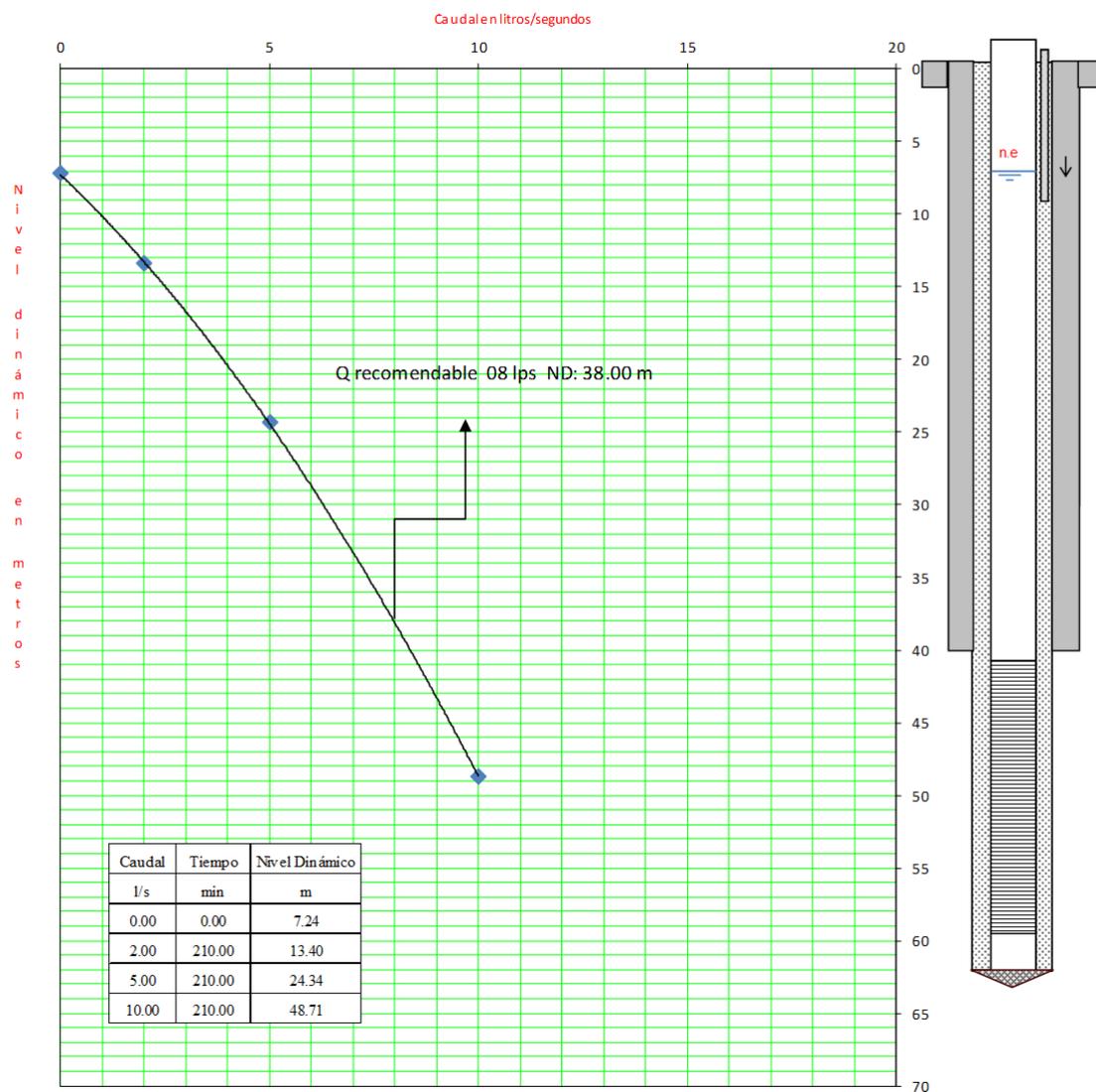
## ANEXO 4: PRUEBA DE RENDIMIENTO



**Figura 30: Prueba de rendimiento del pozo QR-05A**

### PRUEBA DE RENDIMIENTO

Departamento **Lima** Fecha: **15/04/2018**  
 Provincia **Provincia Const. Callao** N.E./P.R.s (m): **7,89** N.E./s (m): **7,24**  
 Distrito **Callao** P.R.s (m): **0,65** Prof. Bomba (m): **55,00**  
 Nombre del pozo **QR-05A** Lugar: **QUIMPAC SA**



**Figura 31: Curva característica del pozo QR-05A**

Q <sub>1</sub> =	0.002 m <sup>3</sup> /s	ND <sub>1</sub> =	13.4 m	S <sub>1</sub> =	6.16 m
Q <sub>2</sub> =	0.005 m <sup>3</sup> /s	ND <sub>2</sub> =	24.3 m	S <sub>2</sub> =	17.10 m
Q <sub>3</sub> =	0.01 m <sup>3</sup> /s	ND <sub>3</sub> =	48.7 m	S <sub>3</sub> =	41.47 m

$$\frac{\frac{S_2}{Q_2} - \frac{S_1}{Q_1}}{\frac{S_3}{Q_3} - \frac{S_2}{Q_2}} = \frac{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}}$$

$$\frac{\frac{17.10}{0.005} - \frac{6.16}{0.002}}{\frac{41.50}{0.010} - \frac{17.10}{0.005}} = \frac{0.005^{n-1} - 0.002^{n-1}}{0.010^{n-1} - 0.005^{n-1}}$$

$$0.47 = \frac{0.005^{n-1} - 0.002^{n-1}}{0.010^{n-1} - 0.005^{n-1}}$$

Para  $n = 2.31$ , cumple la igualdad

$$0.47 = 0.47$$

**Figura 32: Método Analítico**

**Tabla 8: Registro de niveles del primer escalón**

ESCALÓN I			
Q = 2 l/s			
Tiempo (min)	ND/S (m)	Abatimiento (m)	Corrección de Dupuit (m)
2	13,18	5,94	5,62
4	13,21	5,97	5,64
6	13,23	5,99	5,66
8	13,25	6,01	5,68
10	13,26	6,02	5,69
15	13,27	6,03	5,70
20	13,29	6,05	5,72
30	13,30	6,06	5,72
40	13,30	6,06	5,72
50	13,32	6,08	5,74
60	13,33	6,09	5,75
70	13,35	6,11	5,77
80	13,35	6,11	5,77
90	13,36	6,12	5,77
100	13,34	6,10	5,76
120	13,37	6,13	5,79
150	13,39	6,15	5,80
180	13,40	6,16	5,81
190	13,39	6,15	5,80
200	13,40	6,16	5,81
210	13,40	6,16	5,81

**Tabla 9: Registro de niveles del segundo escalón**

ESCALÓN II			
Q = 5 l/s			
Tiempo (min)	ND/S (m)	Abatimiento (m)	Corrección de Dupuit (m)
212	23,74	16,50	14,01
214	23,80	16,56	14,05
216	23,85	16,61	14,09
218	23,89	16,65	14,12
220	23,96	16,72	14,17
225	23,97	16,73	14,17
230	24,01	16,77	14,20
240	24,07	16,83	14,24
250	24,02	16,78	14,21
260	24,14	16,90	14,29
270	24,22	16,98	14,35
280	24,19	16,95	14,32
290	24,24	17,00	14,36
300	24,24	17,00	14,36
310	24,19	16,95	14,32
330	24,30	17,06	14,40
360	24,23	16,99	14,35
390	24,31	17,07	14,41
400	24,33	17,09	14,42
410	24,34	17,10	14,43
420	24,34	17,10	14,43

**Tabla 10: Registro de niveles del tercer escalón**

ESCALÓN III			
Q = 10 l/s			
Tiempo (min)	ND/S (m)	Abatimiento (m)	Corrección de Dupuit (m)
422	40,44	33,20	23,13
424	40,27	33,03	23,06
426	41,35	34,11	23,48
428	42,24	35,00	23,81
430	42,77	35,53	24,00
435	43,24	36,00	24,16
440	43,74	36,50	24,33
450	44,94	37,70	24,71
460	46,27	39,03	25,11
470	47,34	40,10	25,41
480	47,13	39,89	25,35
490	48,24	41,00	25,64
500	47,23	39,99	25,38
510	46,24	39,00	25,10
520	47,24	40,00	25,38
540	48,13	40,89	25,61
570	48,73	41,49	25,76
600	48,68	41,44	25,75
610	48,70	41,46	25,75
620	48,71	41,47	25,76
630	48,71	41,47	25,76

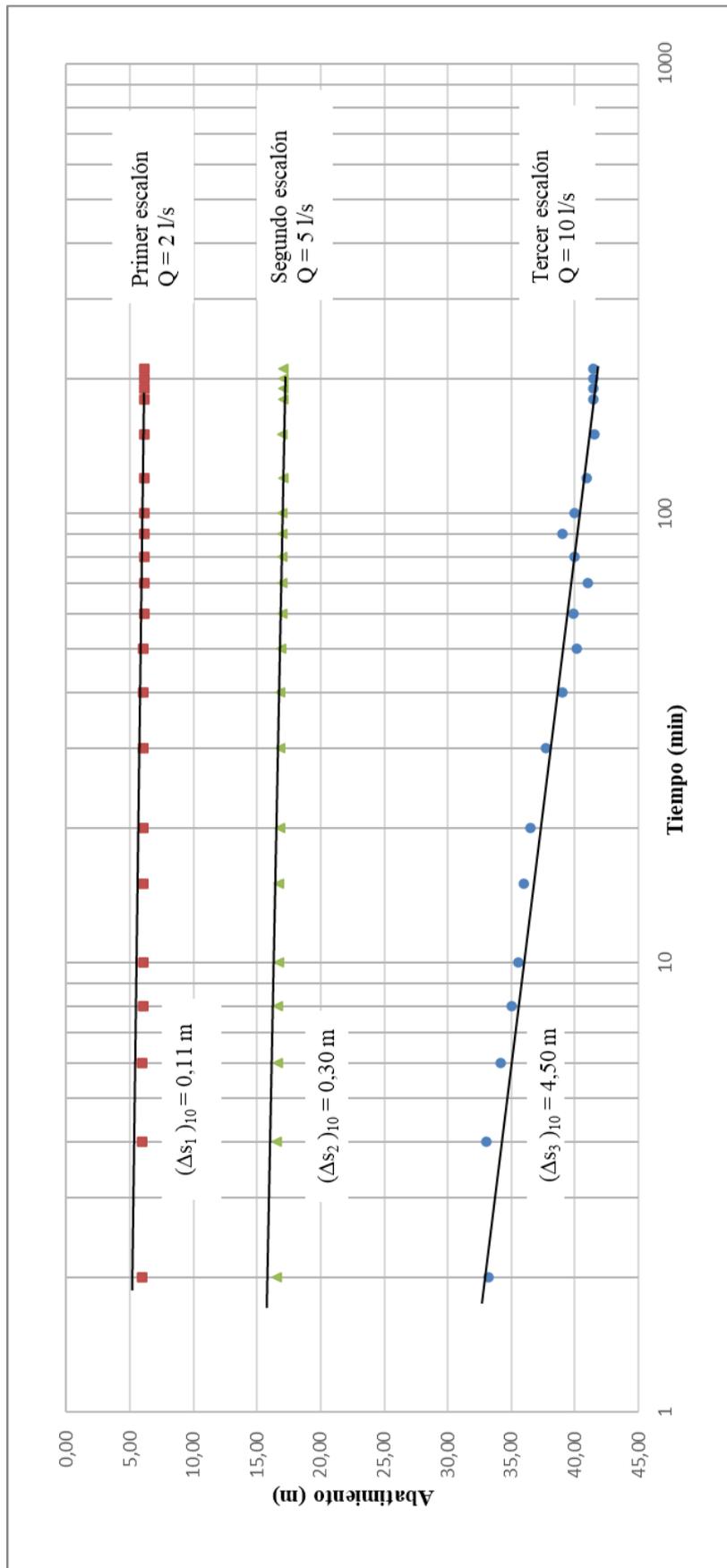
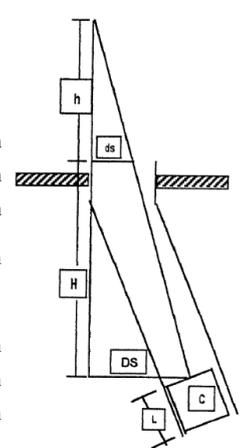


Figura 33: Abatimientos de cada escalón referidos al mismo origen de coordenadas

## ANEXO 5: PRUEBA DE VERTICALIDAD

### Tabla 11: Datos de campo de la prueba de verticalidad

<u>PRUEBA DE VERTICALIDAD</u>									
Departamento: <b>LIMA</b>		Provincia: <b>CALLAO</b>		Distrito: <b>CALLAO</b>		 <p style="text-align: center;">DS = (h+H)/h*ds</p>			
<b>Pozo</b>				<b>Datos del calibrador C:</b>					
Propietario: QUIMPAC S.A.				Diam. Exterior de C=				0.30m	
Nombre: QR-05A				Longitud L=				1.00m	
Ejecutor: Francisco Quintana P.				Altura Tripode h=				2.85m	
Fecha: 17/04/2018				Prof. alcanzada por el fondo del calibrador=				61.20m	
<b>Coordenadas UTM (WGS-84)</b>				<b>Datos del pozo QR-05A:</b>					
Este (m): 268065,00				Profundidad=				62.40m	
Norte (m): 8675347,00				diam. Inter. entubado=				32.60m	
Cota (m): 8,00				diam. Exter. entubado=				36.60m	
Profundidad (m)	Radio del pozo (cm)	Mediciones ( cm )		Desplazamiento ds (cm)		Desviación DS (cm)			
		N - S	E - O	N - S	E - O	N - S	E - O		
0	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		
3	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		
6	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		
9	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		
12	16,30	16,35	16,40	-0,05	-0,10	-0,25	-0,49		
15	16,30	16,45	16,30	-0,15	0,00	-0,89	0,00		
18	16,30	16,40	16,40	-0,10	-0,10	-0,69	-0,69		
21	16,30	16,25	16,40	0,05	-0,10	0,39	-0,79		
24	16,30	16,20	16,40	0,10	-0,10	0,89	-0,89		
27	16,30	16,25	16,30	0,05	0,00	0,49	0,00		
30	16,30	16,25	16,40	0,05	-0,10	0,54	-1,08		
33	16,30	16,20	16,30	0,10	0,00	1,18	0,00		
36	16,30	16,20	16,40	0,10	-0,10	1,28	-1,28		
39	16,30	16,20	16,40	0,10	-0,10	1,38	-1,38		
42	16,30	16,25	16,35	0,05	-0,05	0,74	-0,74		
45	16,30	16,20	16,30	0,10	0,00	1,58	0,00		
48	16,30	16,25	16,35	0,05	-0,05	0,84	-0,84		
51	16,30	16,25	16,30	0,05	0,00	0,89	0,00		
54	16,30	16,25	16,30	0,05	0,00	0,94	0,00		
57	16,30	16,25	16,40	0,05	-0,10	0,98	-1,97		
60	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		
61	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00		

DS = La desviación del cable a cualquier profundidad.  $DS = (1 + h/H) * ds$   
 ds = desplazamiento del cable en la boca del pozo. Medido respecto al borde del entubado.

**Tabla 12: Desviaciones orientación Norte-Sur**

<b><u>DESVIACIONES ORIENTACIÓN NORTE - SUR</u></b>			
Prof.	Desviación Máxima (DS máx.)	Desviación Calculada (DS calc.)	Límite permisible (DS calc. < DS máx.)
m	cm	cm	
0,00	0,00	0,00	SI
3,00	0,90	0,00	SI
6,00	1,80	0,00	SI
9,00	2,70	0,00	SI
12,00	3,60	-0,25	SI
15,00	4,50	-0,89	SI
18,00	5,40	-0,69	SI
21,00	6,30	0,39	SI
24,00	7,20	0,89	SI
27,00	8,10	0,49	SI
30,00	9,00	0,54	SI
33,00	9,90	1,18	SI
36,00	10,80	1,28	SI
39,00	11,70	1,38	SI
42,00	12,60	0,74	SI
45,00	13,50	1,58	SI
48,00	14,40	0,84	SI
51,00	15,30	0,89	SI
54,00	16,20	0,94	SI
57,00	17,10	0,98	SI
60,00	18,00	0,00	SI
61,00	18,30	0,00	SI

DS máxima = Desviación máxima de la verticalidad del pozo, según especificaciones  
DS calculada = Desviación calculada de la verticalidad del pozo

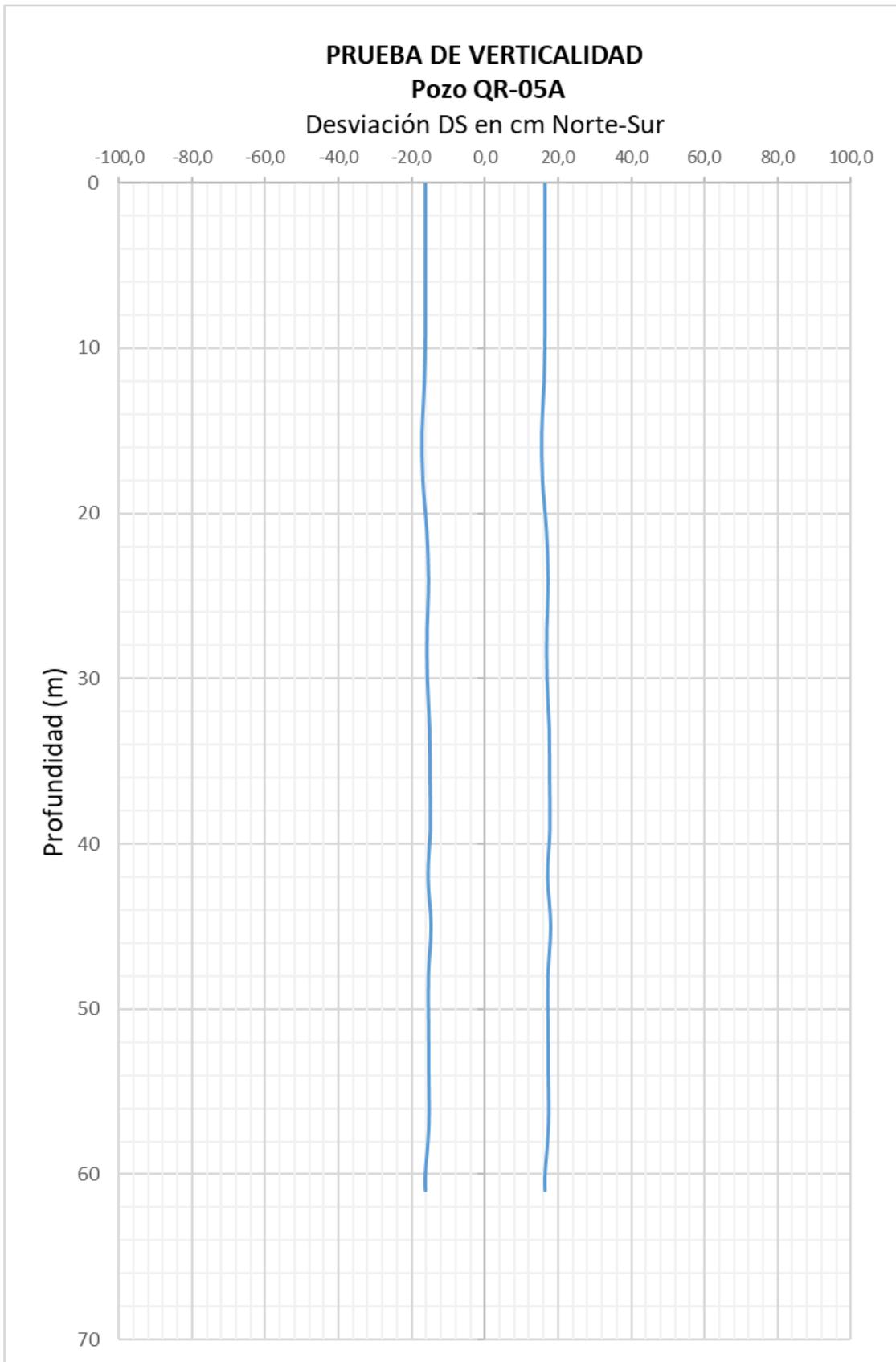
**Según Especificaciones de SEDAPAL, la desviación de la verticalidad del pozo no deberá ser mayor de 0,15 m por cada 50 m de profundidad.**

**Tabla 13: Desviaciones orientación Este-Oeste**

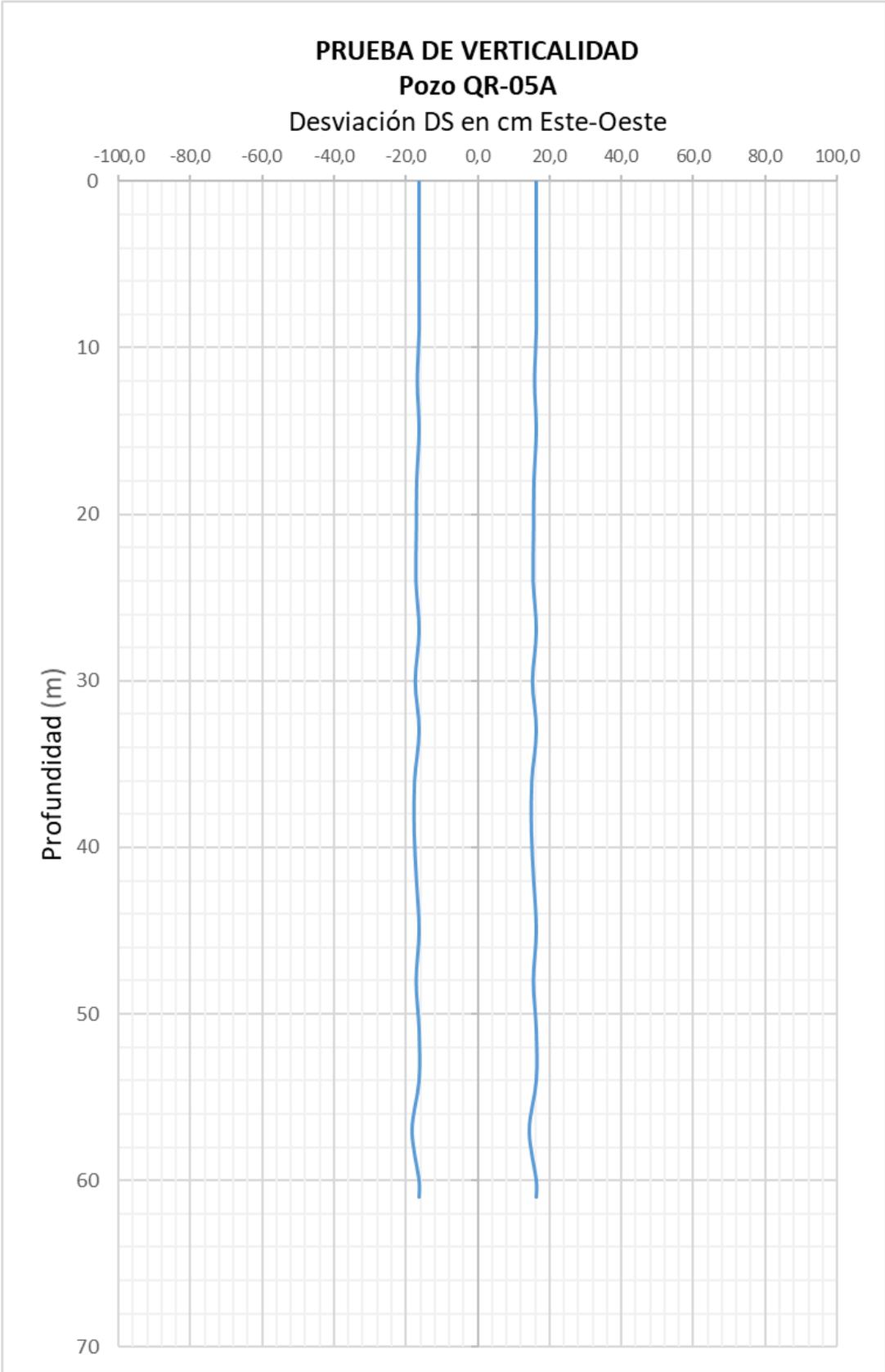
<b><u>DESVIACIONES ORIENTACIÓN ESTE - OESTE</u></b>			
Prof.	Desviación Máxima (DS máx.)	Desviación Calculada (DS calc.)	Límite permisible (DS calc. < DS máx.)
m	cm	cm	
0,00	0,00	0,00	SI
3,00	0,90	0,00	SI
6,00	1,80	0,00	SI
9,00	2,70	0,00	SI
12,00	3,60	-0,49	SI
15,00	4,50	0,00	SI
18,00	5,40	-0,69	SI
21,00	6,30	-0,79	SI
24,00	7,20	-0,89	SI
27,00	8,10	0,00	SI
30,00	9,00	-1,08	SI
33,00	9,90	0,00	SI
36,00	10,80	-1,28	SI
39,00	11,70	-1,38	SI
42,00	12,60	-0,74	SI
45,00	13,50	0,00	SI
48,00	14,40	-0,84	SI
51,00	15,30	0,00	SI
54,00	16,20	0,00	SI
57,00	17,10	-1,97	SI
60,00	18,00	0,00	SI
61,00	18,30	0,00	SI

DS máxima = Desviación máxima de la verticalidad del pozo, según especificaciones  
 DS calculada = Desviación calculada de la verticalidad del pozo

**Según Especificaciones de SEDAPAL, la desviación de la verticalidad del pozo no deberá ser mayor de 0,15 m por cada 50 m de profundidad.**



**Figura 34: Desviaciones orientación Norte-Sur**



**Figura 35: Desviaciones orientación Este-Oeste**

## ANEXO 6: FOTOGRAFÍAS



**Figura 36: Instalación del equipo de izaje (gata hidráulica)**



**Figura 37: Electrobomba sumergible PEDROLLO (25 HP/18.50 KW)**



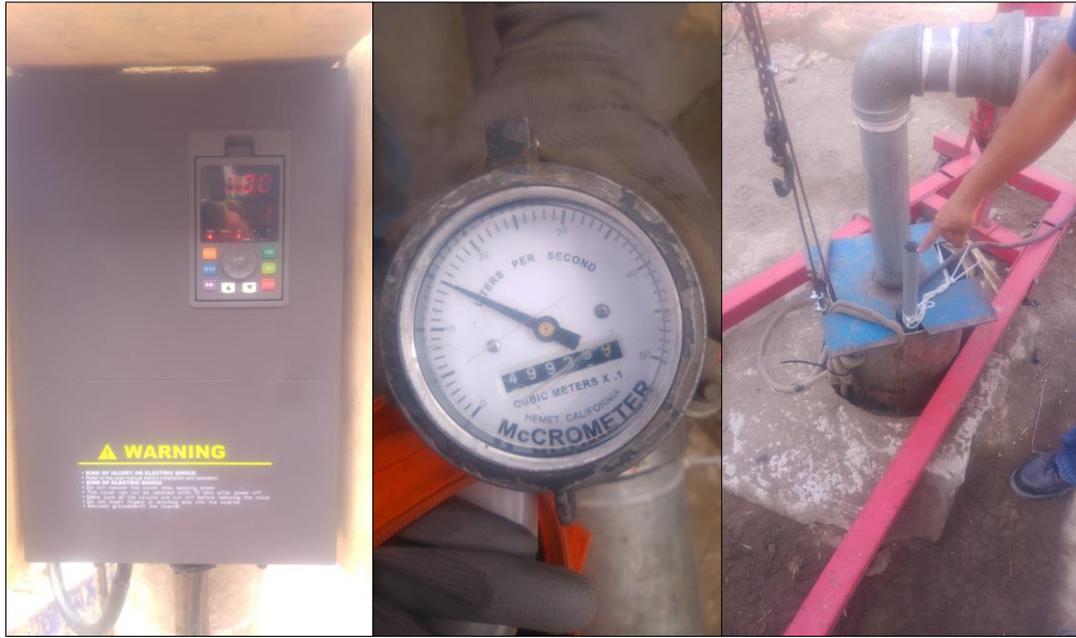
**Figura 38: Instalación de la columna de extracción**



**Figura 39: Poza de rebombeo**



**Figura 40: Motobomba Yamaha**



**Figura 41: Variador de frecuencia, medidor de caudal y tubería guía**



**Figura 42: Monitoreo de los niveles dinámico en el pozo QR-05A**



**Figura 43: Monitoreo de la calidad del agua**



**Figura 44: Instalación del trípede (prueba de verticalidad)**



**Figura 45: Prueba de Verticalidad**