

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“EVALUACIÓN, MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE  
POZOS TUBULARES PROFUNDOS EN LOS ACUÍFEROS DE  
CHILLÓN Y RÍMAC”**

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

**FERNANDO RAFAEL QUINTANA ANTONIO**

**LIMA – PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“EVALUACIÓN, MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE POZOS  
TUBULARES PROFUNDOS EN LOS ACUÍFEROS DE CHILLÓN Y RÍMAC”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**FERNANDO RAFAEL QUINTANA ANTONIO**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. TERESÁ OLINDA VELÁZQUEZ BEJARANO

Presidente

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO

Asesor

Mg. Sc. RICARDO APACLLA NALVARTE

Miembro

Mg. Sc. ~~KENYT GLICERIO CAVALCANTI CARDENAS~~

Miembro

LIMA – PERÚ

2020

# ÍNDICE GENERAL

I.	PRESENTACIÓN.....	1
II.	INTRODUCCIÓN .....	4
III.	OBJETIVOS .....	6
	3.1 Objetivo general .....	6
	3.2 Objetivos específicos.....	6
IV.	DESARROLLO DEL TRABAJO .....	7
	4.1 Conceptos aplicados a la evaluación, mantenimiento y rehabilitación de pozos ....	7
	4.1.1 Factores que afectan el rendimiento de un pozo .....	7
	4.1.2 Características hidrogeológicas de los acuíferos Chillón y Rímac .....	13
	4.1.3 Ecuaciones aplicables en la evaluación de pozos.....	15
	4.1.4 Inspección por cámara de televisión (CCTV) .....	19
	4.1.5 Procedimientos para recuperar la producción de pozos tubulares .....	21
	4.2 Metodología del trabajo ejecutado .....	24
	4.2.1 Características del pozo y su equipo de bombeo.....	24
	4.2.2 Evaluación del estado inicial de los pozos .....	27
	4.2.3 Evaluación del estado de los pozos antes de ejecutarse las actividades de mantenimiento y rehabilitación .....	34
	4.2.4 Resultados de la inspección por cámara de televisión (CCTV) .....	35
	4.2.5 Procedimientos ejecutados en la recuperación de producción de los pozos ..	36
	4.2.6 Diseño actual de los pozos después de ejecutarse la rehabilitación por doble entubado .....	42
	4.2.7 Resultados de las pruebas de rendimiento posterior a su intervención .....	43
	4.2.8 Evaluación del estado de los pozos después de ejecutado las actividades de mantenimiento y rehabilitación .....	43
	4.3 Contribución en la solución de situaciones problemáticas presentados durante la estancia en la empresa .....	50
	4.4 Contribución a la empresa en términos de las competencias y habilidades adquiridas durante su formación profesional .....	52

4.5	Nivel de beneficio obtenido por la empresa a partir de la solución de situaciones problemáticas.....	54
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1	Conclusiones .....	56
5.1.1	Pozo P-717 Estrella .....	56
5.1.2	Pozo P-167 La Virreyna.....	56
5.2	Recomendaciones.....	57
5.2.1	Pozo P-717 Estrella .....	57
5.2.2	Pozo P-167 La Virreyna.....	58
VI.	BIBLIOGRAFÍA .....	59
VII.	ANEXOS .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del coeficiente C de pérdidas de carga hidráulica de pozos según Walton .....	17
Tabla 2: Diseño inicial del pozo P-717 .....	26
Tabla 3: Diseño inicial del pozo P-167 .....	26
Tabla 4: Prueba de rendimiento inicial del P-717 .....	27
Tabla 5: Prueba de rendimiento inicial del P-167 .....	27
Tabla 6: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-717.....	28
Tabla 7: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-167.....	29
Tabla 8: Diseño actual del pozo P-717 .....	42
Tabla 9: Diseño actual del pozo P-167 .....	42
Tabla 10: Prueba de rendimiento del P-717 .....	43
Tabla 11: Prueba de rendimiento del P-167 .....	43
Tabla 12: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-717.....	44
Tabla 13: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-167.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Perforación en tubería ciega del pozo P-95. ....	10
Figura 2: Incrustación severa.....	11
Figura 3: Incrustación y corrosión.....	12
Figura 4: Instalación de la cámara de TV en la boca del pozo.....	20
Figura 5: Inspección del pozo por cámara de TV.....	20
Figura 6: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-717, estado inicial .....	29
Figura 7: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-167, estado inicial .....	30
Figura 8: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-717, estado actual.....	45
Figura 9: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-167, estado actual.....	46
Figura 10: Ubicación del pozo P-717 Estrella.....	62
Figura 11: Ubicación del pozo P-167 La Virreyna.....	63
Figura 12: Diseño inicial del pozo P-717 Estrella.....	64
Figura 13: Diseño inicial del pozo P-167 La Virreyna.....	65
Figura 14: Prueba de rendimiento inicial del pozo P-717 Estrella.....	66
Figura 15: Prueba de rendimiento inicial del pozo P-167 La Virreyna.....	67
Figura 16: Zona saturada de erosión, corrosión e incrustación; rotura en la tubería ciega en P-717 .....	68
Figura 17: Profundidad de la inspección 87.53 m, acumulación de sedimentos en el fondo del P-717 .....	68
Figura 18: Perforación en el tubo ciego, grava expuesta a ingresar al interior del pozo P-167.....	69
Figura 19: Zona de filtros no visibles debido a la incrustación severa en el pozo P-167....	69
Figura 20: Diseño del pozo P-717 después de la rehabilitación por doble entubado .....	70
Figura 21: Diseño del pozo P-167 después de la rehabilitación por doble entubado .....	71
Figura 22: Prueba de rendimiento al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del P-717.....	72
Figura 23: Prueba de rendimiento al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del P-167.....	73
Figura 24: Recirculación del producto desincrustante biodegradable en labores de mantenimiento .....	74

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ubicación de los pozos .....	62
Anexo 2: Diseño inicial de los pozos .....	64
Anexo 3: Prueba de rendimiento inicial de los pozos .....	66
Anexo 4: Inspección por cámara de TV (CCTV).....	68
Anexo 5: Diseño actual de los pozos.....	70
Anexo 6: Prueba de rendimiento actual de los pozos.....	72
Anexo 7: Actividades desarrolladas como profesional .....	74

## **I. PRESENTACIÓN**

La carrera de Ingeniería Agrícola da la posibilidad de abarcar diversas actividades relacionadas al manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos, siendo el estudio y la explotación sustentable de las aguas subterráneas de gran importancia, pues constituyen un complemento necesario para el abastecimiento y una reserva importante para afrontar la escasez de las aguas superficiales.

Es en el campo de las aguas subterráneas donde se desarrolló la mayoría de la experiencia laboral posterior a la obtención del grado de bachiller de Ingeniería Agrícola, tanto en el ámbito público como privado. Entre las empresas donde se brindaron servicios profesionales se encuentra Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima – SEDAPAL, en la cual me desempeñe en el cargo de asistente de ingeniería, prestando servicios en la ejecución de expedientes de evaluación, mantenimiento y rehabilitación de pozos profundos a cargo del Equipo Aguas Subterráneas – EASu.

De acuerdo al plan operativo del Grupo de Ingeniería de Pozos del EASu, se ejecutan los trabajos de mantenimiento y rehabilitación de pozos basado en un programa planificado que incluye el listado de los 120 pozos a ejecutar en el año. De esta manera la evaluación de la información se tiene que hacer en forma permanente durante el desarrollo de dicha actividad a lo largo del año.

Como asistente de ingeniería se desarrolló las principales siguientes actividades:

- Se efectuó una etapa previa de evaluación y diagnóstico de los pozos utilizando la información histórica de cada fuente de agua que existe en la base de datos del EASu, de la cual lo más importante tiene que ver con su estado inicial, las medidas de los niveles de agua y los caudales registrados a través del tiempo.
- Se continuó con una fase de registro de los datos de campo recogidos durante la ejecución de los trabajos, y una etapa final de evaluación y procesamiento de dicha información para generar los reportes e informes con los resultados obtenidos.

- En la fase final del mantenimiento y/o rehabilitación de un pozo se realizó una prueba de aforo para establecer la curva de rendimiento actualizada y compararla con las anteriores que se tenían antes de la ejecución de dichos trabajos (ver Anexo 7 – Figura 24). La nueva curva de rendimiento permitirá además definir las condiciones de operación del pozo.
- Se planificó el programa anual de mantenimientos preventivo y correctivo a los pozos tubulares para el posterior año que están en el sistema de producción de SEDAPAL, tomando como base sus características hidráulicas históricas (niveles de agua y caudales registrados), último mantenimiento ejecutado, fuente única, requerimientos por parte de los Centros de Servicio, etc.
- Se apoyó en la formulación de proyectos de tipo Inversiones de Optimización, de Ampliación Marginal, de Rehabilitación y de Reposición – IOARR de tipo rehabilitación (perforación pozos sustitutos), con la finalidad de ser registrados en la cartera de inversiones de planeamiento e inclusión en el marco de la Programación Multianual de Inversiones (PMI) 2021-2023.
- Se apoyó en la elaboración de fichas y especificaciones Técnicas de materiales utilizados en las actividades de mantenimiento, rehabilitación y perforación de pozos.
- Se apoyó en la elaboración de términos de referencia para la ejecución de servicios relacionados con las actividades de mantenimiento, rehabilitación y perforación de pozos.

La culminación de los cursos correspondientes a la malla curricular de Ingeniería Agrícola me permitió desarrollarme como profesional, principalmente en las actividades descritas anteriormente relacionadas a la gestión, manejo y explotación de las aguas subterráneas. Lo puesto en práctica de lo aprendido durante mis estudios en la carrera se detallan según la actividad ejecutada en mi experiencia laboral:

- Inventarios de fuentes de aguas subterráneas, para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en los cursos de Topografía, Aguas Subterráneas, Órganos y Circuitos Eléctricos e Ingeniería de Riegos.

- Identificación el uso del agua y situación legal, para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en los cursos de Gestión del Agua y Abastecimiento de Agua Potable
- Ejecución e interpretación de pruebas de acuífero (descenso, recuperación y rendimiento), para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en el curso de Aguas Subterráneas.
- Evaluación, mantenimiento y rehabilitación de pozos, para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en los cursos de Aguas Subterráneas, Órganos y Circuitos Eléctricos, Hidráulica y Abastecimiento de Agua Potable.
- Planificación del programa anual de mantenimientos preventivo y correctivo a los pozos tubulares, para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en los cursos Aguas Subterráneas, Hidráulica y Abastecimiento de Agua Potable.
- Formulación de proyectos de tipo Inversiones de Optimización, de Ampliación Marginal, de Rehabilitación y de Reposición – IOARR de tipo rehabilitación (perforación pozos sustitutos), para la realización de esta actividad se usaron los conocimientos aprendidos en los cursos de Proyectos de Inversión, Aguas Subterráneas, Hidráulica y Abastecimiento de Agua Potable.

## **II. INTRODUCCIÓN**

Históricamente la ciudad de Lima Metropolitana se ve afectada por épocas de sequía, específicamente durante los meses de abril a noviembre, que afectan directamente en la disminución de su principal fuente de abastecimiento (el río Rímac), ocasionando restricciones del servicio de agua potable. La ciudad de Lima al estar ubicada en un desierto y contar con más de 10 millones de habitantes, requiere de altas reservas de agua, tanto superficial como subterránea para abastecer a su población.

La empresa Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima – SEDAPAL, encargada de la prestación de servicios de saneamiento como agua potable, ejecuta políticas en operación, mantenimiento, control y desarrollo de los servicios básicos. El ámbito de responsabilidad de la empresa abarca los distritos que se extienden de norte a sur, de Ancón a Pucusana y de oeste a este, de La Punta a Lurigancho.

Dentro del sistema de producción de agua potable, se ejecuta la exploración y captación de las aguas subterráneas a través de pozos tubulares. Durante el mes de mayo del año 2020, en el sistema se contó con 412 pozos operativos, los cuales 315 pozos tuvieron producción, siendo la extracción de aguas subterráneas 12 015 289 m<sup>3</sup>, equivalente a 4,49 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 1 715 707 m<sup>3</sup> (0,64 m<sup>3</sup>/s) corresponde a la producción de los 28 pozos que administra el Consorcio Agua Azul. Al mes de mayo del año 2020, el aporte de las aguas subterráneas al sistema de abastecimiento ha alcanzado un 16 % (52 878 300 m<sup>3</sup>), mientras que la superficial ha sido el 84 % (272 383 149 m<sup>3</sup>) (Sedapal, 2020).

El aporte de las aguas subterráneas dentro del abastecimiento de agua potable se considera una fuente de recursos importante, por su capacidad de almacenaje, importancia ecológica, por su coste de captación menor a comparación de otras infraestructuras como reservorios, canales, etc., por tal motivo su obra de captación, el pozo tubular, se encuentra dentro de estructuras más difundidas, la misma que requiere de una adecuada conservación y un plan de mantenimientos preventivos anuales, con el fin de mantener su capacidad de producción y alargar su vida útil.

Lamentablemente en el Perú está muy poco difundido las prácticas de mantenimiento planificado en los pozos, las cuales, una vez finalizado su perforación, instalación del equipo de bombeo y puesta en funcionamiento no se suele establecer un monitoreo continuo a las condiciones operativas del mismo, el cual nos permitiría identificar con descensos en el rendimiento del pozo por diversas causas, tanto por problemas regionales (aguas corrosivas e incrustantes, bacterias ferruginosas y abatimiento del nivel freático), en su estructura hidráulica (perforaciones o fracturas en la columna de producción) o del equipo de bombeo instalado (falta de mantenimiento, sobredimensionamiento o arenamiento). Un programa de mantenimiento rutinario para la prevención, descubrimiento y corrección oportuna de los problemas antes mencionados mantendría su producción y no generaría un incremento en el gasto de energía.

En el presente trabajo a desarrollar se describirá la metodología usada en la recuperación de la producción de los pozos tubulares P-717 Estrella (acuífero de Chillón) y P-167 La Virreyna (acuífero de Rímac), pertenecientes a SEDAPAL. A través de la evaluación y diagnóstico del estado actual del pozo, se determinará el procedimiento mecánico y los productos químicos a utilizar para la desincrustación y descolmatación de los filtros de los pozos y del acuífero a su alrededor, con la finalidad de recuperar su eficiencia y establecer las nuevas condiciones de operación para proceder a su correspondiente equipamiento.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

- Detallar la metodología usada en la evaluación, el mantenimiento y la rehabilitación de pozos tubulares profundos en los acuíferos de Chillón y Rímac.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el estado de los pozos tubulares a través de la ecuación de su abatimiento y mediante inspecciones por cámara de televisión.
- Determinar los factores que afectan el rendimiento de los pozos tubulares.
- Establecer el procedimiento adecuado de mantenimiento y rehabilitación de los pozos tubulares con el propósito de recuperar su producción.

## **IV. DESARROLLO DEL TRABAJO**

En el presente trabajo se describe las actividades realizadas en la evaluación previa, el diagnóstico del estado actual y la recuperación de su rendimiento de los pozos tubulares P-717 Estrella, ubicado en Los Olivos (acuífero de Chillón) y P-167 La Virreyna, ubicado en Surco (acuífero de Rímac), pertenecientes a SEDAPAL, en el año 2018 y 2019 respectivamente. Los procedimientos ejecutados, en la restitución de la productividad de ambos pozos se realizaron siguiendo la metodología aplicada por SEDAPAL para el mantenimiento y rehabilitación de sus pozos, tomando como apoyo literatura especializada en hidrogeología, manuales técnicos en mantenimiento y rehabilitación de pozos, estudios de profesionales especialistas y empresas dedicadas al rubro.

### **4.1 Conceptos aplicados a la evaluación, mantenimiento y rehabilitación de pozos**

#### **4.1.1 Factores que afectan el rendimiento de un pozo**

Existen numerosos factores que afectan el rendimiento de un pozo, los cuales se pueden presentar de manera aislada o combinada, como factores de diseño, factores de construcción, defectos operacionales y causas regionales, siendo los principales los siguientes:

##### **a. Factores de diseño**

Entre los defectos de diseño que afectan la eficiencia del pozo están:

- Abertura de filtros del pozo no cuenta con un área abierta suficiente, esto significaría un aumento en las velocidades de ingreso del agua al interior del pozo, causando pérdidas de entrada mayores.

Dado que la velocidad de entrada del agua en los filtros causa el arrastre de elementos finos, estos obstruyen parte de las aberturas, por lo que el diseño de la abertura de los filtros debe ser máxima, a fin de obtener una mínima velocidad, evitando así la incrustación y la corrosión (Castany, 1975).

- Distribución deficiente de aberturas en los filtros “produce convergencia excesiva del flujo cerca de cada abertura individual. En algunos casos, esto ha producido abatimientos cuyo valor es del doble de los que deberían haber ocurrido” (Johnson, 1975, p. 144).
- Asimismo, puede influir en la baja eficiencia del pozo el exceso o escasez de filtros, información litológica errónea, selección inadecuada de la bomba, mal diseño del pre filtro de grava, etc.

**b. Factores de construcción**

Entre los defectos constructivos que afectan la eficiencia del pozo están:

- Deficiencias en el desarrollo del pozo, el mismo que se debe realizar inmediatamente finalizado la perforación del pozo y previos a la prueba de rendimiento de larga duración, “consiste esencialmente, en una agitación controlada del agua en el pozo, cuya finalidad es eliminar residuos de bentonita, limpiar el filtro granular, si lo hay, y remover los materiales finos del acuífero en su entorno” (Comisión Nacional del Agua, 2007, p. 22). Esta deficiencia produce que el caudal específico se vea reducido en comparación a otros pozos dentro de la misma región.
- La mala distribución de los filtros en intervalos de estratos donde el acuífero es de producción baja, limita la explotación y baja su eficiencia.
- Entre otros defectos que pueden influir en el bajo rendimiento, es el uso de fluidos de perforación deficientes, grava inadecuada, deficiente verticalidad, poca profundidad, etc.).

**c. Descenso del nivel estático del agua**

El descenso del nivel estático ocurre de manera regional por problemas de sobre explotación del acuífero y/o desequilibrio del sistema acuífero por disminución de su recarga; y de manera local por interferencias por el funcionamiento de otros pozos de bombeo.

Como resultado de este descenso de la napa, la bomba tiene que extraer agua de una profundidad mayor para la que fue diseñada, muchas veces en sacrificio de un menor caudal.

Cualquier reducción de las propiedades del acuífero con la profundidad también afecta el rendimiento ya que el pozo extrae agua mayormente de las secciones bajas, menos productivas del acuífero (Binnie & Partners, 1986, p. 4).

**d. Deficiencias del equipo de bombeo**

Estas deficiencias se dan por el desgaste de sus partes (impulsores, bocinas, ejes, etc.), entre ellas la entrada de arena al pozo debido a diversos factores como el agrandamiento de la abertura de las ranuras por la corrosión o erosión produce un acelerado desgaste de los impulsores.

El sobredimensionamiento de las bombas debido al descenso del nivel estático conlleva a las condiciones de operación sean diferentes a las originales, ocasionando una caída de la eficiencia por el aumento de la altura dinámica total.

**e. Corrosión del entubado y filtros**

Es la destrucción o remoción del metal por reacción química o electromecánica con su medio ambiente. Esta remoción puede causar una falla debido, ya sea, un agrandamiento de las aberturas de las ranuras del filtro se conduce una falla por arenado, o una reducción de la resistencia que conduce al colapso o falla estructural del filtro o entubado (Binnie & Partners, 1986, p. 7).

Se manifiesta por una inusual producción de sólidos, que se inicia cuando la grava empieza a ingresar al interior de la columna de producción, por perforaciones localizadas o fracturas en la estructura (ver Figura 1), esta es una de las razones por la que la arena entre al pozo, acumulándose en el fondo pudiendo llegar a bloquear la parte baja de los filtros del pozo. Además, “se evita la corrosión utilizando aceros especiales o aceros recubiertos por capas anticorrosivas (caucho duro, barniz)” (Castany, 1975, p. 532).



**Figura 1: Perforación en tubería ciega del pozo P-95**

Fuente: Tomado de SEDAPAL

Entre las acciones para mejorar las condiciones de funcionamiento del pozo está el elaborar un adecuado proyecto, desarrollo y explotación del mismo, los cuales, son factores importantes en su resistencia a la corrosión (Custodio & Llamas, 1976).

**f. Incrustación**

Es el taponamiento de las aberturas de los filtros y de la formación acuífera con los productos de la corrosión, depósitos minerales o productos de organismos vivientes. La obstrucción de las ranuras en el filtro se manifiesta por la disminución de la capacidad específica del pozo.

Estos depósitos de incrustación pueden ser la forma dura, típica de los carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio, mientras la forma blanda es típica de los hidróxidos de hierro y manganeso (ver Figura 2).



**Figura 2: Incrustación severa**

Fuente: Tomado de SEDAPAL

Las aguas subterráneas están generalmente saturadas en carbonato cálcico, que se mantiene en disolución gracias a la presencia de cierta cantidad de anhídrido carbónico disuelto. Sin embargo, por varias razones este anhídrido carbónico se puede liberar, como por ejemplo por la entrada turbulenta del agua hacia el pozo, propiciando la precipitación del carbonato de calcio.

El carbonato de calcio puede ser arrastrado en suspensión en el agua subterránea en una proporción que depende del contenido de dióxido de carbono disuelto en ésta. La capacidad del agua para retener el dióxido de carbono en solución, varía de acuerdo con la presión, de forma que cuanto mayor la presión, más dióxido de carbono será retenido. Cuando se bombea agua de un pozo, la superficie freática se abate para provocar el gradiente necesario, o diferencia de presión, dentro de la formación acuífera, e inducir así el flujo de agua hacia el pozo. Por lo tanto, la presión hidrostática en las regiones más profundas del acuífero disminuye, haciéndolo en mayor magnitud en el punto del pozo mismo. Debido a esta reducción de presión, se libera una mayor o menor cantidad de dióxido de carbono. Cuando sucede esto, el agua pierde a menudo su aptitud para retener en solución su carga completa de

carbonato de calcio, y un aparte de este material gelatinoso se precipita a la arena adyacente a la rejilla del pozo (Johnson, 1975, p. 369).

Tanto la incrustación y la corrosión bajo ciertas condiciones pueden ocurrir de manera simultánea (ver Figura 3).



**Figura 3: Incrustación y corrosión**

Fuente: Tomado de SEDAPAL

#### **g. Erosión**

Esta ocasiona la destrucción de una superficie por la acción abrasiva (mecánica) de un fluido y generalmente es acelerada por la presencia de partículas sólidas en suspensión.

La erosión es el resultado de la velocidad excesiva o la abrasión producida por el agua o una mezcla de agua y arena, cuando es forzada a pasar por cauces restringidos tales como ranuras de filtros.

Si existen condiciones adecuadas para la corrosión, entonces también podría existir una interacción debido a la remoción de la capa protectora producida por la erosión expondría el material interior al ataque corrosivo (Binnie & Partners, 1986, p. 11).

#### **4.1.2 Características hidrogeológicas de los acuíferos Chillón y Rímac**

##### **a. Descripción general**

La cuenca del río Chillón se halla comprendida entre las coordenadas 76°20' y 77°10' de longitud oeste, y 11°20' y 12°00' de latitud sur; políticamente pertenece al departamento de Lima, ocupando las provincias de Lima y Canta; limita por el norte con la cuenca del río Chancay - Huaral, por el sur con la cuenca del río Rímac, por el este con la cuenca del río Mantaro y por el oeste con el Océano Pacífico.

La cuenca del río Chillón tiene una extensión aproximada de 2 300 km<sup>2</sup>, de la cual el 42% corresponde a la cuenca húmeda. En su curso superior, hasta la localidad de Canta, tiene una pendiente de 6% en el curso medio, de la localidad de Canta hasta Santa Rosa de Quives una pendiente de 2%.

La cuenca del Rímac se halla comprendida entre las coordenadas 76°05' y 76°10' de longitud oeste y 11°25' y 12°10' de latitud sur.

Políticamente se ubica en el departamento de Lima, ocupando las provincias de Lima y Huarochirí. Limita por el norte con la cuenca del río Chillón, por el sur con las cuencas de los ríos Mala y Lurín, por el este con la cuenca del Mantaro y por el oeste con el Océano Pacífico.

La cuenca del río Rímac cuenta con un área de drenaje total de 3 583 km<sup>2</sup>; la pendiente promedio es de 3,62%. La superficie de la cuenca húmeda es de 2 211 km<sup>2</sup>, es decir, el 61,2% del área total contribuye al escurrimiento superficial y subterráneo.

##### **b. Profundidad de la Napa**

Los niveles del acuífero Chillón varían desde profundidades someras hasta 38 m y aumentan mientras se alejan del río. En los pozos ubicados en la margen derecha del río de la parte alta-media se registra un mayor descenso de los niveles durante la temporada de estiaje influenciado por las operaciones del proyecto Agua Azul, con niveles relativamente someros que varían entre 2 a 30 m. En la parte media, en la margen derecha del río se presentan niveles más profundos con niveles que varían hasta 28 m y en la margen izquierda entre Pte. Piedra y Carabayllo los niveles varían entre 4 a 28 m. En la parte baja no

se registra mucha información de niveles como en Ventanilla, norte de Callao y San Martín de Porres. Además, se observa la recuperación de los niveles en sectores de Pte. Piedra y Carabaylo.

En el acuífero Rímac se presentan niveles muy someros que varían de 0 a 3 m, como en La Punta y en los Pantanos de Villa en Chorrillos, niveles relativamente profundos en distritos cerca al litoral costero y niveles profundos que varían 50 a 98 m en Ate, San Borja, San Isidro y sectores de Surco.

Los pozos ubicados en Chaclacayo cerca al río presentan niveles someros. En el margen derecho del río los niveles se profundizan en dirección del flujo.

### **c. Coeficiente de permeabilidad**

En los acuíferos del Chillón, Rímac y Lurín, para el año 1971, las permeabilidades presentan valores que, en su mayor parte, van de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  m/s. La tendencia general es a una disminución de la permeabilidad de aguas arriba hacia aguas abajo. Esta tendencia coincide con la dinámica geológica de disposición de material detrítico. En cuanto a los valores del coeficiente de almacenamiento (S), no se puede señalar ninguna tendencia definida en su repartición geográfica. Los valores antes citados son producto de pruebas hidrodinámicas realizadas sobre el segmento superior de los aluviones. En las pruebas realizadas sobre todo después de 1980 en que se inicia una tendencia a la reprofundización y perforación de nuevos pozos más profundos que captan parte del tramo inferior más fino de los terrenos aluviales, se registran en general valores de permeabilidad más bajos que para 1971. Así, en pruebas realizadas en los últimos cuatro (4) años (unas 80) se han obtenido los siguientes valores de permeabilidad: para el acuífero del valle del Chillón, entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$  m/s; para el acuífero del valle del Rímac entre  $10^{-3}$  y  $10^{-7}$  m/s; y, para el acuífero del valle de Lurín, entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  m/s. En los casos de los acuíferos del Chillón y del Rímac no se presenta una tendencia definida para la repartición de los valores de hidráulica subterránea; y, en el caso del acuífero del Lurín, se mantiene la tendencia y rango de los valores de 1971 (Asociación ANTEA-AMSA, 1999, p. 37).

#### **d. Coeficiente de almacenamiento**

Para 1971, en el acuífero del Chillón los valores de coeficientes de almacenamiento (S) van de más del 0.05 (propios de acuíferos de napa libre) hasta 0,02 (se aproxima a valores de acuíferos con napas confinadas).

Los valores de coeficiente de almacenamiento hallados en pruebas realizadas con posterioridad a 1980 se presentan de la siguiente forma: en el acuífero del Chillón de 0,005 a 0,1.

En el caso del acuífero del Rímac, los valores de coeficiente de almacenamiento hallados fluctuaban entre 0,05 y 0,002 y, en el caso del acuífero del Lurín, existía un valor referencial del 0,05.

Los valores de coeficiente de almacenamiento hallados en pruebas realizadas con posterioridad a 1980 se presentan de la siguiente forma en el acuífero del Rímac de 0,001 a 0,05. En proximidades al río Rímac se han encontrado valores de hasta 1,5 de coeficiente de almacenamiento (Pozo P-459) (Asociación ANTEA-AMSA, 1999, p. 38).

### **4.1.3 Ecuaciones aplicables en la evaluación de pozos**

#### **a. Método de Jacob (Resolución gráfica de los valores B y C)**

Según Rorabaugh (1953), el descenso de un pozo puede expresarse por la siguiente fórmula:

$$s = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

Donde:

s = Abatimiento total del nivel de agua en el pozo (nivel dinámico – nivel estático) (m).

B·Q = Abatimiento del nivel de agua debido a las características hidrogeológicas del acuífero (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y condiciones límites).

C·Q<sup>n</sup> = Abatimiento producido por pérdidas de carga en el paso del agua hacia el pozo. Depende de la velocidad de entrada al pozo y de la forma y porcentaje de aberturas en el filtro, así como el grado de desarrollo en la formación inmediatamente alrededor del pozo. En

general este abatimiento depende de la calidad constructiva de la obra, del estado en que se encuentran el área filtrante del pozo y la formación acuífera inmediatamente a su alrededor.

Q = Caudal de bombeo (m<sup>3</sup>/día).

n = Suele estar comprendido entre valores de 1 a 3,5. Cuando su valor esta entre 1 y 2, la circulación de agua en las proximidades del pozo es laminar. Cuando n es mayor a 2, la circulación es de régimen turbulento.

B = Coeficiente que depende de las características hidrogeológicas del acuífero (día/m<sup>2</sup>).

C = Coeficiente que depende de las características constructivas y del estado del pozo (días<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>).

El método que propone Jacob (1950) fija el valor de n = 2, de modo que la ecuación de descenso queda:

$$s = B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

Para la dos de los regímenes de bombeo:

$$s_1 = B \cdot Q_1 + C \cdot Q_1^2$$

$$s_2 = B \cdot Q_2 + C \cdot Q_2^2$$

Para la determinación de los coeficientes B y C se utilizan los resultados de una prueba de rendimiento resolviendo como mínimo las ecuaciones de dos de los regímenes de bombeo:

$$\frac{s_1}{Q_1} = B + C \cdot Q_1$$

$$\frac{s_2}{Q_2} = B + C \cdot Q_2$$

Puede procederse a resolver analíticamente el sistema de dos ecuaciones planteado, o bien se puede efectuar la resolución gráfica, dibujando S/Q en función de Q y trazando la recta que pasa por esos puntos. La pendiente da el valor de C y la ordenada en el origen el valor de B. En el mismo gráfico pueden dibujarse otros valores del ensayo y ver si se ajustan a la recta determinada (Custodio & Llamas, 1976, p. 829).

Respecto al valor del coeficiente C, Walton (en Bierschenk, 1964) establece como regla orientativa las siguientes condiciones constructivas del pozo:

**Tabla 1: Valores del coeficiente C de pérdidas de carga hidráulica de pozos según Walton**

C (días <sup>2</sup> /m <sup>5</sup> )	Condiciones constructivas del pozo
$C \leq 2,5 \cdot 10^{-7}$	Bien construido y bien desarrollado
$2,5 \cdot 10^{-7} \leq C \leq 50 \cdot 10^{-7}$	Principios de incrustación de la rejilla
$50 \cdot 10^{-7} \leq C \leq 200 \cdot 10^{-7}$	Incrustación o taponamiento importante
$C \geq 200 \cdot 10^{-7}$	Incrustación es muy fuerte y la rehabilitación puede ser muy difícil o imposible

Fuente: Adaptado de Custodio & Llamas (1976)

#### b. Método analítico

Si el valor de n=2 no parece el indicado, se procede a tomar tres pares de valores y resolver el sistema de ecuaciones:

$$s_1 = B \cdot Q_1 + C \cdot Q_1^n$$

$$s_2 = B \cdot Q_2 + C \cdot Q_2^n$$

$$s_3 = B \cdot Q_3 + C \cdot Q_3^n$$

Para la resolución del sistema propuesto, se divide entre el caudal Q cada uno de las ecuaciones planteadas, obteniendo:

$$\frac{s_1}{Q_1} = B + C \cdot Q_1^{n-1}$$

$$\frac{s_2}{Q_2} = B + C \cdot Q_2^{n-1}$$

$$\frac{s_3}{Q_3} = B + C \cdot Q_3^{n-1}$$

El método analítico elimina del sistema los coeficientes B y C, quedando:

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

Tanteando diferentes valores de n se puede hallar el que cumple mejor la ecuación. Una vez determinado n, se calcula B y C.

Para valores de  $n > 2$ , se obtienen valores de C menores y por lo tanto no sería válido la regla establecida por Walton, para lo cual se busca un coeficiente equivalente para efectuar la comparación:

$$C' = \frac{C \cdot Q^n}{Q^2}$$

#### c. Eficiencia hidráulica del pozo

En base a la determinación de la ecuación del abatimiento del pozo su eficiencia hidráulica se determina según la siguiente expresión:

$$Eficiencia (\%) = \frac{B \cdot Q}{(B \cdot Q + C \cdot Q^n)} \cdot 100$$

Q = Caudal de bombeo (m<sup>3</sup>/día).

B = Coeficiente que depende de las características hidrogeológicas del acuífero (día/m<sup>2</sup>).

C = Coeficiente que depende de las características constructivas y del estado del pozo (días<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>).

#### d. Caudal específico del pozo

Es el caudal aportado por unidad de descenso de nivel del agua en el pozo, nos da una idea de la efectividad o capacidad productiva del pozo, “para que el pozo sea realmente eficiente es necesario que el caudal específico sea lo mayor posible, sin, claro está, bombear arena” (Custodio & Llamas, 1976, p. 1721). Está representado por la siguiente expresión:

$$Q_e = \frac{Q}{s}$$

Q<sub>e</sub> = Caudal específico (l/s/m).

Q = Caudal de bombeo (l/s).

s = Abatimiento total del nivel de agua en el pozo (nivel dinámico – nivel estático) (m).

#### **4.1.4 Inspección por cámara de televisión (CCTV)**

La inspección por cámara de televisión nos detalla en estado actual del pozo y como resultado de este, se determinará el trabajo a ejecutar (mantenimiento correctivo, rehabilitación o ambos). Los pozos donde se realiza inspección por cámara de televisión son pozos que están desmontados, es decir sin equipo de bombeo.

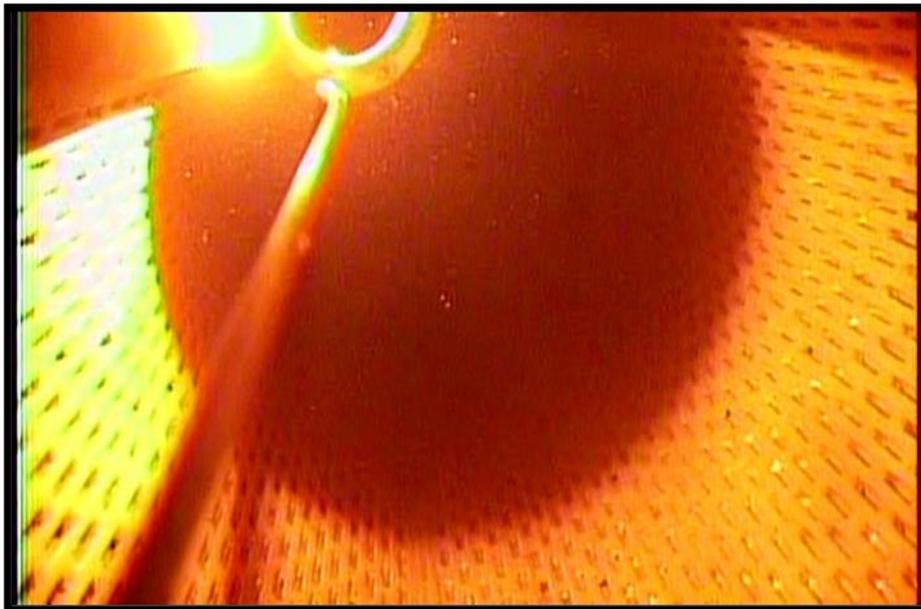
##### **a. Etapas para la ejecución de una inspección por cámara de televisión**

- Verificación del estado de funcionamiento del equipo de inspección de cámara de TV.
- Traslado del equipo de CCTV hasta el pozo.
- Preparación del ambiente de trabajo.
- Señalización del perímetro de trabajo
- Montaje del sistema de inspección y sus componentes.
- Instalación del sistema de inspección en la boca del pozo (ver Figura 4).
- Ejecución de la inspección con cámara de TV (ver Figura 5).
- Desmontaje del sistema de inspección y sus componentes.
- Retorno del equipo de CCTV.



**Figura 4: Instalación de la cámara de TV en la boca del pozo**

Fuente: Tomado de SEDAPAL



**Figura 5: Inspección del pozo por cámara de TV**

Fuente: Tomado de SEDAPAL

Las inspecciones de cámara de televisión, además de mostrarnos el estado del pozo, es ampliamente usado para obtener el diseño del pozo con fines de regularización de licencias de uso de agua subterránea.

#### **4.1.5 Procedimientos para recuperar la producción de pozos tubulares**

##### **a. Mantenimiento preventivo y desinfección del pozo**

Dicho mantenimiento se ejecuta en el pozo con el equipo de bombeo instalado, frecuentemente en pozos en funcionamiento o reserva y cuenta con el siguiente procedimiento:

- Planeamiento y programación.
- Coordinaciones previas.
- Realizar purgado previo.
- Instalar tubería de recirculación (en caso de no contar con uno).
- Instalación del sistema de recirculación.
- Preparar y aplicar el producto desincrustante biodegradable según dosificación requerida (5 kg por metro lineal de filtro).
- Recirculación por un lapso de 12 a 16 horas.
- Purgado del producto desincrustante biodegradable.
- Preparar y aplicar el producto desinfectante del pozo según dosificación requerida (1 kg por cada 10 metros lineales de columna de agua del pozo).
- Recirculación y reposo del producto desinfectante por un lapso de 12 horas.
- Recirculación y purgado producto desinfectante del pozo.
- Desmontaje de equipo de recirculación.
- Toma de muestra de agua después de 72 horas como mínimo.

##### **b. Mantenimiento correctivo**

Es el proceso de eliminación mediante actividades físicas y químicas de las incrustaciones formadas por la actividad química del agua en la columna (zona de filtros). Si el pozo ha estado en funcionamiento no requiere de un purgado previo, caso contrario de haber estado en reserva, se realiza un purgado con una bomba de prueba. El procedimiento cuenta con las siguientes etapas:

- Planeamiento y programación.
- Coordinaciones previas.

- Instalación de maquinaria y equipos.
- Toma de datos iniciales (N.E., profundidad).
- Rascado de tubería ciega y filtros (dependiendo el grosor de las incrustaciones).
- Preparación de producto desincrustante biodegradable según dosificación requerida (5 kg por metro lineal de filtro).
- Aplicación del producto desincrustante biodegradable.
- Cepillado de los filtros.
- Recuperación de fondo (pistón o aire comprimido).
- Montaje de equipo de bombeo.
- Purgado del producto desincrustante biodegradable.
- Instalación del sistema de recirculación.
- Preparar y aplicar el producto desinfectante del pozo según dosificación requerida (1 kg por cada 10 metros lineales de columna de agua del pozo).
- Recirculación y reposo del producto desinfectante por un lapso de 12 horas.
- Recirculación y purgado producto desinfectante del pozo.
- Desmontaje de equipo de recirculación.
- Prueba de rendimiento del pozo a fin de establecer las nuevas condiciones de equipamiento y funcionamiento.
- Toma de muestra de agua después de 72 horas como mínimo.
- Desmontaje del equipo de bombeo.
- Sellado temporal.

**c. Rehabilitación por doble entubado**

Es el proceso por el cual mediante actividades físicas se recupera la estructura hidráulica dañada (tubería ciega y/o filtros) de un pozo dañado, el mismo que se da con la instalación de forma concéntrica de una columna de menos diámetro que la original. Dependiendo el estado del pozo (corrosión e incrustación severa), se realizará una limpieza previa de acuerdo al procedimiento de mantenimiento correctivo; teniendo en consideración la

estructura metálica, la cual puede sufrir el colapso de la misma, en caso de ejecutarse actividades de rasqueteo o cepillado debido a su deterioro y antigüedad. El procedimiento cuenta con las siguientes etapas:

- Planeamiento y programación.
- Coordinaciones previas.
- Instalación de maquinaria y equipos.
- Ejecución del procedimiento de mantenimiento correctivo, en consideración que el estado de la estructura metálica lo permita.
- Instalación de la nueva columna metálica de menor diámetro.
- Prueba de verticalidad o alineamiento de la columna.
- Anclaje de la columna (fijado en la boca del pozo).
- Montaje de equipo de bombeo.
- Purgado del producto desincrustante biodegradable.
- Instalación del sistema de recirculación.
- Preparar y aplicar el producto desinfectante del pozo según dosificación requerida (1 kg por cada 10 metros lineales de columna de agua del pozo).
- Recirculación y reposo del producto desinfectante por un lapso de 12 horas.
- Recirculación y purgado producto desinfectante del pozo.
- Desmontaje de equipo de recirculación.
- Prueba de rendimiento del pozo a fin de establecer las nuevas condiciones de equipamiento y funcionamiento.
- Desmontaje del equipo de bombeo.
- Sellado temporal.

## **4.2 Metodología del trabajo ejecutado**

### **4.2.1 Características del pozo y su equipo de bombeo**

La información histórica, características de los pozos, su equipamiento y sus registros de campo, se obtuvo del banco de expedientes de los pozos del EASu, donde se consigna toda la información desde la etapa de memoria constructiva de los pozos hasta sus mantenimientos posteriores, la cual sirvió como base para la evaluación previa.

#### **a. Datos generales del pozo tubular P-717 Estrella**

Ubicación: Asoc. Pro Viv. La Estrella Fte. Mz-B1 Lot-1 Los Portales del Sol, distrito de Los Olivos (ver Anexo 1 – Figura 10).

Coordenadas

Este: 274143 m

Norte: 8679018 m

Año de construcción: 1984

Profundidad inicial (m): 98,00

Condiciones de operación inicial

Q (l/s): 18

N.E. (m): 20,00

N.D. (m): 60,00

Instalación de bomba sobre impulsores (m): 65,00

Estado actual: En reserva

Equipo de bombeo: Sin equipo

Datos del último registro de campo (2010):

Q (l/s): 16

N.E. (m): 18,10

N.D. (m): 48,85

**b. Datos generales del pozo tubular P-167 La Virreyna**

Ubicación: Parque La Tapada, distrito de Surco (ver Anexo 1 – Figura 11).

Coordenadas

Este: 282907 m

Norte: 8656678 m

Año de construcción: 1970

Profundidad inicial (m): 120

Condiciones de operación inicial

Q (l/s): 70

N.E. (m): 23,00

N.D. (m): 50,00

Estado actual: En funcionamiento

Equipo de bombeo

Tipo de Bomba: Turbina vertical

Marca de la bomba: BJ-8

Modelo de bomba: 10GH-10

Datos del último registro de campo (2019):

Q (l/s): 27

N.E. (m): 51,90

N.D. (m): 58,00

**c. Diseño inicial de los pozos**

• **P-717 Estrella**

La descripción de la estructura hidráulica inicial (ver Anexo 2 – Figura 12)

es la siguiente:

**Tabla 2: Diseño inicial del pozo P-717**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0,00 – 72,00	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
72,00 – 77,00	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
77,00 – 78,20	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
78,20 – 83,20	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
83,20 – 84,40	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
84,40 – 89,40	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
89,40 – 90,60	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
90,60 – 95,60	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
95,60 – 98,00	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor

- **P-167 La Virreyna**

La descripción de la estructura hidráulica inicial (ver Anexo 2 – Figura 13) es la siguiente:

**Tabla 3: Diseño inicial del pozo P-167**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0,00 – 60,00	Tubería ciega de acero negro de 18” diámetro de ¼” espesor
58,00 – 67,00	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
67,00 – 81,64	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
81,64 – 83,40	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
83,40 – 95,60	Tubo nacional filtrante de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
95,60 – 97,68	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor
97,68 – 117,20	Filtros tipo NOLD de acero inoxidable de 15” diámetro de ¼” espesor
117,20 – 120,00	Tubería ciega de acero negro de 15” diámetro de ¼” espesor

#### d. Prueba de rendimiento inicial de los pozos

- **P-717 Estrella**

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 97 horas (ver Anexo 3 – Figura 14), ejecutados al finalizar la perforación del pozo, con un nivel estático de 20,00 y una instalación de bomba a los 65,00 m. Siendo los resultados del mismo, los siguientes:

**Tabla 4: Prueba de rendimiento inicial del P-717**

Caudal (l/s)	Nivel Dinámico (m)
15	45,60
19	55,00
22	68,80

- **P-167 La Virreyna**

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 90 horas (ver Anexo 3 – Figura 15), ejecutados al finalizar la perforación del pozo, con un nivel estático de 23,00 y una instalación de bomba a los 94,00 m. Siendo los resultados del mismo, los siguientes:

**Tabla 5: Prueba de rendimiento inicial del P-167**

Caudal (l/s)	Nivel Dinámico (m)
45	38,00
60	44,75
70	50,00
80	55,00

#### 4.2.2 Evaluación del estado inicial de los pozos

Se evaluó el estado inicial de los pozos tubulares a través de la ecuación de su abatimiento, el cual para determinar sus coeficientes B y C, se utilizó el método de Jacob ( $n = 2$ ) y el método analítico (tanteo de  $n$ ), a partir de los cuales se estableció

su estado inicial según su coeficiente C (ver Tabla 1), eficiencia hidráulica y caudal específico. Asimismo, mediante esta evaluación se determinó si el bajo rendimiento se debe a los factores constructivos descritos en los conceptos.

**a. Método de Jacob (Resolución gráfica de los valores B y C)**

• **P-717 Estrella**

En la Tabla 6 se presentan los datos de descensos correspondientes a la prueba de rendimiento inicial ejecutada al pozo P-717. Asimismo, se muestran los valores obtenidos para la evaluación del estado del pozo por el método de Jacob. Siendo estos los siguientes:

**Tabla 6: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-717**

Escalón	Q (l/s)	Q (m3/día)	N.D. (m)	s (m)	s/Q (días/m <sup>2</sup> )	Qe (l/s/m)
1	15	1296,00	45,60	25,60	0,01975	0,586
2	19	1641,60	55,00	35,00	0,02132	0,543
3	22	1900,80	68,80	48,80	0,02567	0,451

Nota: Los datos se obtuvieron de la prueba de rendimiento inicial al finalizar su perforación.

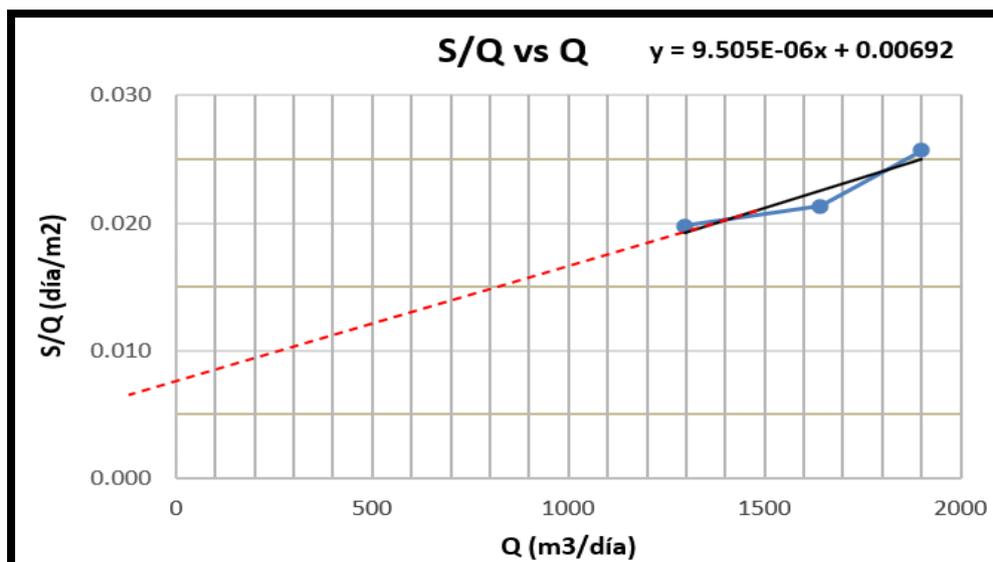
Según Jacob, se fija el valor de  $n = 2$ , por lo que se ajusta la fórmula de descenso de acuerdo a los resultados obtenidos para determinar los coeficientes B y C:

$$25,60 = B \cdot 1296,00 + C \cdot 1296,00^2 \quad \wedge \quad 0,01975 = B + C \cdot 1296,00$$

$$35,00 = B \cdot 1641,60 + C \cdot 1641,60^2 \quad \wedge \quad 0,02132 = B + C \cdot 1641,60$$

$$48,80 = B \cdot 1900,80 + C \cdot 1900,80^2 \quad \wedge \quad 0,02567 = B + C \cdot 1900,80$$

Mediante la resolución gráfica de la Figura 6, se determinó los siguientes valores de B y C:



**Figura 6:** Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-717, estado inicial

$$B = 0,00692 \text{ día/m}^2$$

$$C = 9,505 \cdot 10^{-6} \text{ días}^2/\text{m}^5 = 95,05 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C = 95,05 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , el estado inicial del pozo P-717 señala que la incrustación o taponamiento de los filtros es importante.

- **P-167 La Virreyna**

En la Tabla 7 se presentan los datos de descensos correspondientes a la prueba de rendimiento inicial ejecutada al pozo P-167. Asimismo, se muestran los valores obtenidos para la evaluación del estado del pozo por el método de Jacob. Siendo estos los siguientes:

**Tabla 7:** Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-167

Escalón	Q (l/s)	Q (m3/día)	N.D. (m)	s (m)	s/Q (días/m2)	Qe (l/s/m)
1	45	3888,00	38,00	15,00	0,00386	3,000
2	60	5184,00	44,75	21,75	0,00420	2,759
3	70	6048,00	50,00	27,00	0,00446	2,593
4	80	6912,00	55,50	32,50	0,00470	2,462

Nota: Los datos se obtuvieron de la prueba de rendimiento inicial al finalizar su perforación.

Según Jacob, se fija el valor de  $n = 2$ , por lo que se ajusta la fórmula de descenso de acuerdo a los resultados obtenidos para determinar los coeficientes B y C:

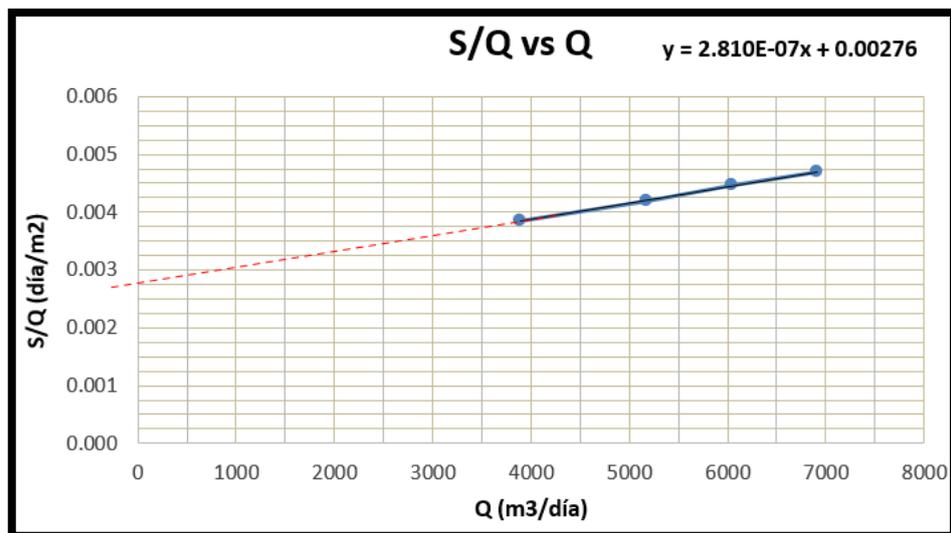
$$15,00 = B \cdot 3888,00 + C \cdot 3888,00^2 \quad \wedge \quad 0,00386 = B + C \cdot 3888,00$$

$$21,75 = B \cdot 5184,00 + C \cdot 5184,00^2 \quad \wedge \quad 0,00420 = B + C \cdot 5184,00$$

$$27,00 = B \cdot 6048,00 + C \cdot 6048,00^2 \quad \wedge \quad 0,00446 = B + C \cdot 6048,00$$

$$32,50 = B \cdot 6912,00 + C \cdot 6912,00^2 \quad \wedge \quad 0,00470 = B + C \cdot 6912,00$$

Mediante la resolución gráfica de la Figura 7, se determinó los siguientes valores de B y C:



**Figura 7: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-167, estado inicial**

$$B = 0.00276 \text{ día/m}^2$$

$$C = 2,81 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C = 2,81 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , el estado inicial del pozo P-167 señala principios de incrustación de los filtros.

**b. Método analítico**

• **P-717 Estrella**

Utilizando los datos de descenso representados en la Tabla 4, correspondientes a la prueba de rendimiento inicial ejecutada al pozo P-717, se procede a establecer el siguiente sistema de ecuaciones:

$$25,60 = B \cdot 1296,00 + C \cdot 1296,00^n \quad \wedge \quad 0,01975 = B + C \cdot 1296,00^{n-1}$$

$$35,00 = B \cdot 1641,60 + C \cdot 1641,60^n \quad \wedge \quad 0,02132 = B + C \cdot 1641,60^{n-1}$$

$$48,80 = B \cdot 1900,80 + C \cdot 1900,80^n \quad \wedge \quad 0,02567 = B + C \cdot 1900,80^{n-1}$$

Al eliminar los coeficientes B y C del sistema de ecuaciones queda:

$$\frac{\frac{35,00}{1641,60} - \frac{25,60}{1296,00}}{\frac{48,80}{1900,80} - \frac{35,00}{1641,60}} = 0,3601$$

Se procede a tantear distintos valores de n (rango entre 1 a 3,5) para hallar el que cumpla mejor con la ecuación:

$$\frac{1641,60^{n-1} - 1296,00^{n-1}}{1900,80^{n-1} - 1641,60^{n-1}}, \text{ para } n = 3,5$$

$$\frac{1641,60^{2,5} - 1296,00^{2,5}}{1900,80^{2,5} - 1641,60^{2,5}} = 1,008$$

Comparando resultados de ambas ecuaciones:

$$0,3601 \neq 1,008$$

Mediante el tanteo de valores de n se determinó que, para cumplir con la igualdad de ambas ecuaciones, el valor de n debe ser superior al límite de 3,5.

Un valor de n alto nos indica una pérdida de carga alta en el pozo, en este caso el bombeo se realizó al finalizar los trabajos de perforación. Esto nos indicaría una ineficiencia del pozo debido a defectos de diseño o constructivos.

• **P-167 La Virreyna**

Utilizando los datos de descenso representados en la Tabla 5, correspondientes a la prueba de rendimiento inicial ejecutada al pozo P-167,

se procede a establecer el siguiente sistema de ecuaciones:

$$15,00 = B \cdot 3888,00 + C \cdot 3888,00^n \quad \wedge \quad 0,00386 = B + C \cdot 3888,00^{n-1}$$

$$21,75 = B \cdot 5184,00 + C \cdot 5184,00^n \quad \wedge \quad 0,00420 = B + C \cdot 5184,00^{n-1}$$

$$27,00 = B \cdot 6048,00 + C \cdot 6048,00^n \quad \wedge \quad 0,00446 = B + C \cdot 6048,00^{n-1}$$

$$32,50 = B \cdot 6912,00 + C \cdot 6912,00^n \quad \wedge \quad 0,00470 = B + C \cdot 6912,00^{n-1}$$

Al eliminar los coeficientes B y C del sistema de ecuaciones queda:

$$\frac{\frac{21,75}{5184,00} - \frac{15,00}{3888,00}}{\frac{27,00}{6048,00} - \frac{21,75}{5184,00}} = 1,256$$

Se procede a tantear distintos valores de n (rango entre 1 a 3,5) para hallar el que cumpla mejor con la ecuación:

$$\frac{5184,00^{n-1} - 3888,00^{n-1}}{6048,00^{n-1} - 5184,00^{n-1}}, \text{ para } n = 2,847$$

$$\frac{5184,00^{1,847} - 3888,00^{1,847}}{6048,00^{1,847} - 5184,00^{1,847}} = 1,251$$

Comparando resultados de ambas ecuaciones:

$$1,256 \approx 1,251$$

Mediante el tanteo de valores de n se determinó que, para cumplir con la igualdad de ambas ecuaciones, el valor de n debe ser de 2,847.

Para determinar los coeficientes B y C, se reemplaza el n = 2,847 en el sistema de ecuaciones, obteniendo los siguientes resultados:

$$B = 0,003377 \text{ día/m}^2$$

$$C = 1,126 \cdot 10^{-10} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

Para que el valor de C sea admisible para clasificarlo dentro de las condiciones constructivas del pozo de Walton, se buscó el coeficiente equivalente:

$$C' = \frac{(1,126 \cdot 10^{-10}) \cdot (3888,00^{2,847})}{3888,00^2} = 1,236 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C' = 1,236 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , el estado inicial del pozo P-167 señala que está bien construido y bien desarrollado.

**c. Eficiencia hidráulica del pozo**

• **P-717 Estrella**

La eficiencia hidráulica en el estado inicial del pozo se determinará utilizando los valores obtenidos mediante el método de Jacob:

$$n = 2$$

$$B = 0,00692 \text{ día}/\text{m}^2$$

$$C = 95,05 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

$$Q = 1641,60 \text{ m}^3/\text{día}$$

Siendo la eficiencia hidráulica calculada del pozo de 30,72 %.

• **P-167 La Virreyna**

La eficiencia hidráulica en el estado inicial del pozo se determinará utilizando los valores obtenidos mediante el método de Jacob:

$$n = 2$$

$$B = 0,00276 \text{ día}/\text{m}^2$$

$$C = 2,81 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

$$Q = 6048,00 \text{ m}^3/\text{día}$$

Siendo la eficiencia hidráulica calculada del pozo de 61,89 %.

**d. Caudal específico del pozo**

• **P-717 Estrella**

Calculando el caudal específico del pozo según las condiciones iniciales establecidas:

$$Q = 19 \text{ l/s}$$

$$\text{Nivel estático} = 20,00 \text{ m}$$

$$\text{Nivel dinámico} = 55,00 \text{ m}$$

$$\text{Abatimiento} = 35,00 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{19 \text{ l/s}}{35,00 \text{ m}} = 0,542 \text{ l/s/m}$$

- **P-167 La Virreyna**

Calculando el caudal específico del pozo según las condiciones iniciales establecidas:

$$Q = 70 \text{ l/s}$$

$$\text{Nivel estático} = 23,00 \text{ m}$$

$$\text{Nivel dinámico} = 50,00 \text{ m}$$

$$\text{Abatimiento} = 27,00 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{70 \text{ l/s}}{27,00 \text{ m}} = 2,592 \text{ l/s/m}$$

#### 4.2.3 Evaluación del estado de los pozos antes de ejecutarse las actividades de mantenimiento y rehabilitación

La evaluación de los pozos previos a ejecutarse las actividades de mantenimiento y rehabilitación se determinaron con el último registro de campo disponible en funcionamiento, esto debido a que ambos pozos no cuentan con pruebas de rendimiento actualizadas al momento de evaluar su estado actual. En tal sentido, se procedió a realizar la evaluación a través de los caudales específicos siguientes:

- **P-717 Estrella**

Calculando el caudal específico del pozo según el último registro de campo realizado:

$$Q = 16 \text{ l/s}$$

$$\text{Nivel estático} = 18,10 \text{ m}$$

$$\text{Nivel dinámico} = 48,85 \text{ m}$$

$$\text{Abatimiento} = 30,75 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{16 \text{ l/s}}{30,75 \text{ m}} = 0,520 \text{ l/s/m}$$

- **P-167 La Virreyna**

Calculando el caudal específico del pozo según el último registro de campo

realizado:

$$Q = 27 \text{ l/s}$$

Nivel estático = 51,90 m

Nivel dinámico = 58,00 m

Abatimiento = 6,10 m

$$Q_e = \frac{27 \text{ l/s}}{6,10 \text{ m}} = 4,426 \text{ l/s/m}$$

#### 4.2.4 Resultados de la inspección por cámara de televisión (CCTV)

- **P-717 Estrella**

Con la finalidad de ver el estado actual en que se encontraba el pozo P-717 Estrella, se procedió a realizar una la inspección por cámara de televisión, encontrándose el nivel estático a 22,03 m y una profundidad de inspección de 87,89 m, lo que indico una sedimentación acumulada de 10,31 m.

El estado de conservación inspeccionado de la tubería ciega de acero negro y de 15" de diámetro, presentó en los tramos iniciales corrosión moderada con poca presencia de incrustaciones (ver Anexo 4 – Figura 16). La zona media de la tubería presentó corrosión e incrustaciones severas, así como una rotura del mismo a los 72,11 m.

El estado de conservación inspeccionado de los filtros de acero inoxidable y de 15" de diámetro, presentó en los tramos iniciales y medios la obstrucción de sus aberturas debido a abundantes incrustaciones. La zona baja de los filtros no se inspeccionó debido a la acumulación de sedimentos en el fondo (ver Anexo 4 – Figura 17).

- **P-167 La Virreyna**

Con la finalidad de ver el estado actual en que se encontraba el pozo P-167 La Virreyna, se procedió a realizar una la inspección por cámara de televisión, encontrándose el nivel estático a 52,73 m y una profundidad de inspección de 109,25 m, lo que indico una sedimentación acumulada de 10,75 m.

El estado de conservación inspeccionado de la tubería ciega de acero negro y de 18" de diámetro, presentó una fuerte corrosión con poca presencia de

incrustaciones. En la tubería ciega de acero negro y de 15” de diámetro, se presentan varias perforaciones de mediano tamaño, el cual permiten el ingreso de grava y sedimento al interior de la columna (ver Anexo 4 – Figura 18).

No se visualizó el estado de conservación de los filtros de acero inoxidable y de 15” de diámetro, debido a la presencia de fuerte incrustación (ver Anexo 4 – Figura 19).

#### **4.2.5 Procedimientos ejecutados en la recuperación de producción de los pozos**

A través de los resultados obtenidos en la etapa de evaluación e inspección por cámara de televisión del estado actual de los pozos P-717 Estrella y P-167 La Virreyna, se determinó que ambos pozos requerían una rehabilitación por doble entubado, previa limpieza de la columna inicial (tubería ciega y filtros) de acuerdo al procedimiento de mantenimiento correctivo, esto debido a la corrosión e incrustación severa.

##### **a. P-717 Estrella**

La caseta en donde se encuentra el pozo es de material noble y con techo de concreto armado desmontable, debido al deterioro de la columna de acero de 15” se procedió a la instalación de una columna de acero inoxidable de 12”, previamente se ejecutó el mantenimiento correctivo de la columna inicial para recuperar el área filtrante del mismo. El pozo al haber estado en reserva, se realizó un purgado previo con una bomba de prueba.

El pozo se encontró sin equipo de bombeo, sin árbol de descarga, el equipo de cloración y las conexiones eléctricas se encontraron bloqueadas.

- Planeamiento y programación.

El pozo fue programado dentro del plan anual de mantenimientos del EASu, para lo cual se dispuso su inspección por cámara de TV, conociéndose el estado del pozo, se planificó las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

- Coordinaciones previas.

Previamente a iniciar los trabajos se comunicó mediante carta a su respectiva municipalidad, los trabajos en áreas públicas ejecutados en la

infraestructura hidráulica del pozo.

Se coordinó con el personal del Equipo Prevención y Vigilancia las rondas policiales inopinadas a fin de cautelar la maquinaria y equipos que se destinaron en el pozo.

- Instalación de maquinaria y equipos.

Se realizó una inspección previa a la caseta del pozo, donde se verificó el tipo de la caseta (superficial) y su acceso a las instalaciones. Se determinó que la máquina rehabilitadora Tone Boring era la más adecuada para los trabajos de mantenimiento y rehabilitación. Además, con la inspección se pudo establecer las medidas de seguridad colectivas a utilizarse.

- Toma de datos iniciales (N.E., profundidad).

El nivel estático el día de iniciado las labores de campo fueron de 22,03 m y una profundidad de 87,69 m.

- Montaje de equipo de bombeo de prueba.

El pozo al haber estado en reserva, se procedió al montaje de un equipo de bombeo de prueba.

- Purgado previo del agua del pozo.

El purgado previo duró alrededor de 6 horas para eliminar cualquier tipo de contaminación, dado que el polímero desincrustante biodegradable puede reaccionar a este.

- Desmontaje del equipo de bombeo.

- Rascado de tubería ciega y filtros (dependiendo el grosor de las incrustaciones).

Según la inspección por cámara de TV, el pozo tenía incrustaciones duras, por lo que procedió al rascado de las tuberías y filtros para recuperar el diámetro interno de la columna del pozo. Se utilizó un rascador de tipo campana para tal procedimiento.

- Preparación de producto desincrustante biodegradable según dosificación requerida (5 kg por metro lineal de filtro).

Se utilizó 100 kg de producto biodegradable en 1000 litros de agua para los 20 m de filtros de la columna.

- Aplicación del producto desincrustante biodegradable.
- Cepillado de los filtros.

El cepillo se colocó en la boca del pozo suspendido del cable de la unidad rehabilitadora, adicionando una tubería pesada para evitar que flote el cepillo al contacto con el agua, en la zona de filtros se pistoneó por 5 minutos por metro lineal.

- Recuperación de fondo (pistón o aire comprimido).

Se colocó el pistón en la boca del pozo suspendido del cable de la unidad rehabilitadora, al bajar el pistón hasta el fondo, este succionó el material depositado. Al levantar el pistón a la superficie con el sedimento, se depositó en un recipiente para su eliminación.

- Instalación de la nueva columna metálica de menor diámetro.

Se instaló una columna de acero inoxidable de 12" de diámetro según diseño, la cual se procedió a bajar por tramos y se fueron empalmando hasta llegar a su profundidad final, verificando su alineamiento.

- Prueba de verticalidad o alineamiento de la columna.

Se comprobó a través de la prueba de verticalidad que la columna estuvo correctamente alineada.

- Anclaje de la columna (fijado en la boca del pozo).

- Montaje de equipo de bombeo

Se montó una bomba sumergible instalada a 78,00 m.

- Purgado del producto desincrustante biodegradable.

Se realizó el purgado eliminando el desincrustante biodegradable a la red de alcantarillado.

- Instalación del sistema de recirculación.

- Preparar y aplicar el producto desinfectante del pozo según dosificación requerida (1 kg por cada 10 metros lineales de columna de agua del pozo).

Se disolvió aproximadamente 7,50 kg de hipoclorito de calcio al 65% de contenido de cloro activo en un recipiente de 100 litros.

- Recirculación y reposo del producto desinfectante por un lapso de 12 horas.
- Recirculación y purgado producto desinfectante del pozo.
- Desmontaje de equipo de recirculación.
- Prueba de rendimiento del pozo a fin de establecer las nuevas condiciones de equipamiento y funcionamiento.

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 20 horas y se estableció 3 escalones. Los 2 primeros escalones fueron de 6 horas y el último de 8 horas.

- Desmontaje del equipo de bombeo.
- Sellado temporal.

Se soldó la boca del pozo con una tapa metálica.

**b. P-167 La Virreyna**

La caseta en donde se encuentra el pozo es de material noble y con techo de concreto armado desmontable, debido al deterioro de la columna de acero de 15” se procedió a la instalación de una columna de acero inoxidable de 12”, previamente se ejecutó el mantenimiento correctivo de la columna inicial para recuperar el área filtrante del mismo. El pozo al haber estado en funcionamiento no requirió de un purgado previo.

El pozo se encontró sin equipo de bombeo y con el árbol de descarga desmontado a fin de facilitar las labores ejecutadas.

- Planeamiento y programación.

El pozo fue programado dentro del plan anual de mantenimientos del EASu, para lo cual se dispuso su inspección por cámara de TV, conociéndose el estado del pozo, se planificó las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

- Coordinaciones previas.

Previamente a iniciar los trabajos se comunicó mediante carta a su respectiva municipalidad, los trabajos en áreas públicas ejecutados en la infraestructura hidráulica del pozo.

Se coordinó con el personal del Equipo Prevención y Vigilancia las rondas policiales inopinadas a fin de cautelar la maquinaria y equipos que se destinaron en el pozo.

- Instalación de maquinaria y equipos.

Se realizó una inspección previa a la caseta del pozo, donde se verificó el tipo de la caseta (superficial) y su acceso a las instalaciones. Se determinó que la grúa autopropulsada Grove era la más adecuada para los trabajos de mantenimiento y rehabilitación. Además, con la inspección se pudo establecer las medidas de seguridad colectivas a utilizarse.

- Toma de datos iniciales (N.E., profundidad).

El nivel estático el día de iniciado las labores de campo fueron de 52,73 m y una profundidad de 109,25 m.

- Rascado de tubería ciega y filtros (dependiendo el grosor de las incrustaciones).

Según la inspección por cámara de TV, el pozo tenía incrustaciones duras, por lo que procedió al rascado de las tuberías y filtros para recuperar el diámetro interno de la columna del pozo. Se utilizó un rascador de tipo campana para tal procedimiento.

- Preparación de producto desincrustante biodegradable según dosificación requerida (5 kg por metro lineal de filtro).

Se utilizó 170 kg de producto biodegradable en 1000 litros de agua para los 34,14 m de filtros de la columna.

- Aplicación del producto desincrustante biodegradable.

- Cepillado de los filtros.

El cepillo se colocó en la boca del pozo suspendido del cable de la unidad rehabilitadora, adicionando una tubería pesada para evitar que flote el cepillo al contacto con el agua, en la zona de filtros se pistoneó por 5 minutos por metro lineal.

- Recuperación de fondo (pistón o aire comprimido).

Se colocó el pistón en la boca del pozo suspendido del cable de la unidad

rehabilitadora, al bajar el pistón hasta el fondo, este succionó el material depositado. Al levantar el pistón a la superficie con el sedimento, se depositó en un recipiente para su eliminación.

- Instalación de la nueva columna metálica de menor diámetro.

Se instaló una columna de acero inoxidable de 12” de diámetro según diseño, la cual se procedió a bajar por tramos y se fueron empalmando hasta llegar a su profundidad final, verificando su alineamiento.

- Prueba de verticalidad o alineamiento de la columna.

Se comprobó a través de la prueba de verticalidad que la columna estuvo correctamente alineada.

- Anclaje de la columna (fijado en la boca del pozo).

- Montaje de equipo de bombeo.

Se montó una bomba sumergible instalada a 96,00 m.

- Purgado del producto desincrustante biodegradable.

Se realizó el purgado eliminando el desincrustante biodegradable a la red de alcantarillado.

- Instalación del sistema de recirculación.

- Preparar y aplicar el producto desinfectante del pozo según dosificación requerida (1 kg por cada 10 metros lineales de columna de agua del pozo).

Se disolvió aproximadamente 6,00 kg de hipoclorito de calcio al 65% de contenido de cloro activo en un recipiente de 100 litros.

- Recirculación y reposo del producto desinfectante por un lapso de 12 horas.

- Recirculación y purgado producto desinfectante del pozo.

- Desmontaje de equipo de recirculación.

- Prueba de rendimiento del pozo a fin de establecer las nuevas condiciones de equipamiento y funcionamiento.

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 18 horas y se estableció 3 escalones. Los 3 escalones fueron de 6 horas.

- Desmontaje del equipo de bombeo.

- Sellado temporal.

Se soldó la boca del pozo con una tapa metálica.

#### 4.2.6 Diseño actual de los pozos después de ejecutarse la rehabilitación por doble entubado

##### a. Diseño actual del pozo P-717 Estrella

La descripción de la estructura hidráulica inicial (ver Anexo 5 – Figura 20) es la siguiente:

**Tabla 8: Diseño actual del pozo P-717**

Profundidad (m)	Descripción
0,00 – 68,60	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
68,60 – 78,20	Filtros tipo puente trapezoidal de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
78,20 – 80,60	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
80,60 – 92,60	Filtros tipo puente trapezoidal de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
92,60 – 98,00	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor

##### b. Diseño actual del pozo P-167 La Virreyna

La descripción de la estructura hidráulica inicial (ver Anexo 5 – Figura 21) es la siguiente:

**Tabla 9: Diseño actual del pozo P-167**

Profundidad (m)	Descripción
0,00 – 72,00	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
72,00 – 96,00	Filtros tipo puente trapezoidal de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
96,00 – 98,40	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
98,40 – 108,00	Filtros tipo puente trapezoidal de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor
108,00 – 110,40	Tubería ciega de acero inoxidable de 12” diámetro de ¼” espesor

#### 4.2.7 Resultados de las pruebas de rendimiento posterior a su intervención

##### c. Prueba de rendimiento del pozo P-717 Estrella

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 20 horas (ver Anexo 6 – Figura 22), ejecutados al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del pozo, con un nivel estático de 21,45 y una instalación de bomba a los 78,00 m. Siendo los resultados del mismo, los siguientes:

**Tabla 10: Prueba de rendimiento del P-717**

Caudal (l/s)	Nivel Dinámico (m)
8	30,10
15	46,77
20	59,63

##### d. Prueba de rendimiento del pozo P-167 La Virreyna

La prueba de rendimiento tuvo una duración de 18 horas (ver Anexo 6 – Figura 23), ejecutados al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del pozo, con un nivel estático de 52,45 y una instalación de bomba a los 96,00 m. Siendo los resultados del mismo, los siguientes:

**Tabla 11: Prueba de rendimiento del P-167**

Caudal (l/s)	Nivel Dinámico (m)
13	54,00
22	55,95
27	57,58

#### 4.2.8 Evaluación del estado de los pozos después de ejecutado las actividades de mantenimiento y rehabilitación

Se evaluó el estado de los pozos tubulares posterior a sus actividades de mantenimiento y rehabilitación, a través de la ecuación de su abatimiento, el cual para determinar sus coeficientes B y C, se utilizó el método de Jacob ( $n = 2$ ) y el método analítico (tanteo de  $n$ ), a partir de los cuales se estableció su estado según su coeficiente C (ver Tabla 1), eficiencia hidráulica y caudal específico. Asimismo,

mediante esta evaluación se determinó el mejoramiento de su rendimiento como resultado de los trabajos ejecutados.

**a. Método de Jacob (Resolución gráfica de los valores B y C)**

• **P-717 Estrella**

En la Tabla 12 se presentan los datos de descensos correspondientes a la prueba de rendimiento realizada después de los trabajos de mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado ejecutado al pozo P-717. Asimismo, se muestran los valores obtenidos para la evaluación del estado del pozo por el método de Jacob. Siendo estos los siguientes:

**Tabla 12: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-717**

Escalón	Q (l/s)	Q (m3/día)	N.D. (m)	s (m)	s/Q (días/m2)	Qe (l/s/m)
1	8	691,20	30,10	8,65	0,01251	0,925
2	15	1296,00	46,77	25,32	0,01954	0,592
3	20	1728,00	59,63	38,18	0,02209	0,524

Nota: Los datos se obtuvieron de la prueba de rendimiento al finalizar las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

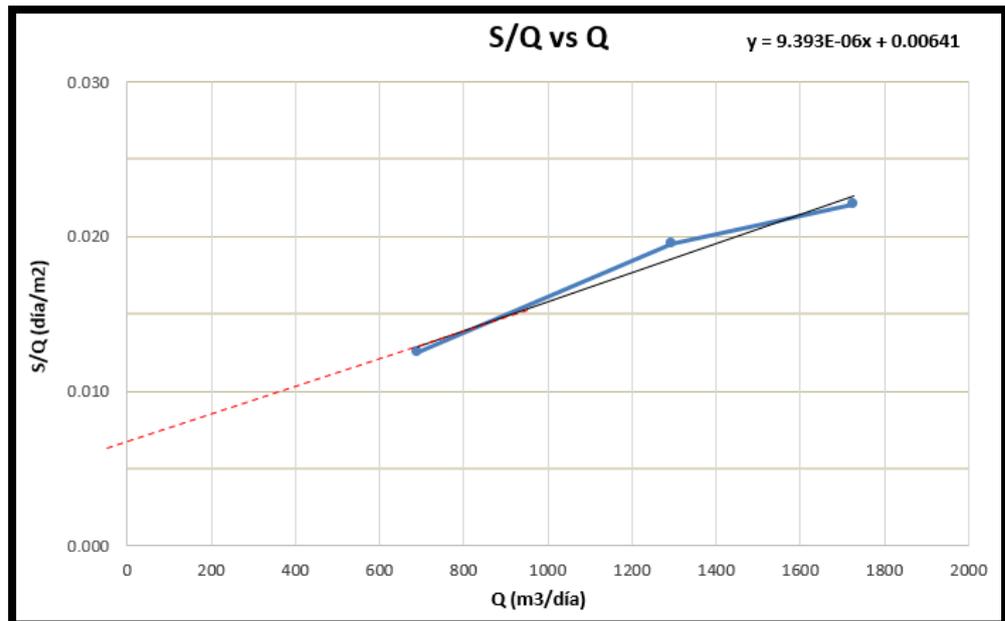
Según Jacob, se fija el valor de  $n = 2$ , por lo que se ajusta la fórmula de descenso de acuerdo a los resultados obtenidos para determinar los coeficientes B y C:

$$8,65 = B \cdot 691,20 + C \cdot 691,20^2 \quad \wedge \quad 0,01251 = B + C \cdot 691,20$$

$$25,32 = B \cdot 1296,00 + C \cdot 1296,00^2 \quad \wedge \quad 0,01954 = B + C \cdot 1296,00$$

$$38,18 = B \cdot 1728,00 + C \cdot 1728,00^2 \quad \wedge \quad 0,02209 = B + C \cdot 1728,00$$

Mediante la resolución gráfica de la figura 8, se determinó los siguientes valores de B y C:



**Figura 8: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-717, estado actual**

$$B = 0,00641 \text{ día/m}^2$$

$$C = 9,393 \cdot 10^{-6} \text{ días}^2/\text{m}^5 = 93,93 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C = 93,93 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , después de ejecutado el mantenimiento correctivo y la rehabilitación por doble entubado del pozo P-717 señala que la incrustación o taponamiento de los filtros es importante.

- **P-167 La Virreyna**

En la Tabla 13 se presentan los datos de descensos correspondientes a la prueba de rendimiento realizada después de los trabajos de mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado ejecutado al pozo P-167. Asimismo, se muestran los valores obtenidos para la evaluación del estado del pozo por el método de Jacob. Siendo estos los siguientes:

**Tabla 13: Datos para el cálculo de la ecuación de abatimiento del pozo P-167**

Escalón	Q (l/s)	Q (m3/día)	N.D. (m)	S (m)	S/Q (días/m2)	Qe (l/s/m)
1	13	1123,20	54,00	1,55	0,00138	8,387
2	22	1900,80	55,95	3,50	0,00184	6,286
3	27	2332,80	57,58	5,13	0,00220	5,263

Nota: Los datos se obtuvieron de la prueba de rendimiento al finalizar las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

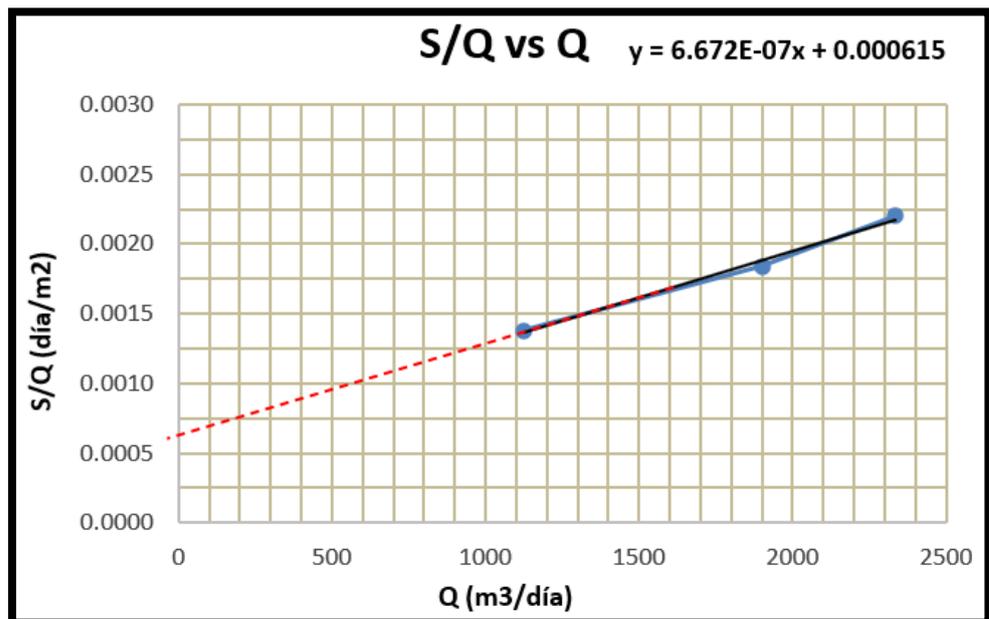
Según Jacob, se fija el valor de  $n = 2$ , por lo que se ajusta la fórmula de descenso de acuerdo a los resultados obtenidos para determinar los coeficientes B y C:

$$1,55 = B \cdot 1123,20 + C \cdot 1123,20^2 \quad \wedge \quad 0,00138 = B + C \cdot 1123,20$$

$$3,50 = B \cdot 1900,80 + C \cdot 1900,80^2 \quad \wedge \quad 0,00184 = B + C \cdot 1900,80$$

$$5,13 = B \cdot 2332,80 + C \cdot 2332,80^2 \quad \wedge \quad 0,00220 = B + C \cdot 2332,80$$

Mediante la resolución gráfica de la figura 9, se determinó los siguientes valores de B y C:



**Figura 9: Resolución gráfica de los coeficientes B y C del pozo P-167, estado actual**

$$B = 0,000615 \text{ día/m}^2$$

$$C = 6,672 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C = 6,672 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , después de ejecutado el mantenimiento correctivo y la rehabilitación por doble entubado del pozo P-167 señala principios de incrustación de los filtros.

## b. Método analítico

### • P-717 Estrella

Utilizando los datos de descenso representados en la Tabla 10, correspondientes a la prueba de rendimiento realizada al pozo P-717, después de ejecutar el mantenimiento correctivo y la rehabilitación por doble entubado, se procede a establecer el siguiente sistema de ecuaciones:

$$8,65 = B \cdot 691,20 + C \cdot 691,20^n \quad \wedge \quad 0,01251 = B + C \cdot 691,20^{n-1}$$

$$25,32 = B \cdot 1296,00 + C \cdot 1296,00^n \quad \wedge \quad 0,01954 = B + C \cdot 1296,00^{n-1}$$

$$38,18 = B \cdot 1728,00 + C \cdot 1728,00^n \quad \wedge \quad 0,02209 = B + C \cdot 1728,00^{n-1}$$

Al eliminar los coeficientes B y C del sistema de ecuaciones queda:

$$\frac{\frac{25,32}{1296,00} - \frac{8,65}{691,20}}{\frac{38,18}{1728,00} - \frac{25,32}{1296,00}} = 2,745$$

Se procede a tantear distintos valores de n (rango entre 1 a 3,5) para hallar el que cumpla mejor con la ecuación:

$$\frac{1296,00^{n-1} - 691,20^{n-1}}{1728,00^{n-1} - 1296,00^{n-1}}, \text{ para } n = 1,1$$

$$\frac{1296,00^{0,1} - 691,20^{0,1}}{1728,00^{0,1} - 1296,00^{0,1}} = 2,087$$

Comparando resultados de ambas ecuaciones

$$2,745 \neq 2,087$$

Mediante el tanteo de valores de n se determinó que, para cumplir con la igualdad de ambas ecuaciones, el valor de n debe ser inferior al límite de 1.

Un valor de n cercano a 1, indica que la circulación en las proximidades del pozo es de régimen laminar, esto debido al bombeo a caudales pequeños.

### **P-167 La Virreyna**

Utilizando los datos de descenso representados en la Tabla 11, correspondientes a la prueba de rendimiento realizada al pozo P-167, después de ejecutar el mantenimiento correctivo y la rehabilitación por doble entubado, se procede a establecer el siguiente sistema de ecuaciones:

$$1,55 = B \cdot 1123,20 + C \cdot 1123,20^n \quad \wedge \quad 0,00138 = B + C \cdot 1123,20^{n-1}$$

$$3,50 = B \cdot 1900,80 + C \cdot 1900,80^n \quad \wedge \quad 0,00184 = B + C \cdot 1900,80^{n-1}$$

$$5,13 = B \cdot 2332,80 + C \cdot 2332,80^n \quad \wedge \quad 0,00220 = B + C \cdot 2332,80^{n-1}$$

Al eliminar los coeficientes B y C del sistema de ecuaciones queda:

$$\frac{\frac{3,50}{1900,80} - \frac{1,55}{1123,20}}{\frac{5,13}{2332,80} - \frac{3,50}{1900,80}} = 1,289$$

Se procede a tantear distintos valores de n (rango entre 1 a 3,5) para hallar el que cumpla mejor con la ecuación:

$$\frac{1900,80^{n-1} - 1123,20^{n-1}}{2332,80^{n-1} - 1900,80^{n-1}}, \text{ para } n = 3$$

$$\frac{1900,80^2 - 1123,20^2}{2332,80^2 - 1900,80^2} = 1,285$$

Comparando resultados de ambas ecuaciones:

$$1,289 \approx 1,285$$

Mediante el tanteo de valores de n se determinó que, para cumplir con la igualdad de ambas ecuaciones, el valor de n debe ser de 3.

Para determinar los coeficientes B y C, se reemplaza el n = 3 en el sistema de ecuaciones, obteniendo los siguientes resultados:

$$B = 0,001379 \text{ día/m}^2$$

$$C = 1,959 \cdot 10^{-10} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

Para que el valor de C sea admisible para clasificarlo dentro de las condiciones constructivas del pozo de Walton, se buscó el coeficiente equivalente:

$$C' = \frac{(1,959 \cdot 10^{-10}) \cdot (1123,20^3)}{1123,20^2} = 2,200 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

En tal sentido, según las condiciones constructivas del pozo de Walton, para el valor obtenido del coeficiente  $C' = 2,200 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$ , el estado del pozo P-167 después de ejecutado los trabajos de mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado, señala que está bien construido, bien desarrollado y con buen estado del área filtrante.

**c. Eficiencia hidráulica del pozo**

• **P-717 Estrella**

La eficiencia hidráulica del pozo posterior a los trabajos de mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado se determinará utilizando los valores obtenidos mediante el método de Jacob:

$$n = 2$$

$$B = 0,00641 \text{ día}/\text{m}^2$$

$$C = 93,93 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

$$Q = 1728,00 \text{ m}^3/\text{día}$$

Siendo la eficiencia hidráulica calculada del pozo de 28,31 %.

• **P-167 La Virreyna**

La eficiencia hidráulica del pozo posterior a los trabajos de mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado se determinará utilizando los valores obtenidos mediante el método de Jacob:

$$n = 2$$

$$B = 0,000615 \text{ día}/\text{m}^2$$

$$C = 6,672 \cdot 10^{-7} \text{ días}^2/\text{m}^5$$

$$Q = 2332,80 \text{ m}^3/\text{día}$$

Siendo la eficiencia hidráulica calculada del pozo de 28,32 %.

#### **d. Caudal específico del pozo**

- **P-717 Estrella**

Calculando el caudal específico del pozo según las condiciones establecidas después del mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado:

$$Q = 20 \text{ l/s}$$

$$\text{Nivel estático} = 21,45 \text{ m}$$

$$\text{Nivel dinámico} = 59,63 \text{ m}$$

$$\text{Abatimiento} = 38,18 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{20 \text{ l/s}}{38,18 \text{ m}} = 0,523 \text{ l/s/m}$$

- **P-167 La Virreyna**

Calculando el caudal específico del pozo según las condiciones establecidas después del mantenimiento correctivo y rehabilitación por doble entubado:

$$Q = 27 \text{ l/s}$$

$$\text{Nivel estático} = 52,45 \text{ m}$$

$$\text{Nivel dinámico} = 57,58 \text{ m}$$

$$\text{Abatimiento} = 5,13 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{27 \text{ l/s}}{5,13 \text{ m}} = 5,263 \text{ l/s/m}$$

#### **4.3 Contribución en la solución de situaciones problemáticas presentados durante la estancia en la empresa**

Entre las soluciones contribuidas a situaciones problemáticas presentadas durante mi estancia en el Equipo Aguas Subterráneas de SEDAPAL, dentro de las actividades de mantenimiento y rehabilitación y perforación de pozos, se encuentran:

- La falta de información histórica del pozo (niveles de agua, condiciones de operación, prueba de aforo, diseño del pozo, perfil litológico, registros históricos de campo, análisis de agua, etc.), produce un desconocimiento al momento de realizar la evaluación y diagnóstico del estado del pozo.

La contribución ante a esta situación fue la recopilación de la información faltante a través de inspecciones por cámara de TV (diseño del pozo), pruebas de rendimiento (condiciones de operación), toma de muestras de agua (calidad de agua) y establecer registros de campo periódicos al pozo con la finalidad de observar la evolución de su eficiencia.

- La imposibilidad de realizar inspecciones por cámara de televisión, debido a la presencia de cables siniestrados de los equipos de bombeo, tuberías de PVC de 1” en el fondo y alta presencia de sedimentos en suspensión que impiden el descenso y visibilidad de la cámara de TV.

La contribución ante tal situación fue la de recomendar el proceso de pesca de los objetos depositados en el pozo, limpieza correctiva preliminar y recuperación de fondo a fin de poder observar el estado de los filtros que se encontraban cubiertas por incrustaciones y la acumulación de sedimentos en el fondo.

- Dificultades en el acceso a las casetas de los pozos a ejecutar trabajos de mantenimiento y rehabilitación con maquinaria pesada al estar ubicados en zonas como parques, jardines, fundos, complejos privados, etc., esto debido al proceso de urbanización donde antiguamente eran terrenos agrícolas.

La contribución ante la problemática de acceso al pozo fue la de gestionar, a través de una comunicación oficial, con las municipalidades y representantes de las juntas vecinales los trabajos a ejecutarse dentro del marco del D.S. N° 013-98-PRES, el cual faculta a SEDAPAL a ejecutar trabajos de emergencia en las infraestructuras hidráulicas de las fuentes de abastecimiento de agua potable o recolección. Dentro de estos trabajos se hace de conocimiento la reposición y resane de que cualquier tipo de daños ocasionados a veredas y jardines dentro del desarrollo de los trabajos.

- La evacuación de estas aguas extraídas en las pruebas de acuífero y rendimiento por lo general se da en los buzones de desagüe y canales de regadío, que en muchos casos no tienen la capacidad de soportar tales descargas, generándose desbordes e inundaciones en la zona.

La contribución ante la problemática a la evacuación de las aguas del bombeo se da en la recopilación de información de las redes de alcantarillado cercanas

al pozo, las cuales cuentan con diámetros que van entre los 8” a 12” en zonas residenciales, ubicando las redes con mayor capacidad para realizar tal procedimiento. Además, se recomendó establecer el horario nocturno (horas de la madrugada) para ejecutar las pruebas de rendimiento, esto a fin de no sobrecargar las redes en horarios donde la hay un mayor caudal debido al uso de los servicios por parte de la población.

- Información histórica de pruebas de bombeo o acuífero no válidas o inexactas (pruebas de bombeo en pozos propios de SEDAPAL y/o de terceros) del banco de datos del EASu.

La contribución a esta problemática fue la reinterpretación de las pruebas de bombeo y acuífero a fin de validar los resultados de las mismas.

#### **4.4 Contribución a la empresa en términos de las competencias y habilidades adquiridas durante su formación profesional**

Las competencias y habilidades adquiridas durante mi formación profesional contribuidas a la empresa más destacables son:

- Establecer el procedimiento adecuado de mantenimiento y rehabilitación a ejecutarse en los pozos teniendo en cuenta los resultados obtenidos en sus evaluaciones previas (método de Jacob, método analítico, eficiencia hidráulica y caudal específico) y el estado actual (inspección por cámara de televisión) de los mismos. En las evaluaciones previas se utilizó literatura especializada en hidrogeología (Johnson, 1975 y Custodio & Lamas, 1976), manuales técnicos en mantenimiento y rehabilitación de pozos (Gibson & Singer, 1974 y Comisión Nacional del Agua, 2007). Además de estudios de profesionales (Haro, 2005 y Quintana, 2008) y empresas (Binnie & Partners, 1986 y Flygt ITT Industries, 2005), donde evaluaron técnicamente el estado de los pozos utilizando la metodología descrita en el trabajo monográfico.
- Planificar el programa anual de mantenimientos preventivo y correctivo a los pozos tubulares para el posterior año que están en el sistema de producción de SEDAPAL, tomando como base sus evaluaciones previas (método de Jacob, método analítico, eficiencia hidráulica y caudal específico), características hidráulicas históricas (niveles de agua y caudales registrados), último

mantenimiento ejecutado, fuente única y requerimientos por parte de los Centros de Servicio.

- La capacidad de manejo y gestión del personal (brigadas), maquinaria y equipos destinados a las labores de mantenimiento, rehabilitación y perforación de pozos en distintos frentes. Durante mi estancia en el Grupo de Ingeniería de Pozos del EASu, diariamente antes de iniciar las labores de campo se realizaban reuniones de trabajo con todo el personal (ingenieros, técnicos y operarios), con la finalidad de establecer el plan de trabajo diario para cada brigada de acuerdo a las labores a ejecutarse (lugar de trabajo, tipo de trabajo a ejecutar, personal especializado requerido, descripción del trabajo, maquinaria y equipos a utilizar y suministros e insumos), consignado a través de ordenes de trabajo. Asimismo, los responsables de cada brigada daban sus reportes diarios de las actividades realizadas, las cuales eran consignadas en las ordenes de trabajo y en los informes técnicos remitidos a la Jefatura del EASu.
- La coordinación con especialistas de diferentes áreas que tienen implicancia dentro de la operación y mantenimiento de los pozos (Centros de Servicios Norte, Centro y Sur, Equipo de Operación y Mantenimiento de Estaciones de Bombeo de Agua – EOMASBA y Equipo Protección y Vigilancia - EPV), con la finalidad de planificar el listado de mantenimiento de pozos solicitados por los centros de servicio, el montaje y desmontaje de equipos de bombeo según sus condiciones de operación establecidas en las pruebas de rendimiento y apoyo de vigilancia a la maquinaria y equipos destinados en los pozos mediante rondas policiales inopinadas a cargo del EPV.
- Habilidades de gestión y coordinación con las áreas pertinentes en procesos administrativos (Equipo Gestión del Abastecimiento – EGAb, Equipo Presupuesto – EPE y Equipo Programación y Ejecución Contractual - EPEC) en lo concerniente de elaboración de términos de referencia para servicios y adquisiciones relacionados a las actividades de perforación, mantenimiento y rehabilitación de pozos. Asimismo, en el apoyo a la formulación de proyectos IOARR, con la finalidad de ser registrados en la cartera de inversiones de planeamiento e inclusión en el marco de la Programación Multianual de Inversiones (PMI) de los años 2021 al 2023, todo dentro de las responsabilidades del Equipo Agua Subterráneas.

- Entre otras contribuciones que se pudo realizó en la empresa, está el uso de *software* aplicados a las aguas subterráneas (*Aquifer Test, Diagrammes, ArcGis*, etc.) con la finalidad de mejorar la toma de decisiones por parte de los especialistas en la gestión de las aguas subterráneas.

#### **4.5 Nivel de beneficio obtenido por la empresa a partir de la solución de situaciones problemáticas**

- Al establecerse una evaluación previa del pozo a través de método de Jacob, método analítico, eficiencia hidráulica y caudal específico, se pudo obtener un diagnóstico más completo de la situación actual del pozo y posibles factores que disminuyen su rendimiento. Asimismo, sumado a la inspección por cámara de televisión, se pudo determinar el procedimiento más adecuado para la recuperación de la producción del pozo. Los resultados favorables al adecuado mantenimiento y rehabilitación del pozo se vieron reflejados en la reducción de los costos de bombeo que en su mayor parte serán el resultado de un menor consumo de energía eléctrica y el mejoramiento de la calidad del agua, dado que el principal problema de la calidad del agua se debe a la incrustación de los filtros del pozo.
- La sistematización, actualización y evaluación de su información histórica y actual de sus pozos tubulares de producción de agua potable, favorece a establecer un mejor programa de mantenimientos preventivos y correctivos, así como los procedimientos a implementar en cada uno de ellos. Esto se traduce en una mejor identificación de los descensos de la eficiencia de los pozos y una oportuna intervención antes de que su rehabilitación se vuelva muy difícil o imposible.
- Las gestiones y coordinaciones realizadas con especialistas de diferentes áreas que tienen implicancia dentro de la operación y mantenimiento de los pozos se tradujeron en una mayor eficiencia al momento de ejecutar los trabajos y en la oportuna identificación de problemas técnicos que se puedan suscitar en el funcionamiento de los pozos. La identificación oportuna de problemas al correcto funcionamiento de los pozos considerados fuente única, son de vital importancia dado que sufrir paralizaciones, supone restricciones en el

abastecimiento de agua potable a la población.

- El apoyo en la formulación de proyectos de tipo Inversiones de Optimización, de Ampliación Marginal, de Rehabilitación y de Reposición – IOARR, dio como resultado el registro de varios proyectos de tipo rehabilitación (perforación de pozos sustitutos) en la cartera de inversiones de planeamiento y su inclusión en el marco de la Programación Multianual de Inversiones (PMI) 2021-2023. Asimismo, el apoyo en la elaboración de términos de referencia de servicios y adquisiciones de bienes se tradujo en el cumplimiento del cronograma del Plan Anual de Contrataciones – PAC.

## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

#### **5.1.1 Pozo P-717 Estrella**

- De acuerdo con la ecuación de su abatimiento, el estado inicial del pozo tiene un coeficiente C de  $95,05 \cdot 10^{-7}$  días<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>, una eficiencia hidráulica de 30,72 % y caudal específico de 0,542 l/s/m. Asimismo, el estado actual del pozo, según la inspección por cámara de televisión, muestra corrosión e incrustación severa en tubería ciega y filtros, así como una rotura en la tubería ciega a los 72,11 m. La profundidad de inspección fue de 87,89 m, lo que indicó una sedimentación acumulada de 10,31 m.
- Los factores que afectan el rendimiento del pozo son las deficiencias en su funcionamiento hidráulico debido al taponamiento de los filtros por falta de trabajos de desarrollo al finalizar la perforación en su estadio inicial. Esto, sumado a la antigüedad y deterioro de la columna de producción a causa de la corrosión e incrustación, son los principales factores que determinan su bajo rendimiento.
- Se ejecutó el procedimiento de rehabilitación por doble entubado, que incluyó un purgado previo y el mantenimiento correctivo de la estructura metálica original, con la instalación de una nueva columna de 12” de acero inoxidable, la misma que cuenta con 21,60 m de filtros tipo puente trapezoidal, evidenciándose un leve incremento en el caudal específico de 0,520 l/s/m a 0,523 l/s/m, entre el último registro de campo y el obtenido después de la rehabilitación.

#### **5.1.2 Pozo P-167 La Virreyna**

- De acuerdo con la ecuación de su abatimiento, el estado inicial del pozo tiene un coeficiente C de  $2,81 \cdot 10^{-7}$  días<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>, una eficiencia hidráulica de 61,89 % y caudal específico de 2,592 l/s/m. Asimismo, el estado actual del pozo según la inspección por cámara de televisión muestra corrosión severa en la tubería ciega

y abundante incrustación en los filtros, así como varias perforaciones en la columna entre los tramos de 60,00 m a 95,00 m. La profundidad de inspección fue de 109,25 m, lo que indicó una sedimentación acumulada de 10,75 m.

- Entre los factores que afectan el rendimiento del pozo está el descenso de 28,90 m del nivel de la napa del acuífero del Rímac, múltiples perforaciones en la columna de producción que permite el ingreso de arena y grava, así como abundante incrustación en la zona de filtros que impide el ingreso del agua.
- Se ejecutó el procedimiento de rehabilitación por doble entubado, que incluyó el mantenimiento correctivo de la estructura metálica original, con la instalación de una nueva columna de 12” de acero inoxidable, la misma que cuenta con 33,60 m de filtros tipo puente trapezoidal, evidenciándose un incremento en el caudal específico de 4,426 l/s/m a 5,263 l/s/m, entre el último registro de campo y el obtenido después de la rehabilitación.

## **5.2 Recomendaciones**

### **5.2.1 Pozo P-717 Estrella**

- De acuerdo con la interpretación de los resultados obtenidos y al haber superado la vida útil del pozo (25 años), se recomienda la perforación de un nuevo pozo sustituto de mayor profundidad debido al descenso de la napa y teniendo en consideración que debe rendir por encima de los 20 l/s que actualmente produce el pozo. Asimismo, se debe verificar las características y el espesor total del acuífero aprovechable, mediante sondajes eléctricos.
- Programar mantenimientos preventivos (cada 2 años) y correctivos (cada 4 años) a la estructura hidráulica de captación, a fin de mantener su productividad.
- La operación del pozo debe ser monitoreada a fin de ser evaluar constantemente las condiciones operacionales, así se pueden reducir las tasas de bombeo de manera que disminuya el abatimiento para retardar la corrosión de la estructura inicial y alargar su vida útil.
- Establecer continuos registros de campo, fin de contar con un historial actualizado del nivel de agua y caudal explotado, el cual nos permitirá identificar descensos en el rendimiento del pozo.

### **5.2.2 Pozo P-167 La Virreyna**

- De acuerdo con la interpretación de los resultados obtenidos y al haber superado largamente la vida útil del pozo (25 años), se recomienda la perforación de un nuevo pozo sustituto, teniendo en consideración que debe rendir por encima de los 27 l/s que actualmente produce el pozo.
- Para corregir el ingreso excesivo de arenas al pozo, se debe reducir el régimen de bombeo del pozo, asimismo a través de la instalación de parches de acero inoxidable cilíndricos tipo filtro puente trapezoidal o lizo que controlen la entrada de arenas y grava.
- Programar mantenimientos preventivos (cada 2 años) y correctivos (cada 4 años) a la estructura hidráulica de captación, a fin de mantener su productividad.
- Establecer continuos registros de campo, fin de contar con un historial actualizado del nivel de agua y caudal explotado, el cual nos permitirá identificar descensos en el rendimiento del pozo.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Binnie & Partners (1986). *Manejo de los Recursos Acuiferos de la Gran Lima*. Informe Específico N° 6, Rehabilitación. Perú.
- Calatroni, R. (1972). *Técnica de la perforación de sondajes con el sistema de percusión*. Chile: Departamento de Recursos Hidráulicos.
- Castany, G. (1975). *Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas*. España: Ediciones Omega S.A.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Rehabilitación de pozos*. (7 ed.) México.
- Custodio, M. y Llamas, R. (1976). *Hidrología subterránea*. España: Ediciones Omega S.A.
- Dirección General de Aguas – Aguas Subterráneas. (1973). *Pruebas de rendimiento en los pozos de las compañías pesqueras Coishco, Huáscar y Matarani N° IRHS 18/2/2-27 y 18/2/2-30*. Perú: Ministerio de Agricultura.
- Flygt ITT Industries. (2005). *Rehabilitación y equipamiento de 50 pozos- Informe Final Pozo N° 439 “San Isidro”*. Perú.
- Flygt ITT Industries. (2005). *Rehabilitación y equipamiento de 50 pozos- Informe Final Pozo N° 604 “Lima Polo 2”*. Perú.
- Flygt ITT Industries. (2005). *Rehabilitación y equipamiento de 50 pozos- Informe Final Pozo N° 626 “San Borja 11”*. Perú.

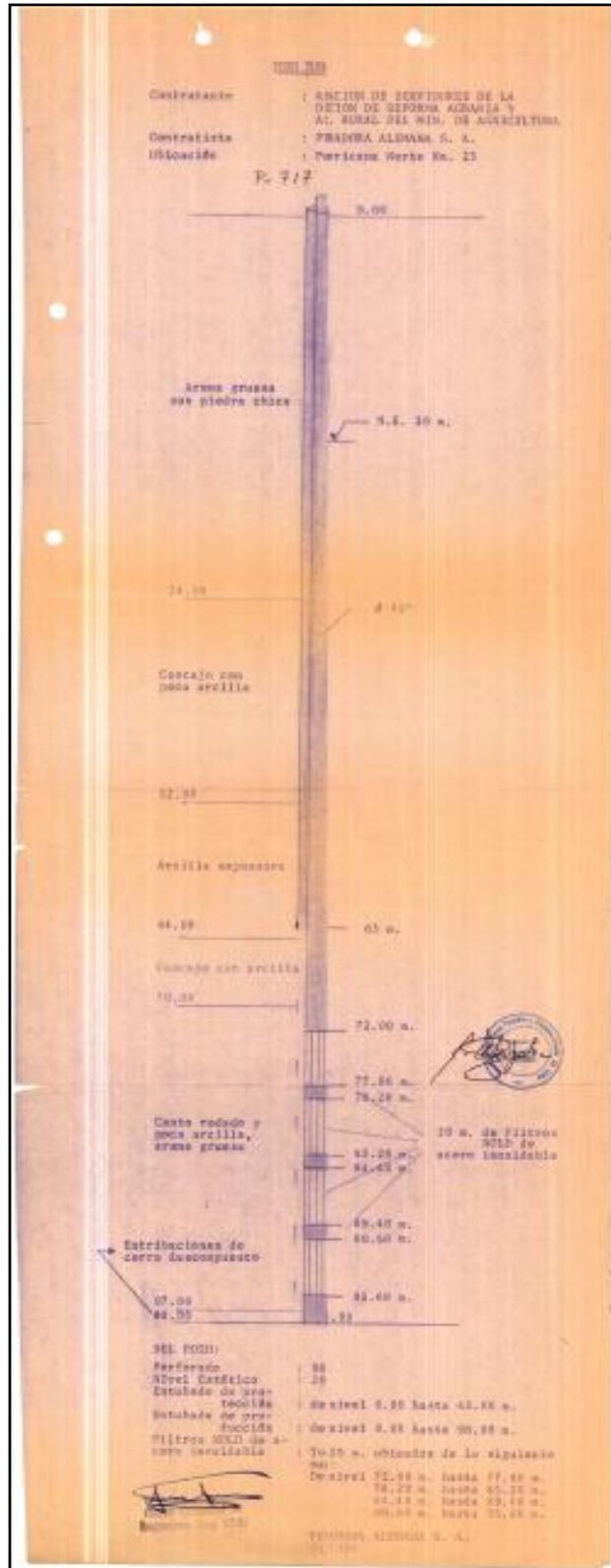
- Flygt ITT Industries. (2005). *Rehabilitación y equipamiento de 50 pozos- Informe Final Pozo N° 641 “Proyecto Italiano 9”*. Perú.
- Flygt ITT Industries. (2005). *Rehabilitación y equipamiento de 50 pozos- Informe Final Pozo N° 726 “Miramar 2”*. Perú.
- Gibson, U. y Singer, R. (1974). *Manual de los pozos pequeños*. (2 ed.) México: Limusa.
- Grupo ANTEA & AMSA. (1999). *Actualización y Modernización del Equipo y Software para la Simulación del Comportamiento del Acuífero de Lima*. Francia: Antea (Grupo BRGM), Perú: Amsa Consultores del Perú.
- Haro, J. (2005). *Evaluación Técnica de los pozos 3A - 21 – 22 para abastecer de agua potable a la ciudad de Chimbote*. Perú: Haro Ingenieros EIRL.
- Johnson, E. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Estados Unidos de América: Johnson Division, UOP Inc.
- Quintana, J. (2008). *Evaluación del pozo SEDACHIMBOTE N° 22*. Perú: Grupo Nippon KOEI – OIST.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). (2020). *Informe de Gestión – Mayo 2020*. Lima, Perú.
- Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)/Organismo de Proyección y Extensión Universitaria en Ingeniería Sanitaria (OPEIS). (1990). *Aguas Subterráneas*. Perú.
- Vargas, A. & Arellano, F. (2002). *Comparación de tres métodos para el cálculo de eficiencia de pozos*. Costa Rica: Revista Geológica de América Central.

## **VII. ANEXOS**



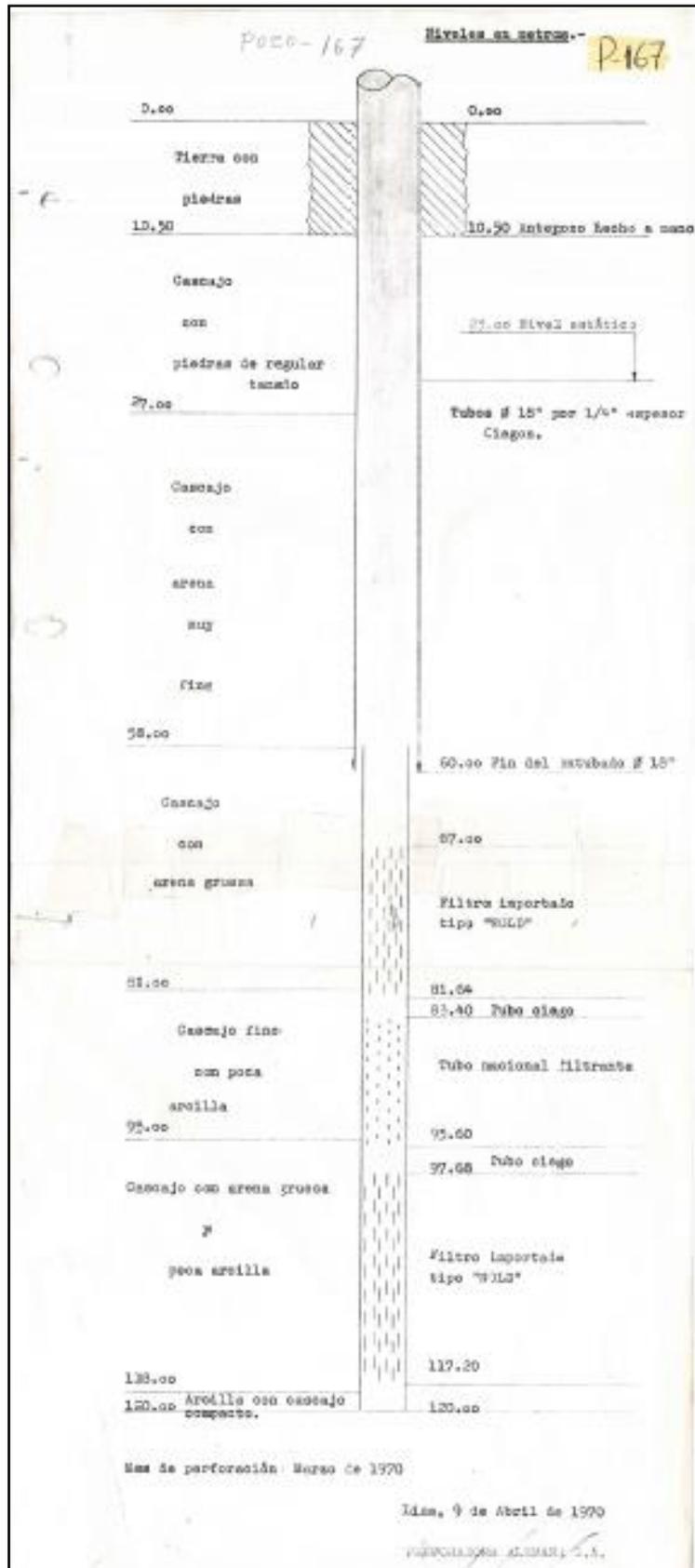


## Anexo 2: Diseño inicial de los pozos



**Figura 12: Diseño inicial del pozo P-717 Estrella**

Fuente: Tomado de SEDAPAL



**Figura 13: Diseño inicial del pozo P-167 La Virreyna**

Fuente: Tomado de SEDAPAL

### Anexo 3: Prueba de rendimiento inicial de los pozos

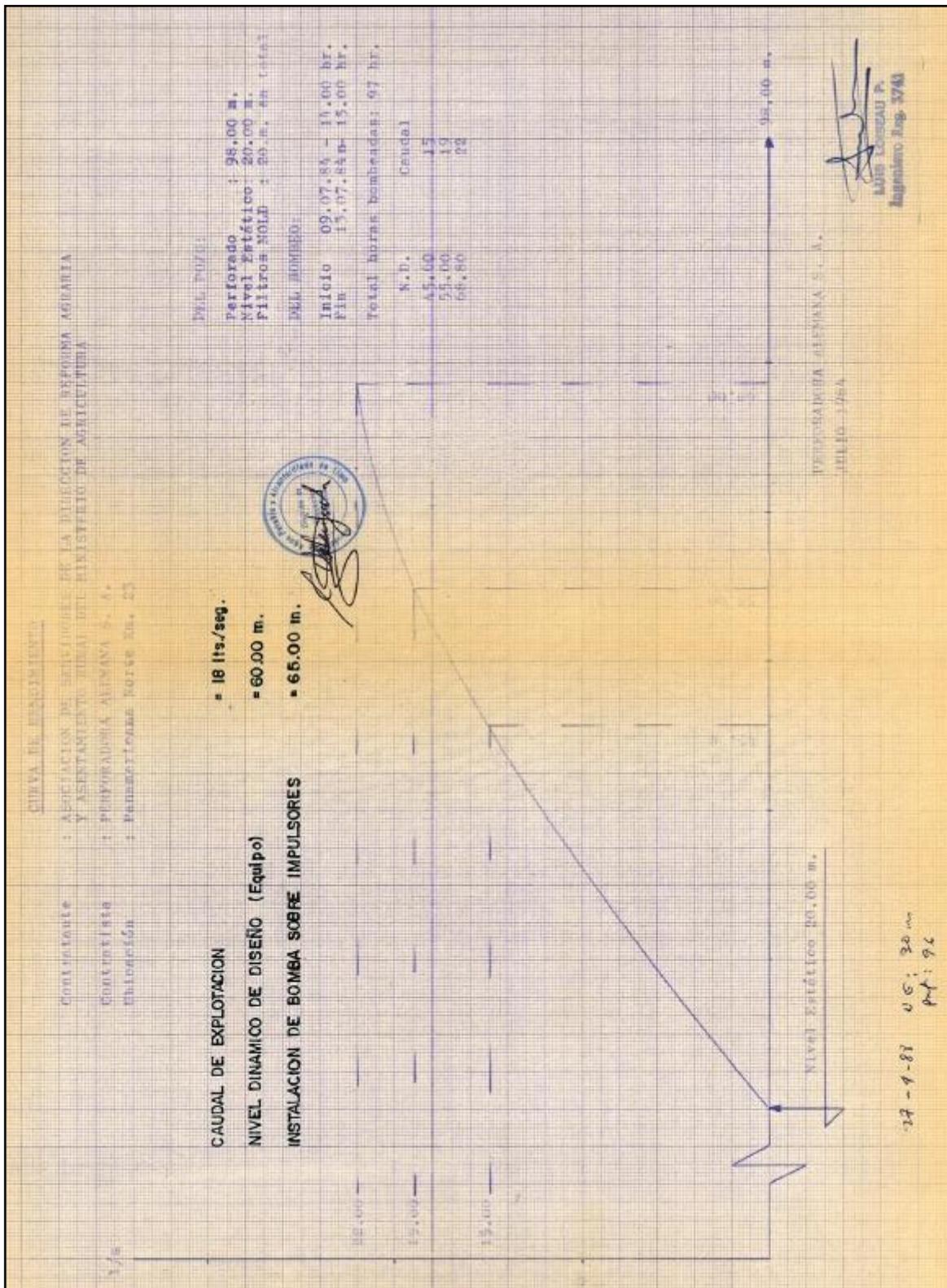
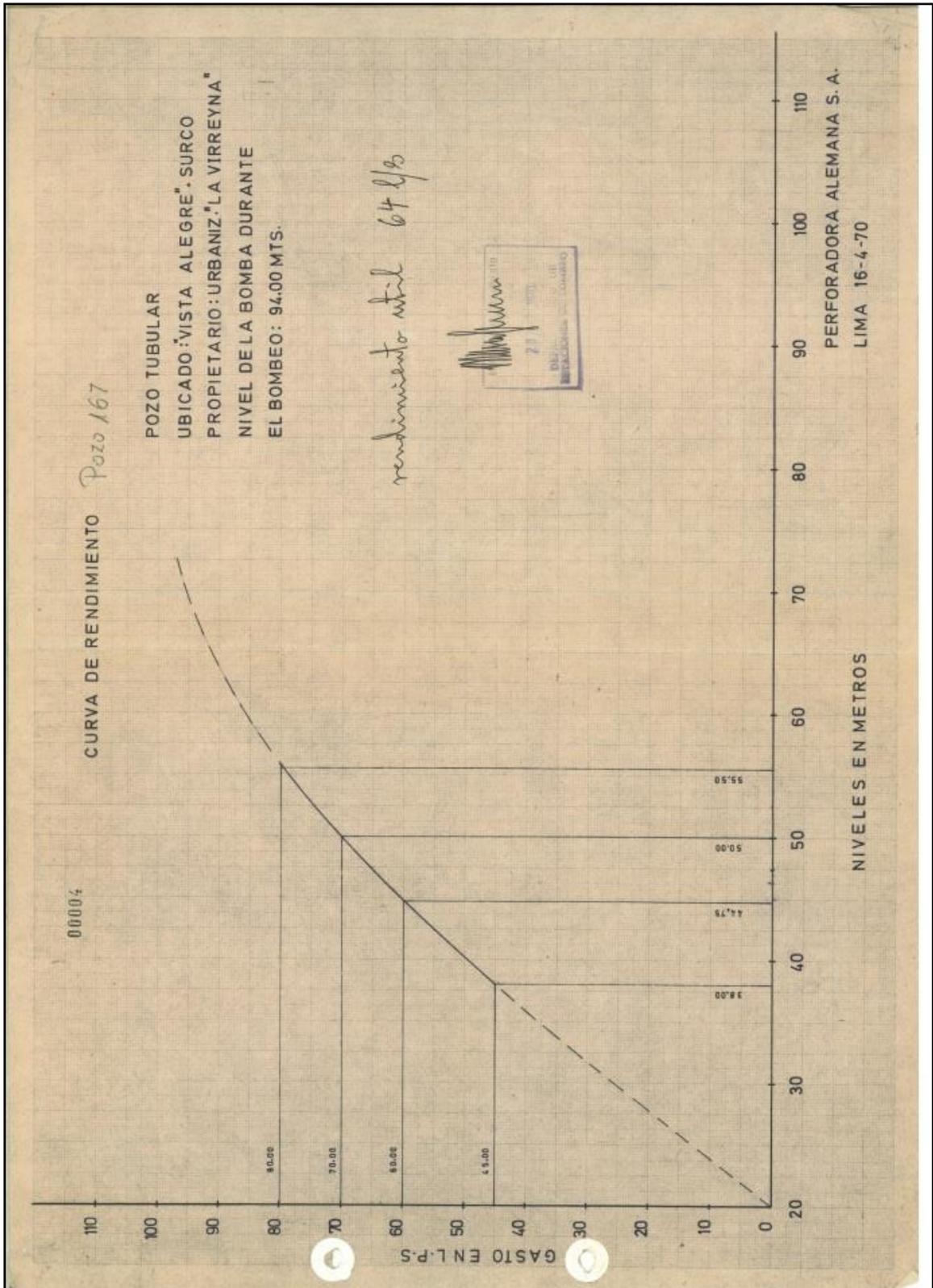


Figura 14: Prueba de rendimiento inicial del pozo P-717 Estrella

Fuente: Tomado de SEDAPAL



**Figura 15: Prueba de rendimiento inicial del pozo P-167 La Virreyna**

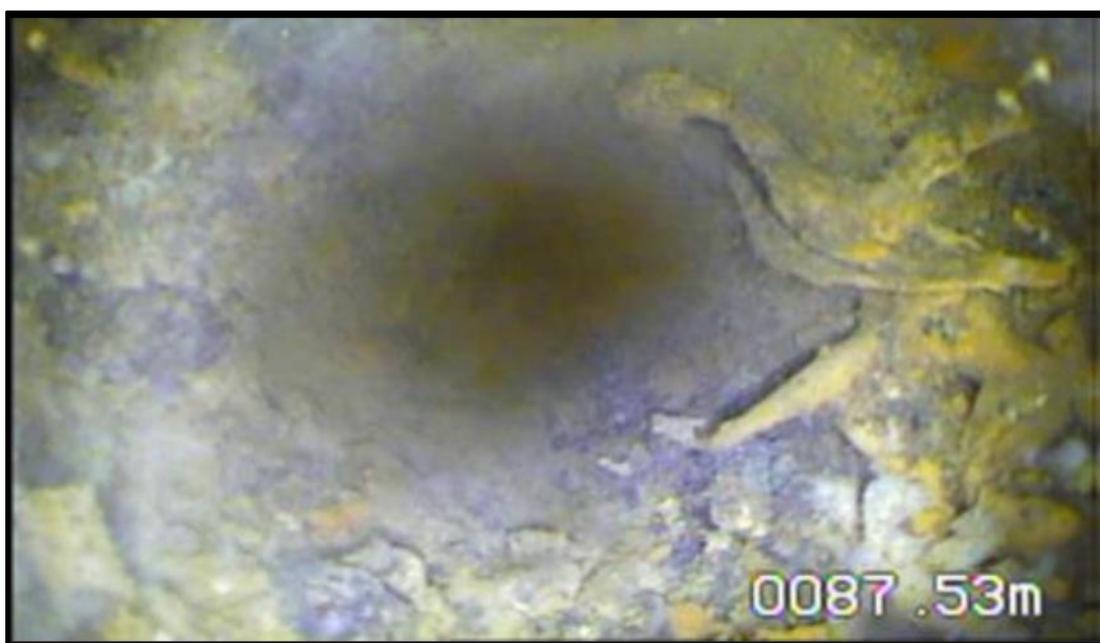
Fuente: Tomado de SEDAPAL

#### Anexo 4: Inspección por cámara de TV (CCTV)



*Figura 16: Zona saturada de erosión, corrosión e incrustación; rotura en la tubería ciega en P-717*

Fuente: Tomado de SEDAPAL



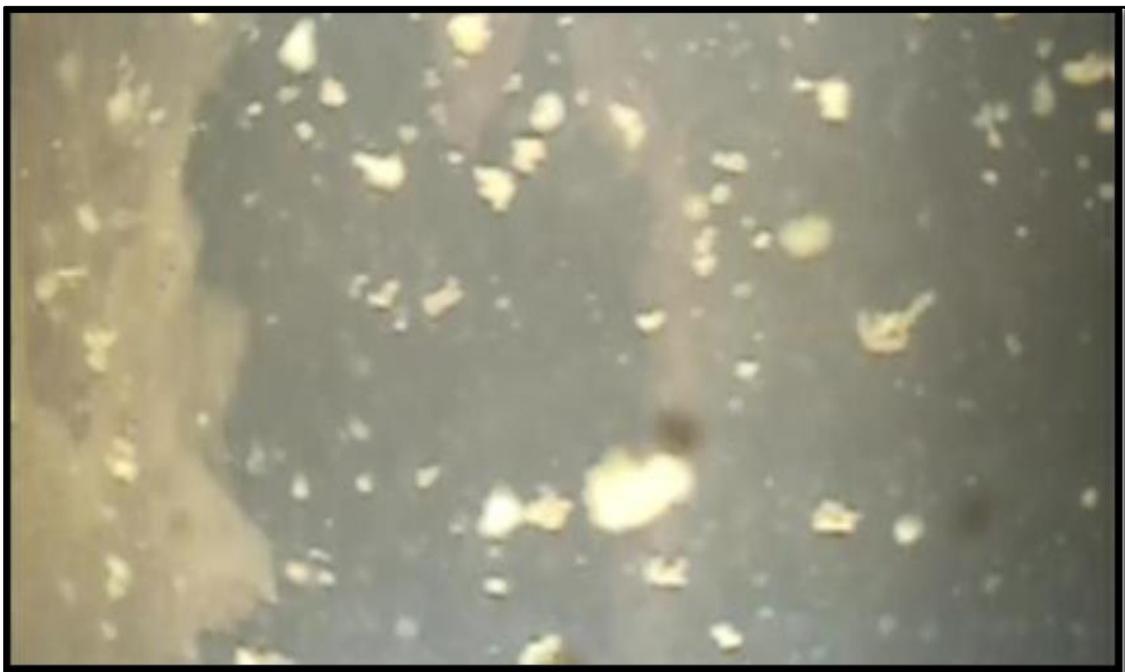
*Figura 17: Profundidad de la inspección 87.53 m, acumulación de sedimentos en el fondo del P-717*

Fuente: Tomado de SEDAPAL



**Figura 18:** Perforación en el tubo ciego, grava expuesta a ingresar al interior del pozo P-167

Fuente: Tomado de SEDAPAL



**Figura 19:** Zona de filtros no visibles debido a la incrustación severa en el pozo P-167

Fuente: Tomado de SEDAPAL

### Anexo 5: Diseño actual de los pozos

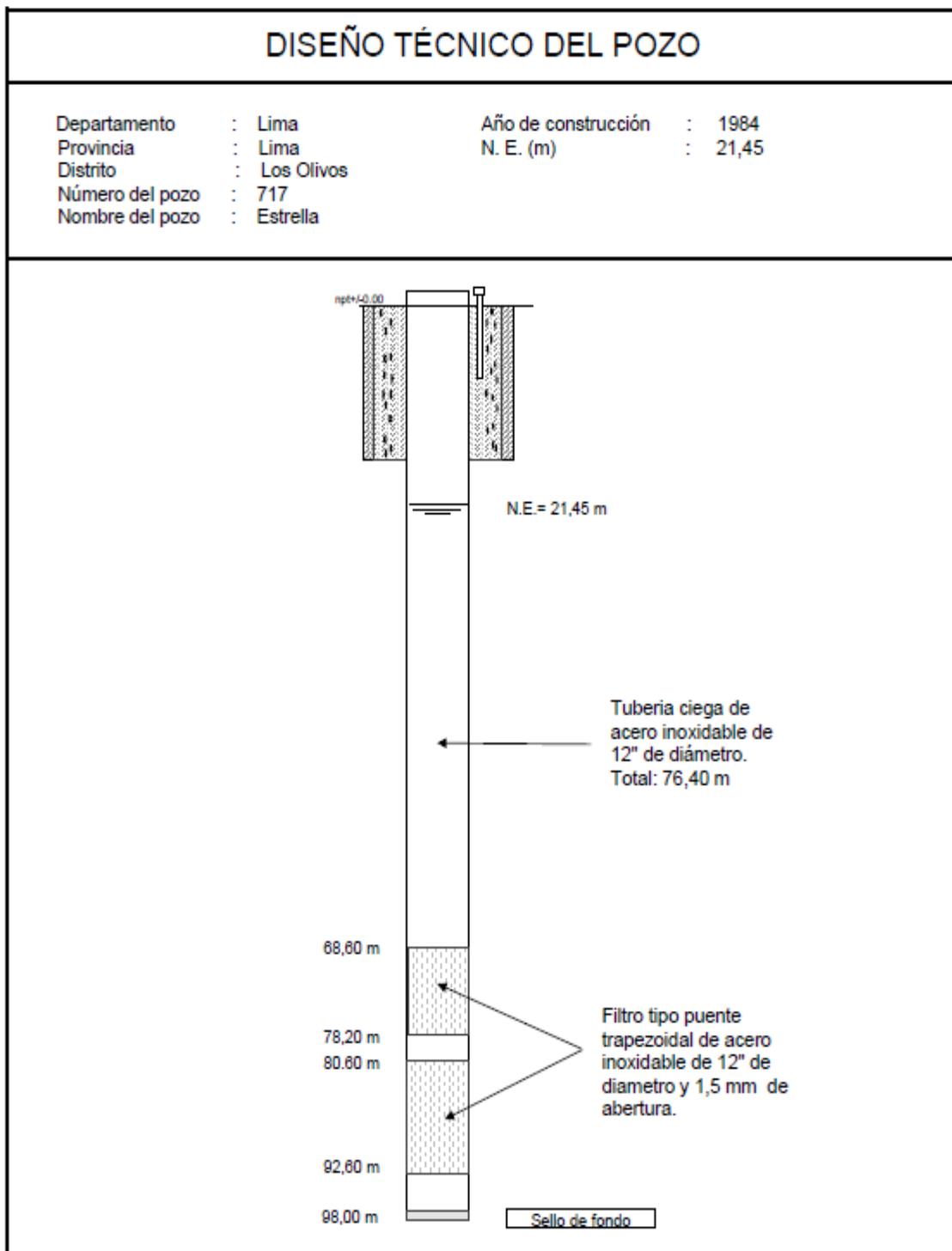
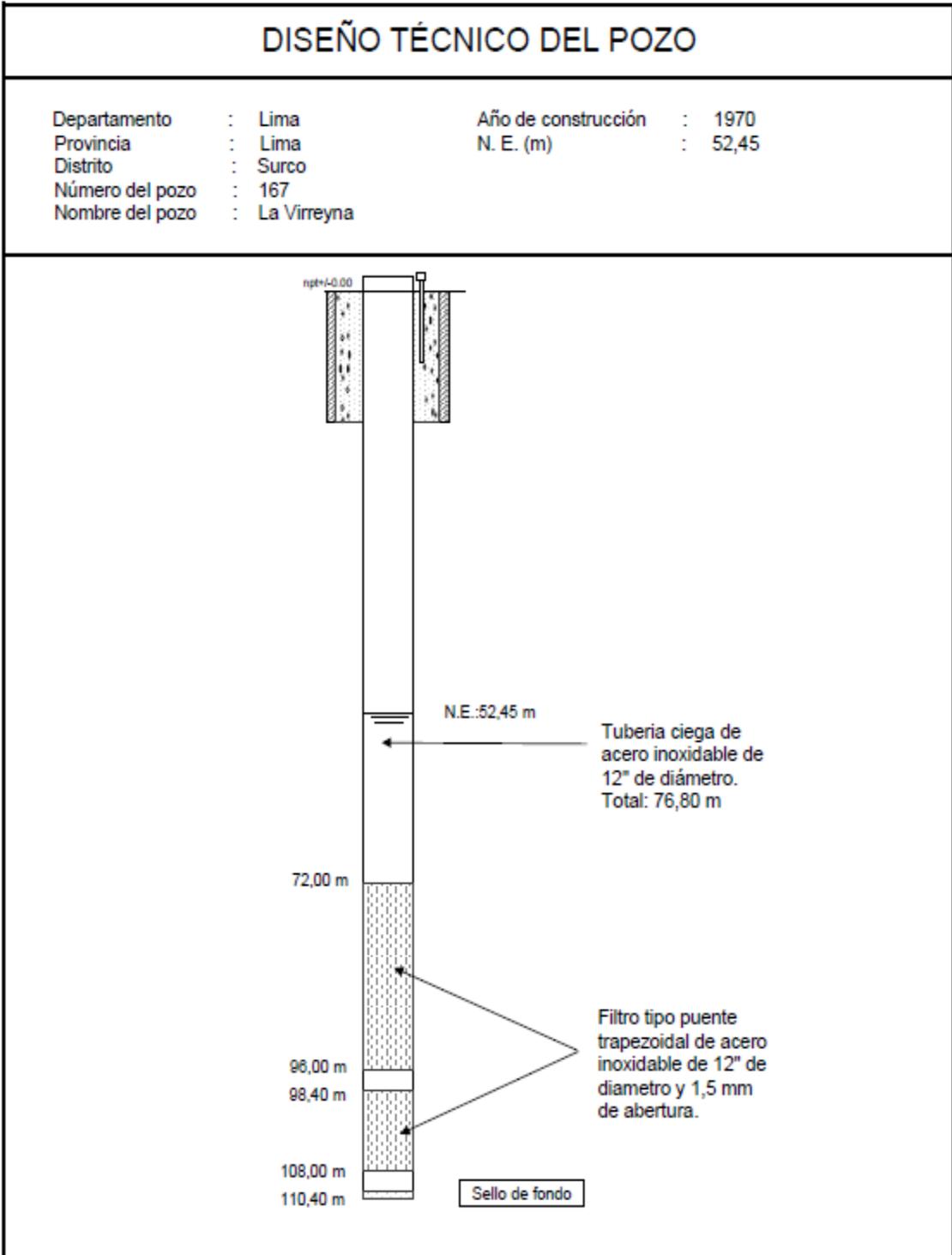


Figura 20: Diseño del pozo P-717 después de la rehabilitación por doble entubado



**Figura 21:** Diseño del pozo P-167 después de la rehabilitación por doble entubado

## Anexo 6: Prueba de rendimiento actual de los pozos

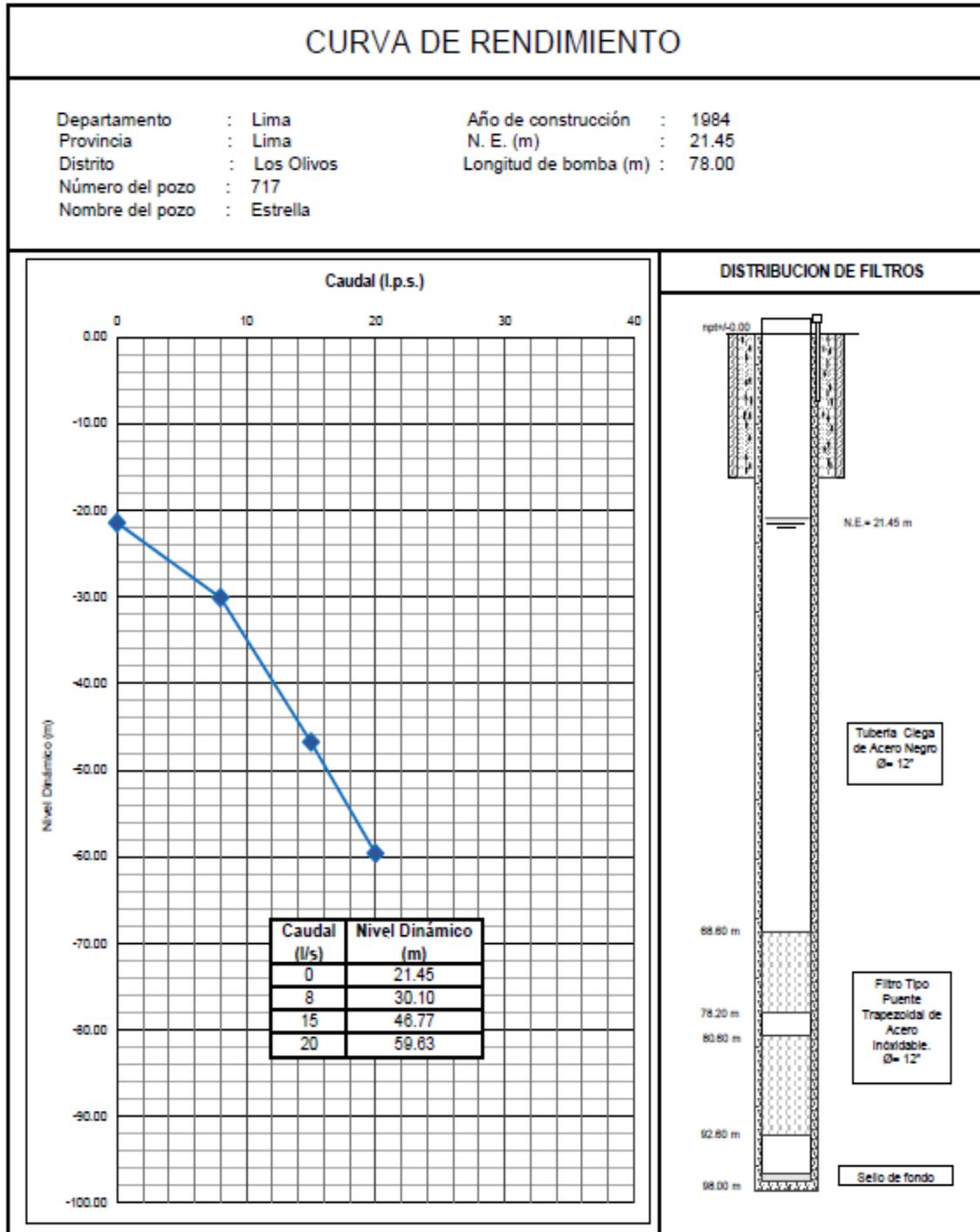


Figura 22: Prueba de rendimiento al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del P-717

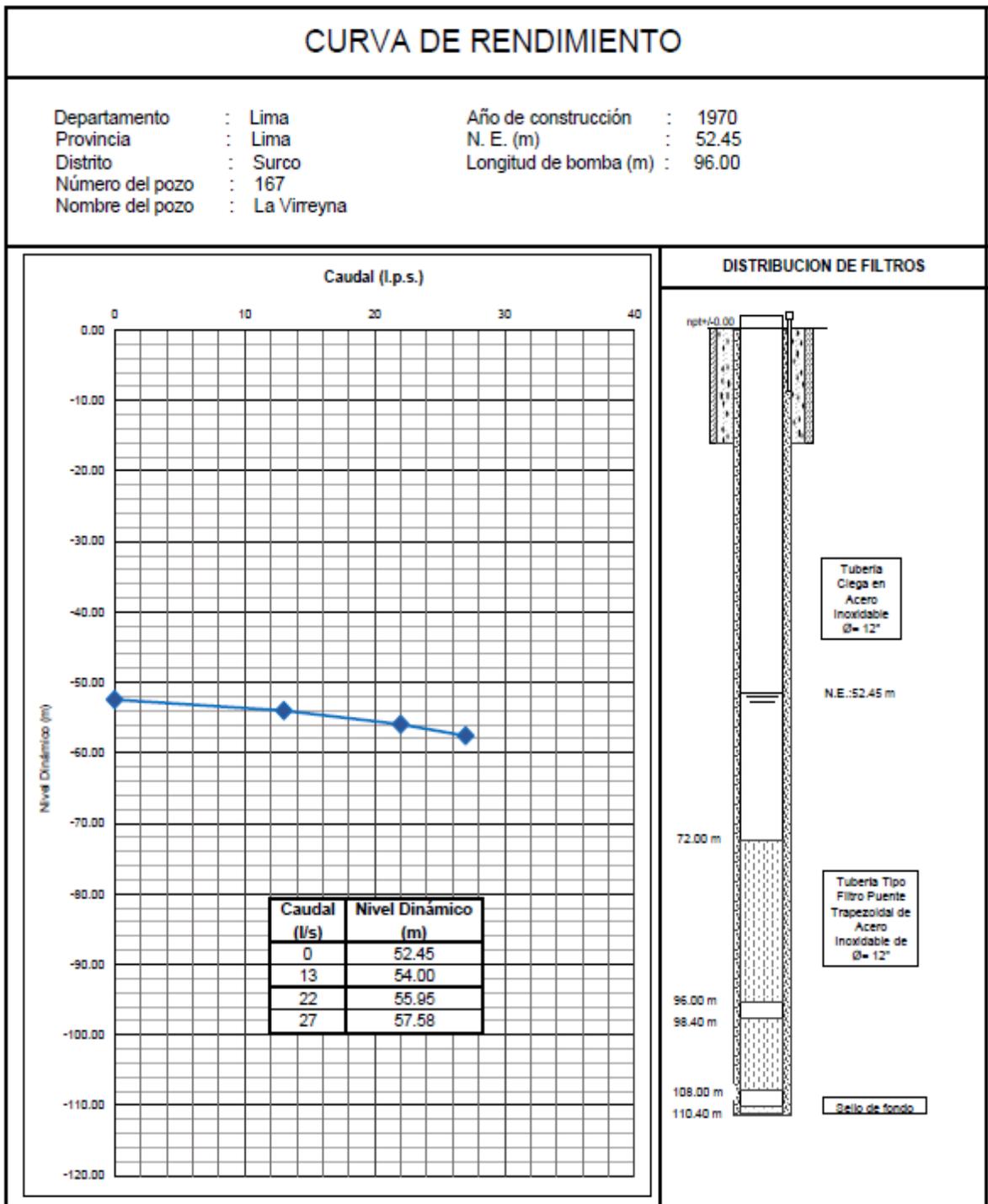


Figura 23: Prueba de rendimiento al finalizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación del P-167

## Anexo 7: Actividades desarrolladas como profesional



*Figura 24:* Recirculación del producto desincrustante biodegradable en labores de mantenimiento