

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LAS UNIDADES
LITOLÓGICAS ATRAVESADAS POR LOS POZOS DE BOMBEO P-20, P-22 Y P-
23 EN LA MINA LA CALERA, YUMBO VALLE DEL CAUCA.

JORGE LUIS ABRIL BENJUMEA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2014

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LAS UNIDADES
LITOLÓGICAS ATRAVESADAS POR LOS POZOS DE BOMBEO P-20, P-22 Y P-
23 EN LA MINA LA CALERA, YUMBO VALLE DEL CAUCA.

JORGE LUIS ABRIL BENJUMEA

Trabajo de Grado para optar el título de
Geólogo

Director: Álvaro Mauricio Solarte Vanegas
Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

A DIOS padre creador por darme la vida y ser el artífice y motor de lucha y cambios en mí.

A mis padres Jairo y Zulia por su apoyo incondicional durante mi vida estudiantil y profesional los cuales adoro con todo mi corazón y son mi fuerza diaria

A mi hermano Juan por su apoyo, paciencia y buenos consejos

A Bogotá ciudad capital que me ha acogido este par de años y me abrió las puertas para realizar mi práctica empresarial y capacitarme como profesional

A mis compañeros y amigos de la universidad (Gorge chaparro, Gorge Camargo, Félix, Edgar Giovanni, Ferney, Alex, aleja vesga, leady, Laura) por su buena vibra, consejos y experiencias recogidas a lo largo de todos estos años de pregrado

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial doy gracias a HIDROGECOL S.A por abrirme las puertas de su hogar para realizar esta práctica empresarial y que hoy se constituye en una escuela mas de aprendizaje en mi vida. A todo el equipo del departamento de Hidrogeología en cabeza el Doctor Alcides Huguett, por sus grandes enseñanzas y paciencia para conmigo.

A la escuela de Geología por formarme como persona integral y como profesional a lo largo de estos duros 5 años de trabajos y experiencias vividas. Al cuerpo logístico de la escuela (Soniecita, Cata).Al profesor Álvaro Solarte por su amable colaboración, al ingeniero civil Luis Moreno por inculcarme esta bella rama de las aguas subterráneas en mi carrera profesional. Al cuerpo docente de la escuela por sus grandes doctrinas y enseñanzas vividas y aprendidas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	19
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1 Revisión Bibliográfica	22
4.2 Fase de campo.....	22
4.3 Clasificación y Descarga de los datos de campo:	23
4.4 Procesamiento de los datos en el software Aquifer Test Pro v.1.2011:	25
4.5 Discusión y análisis de resultados.....	27
5. MARCO TEÓRICO.....	28
5.1 Tipos de acuíferos y su comportamiento:.....	29
5.2 Parámetros hidráulicos para medios porosos, homogéneos e isótropos	30
5.3 Tipos de ensayos de bombeo	34
5.4 METODOS DE ANALISIS EN REGIMEN VARIABLE	37
5.4.1 Acuíferos Confinados o Cautivos:	37
5.4.2 Método de Jacob.....	38
5.4.3 Método de Recuperación de Theis Recovery.....	39
5.5 ACUIFEROS SEMICONFINADOS: METODO DE HANTUSH.....	41
5.5.1 Método de Walton	44
5.6 CONSIDERACIONES SOBRE LA HIDRAULICA DE MEDIOS FRACTURADOS	45
5.6.1 Modelos teóricos para Acuíferos Fracturados	47
6. MARCO GEOLÓGICO	50
6.1 Formación Volcánica (KV).....	52

6.2 FORMACIÓN VIJES (TOV).....	53
6.2.1 Miembro Inferior	54
6.2.2 Miembro Superior	56
6.3 DEPÓSITO ALUVIAL DEL VALLE DEL RÍO CAUCA (Qal)	57
6.4 DEPÓSITO FLUVIO-COLUVIAL (Qfc)	58
7. GEOMORFOLOGIA	60
8. GEOLOGIA ESTRUCTURAL	62
9. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	64
9.1 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-20 en la Mina la Calera.	64
9.1.1 Prueba a Caudal Constante	65
9.1.2 Prueba de Recuperación.....	66
9.1.3 Prueba Escalonada	67
9.1.4 Capacidad de Producción del Pozo P-20	69
9.1.5 Capacidad Específica del Pozo P-20	72
9.1.6 Eficiencia del Pozo P-20.....	75
9.1.7 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P20.....	77
9.1.8 Explotación del Pozo P-20	78
9.2 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-22 en la Mina la Calera.	79
9.2.1 Prueba a Caudal Constante	80
9.2.2 Prueba de Recuperación.....	81
9.2.3 Capacidad de Producción del Pozo P-22 La Calera.	83
9.2.4 Capacidad Específica del Pozo P-22 La Calera.....	86
9.2.5 Eficiencia del Pozo P-22 La Calera	88
9.2.6 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P-22 La Calera	91
9.2.7 Explotación del Pozo P-22 La Calera.....	92
9.3 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-23 en la Mina la Calera.	92
9.3.1 Prueba a Caudal Constante.	93
9.3.2 Prueba de Recuperación.....	94

9.3.3 Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera	95
9.3.4 Capacidad Específica del Pozo P-23 La Calera.....	98
9.3.5 Eficiencia del Pozo P-23 La Calera	100
9.3.6 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P-23 La Calera	102
9.3.7 Explotación del Pozo P-23 La Calera.....	104
10. CONCLUSIONES.....	105
11. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFIA	108
ANEXOS	110

LISTA DE TABLAS

PÁG.

Tabla 1. Coordenadas de Localización del Área de Estudio.	19
Tabla 2. Coordenadas de Localización del Área de Estudio	33
Tabla 3. Métodos de ensayos de Bombeo en medios fracturados. Fuente: Kruseman y Ridder, 1991.....	49
Tabla 4. Relación caudal de bombeo con la constante K.....	65
Tabla 5. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-20.....	68
Tabla 6. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-20.	71
Tabla 7. Resolución de la ecuación de Capacidad Especifica del pozo P-20	74
Tabla 8. Resolución de la ecuación de eficiencia del pozo P-20.....	76
Tabla 9. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-22 La Calera.	82
Tabla 10. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-22 La Calera.....	85
Tabla 11. Resolución de la ecuación de capacidad Especifica del pozo P-22 La Calera.....	87
Tabla 12. Resolución de la Ecuación de Eficiencia del Pozo P-22 La Calera	89
Tabla 13. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-23 la Calera.....	95
Tabla 14. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera.....	97
Tabla 15. Resolución de la Ecuación de Capacidad Especifica del Pozo P-23 La Calera.....	99
Tabla 16. Resolución de la Ecuación de Eficiencia del Pozo P-23 La Calera	101

LISTAS DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. Fuente: Google Earth.	20
Figura 2. Esquema general de la metodología aplicada en el presente estudio. Fuente: El autor.....	21
Figura 3. Visualización de las opciones del Diver. Fuente: Schlumberger Water Services.....	24
Figura 4. Compensación Barométrica de las opciones del Diver Office. Fuente: Schlumberger Water Services.....	25
Figura 5. Procesamiento y ajuste de los datos en el programa Aquifer test Pro.v1.2011. Fuente: Software Aquifer Test Pro.v1.2011).....	26
Figura 6. Selección de la Paleta Analysis del tipo de método a utilizar en el análisis de la prueba de bombeo. Fuente: Software Aquifer Test Pro.v1.2011).....	27
Figura 7. Abatimiento del nivel piezométrico en un pozo de Bombeo. Fuente: Pozos y acuíferos-M. Villanueva y A. Iglesias.....	29
Figura 8. Tipos de ensayos de bombeo. Fuente: Pozos y acuíferos-M. Villanueva y A. Iglesias.....	35
Figura 9. Prueba escalonada sin escalones o intervalos de Bombeo con estabilización de niveles. Fuente: Villanueva y A. Iglesias, 1984.....	36
Figura 10. Recta de Jacob. Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).	39
Figura 11. Análisis de una síntesis de los datos de recuperación con el método de Theis Recovery. Fuente: (Kruseman and Ridder 1975).	41
Figura 12. Función de pozo $W(u, r/B)$ en acuífero semiconfinado (Hantush, 1956). Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).	43
Figura 13. Tabla de la función de pozo en acuífero semiconfinado $W(u, r/B)$. (resumida). Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).	43
Figura 14. Familia de curvas tipo del método de Walton; $W(u, r/L)$. Fuente: (Kruseman and Ridder, 1975).....	44

Figura 15. Clasificación Hidrogeológica de los medios fracturados.Fuente: (Streltsova, 1975).	45
Figura 16. Mapa Geológico del área de estudio. Fuente: El autor.	52
Figura 17. Curvas de capacidad de Produccion del Pozo P-20.	72
Figura 18. Curvas de capacidad especifica del Pozo P-20.	73
Figura 19. Curvas de Eficiencia del Pozo P20.	77
Figura 20. Radio de influencia generado por el pozo de bombeo P-20. Fuente: El autor.	78
Figura 21. Curvas de Capacidad de Producción Pozo P-22 La Calera.....	86
Figura 22. Curvas de capacidad Especifica del pozo P-22 La Calera.....	88
Figura 23. Curvas de eficiencia del Pozo P-22 La Calera	90
Figura 24. Radio de influencia generado por el pozo P-22	91
Figura 25. Curvas de Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera	98
Figura 26. Curvas de capacidad Especifica del Pozo P-23 La Calera	100
Figura 27. Radio de influencia genereado por el pozo P-23	103
Figura 28. Curvas de Eficiencia del Pozo P-23 La Calera.....	103

LISTA DE ANEXOS

PÁG.

ANEXO A. datos y resultados gráficos de pruebas de bombeo a caudal constante , recuperación y escalonada ejecutadas en el pozo p-20 que capta el acuífero calizas de vijes inferior	111
ANEXO B. datos y resultados gráficos de pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación ejecutadas en los pozos p-22 y p-23 que captan el acuífero calizas de vijes superior y el acuitardo deposito fluvio coluvial.	123
ANEXO C. catalogo fotografico del area de estudio (geologia, geomorfologia) .	138

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS CRUZADAS POR LOS POZOS DE BOMBEO P-20, P-22 Y P-23 EN LA MINA LA CALERA, MUNICIPIO DE YUMBO, VALLE DEL CAUCA*

AUTORAS: ABRIL, Jorge Luis**

PALABRAS CLAVES: Pruebas de Bombeo, Acuíferos, Acuitardos, Deposito Fluvio Coluvial, Calizas de la Formación Vijes.

La mina la Calera se encuentra ubicada en las estribaciones orientales de la cordillera occidental, en la cuenca media del Rio cauca, en la Jurisdicción de los municipios de Mulaló y San Marcos, del municipio de Yumbo, en el departamento del Valle del Cauca. El objetivo de este estudio es determinar los principales parámetros hidráulicos asociados a las unidades litológicas cruzadas por los Pozos de Bombeo P-20, P-22 y P-23.

Geológicamente el área se encuentra ubicada en el margen Oriental de la cordillera Occidental, en ella se presentan rocas Volcánicas identificadas como Formación Volcánica, sobre la cual aparece adosado un antiguo Atolón de rocas calcáreas de corta longitud denominado Calizas de la Formación Vijes. Estas rocas aparecen cubiertas por depósitos Cuaternarios asociados a procesos exógenos de meteorización y erosión, representados por depósitos Fluvio-coluviales y el gran depósito aluvial del Valle del Río Cauca.

Para el análisis hidráulico de las unidades litológicas cruzadas por los pozos de bombeo se realizan pruebas de bombeo a caudal constante, recuperación de 24 horas y escalonada en el pozo P-20 y pruebas a caudal constante y recuperación con un tiempo de 12 horas para los pozos P-22 y P-23. Estos datos se interpretan por medio del programa Aquifer Test Pro. v 1.1 de 2011 de Waterloo Hydrogeologic Inc., obteniendo los parámetros asociados tales como Transmisividad, Coeficiente de Almacenamiento y Conductividad Hidráulica. Loa radios de influencia generados para los citados pozos se interpretan en pozo único con el programa computacional Molano (2010), que utiliza las soluciones de Jacob y Theis.

* Trabajo de grado

** Facultad: Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Álvaro Mauricio Solarte V

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF HYDRAULIC PARAMETERS OF THE LITHOLOGICAL UNITS INTERSECTED BY PUMPING WELLS P-20, P-22 AND P-23 AT THE MINE LA CALERA, YUMBO TOWN, DEPARTMENT OF VALLE DEL CAUCA *

AUTHORS: ABRIL, Jorge Luis**

KEYWORDS: Pumping test, Aquifers, Aquitards, Fluvio Coluvial Deposit, Vijes Formation.

La Calera mine is located in the eastern foothills of the western mountains, in the middle reaches of the Rio Cauca, in the jurisdiction of the municipalities of San Marcos Mulaló and San Marcos, in the Department of Valle del Cauca, Yumbo Town. The objective of this study is to determine the main hydraulic parameters associated with lithologic units crossed by Pumping Wells P-20, P-22 and P-23.

Geologically the area is located in the eastern margin of the Western Cordillera, identified as Volcanic rocks. Volcanic Formation are presented, on which appears an old terraced limestone atoll called short length of Vijes Limestone Formation. These rocks are covered with Quaternary deposits associated with exogenous processes of weathering and erosion, represented by Fluvio-coluvial deposits and the large alluvial deposit of Valle del Cauca River.

For the hydraulic analysis of the lithological units crossed by the pumping wells pumping tests at constant flow, 24 hour recovery and stepped on the P-20 well and tests at constant flow and recovery are performed with a time of 12 hours for wells P-22 and P-23. These data are interpreted by means of Aquifer Test Pro v 1.1 2011 program of Waterloo Hydrogeologic Inc., obtaining the associated parameters such as transmissivity, storage coefficient and hydraulic conductivity. The radii of influence generated for the moonpool single well interpreted with Molano (2010) computer program, which uses solutions Jacob and Theis.

* Grade Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director Álvaro Mauricio Solarte V.

INTRODUCCIÓN

La explotación minera implica una serie de estudios geológicos, ambientales, geotécnicos y para este caso hidrogeológicos, de vital importancia en la determinación de las características del comportamiento del agua subterránea, para la adecuada planificación y explotación de calizas en la mina calera, ubicada en el municipio de Yumbo, valle del Cauca.

Dentro del área de estudio, se encuentran depósitos inconsolidados que cubren discordantemente a rocas calizas que se extraen allí, es de este modo que la firma Hidrogeocol S.A y el pasante suscrito a esta, llevan a cabo tres pruebas de bombeo en pozos ya construidos. Con el objeto de caracterizar los principales parámetros hidráulicos de las unidades litológicas cruzadas por estos pozos (T, K y S), tomando principalmente los acuíferos como medios homogéneos e isótropos, dado el requerimiento de la empresa minera en la obtención de estas medidas, así como la complejidad que acarrea incurrir en el análisis y desarrollo de ensayos de bombeo en medios fracturados.

El trabajo se enfocó hacia la determinación de los principales parámetros hidráulicos mediante la ejecución de ensayos de bombeo a caudal constante, recuperación (24h) y escalonada (solo extracción) en el pozo P-20 y pruebas a caudal constante y recuperación (12h) en los pozos P-22 y P-23, cuyos valores serán introducidos en un modelo numérico hidrogeológico, para estimar el volumen de agua subterránea almacenada en ellas.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Determinar los principales parámetros hidráulicos tales como el coeficiente de almacenamiento (S), Transmisividad (T) y Conductividad hidráulica (K), asociados al acuífero que se presenta en la zona donde se ubican los pozos P-20, P-22 y P-23 mediante la ejecución e interpretación de pruebas de bombeo.

1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar la información secundaria de la zona de estudio (descripciones litológicas, registros geofísicos de los pozos de interés, etc) dentro de la concesión minera 8420, con el fin de analizar las unidades hidrogeológicas.
- Ejecución y correlación de una prueba de bombeo escalonada, con tres escalones de duración de 1 hora cada uno y otra prueba a caudal constante y recuperación (24 horas) en el pozo de bombeo P-20 e interpretación a través del programa Acuífertest v. 1.0 (2011) de Waterloo Hydrogeologic, Inc., como un medio homogéneo e isotrópico, para la determinación de los parámetros hidráulicos de las Calizas de la Formación Vijes Superior (Tv), así como caudales de explotación, régimen de bombeo y demás condiciones constructivas).
- Ejecución de dos pruebas de bombeo en los pozos de bombeo P-22 y P-23 a caudal constante y recuperación (12 horas) e interpretación a través de la herramienta AquifertTest v. 1.0 (2011) de Waterloo Hydrogeologic, Inc., para la determinación de los principales parámetros hidráulicos del segmento terrígeno de la Formación Vijes y el depósito Cuaternario Coluvial, respectivamente para los citados pozos.

2. JUSTIFICACIÓN

La empresa Hidrogeocol S.A y como pasante el suscrito de la misma, llevan a cabo una serie de ensayos de bombeo en tres pozos ya construidos que han sido ubicados estratégicamente en la mina la Calera para conocer las propiedades hidráulicas (T, S y K) de las secuencias atravesadas por los mismos, con el objeto de introducir dichos parámetros en un modelo numérico hidrogeológico que simule el volumen de entrada de agua al tajo minero.

Dado el requerimiento de la citada firma en la obtención de dichos parámetros y la implicación que conlleva la realización de ensayos de bombeo en medios fracturados, para dos de los pozos (P-20 y P-22); se llevan a cabo los análisis y resultados de las pruebas como un medio homogéneo e isotrópico, aplicando los modelos y curvas tradicionales de comportamiento de acuíferos porosos.

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La mina a cielo abierto La Calera, está localizada en las estribaciones Orientales de la Cordillera Occidental, en la cuenca media del Río Cauca, en la jurisdicción de los Corregimientos de Mulaló y San Marcos, del Municipio de Yumbo en el Departamento del Valle del Cauca.

El área de influencia directa corresponde al área que cubre el polígono correspondiente al Título Minero 8420, con una extensión de 1.70 Km²; en tanto, el área de influencia indirecta está conformada por 1.0 Km lineal alrededor del polígono del mencionado Título, sumando las dos áreas una extensión total de 35.0 Km².

Esta área limita al Norte con el Municipio de Vijes (Corregimiento de San Marcos y Vereda Manga Vieja), al Sur con el de Yumbo (Corregimiento de Mulaló), al Oeste con las estribaciones orientales de la Cordillera Occidental y al Oriente con el cauce del Río Cauca, enmarcada por las planchas topográfica del IGAC en escala 1:25.000 identificada con la siglas 280 III C, cuyos vértices se encuentran georeferenciados según las siguientes coordenadas planas con Origen Oeste (Tabla 1.0). En la Figura 1 se muestra la localización del área de estudio.

Tabla 1. Coordenadas de Localización del Área de Estudio.

VÉRTICE	COORDENADAS	
	NORTE	ESTE
1	897500	1064000
2	897500	1071000
3	892500	1071000
4	892500	1064000

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.



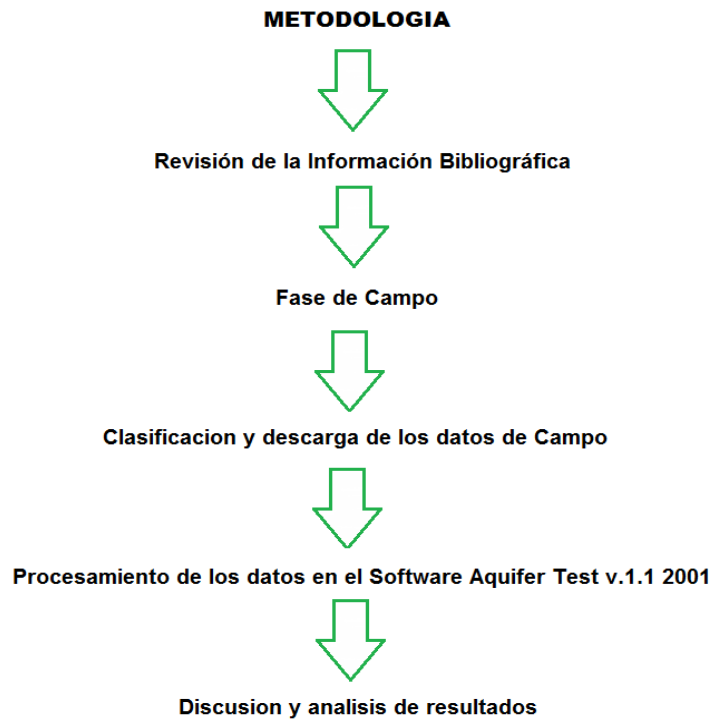
Fuente: Google Earth.

4. METODOLOGÍA

La metodología es un proceso sistemático y organizado del problema a resolver, usado principalmente con el objetivo de definir los pasos y procedimientos a seguir en el desarrollo de un proyecto y llevarlo a buen término.

En este capítulo se explica paso a paso la metodología empleada en la presente practica empresarial (Figura 2), desde el reconocimiento al área de estudio, hasta los resultados obtenidos del mismo, de forma tal, que claramente pueda ser utilizada por otros autores en estudios de similar naturaleza.

Figura 2. Esquema general de la metodología aplicada en el presente estudio.



4.1 Revisión Bibliográfica

En esta fase se hace la revisión de la información disponible sobre la zona de estudio, que principalmente corresponde a una recopilación y análisis de la información secundaria como la litología recolectada y levantada de los pozos de bombeo (P-20, P-22 y P-23) y sus registros físicos (Gamma Ray, Resistividad y Potencial espontaneo), suministrados por la empresa minera. Una vez reconocida el área de estudio se analiza la geología de superficie del sector, información tectónica de la zona, así como la visita a los pozos de bombeo, objeto de la realización de dichos ensayos hidráulicos.

4.2 Fase de campo

La fase de Campo tuvo como objetivo el reconocimiento del área de estudio y con ello la visita a los pozos, para la ejecución y la obtención de los datos arrojados por las pruebas de bombeo así:

- **Pozo P-20:** Se ejecuta el ensayo a caudal constante bombeando el nivel a un caudal regulado durante 24 horas según lo planificado por la empresa minera, observando el comportamiento del nivel piezómetro. Una vez el nivel piezométrico cumpla el tiempo de bombeo establecido se apaga la bomba y se comienzan a medir los datos de recuperación como mínimo al 90% o más de su nivel estático inicial. Completada esta etapa se da por terminado el ensayo. Una vez concluidas esta etapas de bombeo caudal constante y recuperación, se realiza la prueba escalonada a solo bombeo según requerimientos previos de la empresa minera, con un caudal creciente de 1.5, 3 y 6 litros, con escalones de 1 hora de duración cada uno, para medir el comportamiento del bombeo en cada tramo del ensayo.

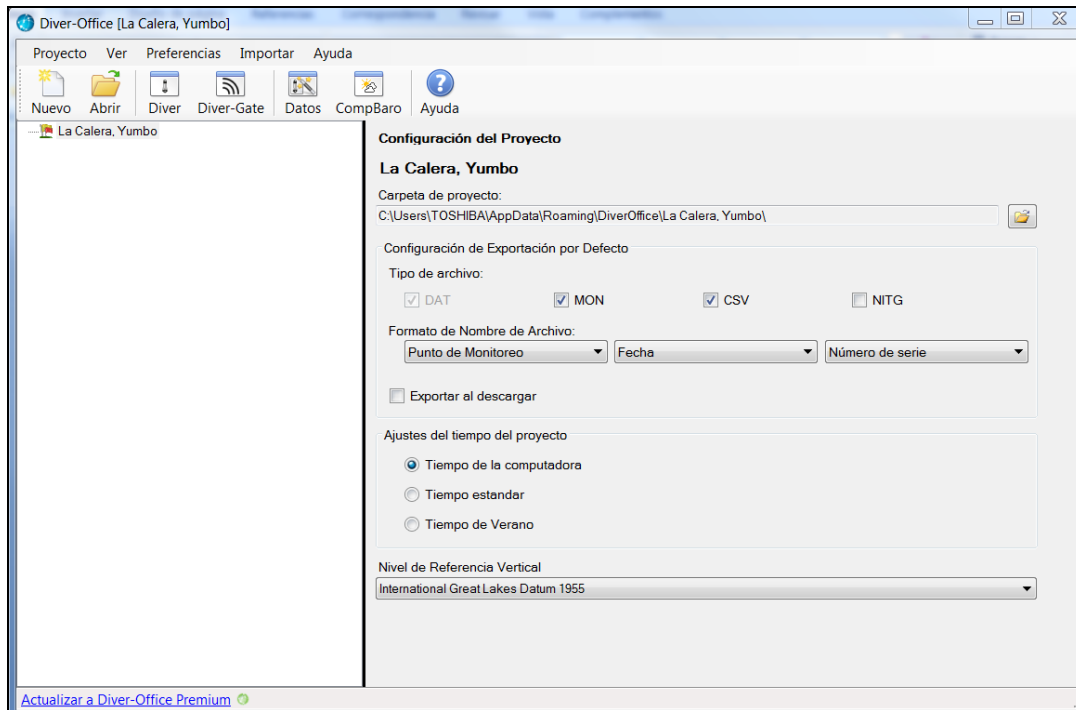
- **Pozos P-22 y P-23:** Se les realiza una prueba a caudal constante y recuperación durante un tiempo de 12 horas, con el fin de obtener los parámetros hidráulicos principales (T, K y S), tanto en el pozo P-22 que capta la unidad terrígena de las Calizas Terciarias (Tv); así como en el pozo P-23 que capta el depósito Cuaternario Fluvio Coluvial (Qfc), de la misma forma y metodología que se realiza en el pozo P-20.

4.3 Clasificación y Descarga de los datos de campo:

Previo a la adquisición de los datos de campo, se utiliza una sonda de niveles graduada al milímetro, para la toma de los datos de extracción y recuperación de los niveles piezométricos de los pozos de bombeo y se consignan en formatos que la empresa Hidrogeocol S.A tiene destinados para tal fin. No obstante se instalan Baro Diver y Cera Divers en dos de los pozos objeto de estudio (P-22) y (P-23), para la toma complementaria de la carga hidrostática de los descensos y ascensos del nivel piezométrico. Para ello se ubica el Diver en una unidad Infrarroja de lectura para su debida programación, en el software Diver Office 2013.1 Los archivos descargados deben ser guardados en un proyecto seleccionado por el usuario, que será la carpeta origen de todos los datos almacenados.

Navegando a través de la interfaz del proyecto se puede ingresar por la barra de herramientas a las opciones del Diver, allí se puede ajustar el numero de datos almacenados, la carga de la batería, configurar el métodos y el intervalo de muestreo y por ende el numero de muestras a obtener para cada etapa o paso.(Figura 3)

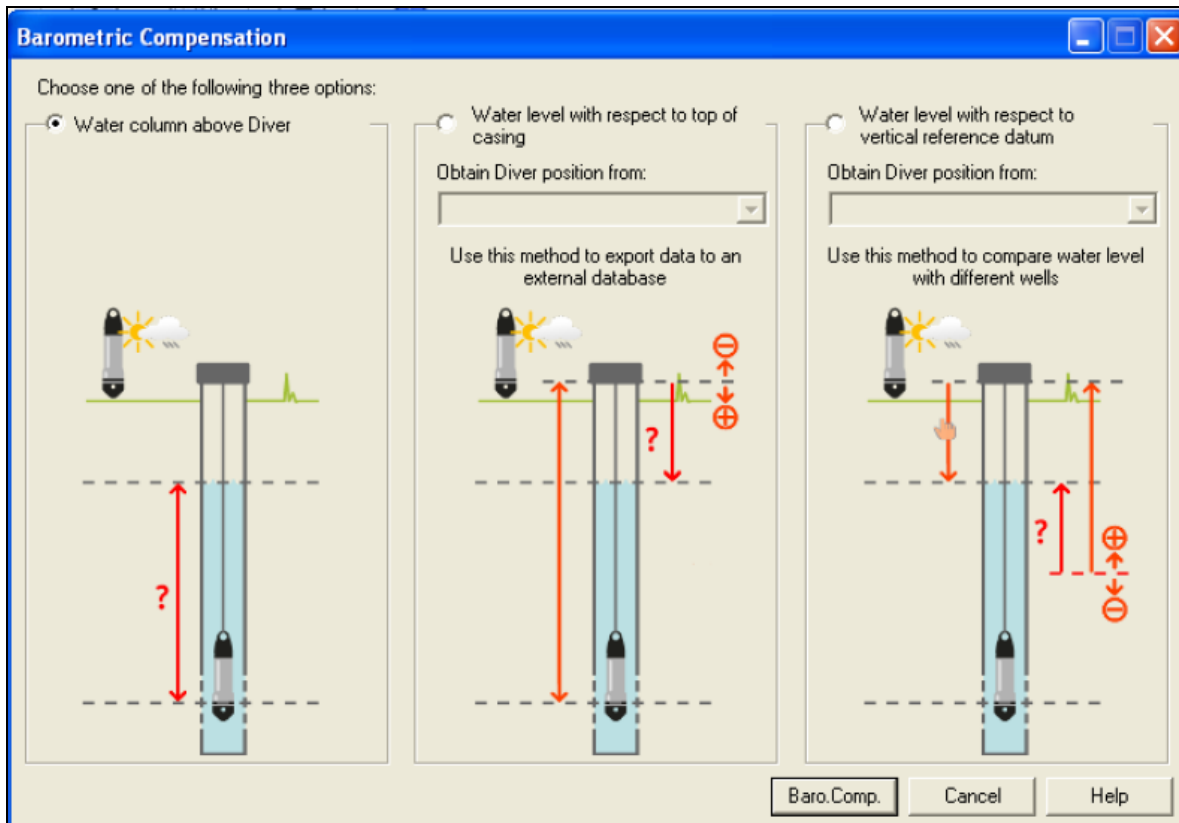
Figura 3. Visualización de las opciones del Diver.



Fuente: Schlumberger Warter Services

Una vez obtenidos los datos del pozo y descargados en el ordenador, se disponen en un archivo de excel, donde se separan los datos tomados por el cera Diver y el baro Diver, donde pueden ser procesados. Para realizar la compensación barométrica del Diver se resta la carga hidrostática obtenida en cada intervalo menos la anterior y se le suma el nivel estático inicial reportado en el pozo. (Figura 4).

Figura 4. Compensación Barométrica de las opciones del Diver Office.



Fuente: Schlumberger Water Services

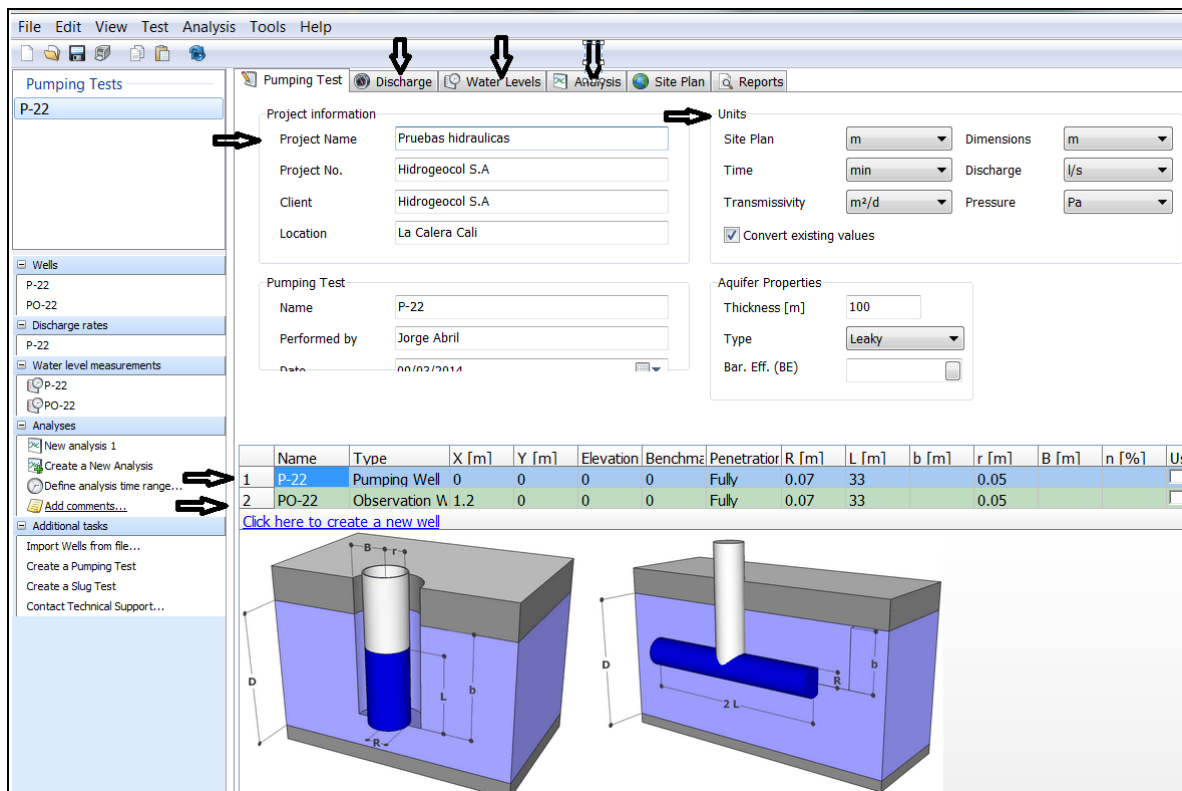
Una vez compensada cada serie de valores puede ser exportada en cualquiera de los tres formatos soportados, para nuestro caso particular, en formato .CSV (comma separated value) para lograr operar los valores en hojas de cálculo de Microsoft Excel.

4.4 Procesamiento de los datos en el software Aquifer Test Pro v.1.2011:

Una vez en el software Aquifer Test Pro.v.1,2011, se introducen los datos correspondientes al tipo de proyecto, caudal de descarga (Discharge), las unidades (Units) a ajustar para obtener las propiedades hidráulicas, los datos del pozo de bombeo y pozo de observación (radio de revestimiento, radio del pozo, longitud de los tramos de rejilla, distancia del pozo de observación). (Figura 5).

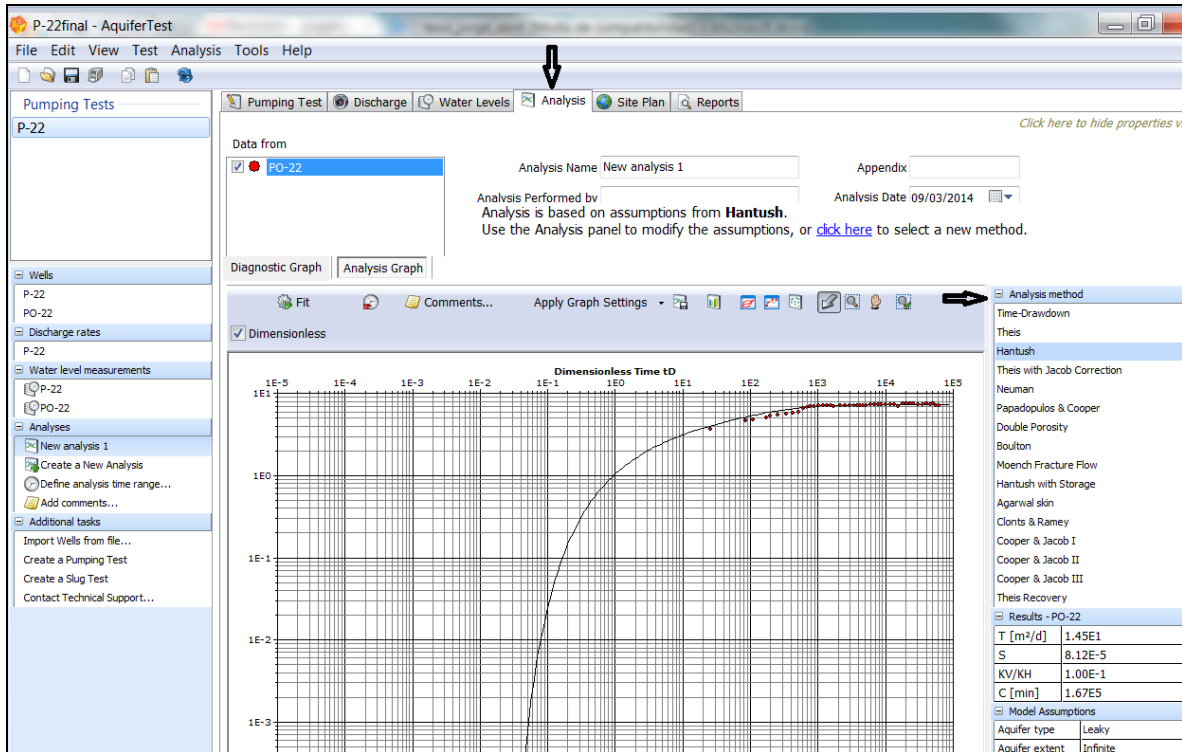
Consignados los registros anteriores, se selecciona el tipo de Análisis (Analysis) a usar (Figura 6), este se escoge a criterio del usuario, según el registro del pozo, su diseño, la geología de la zona entre otros. Es muy importante conocer esta última, pues con base en ella se describe el comportamiento hidráulico de las unidades acuíferas captadas. Seleccionado el método de interpretación, se realiza un ajuste o (Fit) a la curva de abatimiento Vs tiempo obtenida con los datos de la prueba (log-log), para compararla con el ábaco o curva patrón que más se acomode con los datos de campo. Automáticamente el sistema genera los datos correspondientes a Transmisividad (T), Coeficiente de Almacenamiento (S) y Conductividad hidráulica (K), que se tomaran para los resultados arrojados en la presente practica empresarial.

Figura 5. Procesamiento y ajuste de los datos en el programa Aquifer test Pro.v1.2011.



Fuente: Software Aquifer Test Pro.v1.2011)

Figura 6. Selección de la Paleta Analysis del tipo de método a utilizar en el análisis de la prueba de bombeo.



Fuente: Software Aquifer Test Pro.v1.2011).

4.5 Discusión y análisis de resultados

En este capítulo se incluyen los resultados y análisis realizados en la obtención de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas cruzadas por los pozos de bombeo P-20, P-22 y P-23, teniendo en cuenta su interpretación para medios porosos y homogéneos, dado el alcance y justificación del presente desarrollo de la práctica empresarial. No obstante se correlacionan los datos de geología, diseño de los pozos, tectónica y demás información de la zona de estudio, con el fin de tener una mayor certeza del comportamiento de las unidades hidrogeológicas que tienen lugar en la mina la calera.

5. MARCO TEÓRICO

La presente practica empresarial aborda conceptos relacionados principalmente con el desarrollo de análisis de pruebas de bombeo en medios porosos (homogéneos e isotropos) y en menor medida para medios fracturados donde la porosidad es secundaria (fracturas, diaclasamiento, karstificación). En estos últimos los análisis involucran modelos y conceptos mucho más complejos para su desarrollo e interpretación que desde luego se salen del alcance y justificación de esta práctica.

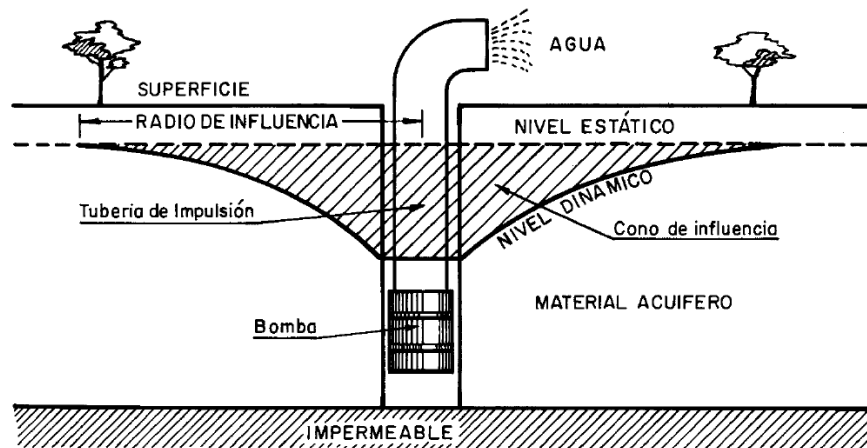
En general, los ensayos de bombeo son métodos de análisis de los pozos de captación de aguas subterráneas y del acuífero en el que se encuentran. Su metodología consiste en bombear los pozos a caudal constante o variable siguiendo la evolución del nivel del agua, debida al bombeo, tanto en el mismo pozo como en otros pozos cercanos, sin embargo dados los costos que involucran la construcción de más pozos, se hacen las pruebas en "pozo único", calculando la distancia a un pozo de observación hipotético, teniendo en cuenta el total de tramos de rejilla instalados, el radio del revestimiento del mismo y una constante que varía dependiendo del caudal bombeado en el.

El estudio de la variaciones de los niveles es en lo que consiste el ensayo de bombeo y lo que permite en si conocer información de las características del acuífero, así como la calidad de su construcción, pérdidas de carga en pozo, así como el caudal de bombeo más aconsejable y el lugar donde debe colocarse la bomba para un caudal determinado de explotación. Respecto al acuífero puede suministrar información sobre su Transmisividad, coeficiente de almacenamiento, conductividad Hidráulica, existencia de barreras o bordes impermeables cercanos, zonas de recarga, etc.

5.1 Tipos de acuíferos y su comportamiento:

Cuando se bombea un pozo baja el nivel en el mismo (nivel Dinámico) y su descenso es más pronunciado en él y aminora a medida que aumenta la distancia al mismo. La distancia entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero se denomina radio de influencia, donde alrededor de él se forma un cono de abatimiento cuya superficie es la superficie piezométrica dinámica como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Abatimiento del nivel piezométrico en un pozo de Bombeo



Fuente: Pozos y acuíferos-M. Villanueva y A. Iglesias

Según el tipo de textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos:

- La permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución, que forman en conjunto acuíferos Kársticos y fisurados, en donde se encuentran las calizas, dolomías, granitos y basaltos, siendo los dos primeros los más importantes.
- Permeabilidad por porosidad intergranular, entre ellos los se encuentran las gravas, arenas, arcosas y en general los materiales detríticos con tamaño de grano arena.

- Aquellos donde la permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas, donde se tienen los acuíferos Kársticos y porosos.

Sin embargo los acuíferos, según sus circunstancias hidráulicas y estructurales, pueden reaccionar de tres distintas formas:

- Acuíferos libres: Aquellos en los cuales el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. El agua que ceden esta almacenada en sus poros, sus conos de bombeo suelen ser profundos debido al nivel en el pozo y su radio de influencia corto.
- Acuíferos cautivos: Se encuentran rodeados de materiales impermeables en sus capas superiores, su nivel estático se encuentra por encima del techo de dicho material acuífero, por tal motivo s encuentran a presión y el agua que liberan es por liberación elástica. Estos acuíferos son rápidos, con muy poca inercia debido a su baja capacidad de almacenar agua, sus conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los libres, pero con radios de influencia largos.
- Acuíferos semiconfinados: En ellos los materiales que le rodean no son del todo impermeables. Así el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. consecuentemente la velocidad de reacción de estos acuíferos es mas moderad que en los cautivos y los radios de influencia tienen valores medios entre libres y cautivos.

5.2 Parámetros hidráulicos para medios porosos, homogéneos e isótropos

La determinación del valor de los parámetros hidráulicos de los acuíferos a través de pruebas de bombeo a caudal constante, recuperación y escalonadas, permite conocer el comportamiento del flujo subterráneo. Estos parámetros están

relacionados con los valores de Transmisividad, Coeficiente de Almacenamiento, la Conductividad Hidráulica, y los Coeficientes de Pérdida de Pozo y de Acuífero, para medios porosos y homogéneos que se obtienen con el fin de poder calcular el Radio de Influencia generado por un caudal y el tiempo óptimo de explotación. No obstante dentro de las propiedades hidráulicas de los acuíferos en medios porosos se tienen:

- **Porosidad**

La porosidad de un material viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total.

$$n = V_v / V_T$$

La porosidad eficaz de un material viene dada por la relación del volumen de agua contenido en una roca, liberada por acción de la gravedad, V_e (volumen de agua libre) y el volumen total (V_T).

$$m_e = V_e / V_T \times 100$$

- **Conductividad hidráulica (K) [L/T]**

Es la medida de la capacidad de un medio poroso para permitir el flujo de un fluido específico. Analíticamente la conductividad hidráulica se relaciona, en la ecuación de Darcy, con el coeficiente de proporcionalidad entre el caudal y el gradiente hidráulico.

Darcy descubrió la ley que regula el movimiento de las aguas subterráneas, midiendo el caudal Q en función de la permeabilidad y observó que éste equivalía a:

$$Q = k \cdot A(h/l)$$

Siendo k el coeficiente de permeabilidad, A el área de la sección transversal a través de la cual se produce el flujo del agua, h la diferencia de carga entre la entrada y la salida y l el recorrido que debe realizar el agua.

Si se tiene en cuenta que:

$$Q/A = v$$

Siendo v , la velocidad media, resulta:

$$Q/A = v = k(h/l)$$

Llamando el gradiente hidráulico $i = h/l$, resulta:

$$v = k \cdot i \quad \text{donde } k = v/i$$

El coeficiente de permeabilidad (k), tiene las dimensiones de una velocidad, ya que la ecuación dimensional es:

$$(k) = (L^3/T) / (L/L)L^2 = L/T$$

En términos generales se puede decir que la conductividad hidráulica depende de la permeabilidad intrínseca del medio poroso, del peso específico y la viscosidad del fluido. La conductividad hidráulica puede ser isotrópica o anisotrópica, dependiendo de si existen variaciones de importancia de conductividad, en diferentes direcciones.

- **Transmisividad (T) [A/T]**

Es el volumen de agua (a la viscosidad cinemática existente), que fluye por unidad de tiempo (caudal), bajo un gradiente unitario, a través de un ancho unitario de acuífero, en todo su espesor.

La Ley de Darcy se expresa como $Q = k.A.i$. Si la sección A es igual a la del acuífero, tiene una longitud L y una altura b , se tiene:

$$A = b \cdot L$$

Entonces la Ley de Darcy se puede escribir como:

$$Q = K \cdot b \cdot L \cdot i$$

Al producto $K \cdot b$, se le llama Transmisividad y se designa por T , quedando la Ley de Darcy:

$$Q = T \cdot L \cdot i$$

Sus dimensiones son las de una velocidad por una longitud:

$$(T) = [L]^2 \cdot [T]^{-1}$$

- **Coefficiente de Almacenamiento (S)**

Es el volumen de agua que un acuífero puede dar ó recibir en almacenamiento por unidad de área y por unidad de cambio en la cabeza. En acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento es igual al producto del almacenamiento específico por el espesor del acuífero. En acuíferos libres es aproximadamente igual a la porosidad eficaz. El tipo de acuífero depende del grado exponencial del Coeficiente de Almacenamiento, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes exponenciales de almacenamiento

ACUÍFERO	EXPONENCIAL (valor de S)
LIBRE	$>10^{-3}$
SEMICONFINADO	$10^{-2} - 10^{-3}$
CONFINADO	$>10^{-4}$

Fuente: Hidrogeocol S.A

- **Coefficiente de pérdida de pozo (C) y de acuífero (B)**

Según Rorabaugh (1953), el descenso del agua en un pozo puede escribirse como.

$$s_p = BQ + CQ_n$$

Donde:

BQ es el descenso que ocurre en el borde exterior del revestimiento necesario para que el agua fluya al pozo en régimen laminar según la ley de Darcy. Es función del diámetro del pozo y de las características del acuífero.

CQn equivale al descenso ocasionado dentro del pozo por flujos turbulentos hacia el pozo, por el paso del agua a través de las rejillas de los filtros, por el movimiento del agua desde la zona filtrante la bomba y por las pérdidas de carga que sufre el agua al entrar en la bomba.

B se denomina Coeficiente de Pérdida de Circulación en la Formación o Coeficiente de Pérdida de Acuífero y es variable con el tiempo de bombeo y C se denomina Coeficiente de Pérdida de Pozo y es independiente del tiempo.

El valor de n puede variar entre 1.5 y 3.5, dependiendo del valor del caudal Q (Lennox, 1966, en Custodio y Llamas, 1983), aun cuando Jacob 1950, en Custodio y Llamas 1983) lo fija en 2.

- **Porosidad total (pt) [%]**

Es el volumen total de vacíos por unidad de volumen de medio poroso.

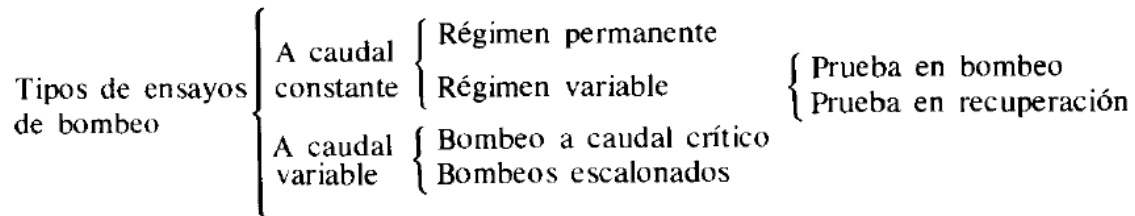
- **Porosidad efectiva (pe) [%]**

Es igual a la producción eficaz y se define como el volumen de agua que un acuífero puede drenar bajo la acción de la gravedad por unidad de volumen del medio poroso.

5.3 Tipos de ensayos de bombeo

Los tipos de ensayos de bombeo se resumen en el siguiente Figura 8.

Figura 8. Tipos de ensayos de bombeo.



Fuente: Pozos y acuíferos-M. Villanueva y A. Iglesias

Los ensayos de bombeo se pueden realizar a caudal constante o a caudal variable y dependiendo de si se mantiene el caudal sin variaciones a lo largo de toda la prueba o no. Es pues que dentro del bombeo se puede llegar a alcanzar el régimen permanente si después de un tiempo los niveles se estabilizan o varían muy poco. Esta situación es hipotética, pues se necesitan muchos horas, quizás meses para bombear un pozo y lograr su mayor grado de estabilización, para considerarlo en régimen permanente. Por tal motivo no se abarcan análisis de pozos en régimen permanente y se hacen en régimen variable, dado el tiempo restringido de la ejecución de las pruebas de bombeo.

Por otra parte en el caso de bombeos a caudal variable pueden existir dos modalidades. La primera consiste en mantener la depresión fija al nivel de la bomba y medir como va variando en caudal con el tiempo. Se le denomina prueba a caudal crítico y se utiliza exclusivamente para ensayos en acuíferos colgados que reúnan determinadas características.

La segunda modalidad es la de caudales escalonados. En esta se fijan a voluntad distintos caudales, midiéndose la depresión producida por cada uno de ellos. Los caudales de bombeo son crecientes y de la misma duración cada uno, generalmente el tiempo que suele darse a cada escalón oscila entre 0.5 y 3 horas. (Villanueva y A. Iglesias, 1984). Para el presente desarrollo de la práctica, se realizan escalones sin recuperación (Figura 9). Este método consiste en efectuar bombeos con caudal creciente e igual tiempo de duración, sin necesidad de interrumpir la prueba al termino de cada uno. Los descensos que se toman son

los originados por cada uno de los caudales. El primer descenso, d_1 , creado por el caudal Q_1 , es la diferencia entre el nivel final, al cabo del tiempo t , y el inicial en reposo. En el segundo escalón existe un incremento del caudal (Q_2-Q_1), lo que produce un descenso adicional Δd_2 . Al caudal Q_2 corresponde un descenso $d_2 = d_1 + \Delta d_2$. El descenso correspondiente al tercer caudal Q_3 será: $d_3 = d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3$. Para la resolución de estas pruebas se necesita al menos una terna de valores para poder resolver el sistema:

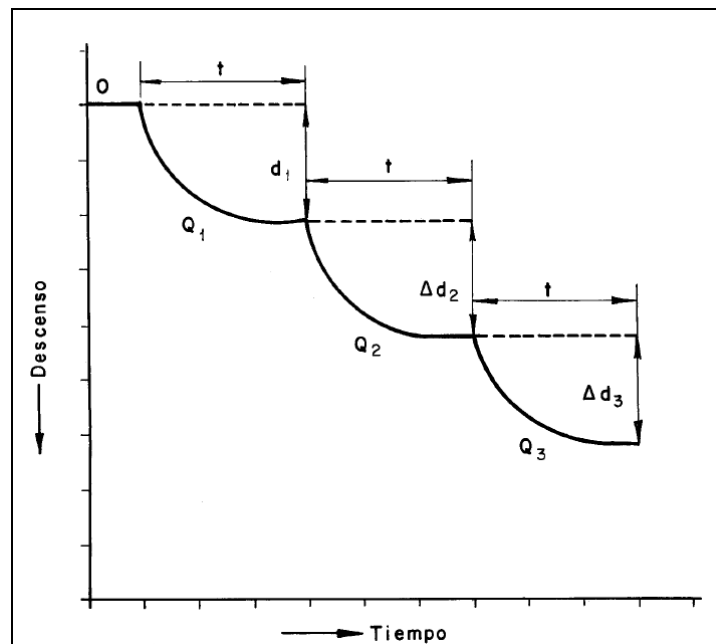
$$d_1 = AQ_1 + BQ_1^n$$

$$d_2 = AQ_2 + BQ_2^n$$

$$d_3 = AQ_3 + BQ_3^n$$

Estas pruebas son de gran utilidad en el cálculo de las pérdidas de carga en el pozo y en el acuífero, como consecuencia de una construcción defectuosa.

Figura 9. Prueba escalonada sin escalones o intervalos de Bombeo con estabilización de niveles.



Fuente: Villanueva y A. Iglesias, 1984.

5.4 METODOS DE ANALISIS EN REGIMEN VARIABLE

5.4.1 Acuíferos Confinados o Cautivos:

- **Método de Theis:**

Se basa principalmente en la ecuación general:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

donde:

d = descenso de un punto situado a la distancia r del pozo de bombeo

Q = caudal de bombeo constante

T = Transmisividad del acuífero

u = es una función auxiliar, cuyo valor es:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

siendo:

S = coeficiente de almacenamiento

t = tiempo transcurrido a partir del comienzo del bombeo, consideradas inicialmente condiciones de reposo.

A la integral de la ecuación se le denomina función de pozo $W(u)$. Así se tiene:

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$d = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Esta integral no tiene solución analítica, pero su función de pozo W_u se ha tabulado en unas tablas para su análisis, sin embargo con el software Aquifer Test Pro v.1.2011 se facilitaran los cálculos, para la obtención de estos parámetros.

5.4.2 Método de Jacob

El método de Jacob es una particularización del método de Theis (Figura 10) , cuando las circunstancias del ensayo reúnen determinadas condiciones. La función de pozo W_u queda definida así:

$$W_{(u)} = -0.577216 - \ln u$$

A partir de la ecuación de Theis se obtiene:

$$d = 0.183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2S}$$

Que es la expresión de Jacob, en la que como siempre:

d = descenso de un punto situado a la distancia r del pozo de bombeo

Q = caudal de bombeo constante

T = Transmisividad del acuífero

S = coeficiente de almacenamiento

t = tiempo transcurrido a partir del comienzo del bombeo, consideradas inicialmente condiciones de reposo.

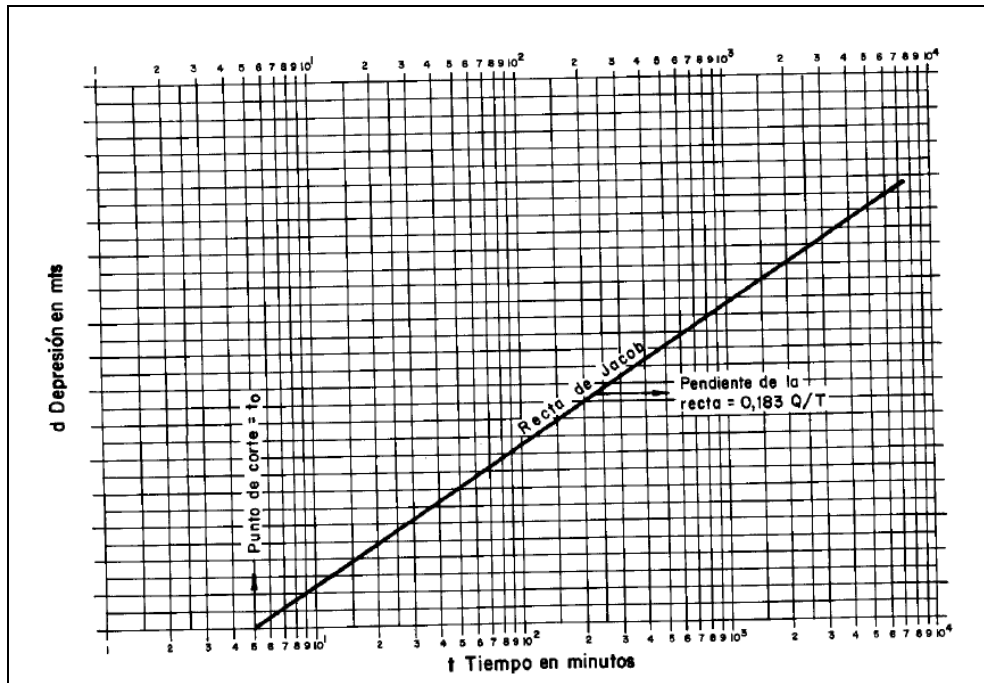
reemplazando t_0 por

$$\frac{r^2 S}{2.25T} = t_0$$

La ecuación definitiva queda reducida así:

$$d = 0.183 \frac{Q}{T} \lg t - 0.183 \frac{Q}{T} \lg t_0$$

Figura 10. Recta de Jacob.



Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).

5.4.3 Método de Recuperación de Theis Recovery

El método de recuperación de Theis es muy usado en acuíferos confinados en periodos de recuperación o ascenso del nivel del pozo. Dicho ascenso se mide por medio del descenso residual S'' , es decir la diferencia entre el nivel del agua antes de comenzar el bombeo y el nivel actual, medida en un cierto momento t'' des pues de finalizado el bombeo (Kruseman y Ridder, 1975). Con los datos obtenidos durante el periodo de recuperación se puede calcular la Transmisividad, sirviendo

de comprobación de los resultados obtenidos con los datos recogidos durante el bombeo. Se puede utilizar el método de recuperación de Theis para calcular las propiedades hidráulicas del acuífero. Según THEIS (1935), el descenso residual S'' durante el periodo de de recuperación viene dado por:

$$s'' = \frac{Q}{4\pi KD} \left[\ln \frac{4kDt'}{r^2 S} - \ln \frac{4kDt''}{r^2 S''} \right]$$

donde:

S'' = descenso radial en m

r = distancia del pozo de observación al bombeo en m; si se considera el pozo de bombeo mismo, $r=r_w$ = radio efectivo del pozo de bombeo

S'' = coeficiente de almacenamiento durante la recuperación, adimensional

S = coeficiente de almacenamiento durante el bombeo

t = tiempo desde que comenzó el bombeo, en días

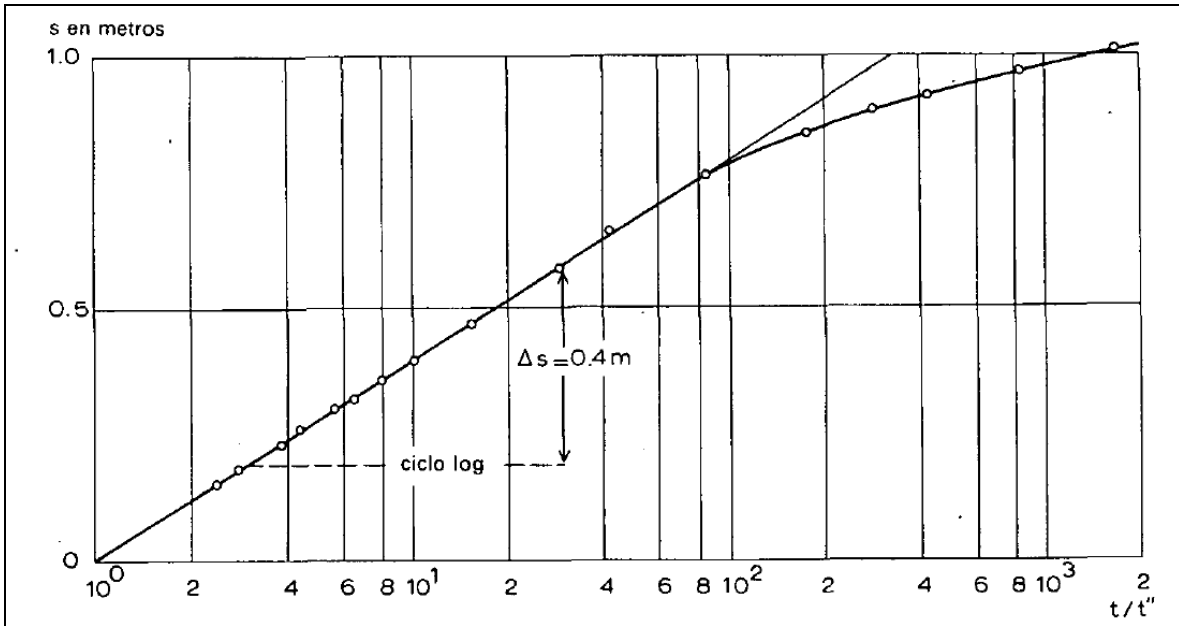
t'' = tiempo desde que termino el bombeo, en días

Q = caudal de recarga= caudal de descarga en $m^3/días$

En la Figura 11 se observa el descenso residual atribuido al $\Delta S''$, que se sustituye en la ecuación con recta pendiente igual a:

$$kD = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta S}$$

Figura 11. Análisis de una síntesis de los datos de recuperación con el método de Theis Recovery.



Fuente: (Kruseman and Ridder 1975).

5.5 ACUIFEROS SEMICONFINADOS: METODO DE HANTUSH

Se basa principalmente en la formula:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

Donde:

d = la depresión en un punto situado a la distancia r del pozo de bombeo

Q = caudal de bombeo constante

T = Transividad

$W(u, r/B)$ = función de pozo para acuífero semiconfinado

B = factor de goteo que corresponde a:

$$\sqrt{\frac{Tb'}{K'}}$$

Siendo:

$\frac{b'}{K'}$ = Resistividad hidráulica, su dimensión es de tiempo t y se utiliza el día.

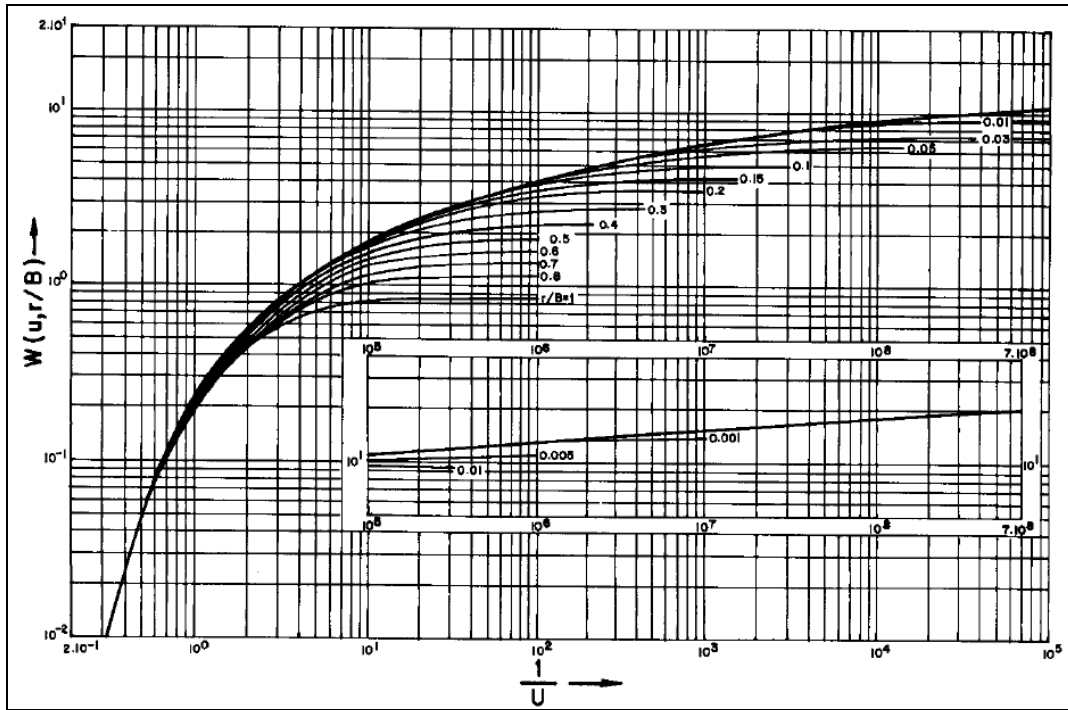
$\frac{K'}{b'}$ = Coeficiente de goteo, su dimensión es la inversa del tiempo t y se expresa como 1/día.

b' = espesor del semipermeable.

K' = permeabilidad vertical de la formación semipermeable.

Principalmente se rige por el método de Theis, con la variación de tener una serie de derivaciones para cada valor de r/B y por consiguiente en la respectiva función de pozo $W(u,r/B)$ (Figura 13). Las derivaciones r/B se separan de las curva de Theis por debajo, mostrando para cada derivación un estado de estabilización, esta tendencia a la estabilización es debida a la recarga por goteo vertical que llega a cono de bombeo del acuífero inferior. Cuanto mayor sea el valor de este goteo, mayor es el valor de r/B y antes se separa de la derivación de la curva teórica de Theis.(Figura 12).(Kruseman y Ridder, 1975).

Figura 12. Función de pozo $W(u, r/B)$ en acuífero semiconfinado (Hantush, 1956).



Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).

Figura 13. Tabla de la función de pozo en acuífero semiconfinado $W(u, r/B)$. (resumida).

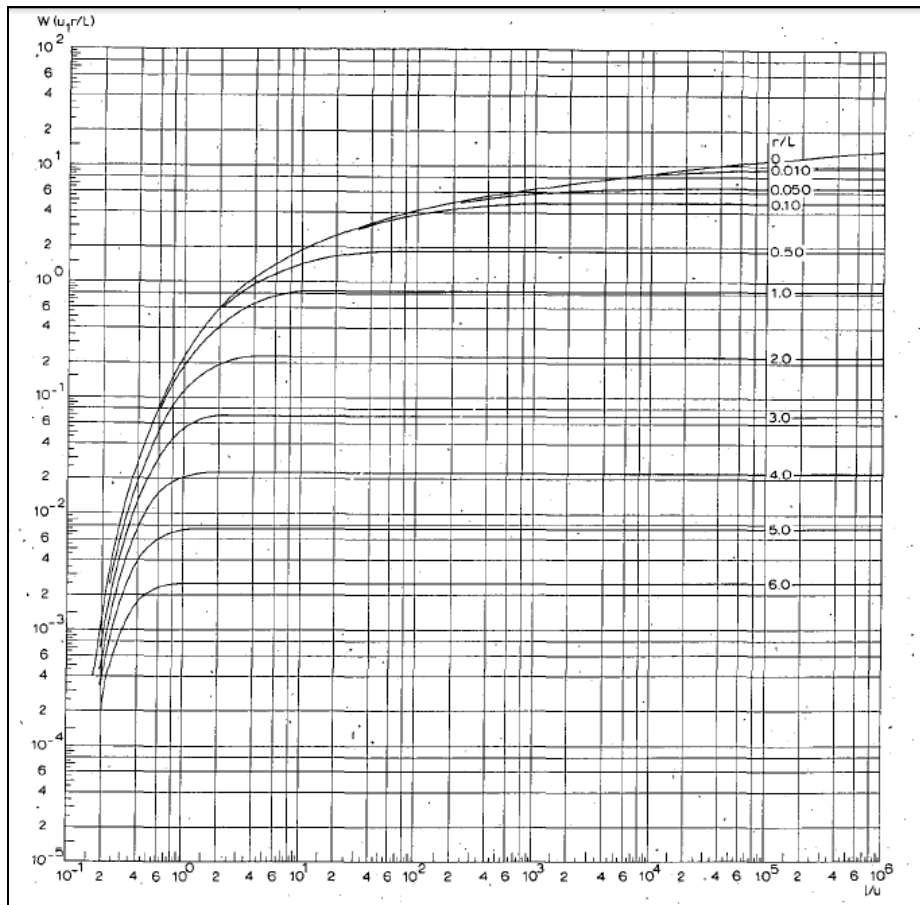
$r/B \backslash u$	0,001	0,005	0,01	0,05	0,10	0,5	1,0	1,5	5,0	9,0
0,000001	13,0031	10,8283	9,4425	6,2285	4,8541	1,8488	0,8420	0,4276	0,0074	0,0001
0,00001	10,9109	10,3963	9,4176	—	—	—	—	—	—	—
0,0001	8,6308	8,5717	8,3983	6,2282	—	—	—	—	—	—
0,001	6,3313	6,3253	6,3069	5,7965	4,8292	—	—	—	—	—
0,01	4,0379	4,0373	4,0356	3,9795	3,8150	1,8486	—	—	—	—
0,1	1,8229	1,8229	1,8227	1,8184	1,8050	1,4422	0,8190	0,4271	—	—
1,0	0,2194	0,2194	0,2194	0,2193	0,2190	0,2103	0,1885	0,1509	0,0073	—
7,0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000

Fuente: (Villanueva y A. Iglesias, 1984).

5.5.1 Método de Walton

Walton en 1962 desarrolla un método de solución siguiendo una línea de razonamiento semejante al utilizado en el método de Theis; sin embargo en este caso, en vez de haber una sola curva tipo, existe una para cada valor de r/L . Esto significa que utilizando tablas de valores de la función $W(u, r/L)$ como las publicadas por HANTUSH (1956), se obtiene una familia de curvas. Figura 14.

Figura 14. Familia de curvas tipo del método de Walton; $W(u, r/L)$.



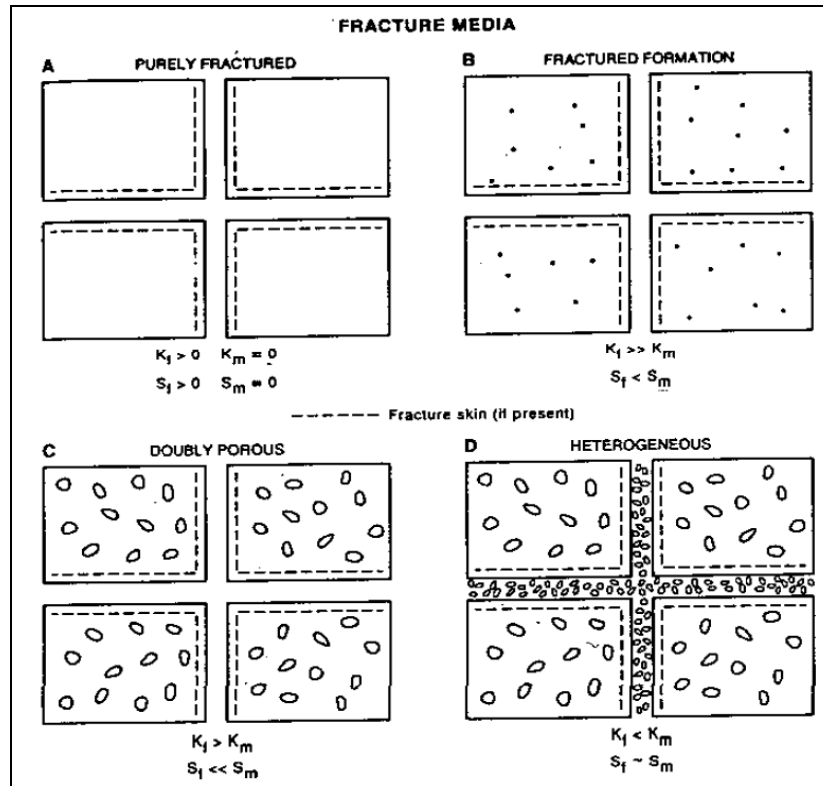
Fuente: (Kruseman and Ridder, 1975)

5.6 CONSIDERACIONES SOBRE LA HIDRAULICA DE MEDIOS FRACTURADOS

El término fractura obedece principalmente a diaclasas, fisuras, grietas y fallas que son causadas por:

Procesos geológicos y ambientales, movimiento tectónico, esfuerzos secundarios, grietas de desecación, meteorización, disolución química de sus materiales constituyentes (Calizas y Dolomías), factores petrológicos de composición mineral, presión litostática, entre otras (Kirchner y Tonder, 1995). Desde el punto de vista hidrogeológico una masa de roca fracturada puede ser considerada un medio multiporoso. Los medios fracturados pueden ser divididos en cuatro categorías (Streltsova, 1975) dependiendo de las propiedades hidráulicas relativas de las fracturas y los bloques o matriz dentro de la fractura. Figura 15.

Figura 15. Clasificación Hidrogeológica de los medios fracturados



Fuente: (Streltsova, 1975).

Estas categorías son gradacionales (Sharp, 1993). En medios fracturados (Figura 15A) la conductividad hidráulica y el almacenamiento del agua están restringidos a las fracturas, en cambio la matriz de la roca no tiene porosidad y permeabilidad. Ejemplos incluyen rocas ígneas intrusivas, granitos, gabros y algunas rocas volcánicas). En muchas formaciones fracturadas, el flujo es controlado por las fracturas, mientras el almacenamiento esta principalmente en los bloques, como ocurre en materiales como shales, limolitas y areniscas. En medios de doble porosidad (Figura 15.C) la permeabilidades relativas de los bloques ocurren principalmente en las fracturas que incluyen materiales como basaltos y rocas carbonatadas. Finalmente en la figura (Figura15.D) se representan medios fracturados en los que las fracturas han sido rellenadas con material que tiene más baja permeabilidad que en los bloques de la matriz (Sharp, 1993).

Las fracturas pueden cerrarse en profundidad debido al peso de la columna listostatica, teniendo por ello diferentes patrones de fracturamiento. Muchos tipos de rellenos son encontrados en fracturas debido al producto de la desintegración de las rocas encajantes o a sus constituyentes químicos. Un hecho muy interesantes es que las fracturas tienden a terminar en otras fracturas. (Berkowitz, 1992).

Una configuración de fracturas está definida como un grupo de fracturas que yace mas a o menos paralela a otras asociadas a estas.(Berkowitz, 1992).Un sistema de fracturas consiste en una red de fracturas que se interceptan en más o menos ángulos constantes, mientras una zona de fractura es una región que contiene un grupo de fracturas.

Las conductividades de de sistemas fracturados varían considerablemente y dependen de: la apertura (distancia entre las paredes de la fractura), frecuencia o espaciamiento (densidad), asperezas de las paredes (asperezas, incluyendo factores de perdidas), presencia de relleno de material, conectividad en las fracturas y porosidad y permeabilidad en la matriz de la roca. La conductividad hidráulica y la descarga o caudal de una fractura con paredes paralelas es

directamente proporcional al cuadrado o cubo de la apertura, como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\rho g e^3}{12\mu} I$$

donde q es la viscosidad del fluido

e = apertura de la fractura

μ = viscosidad dinámica

ρ = es la densidad

g = la aceleración de la gravedad

5.6.1 Modelos teóricos para Acuíferos Fracturados

El flujo en acuíferos fracturados puede ser explicado por varios modelos teóricos. Muskat (1982) fue uno de los primeros en analizar el flujo en medio fracturados. Gringarten (1982) encontró los tres principales tipos de enfoques al problema como sigue:

- El enfoque determinístico que está basado en la exactitud del detalle en la descripción del sistema de fracturas y es principalmente usado en problemas de pequeña escala en ingeniería geotécnica.
- El enfoque del modelo de doble porosidad que asume una distribución uniforme de los bloques de la matriz y las fracturas en todo el acuífero (incluyen modelos de fracturas simple y de multiporosidad y permeabilidad).
- El enfoque de acuífero homogéneo que considera solo las principales tendencias del comportamiento de la presión del acuífero fracturado e intenta relacionarlos a los modelos conocidos de más baja complejidad.

Los modelos teóricos forman la base de los métodos de curvas tipo derivados por varios investigadores para el análisis de los datos de los acuíferos en pruebas de bombeo en medios fracturados.

Barenblatt et al, (1960) introdujeron el concepto de doble porosidad ampliamente usado en el campo del petróleo. Dos enfoques que difieren la manera para describir el flujo en los bloques y las fracturas han tenido lugar. El primer enfoque asume que el flujo ocurre bajo condiciones de un estado pseudo.estable (Warrent and Root, 1963); el otro enfoque el flujo ocurre bajo condiciones transitorias desde el bloque a la fractura (Kazemi et al. 1969).

Moench (1984) incorpora la idea de la perdida de fractura (una delgada capa de baja permeabilidad que se deposita en la superficie de los bloques, que sirve para impedir el libre intercambio del fluido entre los bloques y la fractura). Este efecto de pérdida de fracturas en sistemas de doble porosidad retrasa el flujo de los bloques a las fracturas que es similar al modelo de flujo pseudo estable (Moench, 1984). De acuerdo a Moench, para reducir los gradientes de cabeza hidráulica en los bloques compresibles, el efecto de pérdida de fractura suministra justificación teórica para las aproximaciones de flujo pseudo estable usadas en el modelo de Warrent y Root (1963).

Bourdet and Gringarten (1980) mostraron que el comportamiento de doble porosidad de acuíferos fracturados solo ocurre en áreas restringidas alrededor del pozo de bombeo. Fuera del área (para valores más grandes de $\lambda = 1.78$) el comportamiento del abatimiento es equivalente a un medio poroso.

Finalmente Kruseman and Ridder discutieron los siguientes métodos para el análisis de datos de pruebas de bombeo en medios fracturados, resumidos en la Tabla XXX, de forma muy generalizada:

Tabla 3. Métodos de ensayos de Bombeo en medios fracturados.

DIFERENTES ANALISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO EN ROCAS FRACTURADAS (KRUSEMAN AND RIDDER, 1991)		
METODO	SUPUESTOS	PARAMETROS OBTENIDOS
Bourdet/Gringarten (1980) (pozo de observación)	1. El acuífero es confinado, el espesor del acuífero es uniforme, el pozo penetra totalmente la fractura. El pozo es bombeado a caudal constante; antes del bombeo la superficie piezometrica es horizontal; el flujo al pozo está en estado inestable; 2. Las condiciones de estado pseudo-estable ocurren en los bloques. 3. $\lambda > 1.78$ ($\lambda = \alpha \cdot r^{2*} \cdot K_m \cdot K_f$)	Tf y Tm; Sf y Sm
Kazemi et al. 1969 (para pozo de observación)	1. Igual que en arriba 2. Igual que arriba 3. $u^* > 100$	Tf; Sf y Sm
Warren-Root (1963) (para pozo bombeado)	1. Lo mismo que arriba 2. Lo mismo que arriba 3. No asume pérdidas de de pozo (skin) ni efectos de almacenamiento	Tf; Sf y Sm
Moench (1984) (Para pozos de observación y de bombeo)	1. Lo mismo que arriba 2. Cabezas hidráulicas en los bloques están en estado pseudo-transitorio estable 3. Los efectos de pérdidas de fractura (skin) pueden existir	Kf y Km; Sm y Sf; (donde S denota el almacenamiento específico y no el coeficiente de almacenamiento)

Fuente: Kruseman & Ridder, 1991.

6. MARCO GEOLÓGICO

El Departamento del Valle del Cauca está localizado al Nor-Occidente de Suramérica, sobre los Andes Septentrionales, que corresponde a un sitio de interacción de tres placas tectónicas: Nazca, Suramericana y Caribe. Se considera que la Placa Nazca converge contra la Placa Suramericana, a una velocidad de 8.0 cm/año, en sentido E-W, formando un ángulo de 45° con la dirección de la Cordillera de los Andes y es subducida bajo la Placa Suramericana en la Fosa Colombo-Ecuatoriana. El ángulo de buzamiento calculado para la zona de Benioff es de 30°, presentándose el frente volcánico activo aproximadamente 150.0 Km al Oriente de la fosa y 150.0 Km por encima de la zona de Benioff (Meissnar et al., 1976).

Debido al desplazamiento de la placa oceánica, ocurre la acreción del continente hacia el Oriente Colombiano, y posteriormente los bloques acrecidos son reorganizados por movimientos a lo largo de megafallas de rumbo dextrales (Aspden, 1984). En términos generales, el Oriente Colombiano es una provincia cortical constituida por rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico y el Paleozoico, intruidas por plutones granitoides Mesozoicos. Por su parte, la Provincia Litosférica- Oceánica (Cordillera Occidental) está constituida por rocas Cretácicas, principalmente plutónicas y volcánicas básicas, y por sedimentitas de afinidad oceánica. El límite entre estas dos provincias es la Falla Romeral.

A partir de este momento, la margen continental evoluciona como una margen activa relacionada con una nueva zona de subducción que se genera al Occidente como consecuencia de la acreción. Los rasgos principales de esta nueva margen continental son el establecimiento de un frente volcánico, activo hasta hoy, y la formación de una cuenca de frente de arco entre este último y el punto de inflexión de la pendiente de la fosa oceánica. Bajo este régimen, la corteza, sometida a varios pulsos orogénicos, ha sido intruida por plutones granitoides Terciarios, y

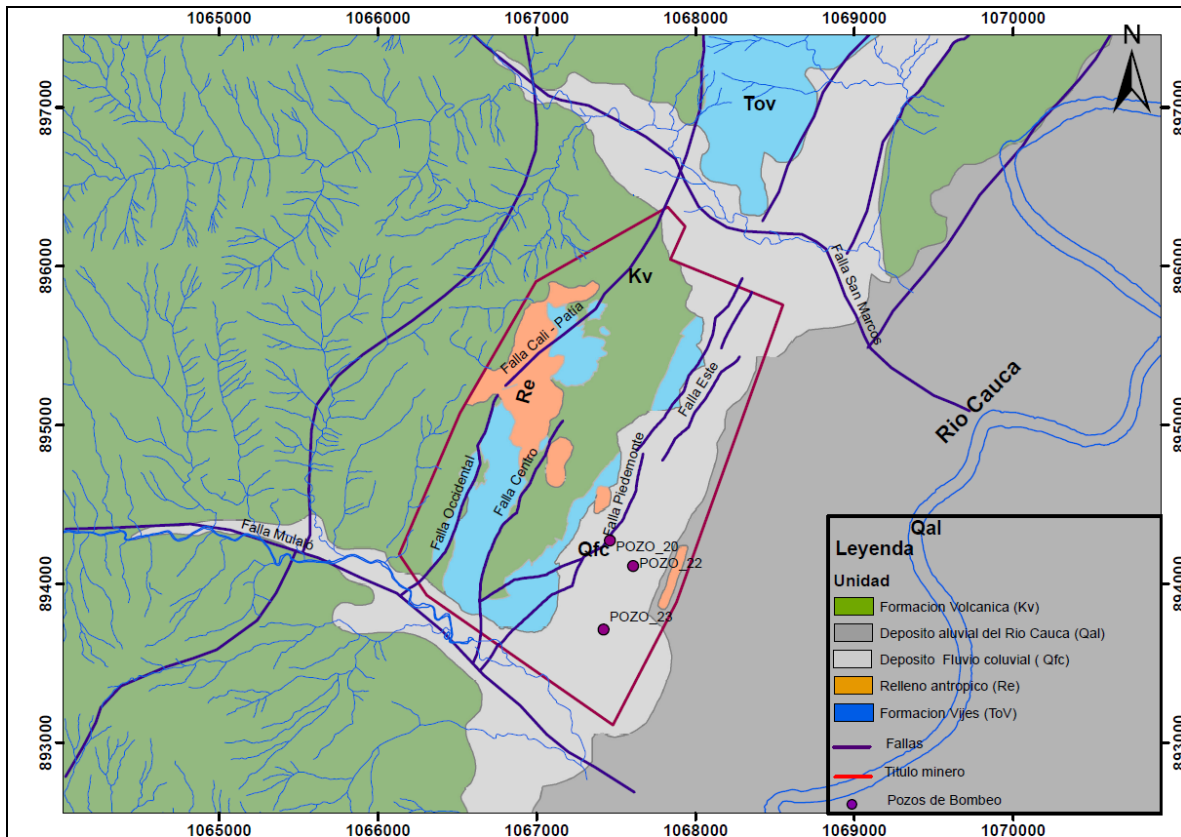
presenta una cobertura de edificios volcánicos y depósitos volcanogénicos y sedimentarios.

De esta manera, la Cordillera Occidental se constituye en la más nueva de las tres cordilleras de los Andes Colombianos, originándose sus rocas y formaciones geológicas dentro del contexto oceánico de una meseta submarina de naturaleza volcánica, construida por emisiones de flujos de basalto, inyecciones de diabasa y sobreposición de sedimentos. Dentro de su proceso evolutivo, la naciente Cordillera Occidental sufre cambios notables derivados del mecanismo de emplazamiento y levantamiento de sus rocas desde el fondo oceánico, hasta obtener su configuración actual como una cordillera continental. (Nivia, 2001).

En el área de la Mina La Calera, la anterior evolución geológica de la Cordillera Occidental está representada por rocas volcánicas identificadas como Formación Volcánica, sobre la cual aparece adosado un atolón de rocas calcáreas de corta longitud conocido como Formación Vijes. Estas rocas aparecen cubiertas por depósitos Cuaternarios asociados a procesos exógenos de meteorización y erosión, representados por depósitos fluvio-coluviales y el gran depósito aluvial del Valle del Río Cauca. (Hidrogeocol, 2012).

La descripción geológica regional resumida en esta práctica empresarial está basada principalmente en los informes de CVC - Ingeominas (1970 y 1971), Ingeominas (2001), y actualizada con la información de geología local, obtenida de fuentes secundarias como Litektos (2012). La Figura muestra el mapa geológico de la zona de estudio.

Figura 16. Mapa Geológico del área de estudio.



Fuente: El autor. Mapa a escala 1:25000

6.1 Formación Volcánica (KV).

Las rocas de ésta Formación presentes en la Cordillera Occidental, consisten esencialmente de lava basáltica, diques de diabasa, cantidades menores de brecha volcánica y horizontes de rocas sedimentarias silíceas, las cuales predominan de manera continua desde de Mulaló hasta más allá de la localidad de San Marcos. En el área de estudio sus afloramientos se encuentran en las zonas topográficas más altas presentes al Occidente del cordón aislado de calizas de la Formación Vijos.

El basalto es una roca oscura de grano muy fino, por lo general de tonalidad verde oscura, que varía de verde oliva a grisáceo y ocasionalmente azulado. Por lo general ocurre como flujos masivos que a veces presentan estructuras

almohadilladas y estructuras columnares, como respuesta al rápido enfriamiento del material fundido y caliente al entrar en contacto con el agua del océano, donde el borde de las almohadillas por lo general da lugar a “capitas” de hialoclastita o brecha de vidrio volcánico. (ANEXO III. Foto No. 3).

La diabasa tiene una composición similar a la del basalto pero su textura es más gruesa, presentando en estado fresco un color verde azulado y colores marrón y amarillo cuando está meteorizada. En la mayoría de los casos forma diques o silos, emplazados en los flujos. Los afloramientos de roca sana sobre las laderas son escasos, hallándose comúnmente en los cauces de quebradas y ríos.

Las rocas basálticas, en los grados incipientes de meteorización, han dado lugar a las conocidas estructuras “bolares” o en “cebolla” que se descomponen en cáscaras concéntricas. En estados más avanzados de meteorización dan lugar a afloramientos arcillosos con núcleos residuales o bloques de roca aislados. Por otra parte el denominado “Saprolito”, es material volcánico en estado de meteorización diferencial, donde se mantiene las características texturales de la roca original. La transformación se produce por procesos de intemperismo, hidratación e hidrólisis, principalmente en las rocas más cercanas a la superficie, como un proceso gradual hacia el desarrollo de suelos.

Según el estudio de Nivia (2001), la Formación Volcánica se deposita en un ambiente marino durante el Cretácico Medio.

6.2 FORMACIÓN VIJES (TOV)

Esta unidad representa un Atolón adosado a la Cordillera Occidental, formado cuando el arrecife crece alrededor de una isla volcánica a medida que la isla se va hundiendo en el mar. Está conformado por una secuencia de calizas y areniscas que afloran en una franja de corta longitud entre cercanías del poblado Mulaló al Sur-Occidente y la población de Vijes al Nor-Oriente. La unidad aparece descrita inicialmente por Stutzer (1934) y subsecuentemente por Nelson

(1957), quien se refiere a ellas como las Calizas de Vijes, y finalmente Schwin (1969) propuso denominarlas Formación Vijes. Esta secuencia se encuentra inclinada hacia el oriente, y se deposita sobre la Formación Volcánica mediante una paraconformidad mayor, lo cual hace que en ciertas zonas se aprecie como un contacto fallado, y en otras como una discordancia angular (Litektos, 2012). Tiene un espesor variable que alcanza un máximo de aproximadamente 300 m al Norte de la Quebrada San Marcos.

En éste sector Norte de la Quebrada San Marcos, Ingeominas (2001) reporta la presencia hacia la base de ésta Formación, una capa de conglomerado de aproximadamente 30.0 m de espesor conformado por clastos derivados de la erosión de las rocas de la Formación Volcánica, conglomerado que marca el nivel discordante con la Formación Volcánica. Hacia el área de la zona minera prácticamente desaparece el conglomerado basal, reposando la caliza y las areniscas calcáreas directamente sobre la Formación Volcánica. Las capas de areniscas calcáreas generalmente no exceden los 2.0 m de espesor y se presenta bien estratificadas, variando su granulometría de grano fino a grueso, donde en algunas se observan fragmentos de calizas nodulares, mientras los mantos de caliza puede desarrollar espesores hasta de 4.0 m. (ANEXO III. Fotos 4 y 5).

De acuerdo al estudio realizado en la mina La Calera por la firma Litektos S.A.S. (2012), la Formación Vijes puede ser dividido en 2 miembros: el primero (inferior), conformada por un “Segmento de Calizas Inferiores” de composición predominantemente calcárea, rica en restos fósiles; y la segunda, un “Segmento Terrígeno Superior” que cubre a la primera.

6.2.1 Miembro Inferior

El segmento de Calizas Inferiores lo dividen en cuatro conjuntos litológicos asociados composicional y facialmente para su descripción. Se les denomina de base a tope “Litoarenitas basales”, “Bioesparitas impuras”, “Bioesparitas puras de algas” y Bioesparitas muy impuras de foraminíferos y bivalvos.

El conjunto equivalente a las Litoarenitas Basales se compone de forma predominante por material lítico proveniente del basamento volcánico, registrando el evento transgresivo basal de la Formación Vijes, conteniendo litoarenitas conglomeráticas polimícticas de regular selección en matriz-soportadas con fragmentos subredondeados de basaltos e intraclastos de las mismas litoarenitas. La matriz es de grano fino a medio, de coloración rojiza o verde oscuro y raramente grisácea. En algunos casos las litoarenitas son fosilíferas con materia orgánica generalmente carbonizada. El espesor del conjunto oscila entre 3.0 y 4.0 m.

El conjunto de Bioesparitas Impuras lo consideran como transicional entre las Litoarenitas Basales y las Bioesparitas Puras. Se compone de esparitas que envuelven esporádicos líticos volcánicos tamaño arenita fina a muy fina y muy esporádicos guijos. En el registro fósil distinguen fragmentos de bivalvos, el desarrollo de algas y un bajo contenido de foraminíferos. Los cristales de carbonato que cementan los líticos se ven oscurecidos por un contenido importante de materia orgánica. El conjunto es homogéneo, con venillas de carbonato y posee un espesor perforado que varía entre 7.0 y 30.0 m, con una media que en espesor corregido se ubica en el rango de los 10.0 m.

El conjunto Bioesparitas Puras de Algas Rojas se compone de múltiples cristales de esparitas en capas potentes muy gruesas que embeben rodales de algas rojas de tamaños milimétricos a centimétricos (hasta 12.0 cm). Se distinguen niveles esporádicos de micritas con acumulaciones de materia orgánica, en capas delgadas que generalmente no sobrepasan los 10.0 cm. La presencia de estas algas y su grado de conservación, junto con la alta concentración de carbonato hablan de un periodo de tiempo en el que la cuenca, que no superaba los 80.0 m de profundidad, se estabiliza y no recibe aportes líticos, permitiéndola tener aguas salobres y tranquilas en una zona restringida que propicio la acumulación del carbonato. En general capas muy gruesas planares, plano-paralelos y tabulares, con adelgazamiento a los bordes, con un espesor corregido que puede variar desde 15.0 a 30.0 m.

El conjunto más superior denominado Bioesparitas Muy Impuras de Foraminíferos, consiste en un paquete grueso de bioesparitas con abundantes líticos de cuarzo y volcánicos cementados en cristales de esparitas inequigranulares de coloración gris-verdosa oscura, con moteados de materia orgánica y restos vegetales carbonizados. En afloramiento, estas capas poseen comportamiento tabular plano-paralelo y ligeramente ondulado y además abundantes foraminíferos y como minerales accesorios glauconita. El espesor de esta capa en perforación alcanza los 30.0 metros, y en espesor corregido (real) puede variar entre los 5.0 y los 18.0 m.

Este miembro inferior se ha interpretado como una transgresión marina (Litektos, 2012).

6.2.2 Miembro Superior

El Segmento Terrígeno Superior yace de manera concordante y en contacto transicional sobre el anterior conjunto superior de Bioesparitas muy Impuras de Foraminíferos. Se compone de limolitas y litoarenitas negras y gris oscura con un alto contenido de materia orgánica y esporádicos fragmentos de bivalvos, gastrópodos, fragmentos de algas y glauconita. Estos niveles se caracterizan por bajo contenido de carbonatos y una influencia de ambientes marinos neríticos. Posee estratificación en capas muy gruesas con laminaciones planares y plano-paralelas ligeramente onduladas, y tipo flaser con fuerte evidencia de bioturbación, en las que se destruye la estratificación. A la parte media y al tope aparecen eventuales capas de sublitoarenitas de color gris claro masivas y homogéneas con esporádicas láminas muy delgadas de materia orgánica. Estas arenitas son lavadas, maduras y muy bien seleccionadas, con grano fino a medio y se relaciona a ambientes de playas. Al tope, estas arenitas gradan a limolitas con coloración amarilla, marcando así el techo de la Formación Vije; sin embargo, hay zonas donde, hacia el techo de este miembro superior, se observan gruesos paquetes de arcillas negras. Lo anterior diferencia se explicaría por la

transgresión en onlap sobre una paleotopografía heterogénea, con zona más profundas y otras más altas (Litektos, 2012). En su parte basal y media, existen concentraciones altas de niveles de glauconita característicos que suelen estar fosfatizados.

La edad de la Formación Vijes no está claramente establecida a pesar de su contenido fosilífero. Hubach y Alvarado (1934) consideran que su depositación ocurre en el Terciario Medio. Esta edad fue revisada por Hubach (1957), quien con base en la presencia de algunos especímenes de *Venericardia* postula una edad Eoceno Superior. Stutzer (1934) y Bürgl (1961) consideran que es del Oligoceno, mientras que Schwinn (1969) reporta una edad Miocena Inferior. Por último, Dueñas (2001) indica que el contacto entre la parte calcárea basal y la parte lítica superior, corresponde a una regresión marina del límite Eoceno Superior y Oligoceno Inferior.

6.3 DEPÓSITO ALUVIAL DEL VALLE DEL RÍO CAUCA (Qal)

Constituye el principal relleno Cuaternario del área donde se encuentra la mina La Calera, flanqueado por las cordilleras Oriental y Occidental. Está conformado por los aluviones del Río Cauca en una gran extensión de topografía plana. Litológicamente se encuentra constituido por capas lenticulares de gravas, arenas finas a gruesas con intercalaciones de arcillas, arcillas arenosas y limos.

Este depósito de ambiente fluvial, en general es amplio y profundo en su parte meridional, estrechándose y adelgazando su espesor a medida que avanza hacia el Norte, por lo cual se ha dividido en dos zonas con diferentes características litológicas. (Ingeominas, 1971). La primera, denominada Zona Sur, se extiende desde la población de Santander de Quilichao hasta el Río Sonso, donde el ancho es cercano a los 40 Km y el espesor fluctúa entre los 300 y los 500 m. La segunda, denominada Zona Norte, se extiende, desde el Río Sonso hasta la localidad de Andalucía, alcanzando un ancho de 10 Km y un espesor promedio de 150 m. En ambas zonas el depósito Cuaternario descansa sobre rocas Terciarias.

El área del presente estudio se ubica en el costado Nor-Oriental del Sector Norte, donde al acercarse al piedemonte de la Cordillera Occidental va reduciendo ostensiblemente su espesor hasta desaparecer, al menos en el piedemonte de la mina La Calera, donde sobre la caliza aparece un depósito fluvio-coluvial con matriz predominantemente arcillosa.

El Depósito Aluvial del Valle del Río Cauca en la Zona Norte, litológicamente se encuentra constituido hacia la base por capas gruesas de arenas de grano grueso a muy grueso y gravas finas a gruesas con delgadas intercalaciones de arcillas y arcillas arenosas, con un espesor que varía entre 100 y 200 m, acunándose hacia los bordes del valle. Hacia el techo se encuentra constituido por una secuencia de capas predominantemente limo-arcillosa interestratificadas con capas delgadas de gravas finas a gruesas representadas por fragmentos de basaltos, lilitas silíceas, pórfidos, esquistos y cuarzo en matriz arenosa. (Litetkos, 2012).

6.4 DEPÓSITO FLUVIO-COLUVIAL (Qfc)

Ocupa las vegas y márgenes de la Quebrada Mulaló, explayándose a la salida de la Cordillera Occidental sobre el Depósito Aluvial del Valle del Río Cauca, ocupando, en el área de la mina La Calera, buena parte del piedemonte de esta Cordillera, donde aparece depositado directamente sobre la Formación Vijes. Consiste en una interdigitación de depósitos fluviales provenientes del Río Cauca y de las Quebradas que descargan en éste (Mulaló y San Marcos), con sedimentos coluviales que se han depositado por acción de flujos torrenciales. Este depósito heterogéneo se ha acumulado en el piedemonte y sobre las Quebradas de Mulaló y San Marcos, en algunas zonas sobre el Miembro Superior de la Formación Vijes, y en otras directamente sobre su Miembro Inferior.

De acuerdo al registro litológico de pozos y piezómetros de monitoreo, en este lugar el mencionado Depósito Fluvio-Coluvial tiene un espesor aproximado de entre 60.0 m y 90.0 m, cubriendo un ancho de aproximadamente 800.0 m. (Litetkos, 2012). Este tipo de depósitos agrupa la sedimentación aluvial reciente y

actual, lo mismo que la generada por coluviones relacionados con las Quebradas Mulaló y San Marcos, y sus afluentes torrenciales. Está constituido por un suelo arcilloso de color negro de aproximadamente 4.0 m de espesor que cubre una secuencia de arenas arcillosas y arcillas arenosas o limosas de color café oscuro, intercaladas con algunas capas de gravas finas a medias con fragmentos de rocas volcánicas y calcáreas en matriz arcillosa color café oscuro. La diferenciación por el tamaño de los sedimentos que la conforman, hacen del Depósito Fluvio-Coluvial una unidad geológica muy heterogénea, donde los depósitos de gravas finas a medias no poseen continuidad lateral. (ANEXO III. Foto 6).

7. GEOMORFOLOGIA

Los alrededores del área de estudio donde se localizan los pozos de bombeo en la mina la Calera, se encuentra asociada a la vertiente Oriental de la Cordillera Occidental, en la Sub-Cuenca Alta y Media del Río Mulaló, afluente de la margen derecha del Río Cauca. Geomorfológicamente está enmarcada por vertientes altas, colinas largas de topes agudos y depósitos fluvio-coluviales y fluviales que suavizan el paisaje.

La citada área se puede dividir en tres unidades geomorfológicas mayores, identificadas de más antigua a joven como Paisaje de Montaña Alta a Escarpada, Paisaje de Colina Montañosa Denudativa y Paisaje de Terrenos Ondulados y Planos.

El Paisaje de Montaña Alta a Escarpada tiene un origen estructural y corresponde a alturas definidas entre los 700 y los 1550 m.s.n.m; cuyas vertientes muestran inclinaciones superiores a los 45° y los sectores escarpados mayores de 60°, conformada por rocas volcánicas de fondo marino representadas por diabasas y basaltos verdosos y oscuros, duros y competentes, que originan un relieve montañoso escarpado a muy escarpado. En éste paisaje son comunes los procesos morfológicos originados por la meteorización de rocas y suelos, la remoción en masa, la erosión fluvial y la erosión antrópica.

En la media pendiente de la Cordillera Occidental, aparece el Paisaje de Colina Montañosa Denudativa, ubicado entre los 700 y los 1000 m.s.n.m, conformado por un antiguo Atolón adosado a la Cordillera, representado por cerros alargados, cuchillas y escarpes de rocas calizas fracturadas debido a esfuerzos tectónicos tanto comprensivos como distensivos. Presenta cauces de quebradas con cortes de disección y con erosión de origen torrencial, donde en algunas zonas la presencia de las lomas onduladas modifica la velocidad de las quebradas y la erosión en unas zonas, haciendo que aparentemente se observe una menor profundidad y amplitud de los valles. Las morfologías con pendientes entre los 30°

y 45° caracterizan a ésta unidad, mostrando el terreno laderas tendidas y lomas agudas con vertientes que drenan hacia el Río Cauca.

El Paisaje de Terrenos Planos y Ondulados se define entre los 500 y 1000 m.s.n.m., y agrupa las vertientes con pendientes hasta de 10° que drenan hacia el Río Mulaló y pendientes menores de 5° que drenan hacia el Río Cauca. Desarrolla zonas anchas y alargadas que se localizan a partir del piedemonte, generando geoformas constituidas por depósitos fluvio-coluviales producto de la erosión del saprolito de las rocas volcánicas y de la meteorización de la caliza. Muy posiblemente este paisaje se encuentra interdigitado con el generado por el gran depósito fluvial asociado al Río Cauca.

Los procesos morfodinámicos que predominan en el área relacionada con la mina La Calera, a los cuales se debe la transformación del relieve, corresponden a aquellos elementos que pueden desprender, transportar y depositar los productos de la meteorización-erosión y de la sedimentación, en particular sobre las laderas con ángulos de inclinación altos y longitudes mayores de 100 m conformadas por rocas volcánicas fracturadas y saprolitizadas. Dentro de estos procesos se pueden destacar las aguas lluvias y de escorrentía, la actividad antrópica y la dinámica, en éste caso del Río Mulaló y sus quebradas afluentes. La acción del mencionado río ha definido los procesos de degradación y agradación observados en el área, dando como resultado la morfología actual.

Los mencionados pozos se encuentran ubicados sobre la Unidad de Terrenos Planos y Ondulados, especialmente en la geoforma desarrollada en el piedemonte constituida por depósitos fluvio-coluviales asociados al Río Mulaló, caracterizada por contener una baja a media cobertura vegetal protectora. (ANEXO III. Foto No. 2).

8. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

La geología estructural regional de la zona de estudio ha sido definida por diversos autores, y resumida en los informes de CVC - Ingeominas (1970, 1971) y por Ingeominas (2001). Así, la superposición de las fases de deformación permiten identificar, en la zona de estudio, 2 sistemas de fallas regionales: uno con dirección de fallamiento N20-30E, y otro con una dirección de fallamiento N40-50W (Nivia et al., 1997). La interacción de los sistemas estructurales, aunque en ciertas zonas permite observar fallas normales e inversas de alto ángulo, siguen un patrón general caracterizado por desplazamientos laterales a gran escala, lo que resulta en un sistema estructural de deslizamientos de rumbo (Aspden, 1984; Ingeominas, 2001).

En el área de estudio, el principal exponente del sistema estructural de dirección N20-30E (el más antiguo de esta región de Colombia) es la Falla Cali-Patía, aunque también se incluyen en éste todas las fallas menores paralelas a dicha falla (por ejemplo, la Falla del Piedemonte). La Falla Cali-Patía, definida geofísicamente en la mayor parte de su longitud (Bermudez et al., 1985), representa el límite oriental del Cretácico superior en la Cordillera Occidental, y el límite Occidental del valle aluvial del Río Cauca (Ingeominas, 2001). Este sistema de fallas ha sufrido cambios en la evolución tectónica de Colombia, dando origen a fallas normales e inversas con vergencias tanto hacia el oriente como al occidente; además, se ha reportado que estas fallas se han comportando como transcurrentes, con movimientos horizontales de deslizamiento de rumbo de gran escala (McCourt, 1984; Aspden, 1984). Localmente, la Falla Cali-Patía experimentó movimiento sinistral durante la orogenia andina (Ingeominas, 2001).

Respecto al sistema estructural de fallas de dirección N40-50W, en la zona de estudio se observan la Falla Mulaló y la Falla San Marcos, las cuales determinan la dirección de sus quebradas homónimas. En particular, la Falla de Mulaló fue reportada por McCourt et al. (1985), agregando que esta falla controla el afloramiento de la Formación Vijes. Aún cuando se cree que estas estructuras

poseen actividad reciente, no hay ninguna evidencia reportada de aquello, por lo que se asume que sólo afectan hasta las rocas Terciarias.

De forma muy generalizada, el estilo estructural de la zona de la Mina La Calera está dominado por estructuras de primer orden que definen un flanco plegado al margen oriental de la Cordillera Occidental. Este flanco posee inclinaciones desde 45° al sur de la mina, hasta inclinaciones sub-verticales hacia el norte de ésta, y están interrumpidos por fallas normales de alto ángulo que poseen extensiones hasta de 1 km. (Litetktos, 2012).

9. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-20 en la Mina la Calera.

Se analizan y se describen los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo a caudal constante, recuperación y escalonada en un pozo construido en el área de influencia directa en la mina la Calera, para monitorear y conocer la magnitud de agua subterránea en rocas fracturadas del acuífero calizas de Vijas, cubierto por un depósito cuaternario fluvio coluvial asociado a la quebrada Mulalo. El pozo identificado con la sigla P-20, ubicado hacia el sector norte de la mina a 230 m del pozo P-22 y 565 m del P-23. Este citado pozo es construido a una profundidad de 175.0 m revestido con tubería ciega y filtros PVC, RDE-21 de 8.0 pulg de diámetro, con siete (7) tramos filtrantes situados entre los 63.0 y los 166.0 m, con una longitud total de 54.0 m. Para la ejecución de las pruebas de bombeo se instala una electro-bomba sumergible con motor Franklin de 15 H.P y Tensión de 200 Voltios, a una profundidad de 75.0 m, empleando tubería de descarga en acero al carbón de 3½ pulg de diámetro. El registro físico y el diseño del pozo se muestran en el ANEXO IV.

En el pozo se realizan pruebas a caudal constante con su respectiva recuperación y pruebas escalonadas, las cuales se interpretarán, mediante el empleo del programa AquiferTest v. 1.1 (2011) de Waterloo Hydrogeologic, Inc, como un medio homogéneo e isotrópico como se justifica inicialmente, en el desarrollo de la presente práctica empresarial. La prueba a caudal constante y recuperación se explican por los métodos de Walton y Theis Recovery, respectivamente, mientras que la escalonada se interpreta por el método de Hantush-Bierschenk. Para el cálculo del Radio de Influencia del pozo se emplea el programa Molano (2010).

Teniendo en cuenta que no existen metodologías ni reglas específicas disponibles para seleccionar el mejor método de análisis de una prueba de bombeo, en especial cuando no se dispone de pozos de observación, se utiliza un procedimiento generalizado empleando toda la información disponible.

Considerando la no existencia de pozos de observación, se calcula la distancia a un pozo de observación hipotético con base en la longitud total del tramo de filtros, el radio interno del pozo y una constante que varía entre 0.7 y 1.2 (Tabla 4), la cual depende de la magnitud del caudal de bombeado y/o del valor de la Transmisividad regional del sistema acuífero captado, tomando los abatimientos en el pozo de bombeo. Dicho radio se calcula con la siguiente ecuación:

$R_i = \text{radio revestimiento del pozo} * \text{longitud total tramos de rejillas} * K$, esta constante K varia segun la siguiente tabla:

Tabla 4. Relación caudal de bombeo con la constante K.

CAUDAL DE BOMBEO	CONSTANTE K
< 10 l/seg	0.7
10-20 l/ seg	0.8
20-30 l/seg	0.9
30-50 l/seg	1
> 50 l/ seg	1.2

Fuente: Programa computacional, Molano, 2010.

Los datos y los resultados gráficos de la interpretación de las pruebas se presentan en el ANEXO I.

9.1.1 Prueba a Caudal Constante

Se realiza con un caudal constante de 5.30 l/s (457.9 m³/día), bombeando durante un tiempo de 1440 minutos (24 horas). Se inicia a partir de un nivel estático de 13.86 m, alcanzando el nivel dinámico o nivel de bombeo, al final de la prueba, los 68.77 m de profundidad, para un abatimiento de 54.91 m. El espesor saturado de

la unidad hidrogeológica captada se estima en 160.0 m de espesor. De acuerdo al diseño del pozo, la unidad captada corresponde al Acuífero Calizas de Vijes, que se encuentra a partir de los 67.0 m de profundidad al estar cubierta por el Acuitardo Depósito Coluvial.

Teniendo en cuenta el efecto de goteo que origina el mencionado Acuitardo cuando el nivel dinámico desciende por debajo del contacto con la caliza, la prueba a caudal constante se interpreta mediante el método de Walton, al comportarse el acuífero calcáreo como semiconfinado. De esta manera se obtiene para la Transmisividad un valor de 3.97 m²/día, un Coeficiente de Almacenamiento de 1.52 E-05 y una Conductividad Hidráulica de 0.0248 m/día.

Teniendo en cuenta tanto la configuración de la curva resultante de la prueba a caudal constante, donde a partir de los 12 minutos de bombeo el nivel dinámico se estabiliza cerca al contacto entre las dos citadas unidades, como también el valor obtenido para el Coeficiente de Almacenamiento del acuífero calcáreo, de 1.52E-05, se concluye que el Acuífero Calizas de Vijes captado por el pozo P-20, es de tipo confinado con efecto de goteo en su parte superior. La resistencia hidráulica vertical que presenta la secuencia semi-confinante superior (Acuitardo Depósito Coluvial) es alta, del orden de 51000 días ($c = 7.35 \text{ E}+7 \text{ min}$), indicando con ello que la granulometría es predominantemente fina, compuesta principalmente por limo-arenoso, limo-arcilloso y arcilla.

9.1.2 Prueba de Recuperación

Esta prueba se inicia a partir de un nivel dinámico de 68.77 m. de profundidad y tiene una duración de 210 minutos (0.14 días), alcanzando el nivel del agua recuperada los 14.66 m., equivalente a una recuperación del 98.5 %. La interpretación, empleando el método de Theis Recovery, calcula para la Transmisividad un valor de 19.80 m²/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.124m/día, valores que difieren un poco a los obtenidos en la prueba a caudal constante, debido al efecto causado, durante la recuperación, por el goteo

del acuitardo. Dentro del calculo para el factor de goteo de la secuencia semiconfinante correspondiente al deposito fluvio coluvial se tiene un valor de 194, expresada asi:

$$\sqrt{\frac{12 * 63}{0.02}} = 194$$

En la interpretación gráfica de la prueba se observa que la línea corta al vértice de los ejes X e Y, señalando con ello que el acuífero calcáreo alcanza a recuperar, en un corto tiempo, prácticamente la totalidad de su nivel estático inicial debido principalmente a la recarga producida por el Acuitardo Depósito Coluvial que tiene un espesor de 64.0 m.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuífero Calizas de Vijes, en alrededores del Pozo P-20, se calculan para la Transmisividad 12.0 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 1.52 E-05 y para la Conductividad Hidráulica 0.074 m/día.

9.1.3 Prueba Escalonada

Esta prueba se ejecuta a partir de un nivel estático de 14.66 m de profundidad, conformada por tres escalones de una hora de duración cada uno, bombeando un caudal de 1.61 l/s (139.6 m³/día) en el primer escalón, 3.01 l/s (260.0 m³/día) en el segundo y 6.01 l/s (519.2 m³/día) en el tercero.

Empleando el método Hantush-Bierschenk, se obtuvo para el Coeficiente de Pérdida de Pozo un valor de C= 3.67 E-05 días²/m⁵ y para el Coeficiente de Pérdida de Acuífero un valor de B= 0.0943 días/m⁵.

El valor del Coeficiente de Pérdida de Pozo (C= 3.67 E-05), indica que su desarrollo fue deficiente por falta de una mayor limpieza, labor que en rocas fracturadas comúnmente se torna difícil al avanzar lateralmente el lodo bentonítico

grandes distancias a través de las fracturas. Pozos bien desarrollados contienen un Coeficiente C con un orden de magnitud de 10^{-7} días²/m⁵. Es importante señalar en la interpretación de los registros físicos de pozo, a los 65.0 m de profundidad la caliza se encuentra fracturada, cubriendo un espesor aproximado de 35 m.

Un resumen de los tipos de pruebas realizadas e interpretadas y los valores de los principales parámetros hidráulicos obtenidos, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-20.

Prueba No.	Tipo de Prueba	Caudal (l/s)	Tiempo de Prueba (min.)	Método de Interpretación	T (m ² /día)	S	K. (m/día)	Coef Pérdida Acuífero (B) días/m ²	Coef. Pérdida Pozo (C) días ² /m ⁵
1	Caudal Constante	5.30	1440	Walton	3.97	1.52 E-05	0.0248	-	-
2	Recuperación	5.30	210	Theis Recovery	19.80	-	0.124	-	-
3	Escalonada	1.61 – 3.01 – 6.01	180	Hantush-Bierschenk	-	-	-	0.0943	3.67 E-05

Las ecuaciones de comportamiento del pozo se obtienen considerando los parámetros hidráulicos promedios, calculados a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo. Estas ecuaciones son: de producción, capacidad específica y de eficiencia.

9.1.4 Capacidad de Producción del Pozo P-20

La ecuación de producción del pozo se obtiene a partir de la resolución de la ecuación:

$$ND = NE + BQ + CQ^2$$

Es decir :

$$ND = NE + (2.3Q/4 \sqrt{T}) \log (2.25Tt/r^2S) + CQ^2$$

Donde:

ND = Nivel dinámico, (m)

NE = Nivel estático, (m)

Q = Caudal de bombeo l/s (m³/día)

T = Transmisividad, (m²/día)

t = Tiempo de bombeo, (día)

R = Radio del pozo, (m)

S = Coeficiente de almacenamiento

C = Pérdidas por construcción del pozo, (días²/m⁵)

Los datos que se toman para resolver la ecuación de Capacidad de Producción son los siguientes:

Profundidad del pozo = 175.0 m.

Diámetro = 8.0 pulgadas

Nivel Estático (NE) = 13.86 m

Caudal de la Prueba (Q) = 5.30 l/s (457.9.6 m³/día)

Transmisividad Promedio (T)	= 12.0 m ² /día
Coeficiente Almacenamiento (S)	= 1.52 E-05
Coeficiente Pérdida Pozo (C)	= 3.67 E-05 días ² /m ⁵

La ecuación para el cálculo de la Capacidad de Producción del pozo es la siguiente: (Fuente: Programa computacional Molano, 2010).

$$ND = 13.86 \text{ m} + 1.318 \times Q (4.88 + \log t) + 0.739 \times Q^2$$

Resolviendo la anterior ecuación para diferentes caudales y tiempos de bombeo, se obtiene la Capacidad de Producción del pozo y sus resultados se presentan en la Tabla 6, donde se observa que para un caudal específico de bombeo, el nivel dinámico desciende paulatinamente en la medida que aumenta el tiempo de bombeo, como respuesta al goteo vertical existente. Por otra parte, el nivel dinámico desciende rápidamente al aumentar el caudal, como respuesta a los bajos valores de los principales parámetros hidráulicos de la caliza fracturada.

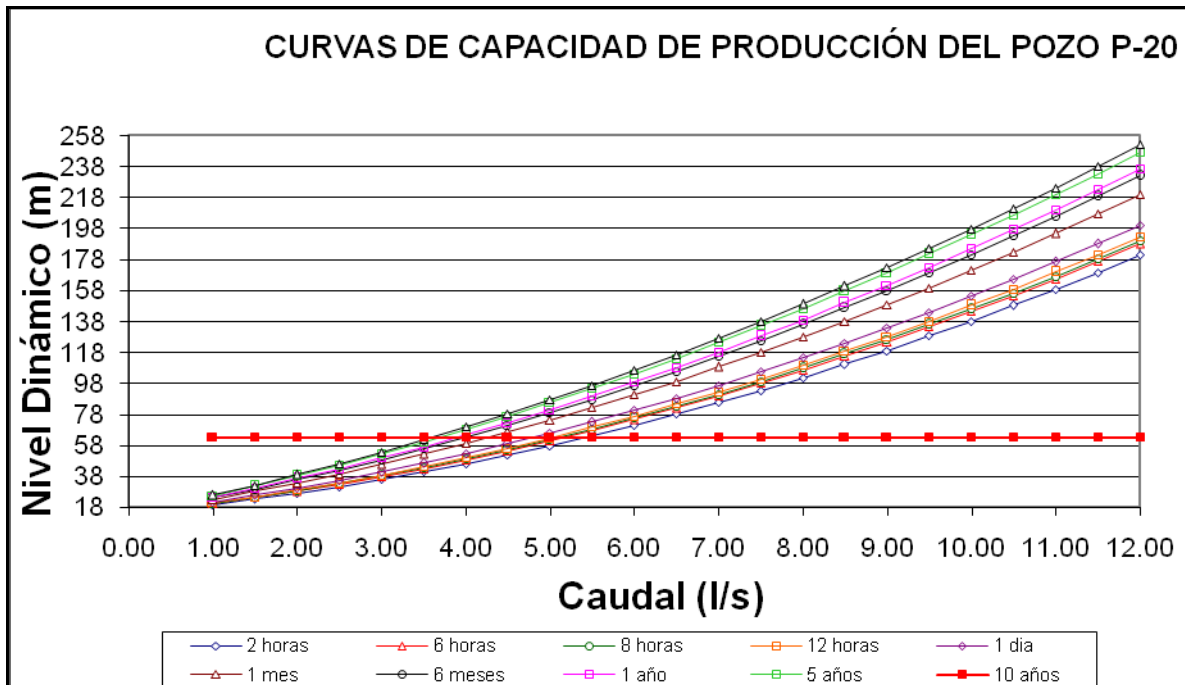
Tabla 6. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-20.

Q(l/s)	ND 2 horas	ND 6 horas	ND 8 horas	ND 12 horas	ND 1 día	ND 1 mes	ND 6 meses	ND 1 año	ND 5 años	ND 10 años	Prof Techo 1º Filtro
1.00	19.61	20.24	20.40	20.64	21.27	22.98	24.00	24.41	25.33	25.73	63.00
1.50	23.04	23.98	24.22	24.58	25.52	28.09	29.63	30.24	31.62	32.22	63.00
2.00	26.84	28.10	28.42	28.89	30.15	33.58	35.63	36.44	38.28	39.07	63.00
2.50	31.00	32.58	32.98	33.57	35.15	39.43	42.00	43.01	45.31	46.30	63.00
3.00	35.54	37.44	37.91	38.63	40.51	45.66	48.73	49.95	52.71	53.90	63.00
3.50	40.45	42.66	43.22	44.05	46.25	52.25	55.84	57.25	60.48	61.87	63.00
4.00	45.73	48.25	48.89	49.84	52.35	59.21	63.31	64.93	68.62	70.20	63.00
4.50	51.38	54.22	54.93	56.00	58.83	66.55	71.16	72.98	77.13	78.91	63.00
5.00	57.39	60.55	61.34	62.53	65.68	74.25	79.38	81.40	86.00	87.99	63.00
5.50	63.78	67.25	68.13	69.43	72.89	82.32	87.96	90.19	95.25	97.44	63.00
6.00	70.54	74.32	75.28	76.70	80.48	90.76	96.92	99.34	104.87	107.25	63.00
6.50	77.67	81.77	82.80	84.35	88.43	99.58	106.24	108.87	114.86	117.44	63.00
7.00	85.16	89.58	90.69	92.36	96.76	108.76	115.94	118.77	125.22	127.99	63.00
7.50	93.03	97.76	98.95	100.74	105.45	118.31	126.00	129.04	135.94	138.92	63.00
8.00	101.26	106.31	107.58	109.49	114.52	128.23	136.44	139.67	147.04	150.22	63.00
8.90	117.02	122.64	124.05	126.17	131.76	147.02	156.15	159.75	167.95	171.48	63.00
9.00	118.85	124.53	125.96	128.10	133.75	149.19	158.41	162.06	170.35	173.92	63.00
9.50	128.19	134.19	135.70	137.96	143.93	160.22	169.96	173.80	182.55	186.32	63.00
10.00	137.91	144.22	145.81	148.18	154.47	171.62	181.87	185.92	195.13	199.10	63.00
10.50	147.99	154.62	156.29	158.78	165.39	183.39	194.16	198.40	208.07	212.24	63.00
11.00	158.45	165.39	167.14	169.75	176.67	195.53	206.81	211.26	221.39	225.75	63.00
11.50	169.27	176.53	178.36	181.09	188.32	208.04	219.83	224.48	235.08	239.64	63.00
12.00	180.47	188.04	189.95	192.80	200.34	220.92	233.22	238.08	249.13	253.89	63.00

En la Figura 17 se presenta las curvas producto de la resolución de la anterior ecuación, donde se observa que para caudales mayores de 5.30 l/s y tiempos de bombeo propuestos, el nivel dinámico desciende por debajo del techo del primer filtro o filtro superior que se encuentra a los 63.0 m de profundidad. Por consiguiente para drenar el Acuífero Calizas de Vijes que se halla entre los 63.0 y los 102.0 m de profundidad, el pozo puede ser bombeado a 8.0 l/s con tiempos de operación de 24 horas/día, alcanzando el nivel dinámico los 114.0 m de profundidad.

El bajo grado de inclinación de las curvas refleja la combinación causada por el goteo vertical proveniente de la secuencia semi-confinante superior, conformada por el Depósito Coluvial.

Figura 17. Curvas de capacidad de Produccion del Pozo P-20.



9.1.5 Capacidad Específica del Pozo P-20

La capacidad específica expresada en l/s/m, se define como la producción del pozo por unidad de abatimiento (Q/s) de la ecuación de producción.

$$Q/s = 1/(B+CQ^n)$$

La capacidad específica se obtiene mediante la resolución de la siguiente ecuación: (Fuente: Molano, 2010).

$$Q/s = 1 / 1.318 (4.88 + \log t) + (0.739 \times Q)$$

Los valores obtenidos de la resolución de esta ecuación se muestran en la Tabla 7, donde se obtiene el caudal generado por metro de descenso. En la citada Tabla

se muestra la baja capacidad específica del Sistema Acuífero captado en alrededores de mencionado pozo, donde para el caudal máximo de explotación calculado (8.0 l/s) con 24 horas/día de bombeo, la capacidad específica es de 0.08 l/s/m.

Las curvas resultantes (Figura 18) presentan un moderado grado de inclinación, indicando con ello que el flujo del agua subterránea desde las capas acuíferas, pasando por el empaque de gravas hacia los filtros, es turbulento y no lineal. Esto generalmente ocurre cuando el agua no transita libremente a través del empaque de grava debido posiblemente a la obstrucción generada por lodo bentonítico como respuesta a la falta de una mayor limpieza y desarrollo del pozo.

Figura 18. Curvas de capacidad específica del Pozo P-20.

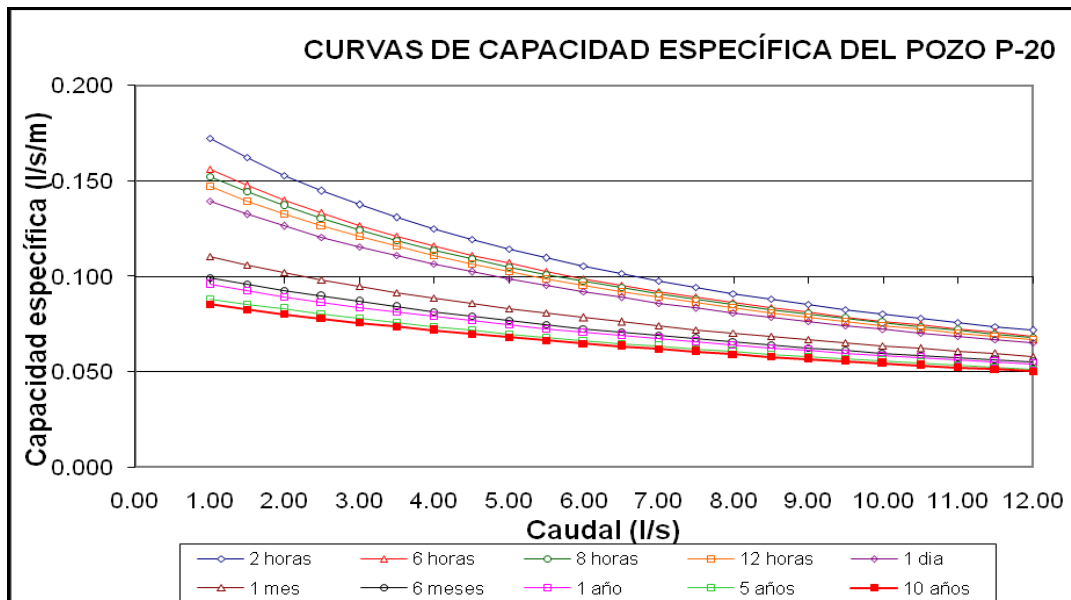


Tabla 7. Resolución de la ecuación de Capacidad Especifica del pozo P-20

Q(l/s)	l/s/m 2 horas	l/s/m 6 horas	l/s/m 8 horas	l/s/m 12 horas	l/s/m 1 día	l/s/m 1 mes	l/s/m 6 meses	l/s/m 1 año	l/s/m 5 años	l/s/m 10 años
1.00	0.1740	0.1568	0.1529	0.1476	0.1394	0.1097	0.0986	0.0948	0.0872	0.0843
1.50	0.1634	0.1482	0.1448	0.1399	0.1326	0.1054	0.0951	0.0916	0.0845	0.0817
2.00	0.1541	0.1405	0.1374	0.1331	0.1264	0.1014	0.0919	0.0886	0.0819	0.0793
2.50	0.1458	0.1335	0.1308	0.1268	0.1207	0.0978	0.0889	0.0858	0.0795	0.0771
3.00	0.1384	0.1272	0.1247	0.1211	0.1156	0.0944	0.0860	0.0831	0.0772	0.0749
3.50	0.1316	0.1215	0.1192	0.1159	0.1108	0.0912	0.0834	0.0807	0.0751	0.0729
4.00	0.1255	0.1163	0.1142	0.1112	0.1065	0.0882	0.0809	0.0783	0.0730	0.0710
4.50	0.1199	0.1115	0.1096	0.1068	0.1024	0.0854	0.0785	0.0761	0.0711	0.0692
5.00	0.1149	0.1071	0.1053	0.1027	0.0987	0.0828	0.0763	0.0740	0.0693	0.0675
5.50	0.1102	0.1030	0.1014	0.0990	0.0952	0.0803	0.0742	0.0721	0.0676	0.0658
6.00	0.1059	0.0992	0.0977	0.0955	0.0920	0.0780	0.0722	0.0702	0.0659	0.0642
6.50	0.1019	0.0957	0.0943	0.0922	0.0890	0.0758	0.0704	0.0684	0.0644	0.0628
7.00	0.0982	0.0924	0.0911	0.0892	0.0861	0.0738	0.0686	0.0667	0.0629	0.0613
7.50	0.0947	0.0894	0.0881	0.0863	0.0835	0.0718	0.0669	0.0651	0.0614	0.0600
8.00	0.0915	0.0865	0.0854	0.0837	0.0810	0.0699	0.0653	0.0636	0.0601	0.0587
8.50	0.0885	0.0838	0.0827	0.0811	0.0786	0.0682	0.0637	0.0621	0.0588	0.0574
9.00	0.0857	0.0813	0.0803	0.0788	0.0764	0.0665	0.0623	0.0607	0.0575	0.0562
9.50	0.0831	0.0790	0.0780	0.0766	0.0743	0.0649	0.0609	0.0594	0.0563	0.0551
10.00	0.0806	0.0767	0.0758	0.0744	0.0723	0.0634	0.0595	0.0581	0.0552	0.0540
10.50	0.0783	0.0746	0.0737	0.0725	0.0704	0.0619	0.0582	0.0569	0.0541	0.0529
11.00	0.0761	0.0726	0.0718	0.0706	0.0686	0.0605	0.0570	0.0557	0.0530	0.0519
11.50	0.0740	0.0707	0.0699	0.0688	0.0669	0.0592	0.0558	0.0546	0.0520	0.0509
12.00	0.0720	0.0689	0.0681	0.0671	0.0653	0.0580	0.0547	0.0535	0.0510	0.0500

9.1.6 Eficiencia del Pozo P-20

La eficiencia del pozo (n %) se define mediante los siguientes parámetros:

s1= Abatimiento Teórico (m)

s2= Abatimiento real (m)

s1= $BQ = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S)$

s2= $BQ + CQ2 = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S) + CQ2$

Se calcula mediante la relación: (Fuente, Custodio y Llamas)

$$n \% = s1/s2$$

La eficiencia del pozo en mención se determina desarrollando la ecuación: (Fuente: Programa computacional Molano, 2010).

$$n \% = 1.318 \times (4.88 + \log t) / 1.318 (4.88 + \log t) + 0.739 \times Q$$

En la Tabla 8 se presenta los valores de la eficiencia (%) para diferentes caudales y tiempo de explotación.

Considerando que la eficiencia de un pozo es el reflejo de la relación existente entre el tamaño de la ranura de los filtros, el tamaño de la granulometría del empaque de grava y el tamaño de la granulometría de las capas acuíferas captadas, en la citada Tabla se observa que para un caudal máximo de 6.0 l/s con muy largos tiempo de bombeo, el pozo alcanza su mínimo valor de eficiencia permisible, correspondiente al 70%. Para mayores caudales la eficiencia es muy baja debido a los problemas de obstrucción planteados en las fracturas de la caliza.

En la Figura 19 se muestra las curvas de eficiencia obtenidas para los diferentes caudales y tiempo de explotación, las cuales se caracterizan por su alto grado de inclinación. Esta situación también refleja la obstrucción de las fracturas en la

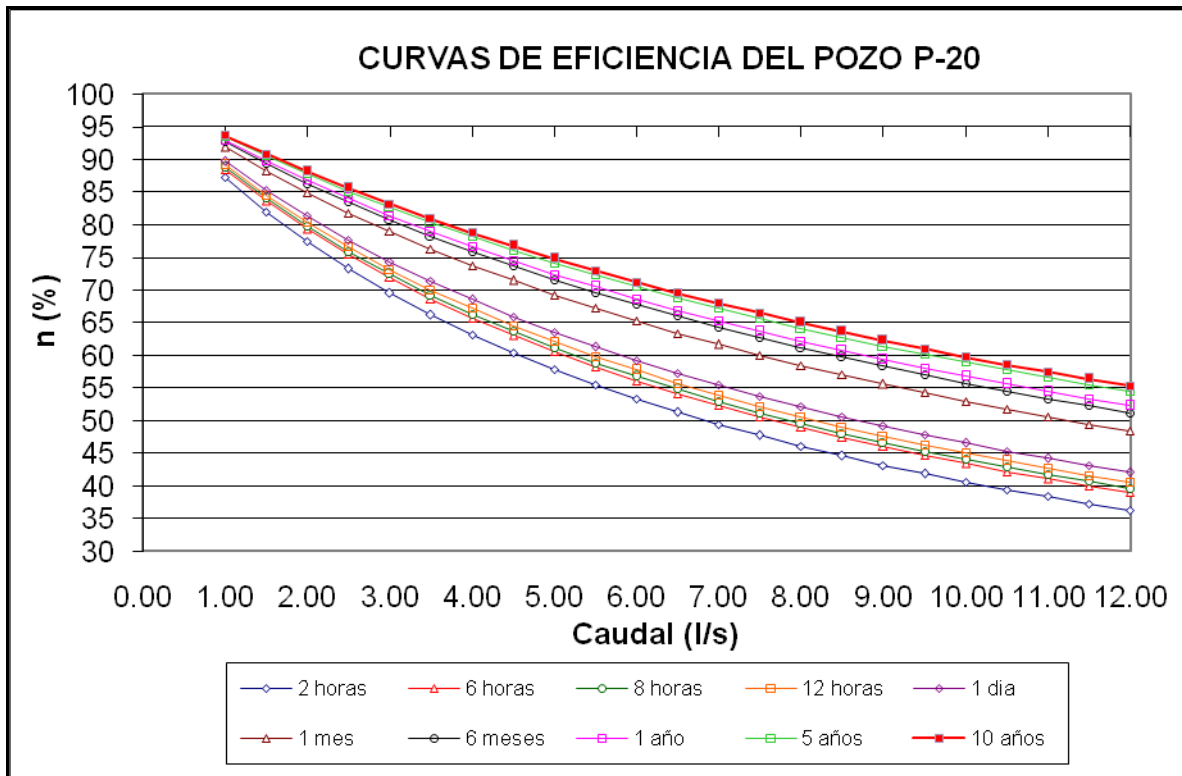
caliza por falta de mayor desarrollo, lo cual puede lograrse mediante un bombeo continuo de largo tiempo de duración.

Como el objetivo del pozo es conocer la capacidad de almacenamiento del Acuífero Calizas de Vijes, el pozo P-20 puede bombearse con el caudal máximo propuesto de 8.0 l/s en forma continua con el fin de lograr descender en alrededores del pozo el nivel dinámico del agua por debajo de la zona de calizas fracturadas, es decir, por debajo de los 102.0 m de profundidad que es donde la caliza tiene su mayor almacenamiento de agua.

Tabla 8. Resolución de la ecuación de eficiencia del pozo P-20.

Q(l/s)	% 2 horas	% 6 horas	% 8 horas	% 12 horas	% 1 día	% 1 mes	% 6 meses	% 1 año	% 5 años	% 10 años
1.00	87.13	88.41	88.69	89.09	89.69	91.89	92.71	92.99	93.55	93.77
1.50	81.87	83.56	83.94	84.48	85.29	88.31	89.45	89.84	90.63	90.93
2.00	77.20	79.22	79.68	80.32	81.31	85.00	86.41	86.90	87.89	88.27
2.50	73.04	75.31	75.82	76.55	77.68	81.92	83.57	84.14	85.30	85.75
3.00	69.30	71.77	72.33	73.12	74.36	79.07	80.91	81.55	82.87	83.38
3.50	65.93	68.54	69.14	69.99	71.31	76.40	78.42	79.12	80.57	81.13
4.00	62.87	65.59	66.22	67.11	68.50	73.91	76.07	76.83	78.39	79.00
4.50	60.08	62.89	63.54	64.46	65.91	71.57	73.86	74.67	76.33	76.98
5.00	57.53	60.40	61.06	62.01	63.50	69.38	71.78	72.62	74.37	75.06
5.50	55.19	58.10	58.77	59.74	61.26	67.32	69.81	70.69	72.51	73.23
6.00	53.02	55.97	56.65	57.63	59.18	65.38	67.94	68.85	70.75	71.49
6.50	51.03	53.99	54.67	55.67	57.23	63.55	66.18	67.11	69.06	69.83
7.00	49.17	52.14	52.83	53.83	55.41	61.81	64.50	65.46	67.46	68.25
7.50	47.45	50.42	51.11	52.11	53.70	60.17	62.90	63.88	65.92	66.73
8.00	45.85	48.80	49.50	50.50	52.09	58.62	61.38	62.38	64.46	65.29
8.50	44.35	47.29	47.98	48.99	50.58	57.14	59.94	60.95	63.06	63.90
9.00	42.94	45.87	46.56	47.56	49.15	55.73	58.56	59.58	61.72	62.57
9.50	41.62	44.53	45.22	46.21	47.80	54.39	57.24	58.27	60.43	61.30
10.00	40.38	43.27	43.95	44.94	46.52	53.12	55.98	57.02	59.20	60.07
10.50	39.21	42.07	42.75	43.74	45.31	51.90	54.77	55.82	58.02	58.90
11.00	38.11	40.94	41.62	42.60	44.16	50.74	53.62	54.67	56.88	57.77
11.50	37.06	39.87	40.54	41.51	43.07	49.63	52.51	53.56	55.79	56.68

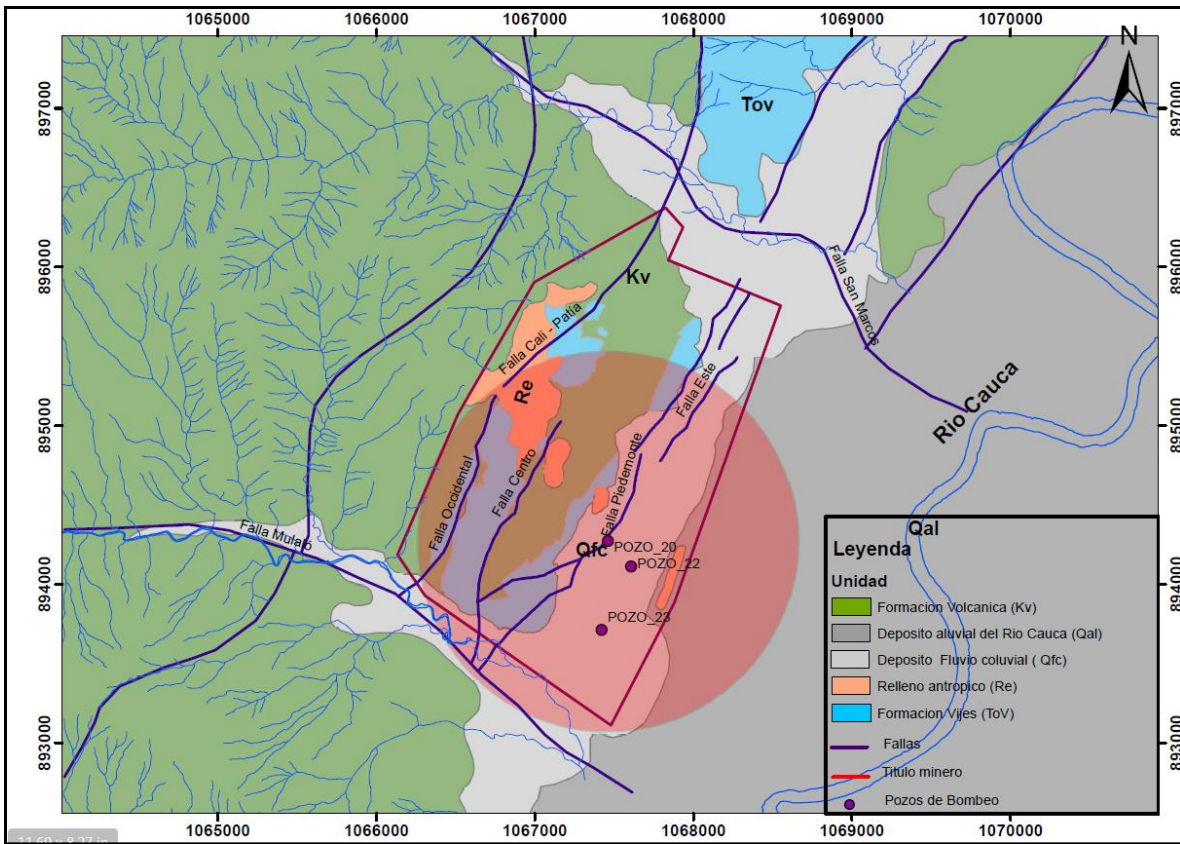
Figura 19. Curvas de Eficiencia del Pozo P20.



9.1.7 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P20

Con base en los promedios calculados de los parámetros hidráulicos, y considerando que en los alrededores del pozo el Acuífero Calizas de Vijos se comporta como homogéneo e isotrópico, el Radio de Influencia generado por el caudal de la prueba de bombeo (5.30 l/s) con tiempo de bombeo de 24 horas/día, alcanza una longitud cercana a los 1200 m, donde el máximo abatimiento cercano al pozo, en un diámetro de 300 m, varía desde 30.0 hasta 10.0 m de profundidad. (Figura 20). Este comportamiento es similar cuando el caudal aumenta a 8.0 l/s. Las gráficas correspondientes se presentan en el ANEXO I.

Figura 20. Radio de influencia generado por el pozo de bombeo P-20.



Fuente: El autor. Escala del mapa 1: 25.000

9.1.8 Explotación del Pozo P-20

Considerando que el pozo P-20 tiene un diámetro de 8.0 pulg y que los filtros se encuentran instalados en siete (7) tramos ubicados entre los 63.0 y los 166.0 m de profundidad, su explotación se puede efectuar con un caudal máximo de 8.0 l/s (691.2 m³/día) durante un tiempo de bombeo continuo (24 horas/día), alcanzando el nivel dinámico una profundidad de aproximadamente 130.0 m, por debajo de la zona donde la caliza contiene su mayor fracturamiento. En estas condiciones, el pozo trabaja con una capacidad específica de 0.06 l/s/m y una eficiencia del 60%, lográndose abatir el nivel del agua a la mayor profundidad posible.

9.2 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-22 en la Mina la Calera.

Se analiza y se muestra los resultados de la interpretación de pruebas a caudal constante y recuperación en un pozo de 4.0 pulg de diámetro identificado como P-22 La Calera, ubicado al Suroeste (SW) del pozo P-20 a una distancia de 230 m y 455 m del pozo P-23; con profundidad de 120.0 m. De acuerdo a la interpretación de su registro físico, en el pozo se instalan cuatro (4) tramos filtrantes, el primero y el segundo situados entre los 20.0 y los 32.0 m y entre los 64.0 y 70.0 m de profundidad, captan sedimentos de granulometría fina pertenecientes al Depósito Fluvio-Coluvial. El tercer tramo, situado desde 73.0 hasta 79.0 m, y el cuarto, ubicado entre los 103.0 y 112.0 m, captan limos arcillosos con clastos de gravas de calizas correspondientes al material meteorizado de la parte superior de la Formación Calizas de Vijes, denominado por ello como Acuífero de Vijes Superior. El registro físico y el diseño del pozo se muestran en el ANEXO IV.

Para la ejecución de las pruebas de bombeo se instala una electro-bomba sumergible con motor Franklin de 7.50 H.P a una profundidad de 82.0 m, empleando tubería de descarga en acero al carbón de 1½ pulg de diámetro.

En el mes de Diciembre de 2013 se ejecutan las pruebas a caudal constante y recuperación, interpretadas mediante el empleo del programa AquifertTest v.1.1 (2011) de Waterloo Hydrogeologic, Inc, como un medio homogéneo e isotrópico, según la justificación de la presente práctica. Las pruebas a caudal constante y recuperación se explican por los métodos de Walton y Theis Recovery, respectivamente. Para el cálculo del Radio de Influencia del pozo, se emplea el programa Molano (2010).

Considerando la no existencia de pozos de observación, las mencionadas pruebas se interpretan como en “pozo único”, calculando la distancia a un pozo de observación hipotético con base en la longitud total del tramo de filtros, el radio interno del pozo y una constante que varía entre 0.7 y 1.2, que depende de la

magnitud del caudal de bombeado y/o del valor de la Transmisividad regional del sistema acuífero captado, utilizando la misma metodología para el pozo P-20.

Los datos y los resultados gráficos de la interpretación de las pruebas se presentan en el ANEXO II. El registro físico del pozo se muestra en el ANEXO IV.

9.2.1 Prueba a Caudal Constante

Se realiza con un caudal de 5.50 l/s (475.2 m³/día), bombeando durante un tiempo de 720 minutos (0.50 día), a partir de un nivel estático de 14.63 m, alcanzando, al final de la misma, un nivel estático de 32.80 m. de profundidad, para un abatimiento de 18.17 m. El espesor saturado de la unidad hidrogeológica captada se estima en 33.0 m de espesor.

Esta prueba se interpreta mediante el método de Walton, teniendo en cuenta el efecto de goteo que se produce cuando el nivel dinámico desciende por debajo de la base del filtro superior (primer filtro) que capta el Acuitardo Fluvio-Coluvial. De esta manera se obtiene para la Transmisividad un valor de 19.1 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento de 3.72 E-05 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.058 m/día.

Teniendo en cuenta tanto la configuración de la curva resultante de la prueba a caudal constante, donde a partir de los 10 minutos de bombeo el nivel dinámico se estabiliza a los 32.0 m de profundidad (inmediatamente debajo del primer filtro), como también el valor obtenido para el Coeficiente de Almacenamiento de 3.72E-05, se concluye que el acuífero captado por el pozo P-22 La Calera, es de tipo confinado con efecto de goteo en su parte superior, situación similar a la del pozo P-20. La resistencia hidráulica vertical que presenta la secuencia semi-confinante superior (Acuitardo Depósito Fluvio-Coluvial) es alta, del orden de 1194 días ($c=1.69 \text{ E}+6 \text{ min}$), indicando con ello que su granulometría es fina, compuesta principalmente por limo-arenoso y limo-arcilloso.

9.2.2 Prueba de Recuperación

Esta prueba se inicia a partir de un nivel dinámico de 32.80 m. de profundidad y tiene una corta duración de 70 minutos (0.048 días), alcanzando el nivel del agua recuperada los 14.96 m., equivalente a una recuperación del 98%. La interpretación, empleando el método de Theis Recovery, determina para la Transmisividad un valor de 17.70 m²/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.535 m/día, valores muy análogos a los obtenidos en la prueba a caudal constante. Como resultado del factor de geoteo para la secuencia semiconfinante del deposito acuitardo Fluvio coluvial se obtiene un valor de 266, expresada así:

$$\sqrt{\frac{18 * 79}{0.024}} = 266$$

En la interpretación gráfica de esta prueba, se observa que la línea producto de su interpretación corta al eje Y muy cerca al vértice, señalando con ello que el acuífero captado conformado principalmente por la unidad Calizas de Vijes Superior, alcanza a recuperar en un corto tiempo, prácticamente la totalidad de su nivel estático inicial debido principalmente a la recarga producida por el Acuitardo Depósito Fluvio-Coluvial que le suprayace.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuífero Calizas de Vijes Superior en alrededores del Pozo P-22 La Calera, se calculan para la Transmisividad 18.0 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 3.72 E-05 y para la Conductividad Hidráulica 0.55 m/día.

En consideración a la no ejecución de pruebas escalonadas encaminadas a conocer los coeficientes de Pérdidas de Pozo (C) y de Pérdida de Acuífero (B), estos se calculan mediante el método teórico, empleando los valores correspondientes a los parámetros hidráulicos promedios y son:

$$C = 1.51 \text{ E-}06 \text{ dias}^2/\text{m}^5$$

$$B = 0.0375 \text{ días/m}^2$$

Estos valores indican que el pozo presenta cierto grado de obstrucción en sus filtros debido al alto contenido de granulometría fina presente en las diferentes capas captadas.

Un resumen de los tipos de pruebas realizadas e interpretadas y los valores de los principales parámetros hidráulicos obtenidos, se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-22 La Calera.

Prueba No.	Tipo de Prueba	Caudal (l/s)	Tiempo de Prueba (min.)	Método de Interpretación	T (m ² /día)	S	K. (m/día)	Coef Pérdida Acuífero (B) días/m ²	Coef. Pérdida Pozo (C) días ² /m ⁵
1	Caudal Constante	5.50	720	Walton	19.1	3.72 E-05	0.58	-	-
2	Recuperación	5.50	70	Theis Recovery	17.70	-	0.535	-	-
3	Teórica	---	720	Hantush-Bierschenk	---	---	.---	0.0375	1.51 E-06

Las ecuaciones de comportamiento del pozo son de producción, capacidad específica y de eficiencia y se obtienen considerando los parámetros hidráulicos promedios, calculados a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo.

9.2.3 Capacidad de Producción del Pozo P-22 La Calera.

La ecuación de producción del pozo se obtiene a partir de la resolución de la ecuación:

$$ND = NE + BQ + CQ^2$$

Es decir :

$$ND = NE + (2.3Q/4 \pi T) \log (2.25Tt/r^2S) + CQ^2$$

Donde:

ND = Nivel dinámico, (m)

NE = Nivel estático, (m)

Q = Caudal de bombeo l/s (m³/día)

T = Transmisividad, (m²/día)

t = Tiempo de bombeo, (día)

R = Radio del pozo, (m)

S = Coeficiente de almacenamiento

C = Pérdidas por construcción del pozo, (días²/m⁵)

Los datos que se toman para resolver la ecuación de Capacidad de Producción son los siguientes:

Profundidad del pozo	= 120.0 m.
Diámetro	= 4.0 pulgadas
Nivel Estático (NE)	= 14.63 m
Caudal de la Prueba (Q)	= 5.50 l/s (475.2 m ³ /día)
Transmisividad Promedio (T)	= 18.0 m ² /día
Coeficiente Almacenamiento (S)	= 3.72 E-05
Coeficiente Pérdida Pozo (C)	= 1.51 E-06 días ² /m ⁵

La ecuación para el cálculo de la Capacidad de Producción del pozo es la siguiente: (Fuente. Programa Molano, 2010).

$$ND = 14.63 \text{ m} + 0.586 \times Q (5.83 + \log t) + 0.0113 \times Q^2$$

Resolviendo la anterior ecuación para diferentes caudales y tiempos de bombeo, se obtiene la Capacidad de Producción del pozo y sus resultados se presentan en la Tabla 10, donde se observa que el máximo caudal de extracción posible del acuífero captado, es cercano a los 10.0 l/s, alcanzando el nivel dinámico los 70.0 m de profundidad. En la Tabla también se muestra que el nivel dinámico desciende paulatinamente en la medida que aumenta el tiempo y el caudal de bombeo, como respuesta al goteo vertical existente.

En la Figura 21 se presenta las curvas producto de la resolución de la anterior ecuación, caracterizadas por su bajo a moderado grado de inclinación, como respuesta al goteo proveniente del semi-confinamiento originado por la capa correspondiente al Acuitardo Fluvio-Coluvial, situada entre los 20.0 y los 79.0 m de profundidad.

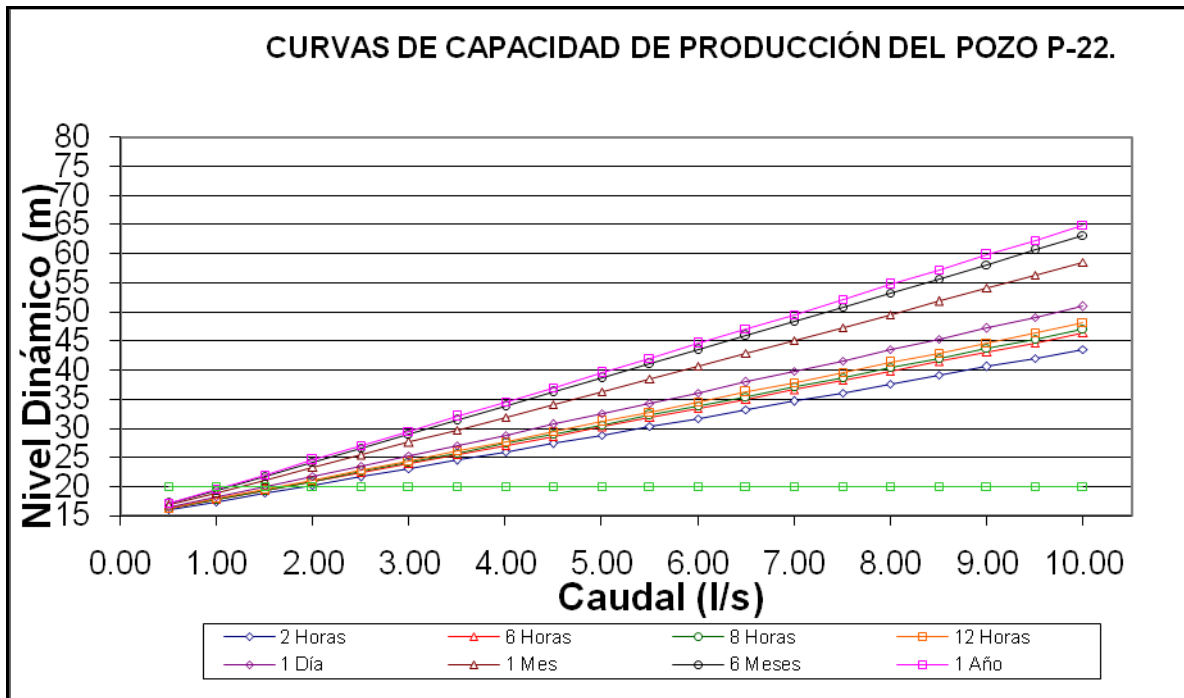
Lo anteriormente expuesto indica que el material meteorizado que ocurre en la parte superior de la Formación Calizas de Vijes, identificado en éste informe como

Acuíferos Calizas de Vijes Superior, contiene un importante almacenamiento de agua subterránea.

Tabla 10. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-22 La Calera.

Q(l/s)	ND 2 horas	ND 6 horas	ND 8 horas	ND 12 horas	ND 1 día	ND 1 mes	ND 6 meses	ND 1 año	ND 5 años	ND 10 años	Prof Techo 1º Filtro
0.50	16.02	16.16	16.20	16.25	16.39	16.77	17.00	17.09	17.29	17.38	20.00
1.00	17.42	17.70	17.77	17.88	18.16	18.92	19.38	19.56	19.97	20.14	20.00
1.50	18.83	19.25	19.35	19.51	19.93	21.07	21.76	22.03	22.64	22.91	20.00
2.00	20.24	20.80	20.94	21.15	21.71	23.23	24.15	24.50	25.32	25.68	20.00
2.50	21.65	22.35	22.53	22.80	23.49	25.40	26.54	26.99	28.01	28.45	20.00
3.00	23.07	23.92	24.13	24.45	25.28	27.57	28.94	29.48	30.70	31.23	20.00
3.50	24.50	25.48	25.73	26.10	27.08	29.75	31.34	31.97	33.40	34.02	20.00
4.00	25.94	27.06	27.34	27.76	28.88	31.93	33.75	34.47	36.11	36.81	20.00
4.50	27.37	28.64	28.95	29.43	30.69	34.12	36.17	36.98	38.82	39.61	20.00
5.00	28.82	30.22	30.57	31.10	32.50	36.31	38.59	39.49	41.53	42.42	20.00
5.50	30.27	31.81	32.20	32.78	34.32	38.51	41.01	42.00	44.26	45.22	20.00
6.00	31.72	33.41	33.83	34.46	36.14	40.71	43.45	44.53	46.98	48.04	20.00
6.50	33.18	35.01	35.47	36.15	37.97	42.92	45.89	47.05	49.72	50.86	20.00
7.00	34.65	36.61	37.11	37.85	39.80	45.14	48.33	49.59	52.45	53.69	20.00
7.50	36.12	38.23	38.76	39.55	41.65	47.36	50.78	52.13	55.20	56.52	20.00
8.00	37.60	39.85	40.41	41.26	43.49	49.59	53.23	54.67	57.95	59.36	20.00
8.50	39.09	41.47	42.07	42.97	45.34	51.82	55.69	57.22	60.70	62.20	20.00
9.00	40.57	43.10	43.73	44.69	47.20	54.06	58.16	59.78	63.46	65.05	20.00
9.50	42.07	44.73	45.41	46.41	49.06	56.30	60.63	62.34	66.23	67.91	20.00
10.00	43.57	46.38	47.08	48.14	50.93	58.55	63.11	64.91	69.00	70.77	20.00

Figura 21. Curvas de Capacidad de Producción Pozo P-22 La Calera



9.2.4 Capacidad Específica del Pozo P-22 La Calera

La capacidad específica expresada en l/s/m, se define como la producción del pozo por unidad de abatimiento (Q/s) de la ecuación de producción.

$$Q/s = 1/(B+CQn)$$

La capacidad específica se obtiene mediante la resolución de la siguiente ecuación: Fuente: Programa Molano, 2010.

$$Q/s = 1 / 0.586 (5.83 + \log t) + (0.0113 \times Q)$$

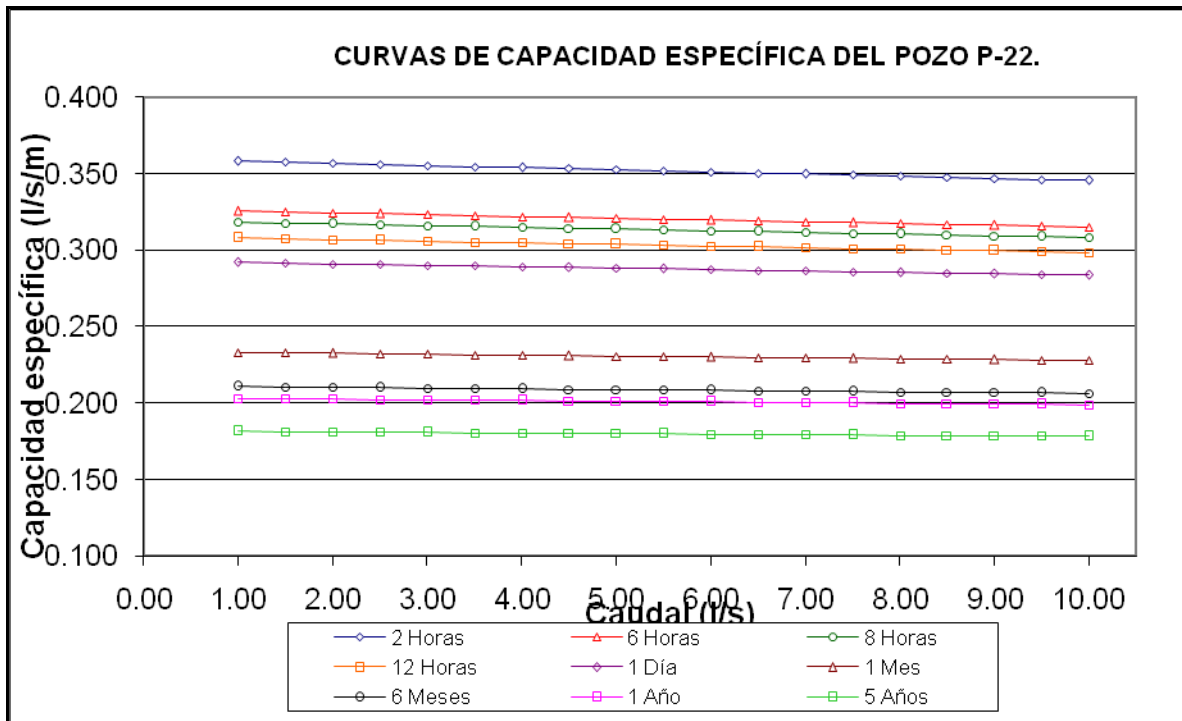
Los valores obtenidos de la resolución de esta ecuación se muestran en la Tabla 11, donde se obtiene el caudal generado por metro de descenso. En la citada Tabla se muestra la baja a moderada capacidad específica del principal Acuífero captado (Calizas de Vijes Superior) en alrededores de mencionado pozo, donde para el caudal máximo de explotación calculado con 24 horas/día de bombeo continuo, la capacidad específica es de 0.29 l/s/m.

**Tabla 11. Resolución de la ecuación de capacidad Especifica del pozo P-22
La Calera**

Q(l/s)	l/s/m 2 horas	l/s/m 6 horas	l/s/m 8 horas	l/s/m 12 horas	l/s/m 1 día	l/s/m 1 mes	l/s/m 6 meses	l/s/m 1 año	l/s/m 5 años	l/s/m 10 años
1.00	0.3581	0.3254	0.3181	0.3078	0.2919	0.2331	0.2107	0.2030	0.1874	0.1814
1.50	0.3574	0.3248	0.3175	0.3072	0.2915	0.2328	0.2104	0.2028	0.1872	0.1812
2.00	0.3567	0.3242	0.3170	0.3067	0.2910	0.2325	0.2102	0.2025	0.1870	0.1811
2.50	0.3560	0.3236	0.3164	0.3062	0.2905	0.2322	0.2099	0.2023	0.1868	0.1809
3.00	0.3552	0.3231	0.3159	0.3056	0.2900	0.2318	0.2097	0.2021	0.1866	0.1807
3.50	0.3545	0.3225	0.3153	0.3051	0.2895	0.2315	0.2094	0.2018	0.1864	0.1805
4.00	0.3538	0.3219	0.3147	0.3046	0.2891	0.2312	0.2092	0.2016	0.1862	0.1803
4.50	0.3531	0.3213	0.3142	0.3041	0.2886	0.2309	0.2089	0.2014	0.1860	0.1801
5.00	0.3524	0.3207	0.3136	0.3036	0.2881	0.2306	0.2087	0.2012	0.1858	0.1800
5.50	0.3517	0.3201	0.3131	0.3030	0.2877	0.2303	0.2085	0.2009	0.1857	0.1798
6.00	0.3510	0.3196	0.3125	0.3025	0.2872	0.2300	0.2082	0.2007	0.1855	0.1796
6.50	0.3503	0.3190	0.3120	0.3020	0.2867	0.2297	0.2080	0.2005	0.1853	0.1794
7.00	0.3496	0.3184	0.3114	0.3015	0.2863	0.2294	0.2077	0.2002	0.1851	0.1792
7.50	0.3489	0.3178	0.3109	0.3010	0.2858	0.2291	0.2075	0.2000	0.1849	0.1790
8.00	0.3483	0.3173	0.3103	0.3005	0.2853	0.2288	0.2072	0.1998	0.1847	0.1789
8.50	0.3476	0.3167	0.3098	0.2999	0.2849	0.2286	0.2070	0.1996	0.1845	0.1787
9.00	0.3469	0.3161	0.3092	0.2994	0.2844	0.2283	0.2068	0.1993	0.1843	0.1785
9.50	0.3462	0.3156	0.3087	0.2989	0.2840	0.2280	0.2065	0.1991	0.1841	0.1783
10.00	0.3455	0.3150	0.3082	0.2984	0.2835	0.2277	0.2063	0.1989	0.1839	0.1781

Las curvas resultantes (Figura 22) presentan un muy bajo grado de inclinación, indicando con ello que el flujo del agua subterránea desde las capas acuíferas hacia el pozo, pasando por el empaque de gravas hacia los filtros, es prácticamente lineal, considerándose leve la obstrucción que todavía se presenta aun después de la fase de limpieza y desarrollo que se le haya hecho al pozo.

Figura 22. Curvas de capacidad Específica del pozo P-22 La Calera.



9.2.5 Eficiencia del Pozo P-22 La Calera

La eficiencia del pozo (n %) se define mediante los siguientes parámetros:

s1= Abatimiento Teórico (m)

s2= Abatimiento real (m)

$$s1= BQ = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S)$$

$$s2= BQ + CQ2 = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S) + CQ2$$

Se calcula mediante la relación:

$$n \% = s1/s2. \text{ (Fuente: Custodio y Llamas).}$$

La eficiencia del pozo en mención se determina desarrollando la ecuación:
(Fuente: Programa Molano, 2010).

$$n \% = 0.586 \times (5.83 + \log t) / 0.583 (5.83 + \log t) + 0.0113 \times Q$$

En la Tabla 12 se presenta los valores calculados de la eficiencia (%) para diferentes caudales y tiempo de explotación.

Tabla 12. Resolución de la Ecuación de Eficiencia del Pozo P-22 La Calera

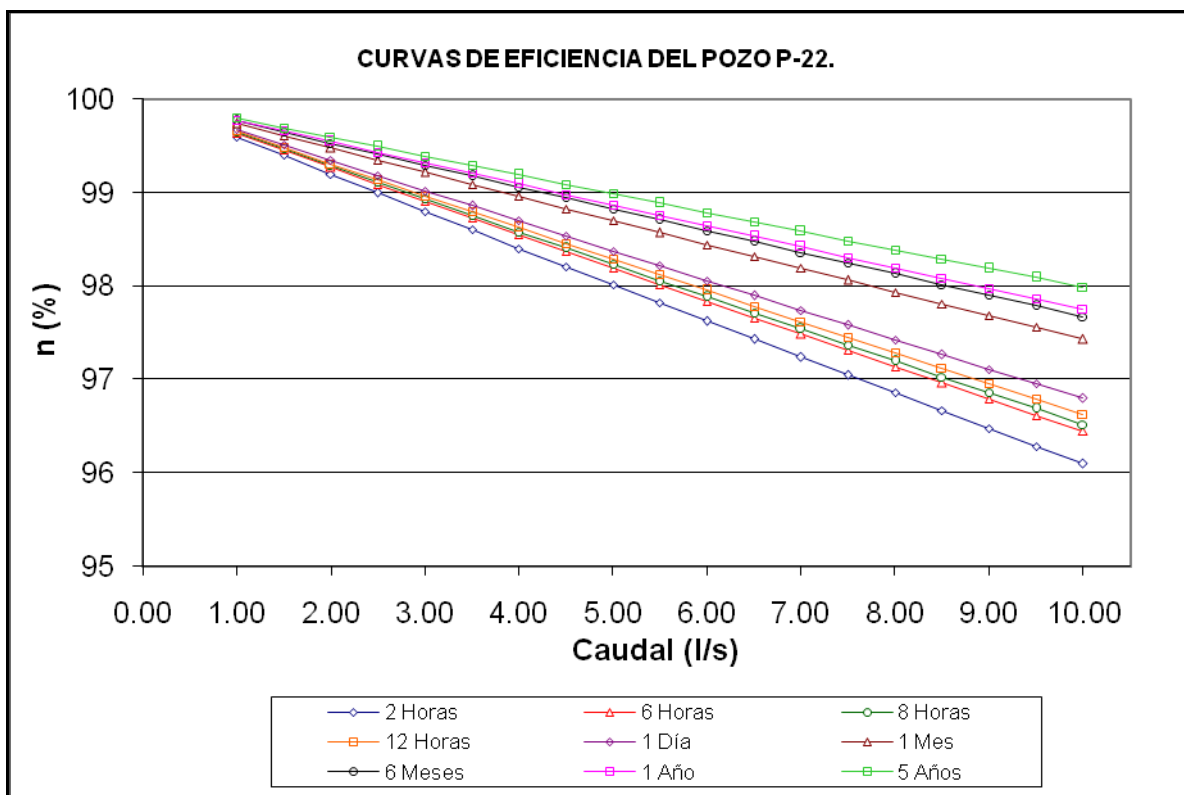
Q(l/s)	% 2 horas	% 6 horas	% 8 horas	% 12 horas	% 1 día	% 1 mes	% 6 meses	% 1 año	% 5 años	% 10 años
1.00	99.60	99.63	99.64	99.65	99.67	99.74	99.76	99.77	99.79	99.80
1.50	99.39	99.45	99.46	99.48	99.51	99.61	99.64	99.66	99.68	99.69
2.00	99.19	99.27	99.28	99.31	99.34	99.47	99.53	99.54	99.58	99.59
2.50	98.99	99.09	99.11	99.14	99.18	99.34	99.41	99.43	99.47	99.49
3.00	98.80	98.90	98.93	98.96	99.02	99.21	99.29	99.32	99.37	99.39
3.50	98.60	98.72	98.75	98.79	98.86	99.08	99.17	99.20	99.26	99.29
4.00	98.40	98.55	98.58	98.62	98.69	98.95	99.05	99.09	99.16	99.19
4.50	98.20	98.37	98.40	98.45	98.53	98.83	98.94	98.98	99.05	99.08
5.00	98.01	98.19	98.23	98.29	98.37	98.70	98.82	98.86	98.95	98.98
5.50	97.81	98.01	98.05	98.12	98.21	98.57	98.70	98.75	98.85	98.88
6.00	97.62	97.83	97.88	97.95	98.05	98.44	98.59	98.64	98.74	98.78
6.50	97.43	97.66	97.71	97.78	97.89	98.31	98.47	98.53	98.64	98.68
7.00	97.23	97.48	97.54	97.62	97.74	98.19	98.36	98.42	98.54	98.58
7.50	97.04	97.31	97.37	97.45	97.58	98.06	98.24	98.31	98.43	98.48
8.00	96.85	97.13	97.20	97.28	97.42	97.93	98.13	98.19	98.33	98.38
8.50	96.66	96.96	97.03	97.12	97.26	97.81	98.01	98.08	98.23	98.28
9.00	96.47	96.79	96.86	96.96	97.11	97.68	97.90	97.97	98.13	98.18
9.50	96.28	96.61	96.69	96.79	96.95	97.55	97.78	97.86	98.02	98.09
10.00	96.10	96.44	96.52	96.63	96.80	97.43	97.67	97.75	97.92	97.99

Considerando que la eficiencia de un pozo es el reflejo de la relación existente entre el tamaño de la abertura de la ranura de los filtros, el tamaño de la granulometría del empaque de grava y de la granulometría de las capas acuíferas captadas, en la citada Tabla se observa que para todos los caudales propuestos con muy largos tiempo de bombeo, la eficiencia del pozo es alta, y por consiguiente se encuentra bien construido y con una aceptable limpieza y desarrollo desde su construcción o mantenimiento. Esta situación se refleja en el

moderado grado de inclinación de las curvas de eficiencia que se presentan en la Figura 23.

Con base en todo lo anteriormente expuesto se puede concluir que en el sector donde se ubica el Pozo P-22 La Calera, la capacidad de almacenamiento tanto del Acuitardo Fluvio-Coluvial como del Acuífero Calizas de Vijes Superior es alta, de tal manera que para lograr descender su nivel dinámico a la mayor profundidad posible, se puede bombear en forma continua con el caudal máximo que produce éste pozo de 4.0 pulg de diámetro, es decir 6.0 l/s, alcanzando el nivel dinámico una profundidad cercana a los 50.0 m.

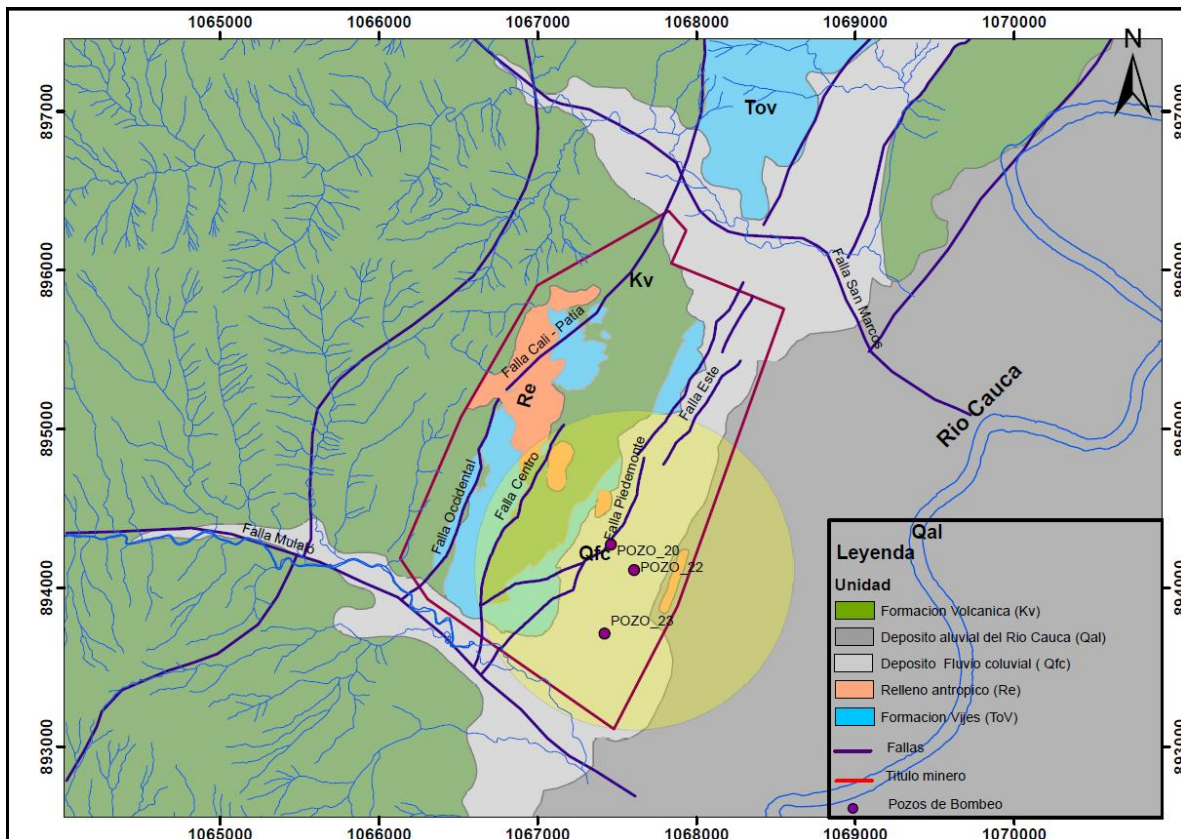
Figura 23. Curvas de eficiencia del Pozo P-22 La Calera



9.2.6 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P-22 La Calera

Con base en los parámetros hidráulicos promedios calculados, y considerando que en los alrededores del pozo el Acuífero Calizas de Vijes Superior se comporta como homogéneo e isotrópico, el Radio de Influencia generado por el máximo caudal de bombeo (6.0 l/s), con tiempo de bombeo de 24 horas/día, alcanza una longitud cercana a los 1200 m, donde el abatimiento varía desde los 45.0 m en alrededores del pozo hasta los 0.70 m en el extremos del mencionado radio (Figura 24). La gráfica correspondiente se presenta en el ANEXO II.

Figura 24. Radio de influencia generado por el pozo P-22. Mapa a escala 1:25.000.



9.2.7 Explotación del Pozo P-22 La Calera

Considerando que el citado pozo tiene un diámetro de 4.0 pulg y que los filtros se encuentran instalados en cuatro (4) tramos ubicados entre los 20.0 y los 112.0 m de profundidad, su explotación se puede efectuar con un caudal máximo de 6.0 l/s (518.4 m³/día) durante un tiempo de bombeo continuo (24 horas/día), alcanzado el nivel dinámico una profundidad de aproximadamente 50.0 m. En estas condiciones el pozo trabaja con una capacidad específica de 0.28 l/s/m y una eficiencia del 98%.

9.3 Ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo en el pozo P-23 en la Mina la Calera.

Se analiza y se muestra los resultados de la interpretación de pruebas a caudal constante y recuperación en un pozo de 4.0 pulg de diámetro identificado como P-23 La Calera, ubicado en el mismo sector y al Norte de los dos anteriores, a una distancia de 455 m del P-22 y 565 m del P-20, con profundidad de 120.0 m, captando el Acuitardo Fluvio-Coluvial. Este pozo se construye a una profundidad de 120.0 m revestido con tubería ciega y filtros PVC RDE-21 de 4.0 pulg de diámetro, diseñado de acuerdo a la interpretación de su registro físico (resistividad, gamma y potencial espontáneo), con una longitud total de 36.0 m de filtros repartidos en cuatro (4) tramos situados entre los 18.0 y los 94.0 m de profundidad. Para la ejecución de las pruebas de bombeo se instala una electrobomba sumergible con motor Franklin de 7.5 H.P a una profundidad de 84.0 m, empleando tubería de descarga en acero al carbón de 1½ pulg de diámetro. El registro físico y el diseño del pozo se muestran en el ANEXO IV.

En el mes de Diciembre de 2013 se llevan a cabo en este pozo pruebas a caudal constante con su respectiva recuperación, las cuales se interpretarán mediante el empleo del programa AquiferTest v.1.1 (2011). La prueba a caudal constante se explica por los métodos de Theis y Cooper & Jacob, y la de recuperación por el

método de Theis Recovery. Para el cálculo del Radio de Influencia del pozo se emplea el programa Molano (2010).

Considerando la no existencia de pozos de observación, la prueba se interpreta como en “pozo único” calculando la distancia a un pozo de observación hipotético con base en la longitud total del tramo de filtros, el radio interno del pozo y una constante que varía entre 0.7 y 1.2, la cual depende de la magnitud del caudal de bombeado y/o del valor de la Transmisividad regional del sistema acuífero captado.

Los datos y los resultados gráficos de la interpretación de las pruebas se presentan en el ANEXO II.

9.3.1 Prueba a Caudal Constante.

Se realiza con un caudal constante de 0.67 l/s (58.32 m³/día), bombeando durante un tiempo de 720 minutos (0.5 día). Se inicia a partir de un nivel estático de 24.16 m, alcanzando el nivel dinámico al final de la prueba, los 67.45 m. de profundidad, para un abatimiento de 43.29 m. El espesor saturado de la unidad hidrogeológica captada se estima en 36.0 m. De acuerdo al diseño del pozo, la unidad captada corresponde al Acuitardo Fluvio-Coluvial.

Teniendo en cuenta el comportamiento del acuífero como confinado, se aplica para la interpretación de esta prueba el método de Theis, obteniendo para la Transmisividad un valor de 0.670 m²/día, con Coeficiente de Almacenamiento de 1.73 E-04 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.0186 m/día. Empleando el método de Cooper & Jacob se calcula una Transmisividad de 0.79 m²/día, con Coeficiente de Almacenamiento de 2.84 E-04 y Conductividad Hidráulica de 0.022 m/día.

9.3.2 Prueba de Recuperación.

Esta prueba se inicia a partir de un nivel dinámico de 67.45 m. de profundidad, y tiene una duración de 140 minutos (0.097 días), alcanzando el nivel del agua recuperada los 26.70 m., equivalente a una recuperación del 94 %. La interpretación, empleando el método de Theis Recovery, calcula para la Transmisividad un valor de 2.21 m²/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.0615 m/día.

En la interpretación gráfica de la prueba, se observa que la línea corta al eje Y cerca al vértice, señalando con ello que el acuitardo captado no recupera el nivel inicial después de largos períodos de bombeo, debido a la ausencia de una recarga cercana.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuitardo Fluvio-Coluvial, en alrededores del Pozo P-23 La Calera, se calculan para la Transmisividad 1.22 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 2.3 E-04 y para la Conductividad Hidráulica 0.0204 m/día.

En consideración a la no obtención de datos relacionados con la ejecución de pruebas escalonadas, encaminadas a conocer los coeficientes de Pérdidas de Pozo (C) y de Pérdida de Acuífero (B), éstos son calculados mediante el método teórico, empleando los valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos. Los valores calculados para los coeficientes son los siguientes:

$$C = 1.54 \text{ E } -03 \text{ días}^2/\text{m}^5$$

$$B = 0.658 \text{ días}/\text{m}^2$$

El valor del Coeficiente de Pérdida de Pozo $C = 1.54 \text{ E} -03$ indica que su desarrollo es deficiente por falta de una mayor limpieza, labor que en sedimentos de granulometría muy fina a fina es muy difícil al ocurrir taponamientos en los tramos filtrantes. Pozos bien desarrollados contienen un Coeficiente C con un orden de magnitud de 10^{-7} días²/m⁵.

Un resumen de los tipos de pruebas realizadas e interpretadas y los valores de los principales parámetros hidráulicos obtenidos, se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Pruebas de Bombeo Interpretadas y Valores de los Parámetros Hidráulicos Obtenidos en el Pozo P-23 la Calera.

Prueba No.	Tipo de Prueba	Caudal (l/s)	Tiempo de Prueba (min.)	Método de Interpretación	T (m ² /día)	S	K. (m/día)	Coef Pérdida Acuífero (B) días/m ²	Coef. Pérdida Pozo (C) días ² /m ⁵
1	Caudal Constante	0.67	720	Theis	0.67	1.73 E-04	0.0186	----	----
2	Caudal Constante	0.67	720	Cooper & Jacob	0.79	2.84 E-04	0.022	----	----
3	Recuperación	0.67	140	Theis Recovery	2.21	----	0.0615	----	----
3	Escalonada	----	---	Teórico	----	----	----	0.658	1.54 E-03

Las ecuaciones de comportamiento del pozo se obtienen considerando los parámetros hidráulicos promedios, calculados a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo. Estas ecuaciones son: de producción, capacidad específica y de eficiencia.

9.3.3 Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera

La ecuación de producción del pozo se obtiene a partir de la resolución de la ecuación: Fuente: (Programa Moilano, 2010).

$$ND = NE + BQ + CQ^2$$

Es decir :

$$ND = NE + (2.3Q/4\pi T) \log (2.25Tt/r^2S) + CQ^2$$

Donde:

ND = Nivel dinámico, (m)

NE = Nivel estático, (m)

Q = Caudal de bombeo l/s (m³/día)

T = Transmisividad, (m²/día)

t = Tiempo de bombeo, (día)

R = Radio del pozo, (m)

S = Coeficiente de almacenamiento

C = Pérdidas por construcción del pozo, (días²/m⁵)

Los datos que se toman para resolver la ecuación de Capacidad de Producción son los siguientes:

Profundidad del pozo = 120.0 m.

Diámetro = 4.0 pulgadas

Nivel Estático (NE) = 24.16 m

Caudal de la Prueba (Q) = 0.67 l/s (58.32 m³/día)

Transmisividad Promedio (T) = 1.22 m²/día

Coeficiente Almacenamiento (S) = 2.30 E-04

Coeficiente Pérdida Pozo (C) = 1.54 E-03 días²/m⁵

La ecuación para el cálculo de la Capacidad de Producción del pozo es la siguiente: (Fuente: Programa Computacional, Molano 2010).

$$ND = 24.16 \text{ m} + 12.35 \times Q (4.90 + \log t) + 11.48 \times Q^2$$

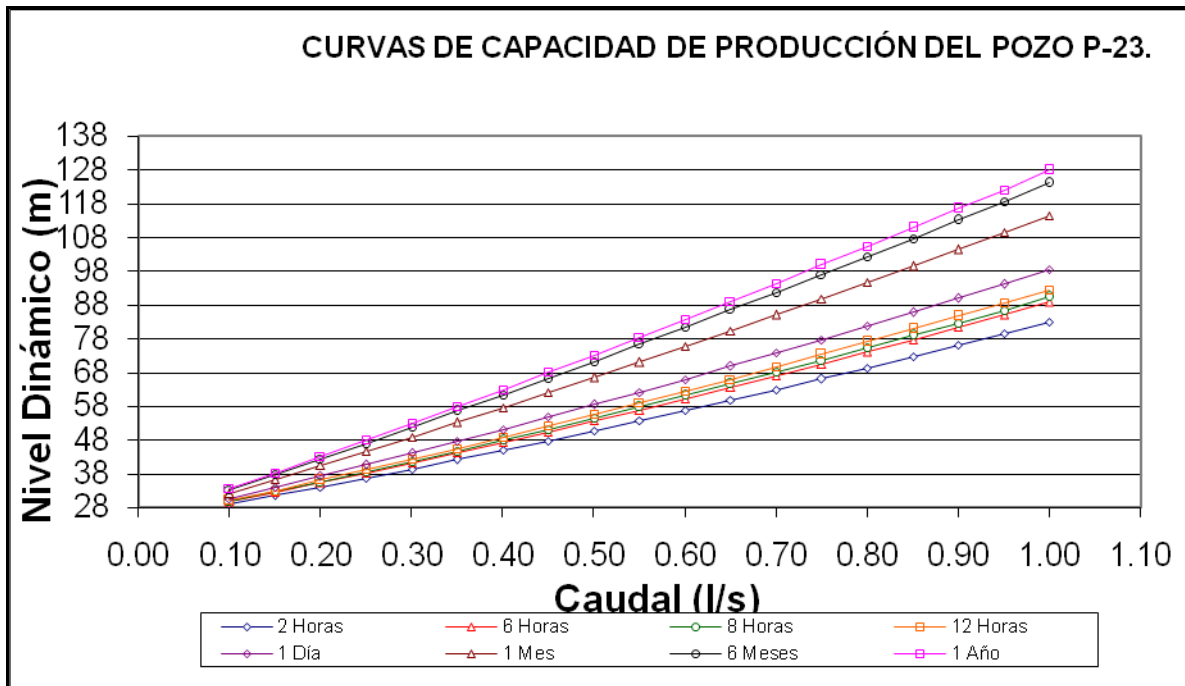
Resolviendo la anterior ecuación para diferentes caudales y tiempos de bombeo, se obtiene la Capacidad de Producción del pozo y sus resultados se presentan en la Tabla 14, donde se observa que para un caudal de bombeo de 0.70 l/s con tiempo de bombeo continuo (24 horas/día), el nivel dinámico desciende aproximadamente a los 73.0 m de profundidad. Se observa que para los muy bajos caudales y tiempos de bombeo propuestos, el nivel dinámico desciende rápidamente como respuesta a la fina granulometría dominante.

Tabla 14. Resolución de la Ecuación de Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera.

Q(l/s)	ND 2 horas	ND 6 horas	ND 8 horas	ND 12 horas	ND 1 día	ND 1 mes	ND 6 meses	ND 1 año	ND 5 años	ND 10 años	Prof Techo 1° Filtro
0.10	29.00	29.59	29.74	29.96	30.55	32.16	33.12	33.50	34.36	34.73	18.00
0.15	31.50	32.39	32.61	32.95	33.83	36.24	37.68	38.25	39.55	40.11	18.00
0.20	34.06	35.25	35.54	35.99	37.17	40.38	42.31	43.07	44.79	45.54	18.00
0.25	36.68	38.16	38.53	39.09	40.57	44.58	46.99	47.94	50.09	51.02	18.00
0.30	39.36	41.13	41.58	42.25	44.02	48.84	51.72	52.86	55.45	56.57	18.00
0.35	42.09	44.16	44.69	45.47	47.53	53.15	56.52	57.85	60.87	62.17	18.00
0.40	44.89	47.25	47.85	48.74	51.10	57.53	61.37	62.89	66.34	67.83	18.00
0.45	47.73	50.40	51.07	52.07	54.72	61.96	66.28	67.99	71.87	73.55	18.00
0.50	50.64	53.60	54.34	55.46	58.41	66.44	71.25	73.15	77.46	79.32	18.00
0.55	53.60	56.86	57.68	58.90	62.15	70.99	76.27	78.36	83.11	85.15	18.00
0.60	56.63	60.18	61.07	62.41	65.94	75.59	81.36	83.63	88.81	91.04	18.00
0.65	59.70	63.55	64.52	65.97	69.80	80.25	86.50	88.96	94.57	96.99	18.00
0.70	62.84	66.98	68.02	69.58	73.71	84.96	91.69	94.35	100.39	103.00	18.00
0.75	66.03	70.47	71.59	73.26	77.68	89.74	96.95	99.79	106.27	109.06	18.00
0.80	69.28	74.02	75.21	76.99	81.71	94.57	102.26	105.29	112.20	115.18	18.00
0.85	72.59	77.62	78.89	80.78	85.79	99.46	107.63	110.85	118.19	121.35	18.00
0.90	75.96	81.28	82.62	84.63	89.93	104.40	113.05	116.47	124.24	127.59	18.00
0.95	79.38	85.00	86.42	88.53	94.13	109.40	118.54	122.14	130.34	133.88	18.00
1.00	82.86	88.78	90.27	92.50	98.39	114.46	124.08	127.87	136.51	140.23	18.00

En la Figura 25 se presentan las curvas producto de la resolución de la anterior ecuación, donde se observa el alto grado de inclinación de las mismas a pesar de los bajos caudales propuestos debido a la fina granulometría del citado acuitardo.

Figura 25. Curvas de Capacidad de Producción del Pozo P-23 La Calera



9.3.4 Capacidad Específica del Pozo P-23 La Calera

La capacidad específica expresada en l/s/m, se define como la producción del pozo por unidad de abatimiento (Q/s) de la ecuación de producción.

$$Q/s = 1/(B + CQn)$$

La capacidad específica se obtiene mediante la resolución de la siguiente ecuación:

$$Q/s = 1 / 12.35 (4.90 + \log t) + (11.48 \times Q)$$

Los valores obtenidos de la resolución de esta ecuación se muestran en la Tabla 15, donde se obtiene el caudal generado por metro de descenso. En la citada Tabla se muestra la muy baja capacidad específica del Acuitardo Fluvio-Coluvial en alrededores de mencionado pozo, donde para el caudal máximo de explotación calculado (0.70 l/s) con 24 horas/día de bombeo, la capacidad específica es de 0.014 l/s/m.

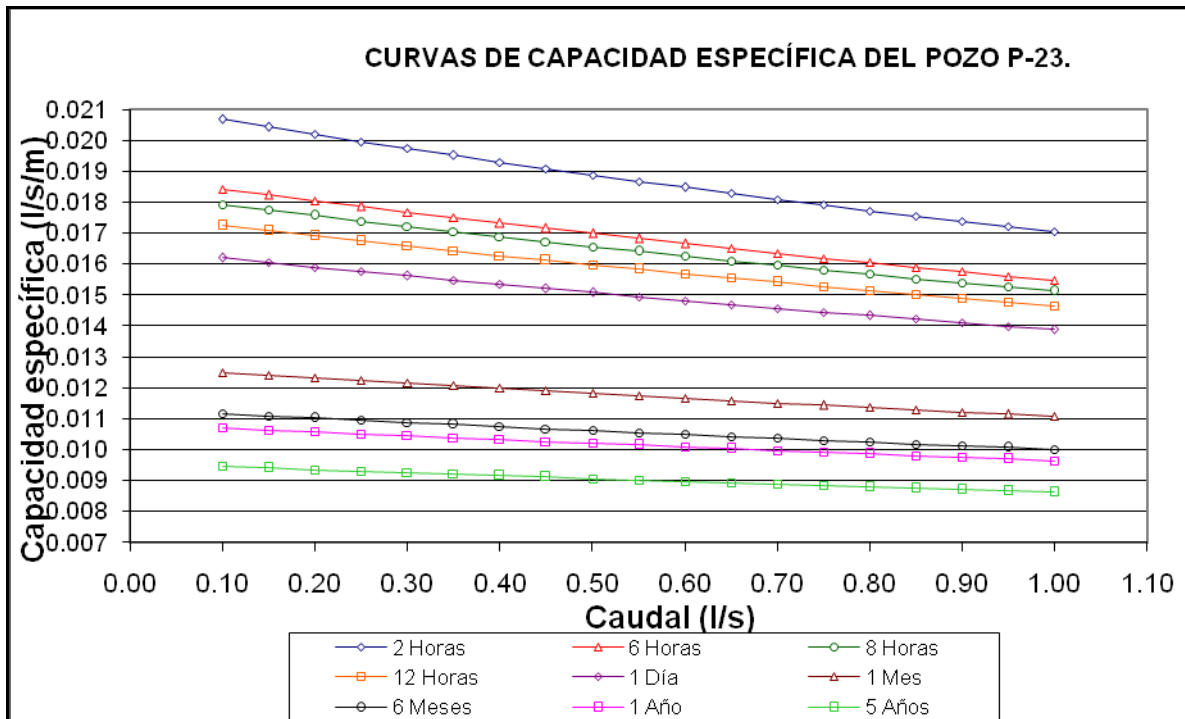
Tabla 15. Resolución de la Ecuación de Capacidad Específica del Pozo P-23 La Calera.

Q(l/s)	l/s/m 2 horas	l/s/m 6 horas	l/s/m 8 horas	l/s/m 12 horas	l/s/m 1 día	l/s/m 1 mes	l/s/m 6 meses	l/s/m 1 año	l/s/m 5 años	l/s/m 10 años
0.10	0.0207	0.0184	0.0179	0.0172	0.0162	0.0125	0.0112	0.0107	0.0098	0.0095
0.15	0.0204	0.0182	0.0177	0.0171	0.0161	0.0124	0.0111	0.0106	0.0097	0.0094
0.20	0.0202	0.0180	0.0176	0.0169	0.0159	0.0123	0.0110	0.0106	0.0097	0.0094
0.25	0.0200	0.0179	0.0174	0.0167	0.0158	0.0122	0.0110	0.0105	0.0096	0.0093
0.30	0.0197	0.0177	0.0172	0.0166	0.0156	0.0122	0.0109	0.0105	0.0096	0.0093
0.35	0.0195	0.0175	0.0171	0.0164	0.0155	0.0121	0.0108	0.0104	0.0095	0.0092
0.40	0.0193	0.0173	0.0169	0.0163	0.0153	0.0120	0.0107	0.0103	0.0095	0.0092
0.45	0.0191	0.0172	0.0167	0.0161	0.0152	0.0119	0.0107	0.0103	0.0094	0.0091
0.50	0.0189	0.0170	0.0166	0.0160	0.0151	0.0118	0.0106	0.0102	0.0094	0.0091
0.55	0.0187	0.0168	0.0164	0.0158	0.0150	0.0117	0.0106	0.0101	0.0093	0.0090
0.60	0.0185	0.0167	0.0163	0.0157	0.0148	0.0117	0.0105	0.0101	0.0093	0.0090
0.65	0.0183	0.0165	0.0161	0.0155	0.0147	0.0116	0.0104	0.0100	0.0092	0.0089
0.70	0.0181	0.0163	0.0160	0.0154	0.0146	0.0115	0.0104	0.0100	0.0092	0.0089
0.75	0.0179	0.0162	0.0158	0.0153	0.0145	0.0114	0.0103	0.0099	0.0091	0.0088
0.80	0.0177	0.0160	0.0157	0.0151	0.0143	0.0114	0.0102	0.0099	0.0091	0.0088
0.85	0.0176	0.0159	0.0155	0.0150	0.0142	0.0113	0.0102	0.0098	0.0090	0.0087
0.90	0.0174	0.0158	0.0154	0.0149	0.0141	0.0112	0.0101	0.0098	0.0090	0.0087
0.95	0.0172	0.0156	0.0153	0.0148	0.0140	0.0111	0.0101	0.0097	0.0089	0.0087
1.00	0.0170	0.0155	0.0151	0.0146	0.0139	0.0111	0.0100	0.0096	0.0089	0.0086

Las curvas resultantes (Figura 26) presentan un alto grado de inclinación, indicando con ello que el flujo del agua subterránea desde las capas acuíferas, pasando por el empaque de gravas hacia los filtros, es turbulento y no lineal. Esto

ocurre cuando el agua no transita libremente debido a la obstrucción generada por la granulometría fina del Acuitardo.

Figura 26. Curvas de capacidad Específica del Pozo P-23 La Calera



9.3.5 Eficiencia del Pozo P-23 La Calera

La eficiencia del pozo (n %) se define mediante los siguientes parámetros: (Fuente Molano, 2010).

s1= Abatimiento Teórico (m)

s2= Abatimiento real (m)

$$s1= BQ = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S)$$

$$s2= BQ + CQ2 = (2.3/4 \square T) * \log (2.25Tt/r2S) + CQ2$$

Se calcula mediante la relación:

$$n \% = s1/s2. \text{ (Fuente: Custodio y Llamas)}$$

La eficiencia del pozo en mención se determina desarrollando la ecuación:
(Fuente. Programa Molano, 2010).

$$n \% = 12.35 \times (4.90 + \log t) / 12.35 (4.90 + \log t) + 11.48 \times Q$$

En la Tabla 16 se presenta los valores de la eficiencia (%) para diferentes caudales y tiempo de explotación.

Teniendo en cuenta que la eficiencia de un pozo es el reflejo de la relación existente entre el tamaño de la ranura de los filtros, el tamaño de la granulometría del empaque de grava y el tamaño de la granulometría de las capas acuíferas captadas, en la citada Tabla se observa que para un caudal máximo de 0.70 l/s con muy largos tiempo de bombeo, el pozo alcanza un valor de eficiencia correspondiente al 88%.

Tabla 16. Resolución de la Ecuación de Eficiencia del Pozo P-23 La Calera

Q(l/s)	% 2 horas	% 6 horas	% 8 horas	% 12 horas	% 1 día	% 1 mes	% 6 meses	% 1 año	% 5 años	% 10 años
0.10	97.63	97.89	97.94	98.02	98.14	98.56	98.72	98.77	98.87	98.91
0.15	96.48	96.86	96.94	97.06	97.24	97.86	98.09	98.17	98.32	98.38
0.20	95.36	95.86	95.97	96.12	96.35	97.17	97.47	97.57	97.77	97.85
0.25	94.27	94.88	95.01	95.19	95.48	96.49	96.86	96.98	97.23	97.33
0.30	93.20	93.91	94.07	94.29	94.62	95.81	96.25	96.40	96.70	96.81
0.35	92.16	92.97	93.15	93.40	93.78	95.15	95.65	95.83	96.17	96.30
0.40	91.14	92.04	92.24	92.53	92.95	94.49	95.06	95.26	95.65	95.79
0.45	90.14	91.14	91.36	91.67	92.14	93.85	94.48	94.70	95.13	95.29
0.50	89.16	90.25	90.49	90.83	91.34	93.21	93.90	94.14	94.62	94.80
0.55	88.20	89.38	89.64	90.00	90.56	92.58	93.34	93.59	94.11	94.31
0.60	87.27	88.52	88.80	89.19	89.79	91.96	92.77	93.05	93.61	93.82
0.65	86.35	87.69	87.98	88.40	89.03	91.35	92.22	92.51	93.11	93.34
0.70	85.46	86.86	87.17	87.62	88.29	90.75	91.67	91.98	92.62	92.86
0.75	84.58	86.05	86.38	86.85	87.55	90.15	91.13	91.46	92.13	92.39
0.80	83.72	85.26	85.61	86.09	86.83	89.56	90.59	90.94	91.65	91.93
0.85	82.87	84.48	84.84	85.35	86.12	88.98	90.06	90.43	91.18	91.47

Q(l/s)	% 2 horas	% 6 horas	% 8 horas	% 12 horas	% 1 día	% 1 mes	% 6 meses	% 1 año	% 5 años	% 10 años
0.90	82.05	83.72	84.09	84.62	85.43	88.41	89.54	89.93	90.71	91.01
0.95	81.24	82.97	83.36	83.90	84.74	87.84	89.02	89.42	90.24	90.56
1.00	80.44	82.23	82.63	83.20	84.07	87.29	88.51	88.93	89.78	90.11

En la Figura 28 se muestra las curvas de eficiencia obtenidas para los diferentes caudales y tiempo de explotación, las cuales se caracterizan por su alto grado de inclinación, situación que también refleja la obstrucción de los filtros y empaque de grava con material fino a muy fino de la unidad captada.

9.3.6 Cálculo del Radio de Influencia del Pozo P-23 La Calera

Con base en los parámetros hidráulicos promedios calculados y considerando que en los alrededores del pozo, el Acuitardo Fluvio-Coluvial se comporta como homogéneo e isotrópico, el Radio de Influencia generado por el caudal propuesto de 0.70 l/s con tiempo de bombeo de 24 horas/día, alcanza una longitud cercana a los 110.0 m, donde el máximo abatimiento cercano al pozo varía desde 35.0 hasta 0.39 m de profundidad (Figura 27). La gráfica correspondiente se presenta en el ANEXO II.

Figura 27. Radio de influencia generado por el pozo P-23. Escala del mapa 1: 25.000

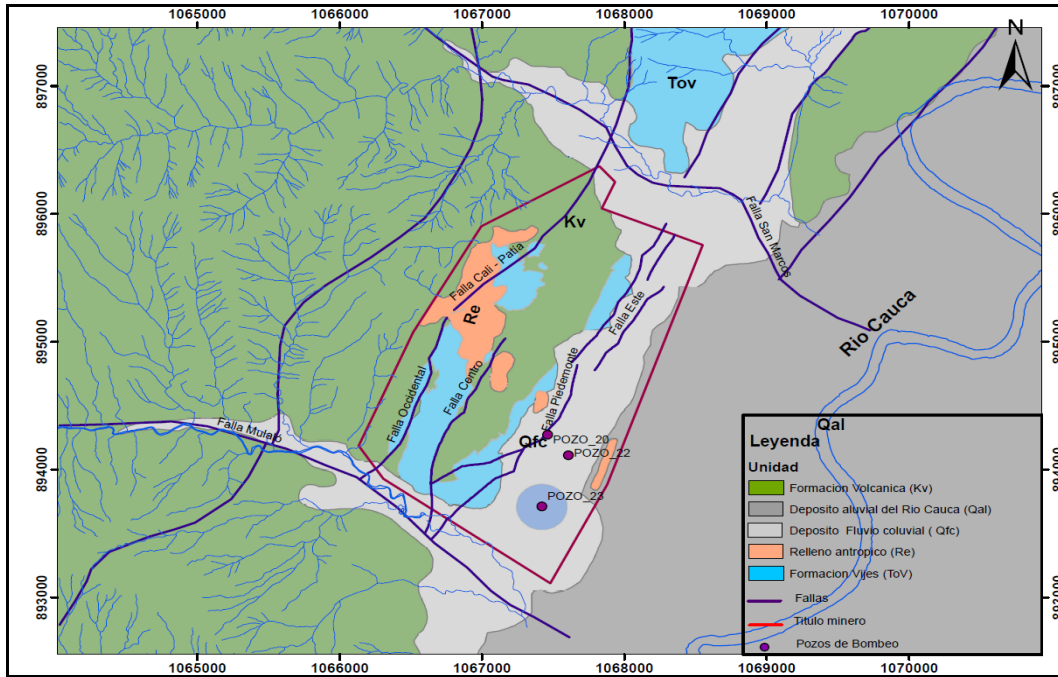
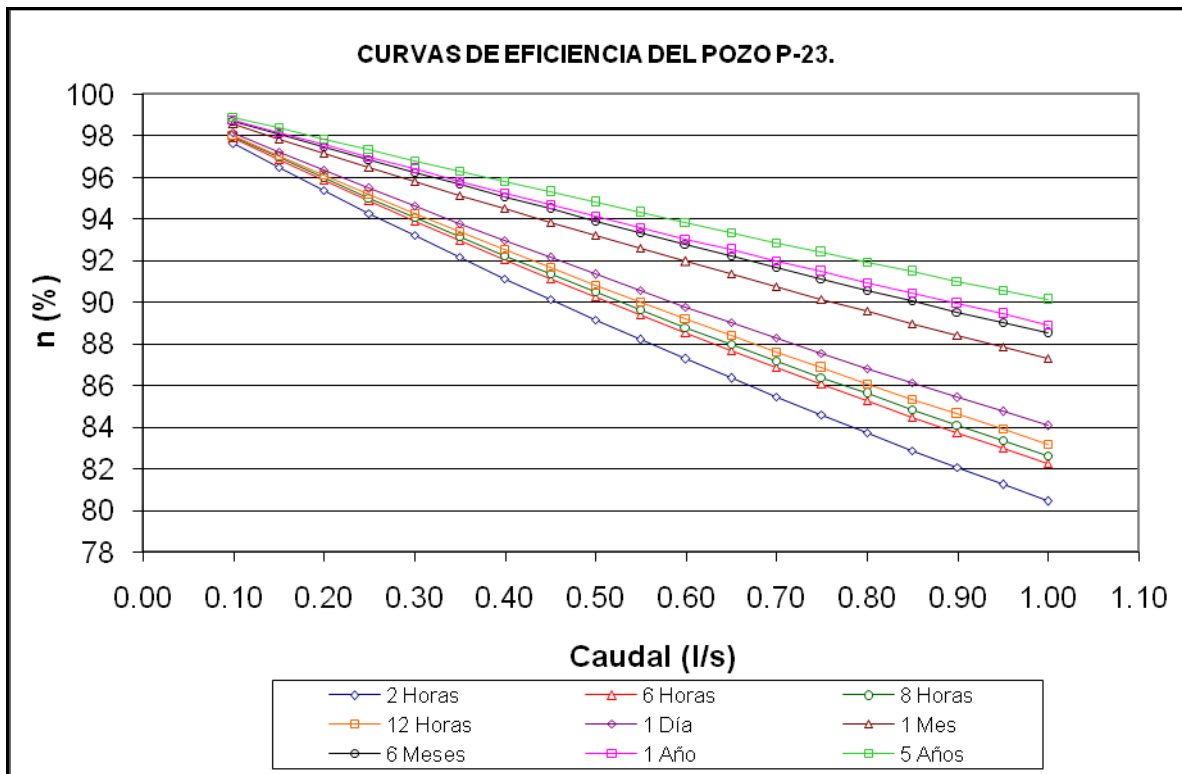


Figura 28. Curvas de Eficiencia del Pozo P-23 La Calera



9.3.7 Explotación del Pozo P-23 La Calera.

Considerando que el pozo P-23 La Calera tiene un diámetro de 4.0 pulg y que los filtros se encuentran instalados en cuatro (4) tramos ubicados entre los 18.0 y los 94.0 m de profundidad, su explotación para abatirlo a la mayor profundidad posible, se puede efectuar con un caudal máximo de 0.70 l/s (60.48 m³/día) durante un tiempo de bombeo continuo (24 horas/día), alcanzado el nivel dinámico una profundidad de aproximadamente 73.0 m. En estas condiciones el pozo trabaja con una capacidad específica de 0.014 l/s/m y una eficiencia del 88%.

10. CONCLUSIONES

- La secuencia sedimentaria atravesada por el pozo P-20 está constituida en su parte superior, hasta los 64.0 m de profundidad por un depósito de origen fluvio-coluvial que cubre a la caliza arrecifal hasta la profundidad de perforación (180.0 m), la cual se encuentra muy fracturada entre los 76.0 y 102.0 m de profundidad, representando ésta última el principal acuífero captado por el mencionado pozo.
- El pozo de bombeo P-20 capta el depósito calcareo de la formación Vijes Inferior de tipo confinado con un comportamiento de semiconfinado, debido al goteo que produce la saturación del depósito Cuaternario superior cuando el nivel dinámico desciende por debajo de su base.
- Se obtuvo un valor de 12.0 m²/día para la Transmisividad, de 1.75 E-05 para el Coeficiente de Almacenamiento y de 0.052 m/día para la Conductividad Hidráulica, en la unidad que capta el acuífero calizas de Vijes inferior.
- El caudal óptimo de explotación calculado para el pozo P-20 es de 8.0 l/s (691.2 m³/día) durante un tiempo de bombeo continuo de 24.0 horas/día, alcanzado el nivel dinámico dentro del pozo una profundidad aproximada a los 105.0 m, por debajo de la zona de calizas fracturadas donde ocurre el mayor almacenamiento de agua subterránea.
- Tomando como homogéneas e isotrópicas en la horizontal las condiciones litológicas de las capas acuíferas captadas, el Radio de Influencia generado por el caudal y el tiempo de explotación recomendado para el pozo P20, alcanza una longitud máxima de aproximadamente 1200 m. A ésta distancia el abatimiento producido varía desde aproximadamente 30.0 m (ND = 44.0 m) en cercanías al pozo, hasta un abatimiento de 3.0 m (ND = 16.0 m) a los 1200 m.

- El pozo de bombeo P-22 capta el deposito calcareo de la formacion Vijes Superior, constituido principalmente por material meteorizado (parte terrigena) de la unidad calcarea mencionada, conformada principalmente por limos limolitas, arcillas negras y conglomerados calcareos.
- La unidad calizas de Vijes superior presenta una Transmisividad de 18.0 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 4.0 E-05 y para la Conductividad Hidráulica 0.55 m/día.
- Considerando la unidad homogenea e isotropica en los alrededores del pozo P-22 comporta como homogéneo e isotrópico, el Radio de Influencia generado por el máximo caudal de bombeo (6.0 l/s), con tiempo de bombeo de 24 horas/día, alcanza una longitud cercana a los 1200 m, donde el abatimiento varía desde los 45.0 m en alrededores del pozo hasta los 0.70 m en el extremos del mencionado radio.
- Se obtuvo como valores promedio para la unidad deposito Fluvio Coluvial una Transmisividad de 1.28 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 2.5 E-04 y para la Conductividad Hidráulica 0.035 m/día.
- El Radio de Influencia generado por el caudal propuesto de 0.70 l/s con tiempo de bombeo de 24 horas/día, en el pozo P-23 alcanza una longitud cercana a los 110.0 m, donde el máximo abatimiento cercano al pozo varía desde 35.0 hasta 0.39 m de profundidad.

11. RECOMENDACIONES

Para caracterizar de una mejor manera el deposito calcareo de la Formacion Vijes (ToV) y con ello un acercamiento mas fiable de las propiedades hidraulicas de los acuíferos fracturados, se hace necesario un estudio a detalle de la caracterizacion de dichas fracturas (diaclasas, planos de falla) tales como numero de sets, orientacion, espaciamiento, abertura, asperezas, unidad de bloque de la matriz (tamaño del bloque), densidad (numero de fracturas por unidad de longitud o area), entre otras.

De igual forma se requieren la construccion e instalacion de mas pozos de bombeo a diferentes distancias, con el fin de monitorear sus niveles piezometricos que garanticen un mejor acercamiento a sus propiedades hidraulicas, implementando realmente pozos de observacion para su analisis.

De igual forma, es necesario realizar nuevos ensayos de bombeo tomando como pozos de observacion cualquiera de los tres mencionados pozos entre si (P-20, P-22 y P-23).

Finalmente como un medio complementario se pueden implementar softwares de modelamiento que trabajan en series o elementos finitos como MODFLOW o FEFLOW, en donde se pueden llegar a obtener resultados muy fiables del comportamiento del flujo de agua subterranea en este tipo de acuíferos.

BIBLIOGRAFIA


- AQUIFERTEST V.3.5., 2002.- Advanced Pumping Test Slug Test Analysis Software. Co-developed by Thomas Robrich and Waterloo Hydrogeologic, Inc. Ontario. Canada.
- ASPEN & NIVIA, A., 1985.- Mapa Geológico de Colombia - Escala 1:100.000, Plancha 278 - Bahía de Buenaventura. INGEOMINAS. Bogotá.
- BURGL, H., 1961.- Historia Geológica de Colombia. Rev. Acad. Col. Cienc. Ex. Fis. Nat., Vol. 11, No. 43, pp. 137 - 191, Bogotá.
- CUSTODIO Y LLAMAS., 1983. - Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Ediciones Omega. España.
- HUBACH, ENRIQUE., 1957. – Contribución a las unidades estratigráfica de Colombia. Informe No. 1212. Instituto Geológico Nacional. Ministerio de Minas y Petróleos. Bogotá.
- HUBACH, E & ALVARADO, B. 1934. Geología de los Departamentos del Valle y Cauca, en especial del carbón. Servicio Geológico Nacional, Informe 224 (Inédito). Bogotá.
- KIRCHNER J. Y VAN TONDER G.J. 1995, Proposed Guidelines for the execution, evaluation and Interpretation of pumping test in fractured- rock formations, Institute for Groundwater Studies, University of Orange free State.
- LITEKTOS S.A.S., 2012.- Modelamiento estructural y estratigrafía de los depósitos de la formación Vijes del piedemonte de la cantera La Calera. Mulaló, Valle.
- MOLANO, CARLOS., 2010.- Programa computacional para el cálculo del Radio de Influencia de un pozo bombeado, utilizando la formulación de Theis. Hidrogeocol Ltda.. Bogotá.
- NIVIA, A., 2001.- Mapa geológico del departamento del Valle del Cauca, escala 1:250.000. Memoria Explicativa. Instituto De Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental Y Nucleas INGEOMINAS, pp85-94. Bogotá.
- STUTZER, O. 1934. Contribución a la geología del Foso Cauca-Patía. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, II, 69-140. Imprenta Nacional. Bogotá


- SCHWINN, W.L. 1969. Guidebook to the geology of the Cali area. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicist, 10th field trip , 29 p. Bogotá.
- BIERSCHENK, W. H., 1970. Determining well efficiency by multiple step-drawdown test. Asociación Internacional de Hidrología Científica. Asamblea general de Berkeley.
- KRUSEMAN G.P. & RIDDER N. A, 1975; Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo, Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen Holanda. Boletín 11 S. Volumen II. p.222.
- VILLANUEVA, M. & IGLESIAS, A., Pozos y acuíferos, técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME, 426 pág.
- RENARD, P. GLENTZ, DAMIAN. & MEJIAS, M., 2005, Understanding diagnostic Plots for well testing, Hydrogeologic journal, 589-600.
- NIELSEN, KURT.; 2007 Fractured aquifers by well testing evaluation pumping, Ed Atlanta.

ANEXOS

ANEXO A. Datos y resultados gráficos de pruebas de bombeo a caudal constante , recuperación y escalonada ejecutadas en el pozo p-20 que capta el acuífero calizas de vijes inferior

1

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22	
			Number: 133456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-22		Pumping Test: CONSTANTE		
Distance from PW: 1.5 [m]		Pumping Well: P-22		
Depth to Static WL: 14.63 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: JorgeAbril		Screen length: 33 [m]		
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 33 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	14.63	0.00	
2	0.3	23.88	9.25	
3	1	26.29	11.66	
4	1.3	26.90	12.27	
5	2	27.51	12.88	
6	2.3	28.07	13.44	
7	3	28.45	13.82	
8	4	28.77	14.14	
9	5	29.04	14.41	
10	6	29.55	14.92	
11	7	31.28	16.65	
12	8	31.80	17.17	
13	9	31.99	17.36	
14	10	32.19	17.56	
15	12	32.38	17.75	
16	14	32.54	17.91	
17	16	32.68	18.05	
18	18	32.72	18.09	
19	20	32.31	17.68	
20	25	32.68	18.05	
21	30	32.71	18.08	
22	35	32.53	17.90	
23	40	32.64	18.01	
24	45	32.76	18.13	
25	50	32.78	18.15	
26	55	32.88	18.25	
27	60	32.91	18.28	
28	70	32.93	18.30	
29	80	33.00	18.37	
30	90	33.09	18.46	
31	100	33.16	18.53	

 Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798	Pumping Test Data Report		
	Project: Pruebas Hidraulicas P-20		
	Number: 123456		
	Client: Hidrogeocol S.A		Page 2
Data observed at: PO-20		Pumping Test: CONSTANTE	
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20	
Depth to Static WL: 13.86 [m]		Casing radius: 0.1 [m]	
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]	
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]	
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 160 [m]	
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]
32	120	68.77	54.91
33	140	68.77	54.91
34	160	68.77	54.91
35	180	68.77	54.91
36	210	68.79	54.93
37	240	68.77	54.91
38	270	68.77	54.91
39	300	68.77	54.91
40	360	68.77	54.91
41	420	68.77	54.91
42	480	68.77	54.91
43	540	68.77	54.91
44	600	68.78	54.92
45	660	68.77	54.91
46	720	68.77	54.91
47	780	68.77	54.91
48	840	68.77	54.91
49	900	68.77	54.91
50	960	68.77	54.91
51	1020	68.77	54.91
52	1080	68.77	54.91
53	1140	68.77	54.91
54	1200	68.77	54.91
55	1260	68.77	54.91
56	1320	68.77	54.91
57	1380	68.77	54.91
58	1440	68.77	54.91



Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101

Waterloo, Ontario, Canada

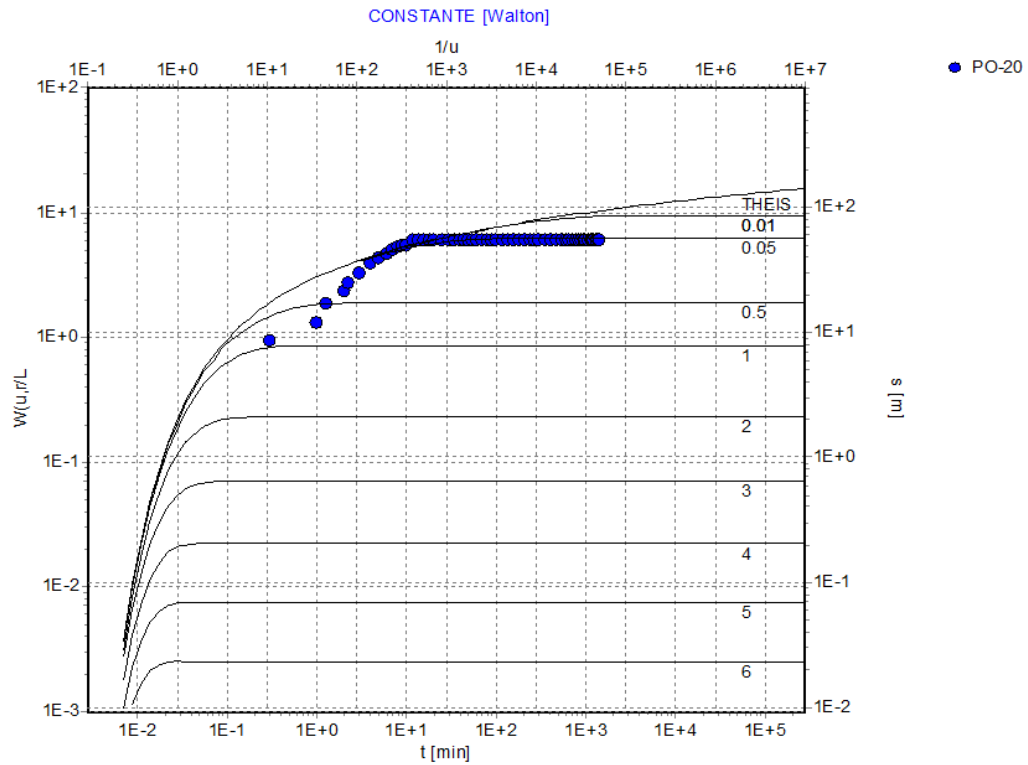
Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-20

Number: 123456

Client: Hidrogeocol S.A



Pumping Test: **CONSTANTE**


Analysis Method: **Walton**


<u>Analysis Results:</u>	Transmissivity:	3.97E+0 [m ² /d]	Conductivity:	2.48E-2 [m/d]
	Storativity:	1.52E-5	c:	7.35E+7 [m/in]

<u>Test parameters:</u>	Pumping Well:	P-20	Aquifer Thickness:	160 [m]
	Casing radius:	0.1 [m]	r/L:	0.01
	Screen length:	54 [m]		
	Boring radius:	0.15 [m]		
	Discharge Rate:	5.3 [l/s]		

Comments: Acuífero captado: Calizas de Vijas Inferior
 Profundidad del pozo: 175 m
 Diametro del pozo: 8 pulg

Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-20	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-20		Pumping Test: RECUPERACION		
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20		
Depth to Static WL: 13.86 [m]		Casing radius: 0.1 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]		
Date: 31/03/2014		Aquifer Thickness: 160 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	68.77	54.91	
2	0.3	67.64	53.78	
3	1	62.82	48.96	
4	1.3	58.00	44.14	
5	2	54.00	40.14	
6	2.3	49.15	35.29	
7	3	46.22	32.36	
8	4	41.43	27.57	
9	5	34.72	20.86	
10	6	30.85	16.99	
11	7	27.73	13.87	
12	8	25.36	11.50	
13	9	23.56	9.70	
14	10	22.08	8.22	
15	12	20.45	6.59	
16	14	19.43	5.57	
17	16	18.77	4.91	
18	18	18.36	4.50	
19	20	18.06	4.20	
20	25	17.56	3.70	
21	30	17.21	3.35	
22	35	16.94	3.08	
23	40	16.76	2.90	
24	45	16.58	2.72	
25	50	16.43	2.57	
26	55	16.30	2.44	
27	60	16.19	2.33	
28	70	16.00	2.14	
29	80	15.75	1.89	
30	90	15.66	1.80	
31	100	15.59	1.73	

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-20	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 2
Data observed at: PO-20		Pumping Test: RECUPERACION		
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20		
Depth to Static WL: 13.86 [m]		Casing radius: 0.1 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]		
Date: 31/03/2014		Aquifer Thickness: 160 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
32	120	15.35	1.49	
33	140	15.21	1.35	
34	160	15.13	1.27	
35	180	14.95	1.09	
36	210	14.66	0.80	

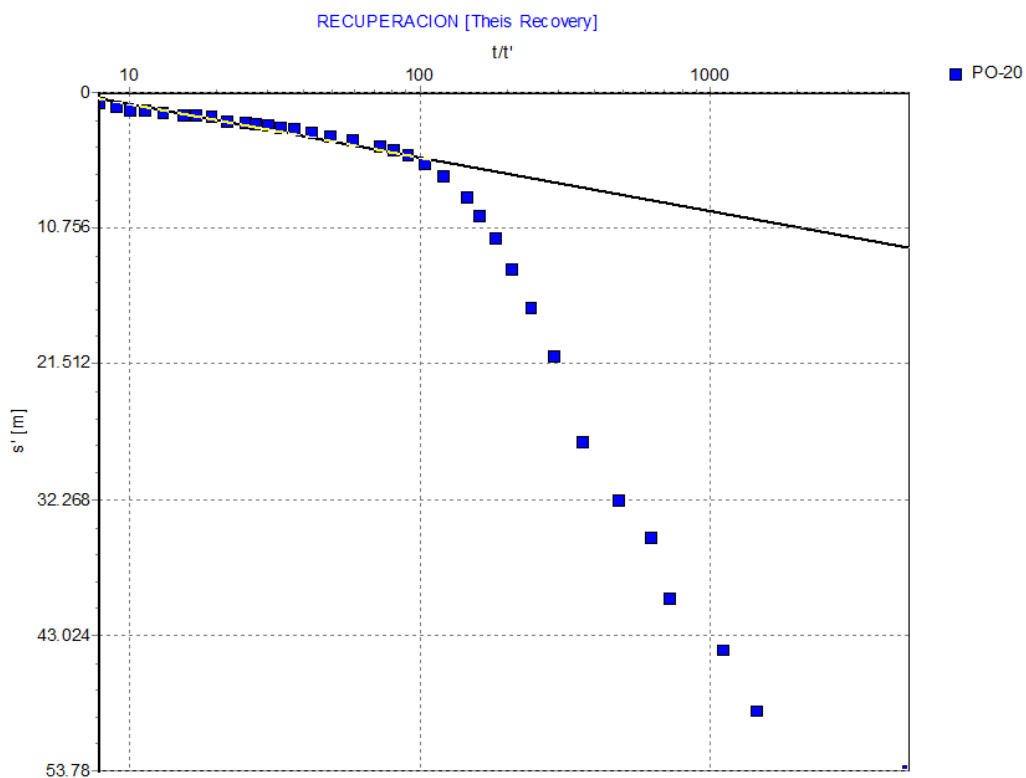


Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-20
 Number: 123456
 Client: Hidrogeocol S.A



Pumping Test: **RECUPERACION**


Analysis Method: **Theis Recovery**


Analysis Results: Transmissivity: 1.98E+1 [m²/d] Conductivity: 1.24E-1 [m/d]

Test parameters: Pumping Well: P-20 Aquifer Thickness: 160 [m]
 Casing radius: 0.1 [m] Confined Aquifer
 Screen length: 54 [m]
 Boring radius: 0.15 [m]
 Discharge Rate: 5.3 [l/s]
 Pumping Time: 1440 [min]

Comments: Acuífero captado: Calizas de Vijas inferior
 Profundidad del pozo: 175 m
 Diametro del pozo: 8 pulg

Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014

 Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798	Pumping Test Data Report		
	Project: Pruebas Hidraulicas P-20		
	Number: 123456		
	Client: Hidrogeocol S.A		Page 1
Data observed at: PO-20		Pumping Test: ESCALONADA	
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20	
Depth to Static WL: 14.66 [m]		Casing radius: 0.1 [m]	
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]	
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]	
Date: 10/12/2013		Aquifer Thickness: 160 [m]	
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]
1	0	14.66	0.00
2	0.3	16.58	1.92
3	1	17.98	3.32
4	1.3	18.64	3.98
5	2	19.49	4.83
6	2.3	19.94	5.28
7	3	20.32	5.66
8	4	20.92	6.26
9	5	21.42	6.76
10	6	21.74	7.08
11	7	22.01	7.35
12	8	22.21	7.55
13	9	22.34	7.68
14	10	22.45	7.79
15	12	22.65	7.99
16	14	22.72	8.06
17	16	22.78	8.12
18	18	22.86	8.20
19	20	22.95	8.29
20	25	22.98	8.32
21	30	23.06	8.40
22	35	23.08	8.42
23	40	23.11	8.45
24	45	23.17	8.51
25	50	23.21	8.55
26	55	23.25	8.59
27	60	23.29	8.63
28	60.3	24.71	10.05
29	61	25.42	10.76
30	61.3	26.11	11.45
31	62	26.70	12.04

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-20	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 2
Data observed at: PO-20		Pumping Test: ESCALONADA		
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20		
Depth to Static WL: 14.66 [m]		Casing radius: 0.1 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]		
Date: 10/12/2013		Aquifer Thickness: 160 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
32	62.3	27.19	12.53	
33	63	27.58	12.92	
34	64	28.33	13.67	
35	65	28.66	14.00	
36	66	28.99	14.33	
37	67	29.21	14.55	
38	68	29.39	14.73	
39	69	29.62	14.96	
40	70	29.24	14.58	
41	72	29.96	15.30	
42	74	30.08	15.42	
43	76	30.08	15.42	
44	78	30.09	15.43	
45	80	30.09	15.43	
46	85	30.24	15.58	
47	90	30.32	15.66	
48	95	30.43	15.77	
49	100	30.53	15.87	
50	105	30.61	15.95	
51	110	30.63	15.97	
52	115	30.68	16.02	
53	120	30.72	16.06	
54	120.3	35.30	20.64	
55	121	37.91	23.25	
56	121.3	40.51	25.85	
57	122	42.32	27.66	
58	122.3	44.46	29.80	
59	123	46.19	31.53	
60	124	48.16	33.50	
61	125	49.13	34.47	
62	126	51.19	36.53	



Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Data Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-20
 Number: 123456
 Client: Hidrogeocol S.A

Data observed at: PO-20		Pumping Test: ESCALONADA	
Distance from PW: 4.5 [m]		Pumping Well: P-20	
Depth to Static WL: 14.66 [m]		Casing radius: 0.1 [m]	
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.15 [m]	
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 54 [m]	
Date: 10/12/2013		Aquifer Thickness: 160 [m]	
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]
63	127	55.13	40.47
64	128	56.30	41.64
65	129	57.36	42.70
66	130	58.16	43.50
67	132	59.73	45.07
68	134	60.81	46.15
69	136	61.77	47.11
70	138	62.56	47.90
71	140	63.16	48.50
72	145	64.50	49.84
73	150	65.51	50.85
74	155	65.92	51.26
75	160	66.79	52.13
76	165	67.58	52.92
77	170	67.90	53.24
78	175	68.02	53.36
79	180	67.94	53.28



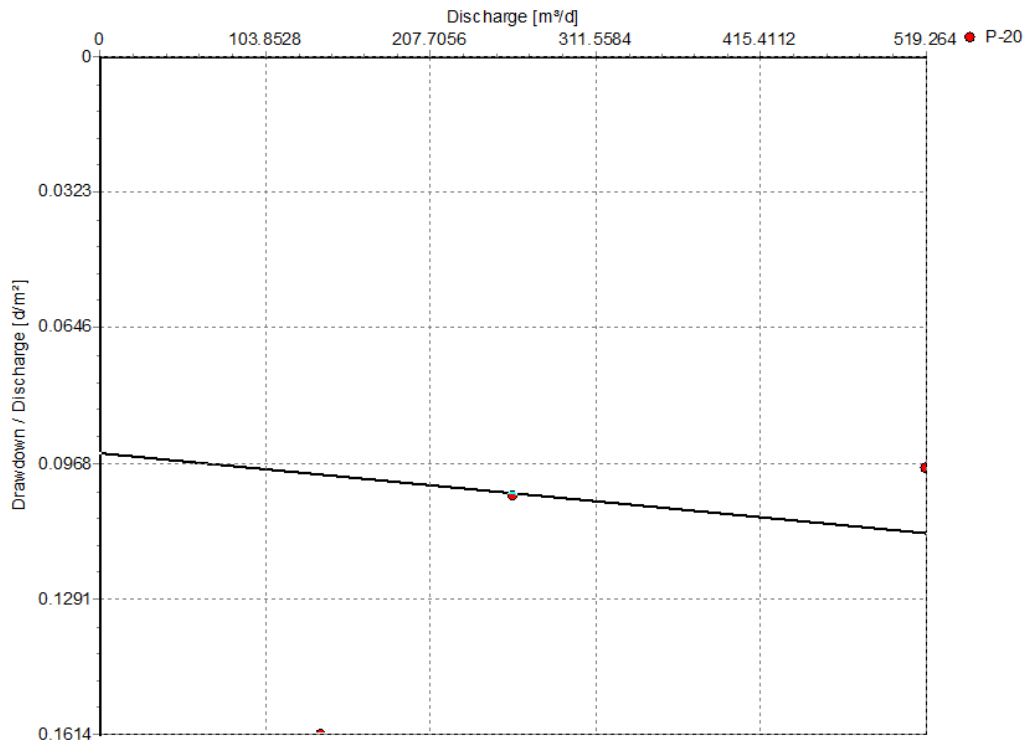
Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-20
 Number: 123456
 Client: Hidrogeocol S.A

ESCALONADA [Hantush-Bierschenk Well Loss]



Pumping Test: **ESCALONADA**

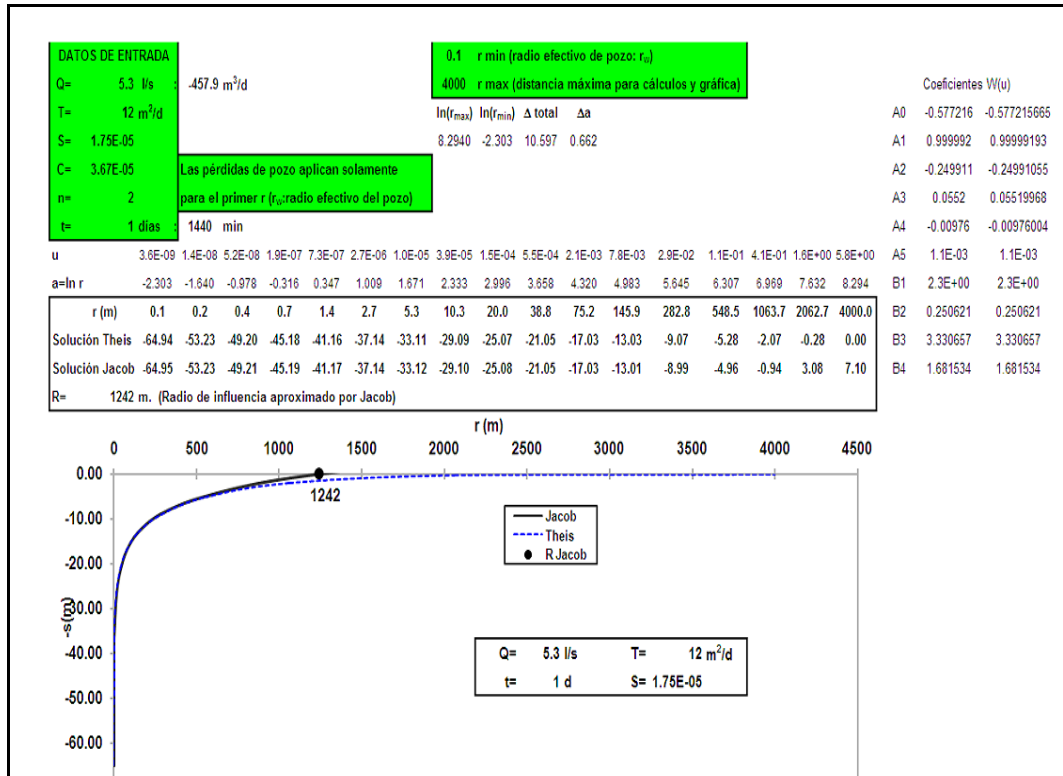
Analysis Method: **Hantush-Bierschenk Well Loss**

Analysis Results: B: 9.43E-2 [d/m²] C: 3.67E-5 [d²/m5]

<u>Test parameters:</u>	Pumping Well:	P-20	Aquifer Thickness:	160 [m]
	Casing radius:	0.1 [m]	Time Interval:	10
	Screen length:	54 [m]	No. of Steps:	3
	Boring radius:	0.15 [m]		
	Discharge Rate:	306.144 [m³/d]		
	No. of Points:	26		


Comments: Acuífero captado: Calizas de Vijas Inferior
 Profundidad del pozo: 175 m
 Diámetro del pozo: 8 pulg


Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014



CURVA DEL RADIO DE INFLUENCIA GENERADO POR EL POZO P-20 PARA UN CAUDAL DE 5.3 l/s Y TIEMPO DE BOMBEO DE 24 horas/día

ANEXO B. Datos y resultados gráficos de pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación ejecutadas en los pozos p-22 y p-23 que captan el acuífero calizas de vijes superior y el acuitardo deposito fluvio coluvial.

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22	
			Number: 133456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-22		Pumping Test: CONSTANTE		
Distance from PW: 1.5 [m]		Pumping Well: P-22		
Depth to Static WL: 14.63 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: JorgeAbril		Screen length: 33 [m]		
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 33 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	14.63	0.00	
2	0.3	23.88	9.25	
3	1	26.29	11.66	
4	1.3	26.90	12.27	
5	2	27.51	12.88	
6	2.3	28.07	13.44	
7	3	28.45	13.82	
8	4	28.77	14.14	
9	5	29.04	14.41	
10	6	29.55	14.92	
11	7	31.28	16.65	
12	8	31.80	17.17	
13	9	31.99	17.36	
14	10	32.19	17.56	
15	12	32.38	17.75	
16	14	32.54	17.91	
17	16	32.68	18.05	
18	18	32.72	18.09	
19	20	32.31	17.68	
20	25	32.68	18.05	
21	30	32.71	18.08	
22	35	32.53	17.90	
23	40	32.64	18.01	
24	45	32.76	18.13	
25	50	32.78	18.15	
26	55	32.88	18.25	
27	60	32.91	18.28	
28	70	32.93	18.30	
29	80	33.00	18.37	
30	90	33.09	18.46	
31	100	33.16	18.53	

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22	
			Number: 133456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 2
Data observed at: PO-22		Pumping Test: CONSTANTE		
Distance from PW: 1.5 [m]		Pumping Well: P-22		
Depth to Static WL: 14.63 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: JorgeAbril		Screen length: 33 [m]		
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 33 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
32	120	33.13	18.50	
33	140	33.18	18.55	
34	160	33.18	18.55	
35	180	32.25	17.62	
36	210	33.76	19.13	
37	240	33.58	18.95	
38	270	33.45	18.82	
39	300	33.45	18.82	
40	360	33.18	18.55	
41	420	33.18	18.55	
42	480	33.37	18.74	
43	540	33.33	18.70	
44	600	33.63	19.00	
45	660	32.80	18.17	
46	720	32.80	18.17	

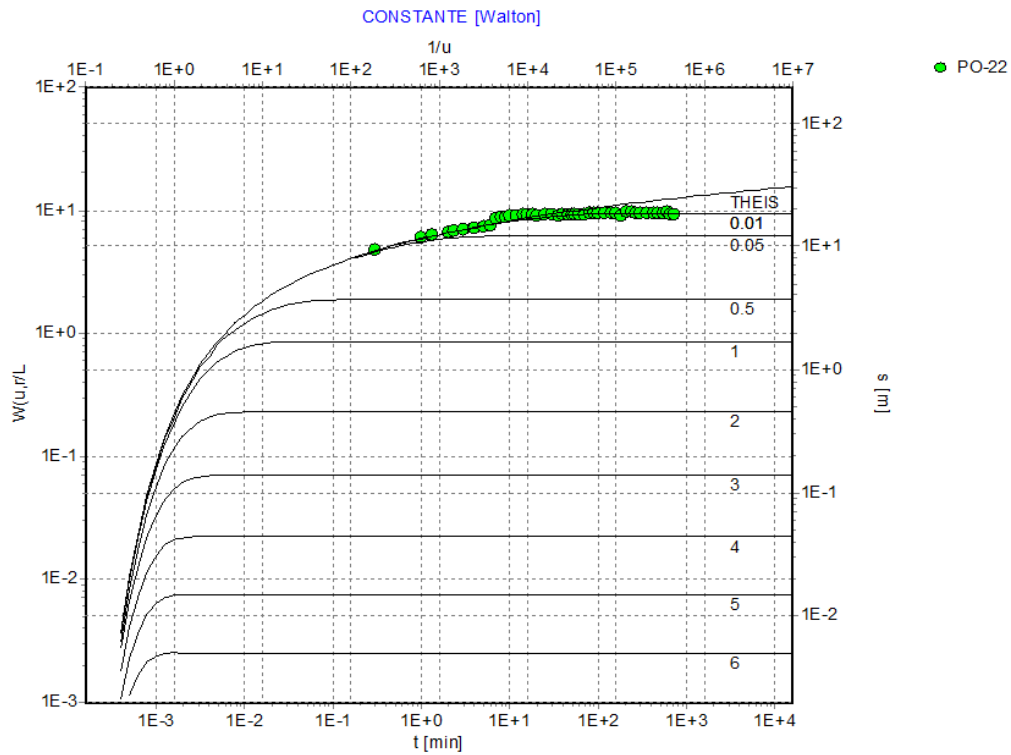


Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22
 Number: 133456
 Client: Hidrogeocol S.A



Pumping Test: **CONSTANTE**


Analysis Method: **Walton**

<u>Analysis Results:</u>	Transmissivity:	1.91E+1 [m ² /d]	Conductivity:	5.80E-1 [m/d]
	Storativity:	3.72E-5	c:	1.69E+6 [m in]

<u>Test parameters:</u>	Pumping Well:	P-22	Aquifer Thickness:	33 [m]
	Casing radius:	0.05 [m]	r/L:	0.01
	Screen length:	33 [m]		
	Boring radius:	0.076 [m]		
	Discharge Rate:	5.5 [l/s]		

Comments: Acuífero captado: Calizas de Vies Superior
 Profundidad del pozo: 120 m
 Diametro del pozo: 4 pulg

Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22	
			Number: 133456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-22		Pumping Test: RECUPERACION		
Distance from PW: 1.5 [m]		Pumping Well: P-22		
Depth to Static WL: 14.63 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La calera, cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 33 [m]		
Date: 10/03/2014		Aquifer Thickness: 33 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	32.80	18.17	
2	0.3	27.50	12.87	
3	1	26.16	11.53	
4	1.3	25.72	11.09	
5	2	24.91	10.28	
6	2.3	23.89	9.26	
7	3	22.95	8.32	
8	4	21.22	6.59	
9	5	20.88	6.25	
10	6	20.07	5.44	
11	7	19.87	5.24	
12	8	19.51	4.88	
13	9	19.41	4.78	
14	10	19.12	4.49	
15	12	19.02	4.39	
16	14	18.87	4.24	
17	16	18.53	3.90	
18	18	18.13	3.50	
19	20	17.73	3.10	
20	25	17.35	2.72	
21	30	17.19	2.56	
22	35	16.99	2.36	
23	40	15.86	1.23	
24	45	15.75	1.12	
25	50	15.36	0.73	
26	55	15.16	0.53	
27	60	14.99	0.36	
28	70	14.96	0.33	

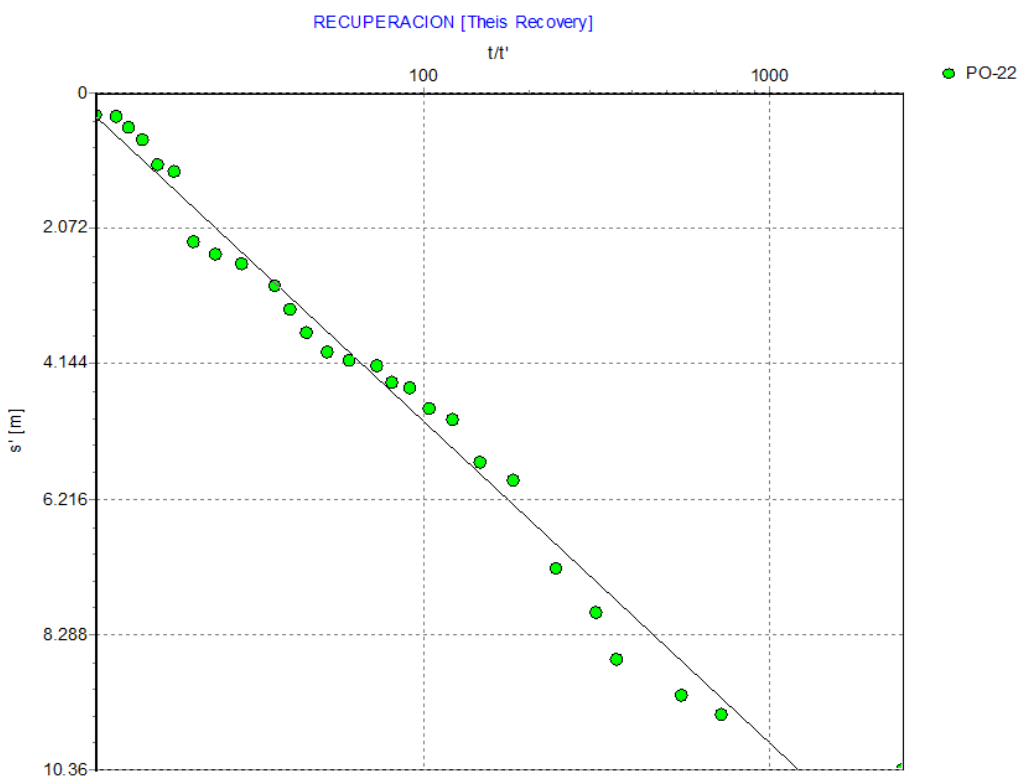


Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: PRUEBAS HIDRAULICAS P-22
 Number: 133456
 Client: Hidrogeocol S.A



Pumping Test: **RECUPERACION**

Analysis Method: **Theis Recovery**

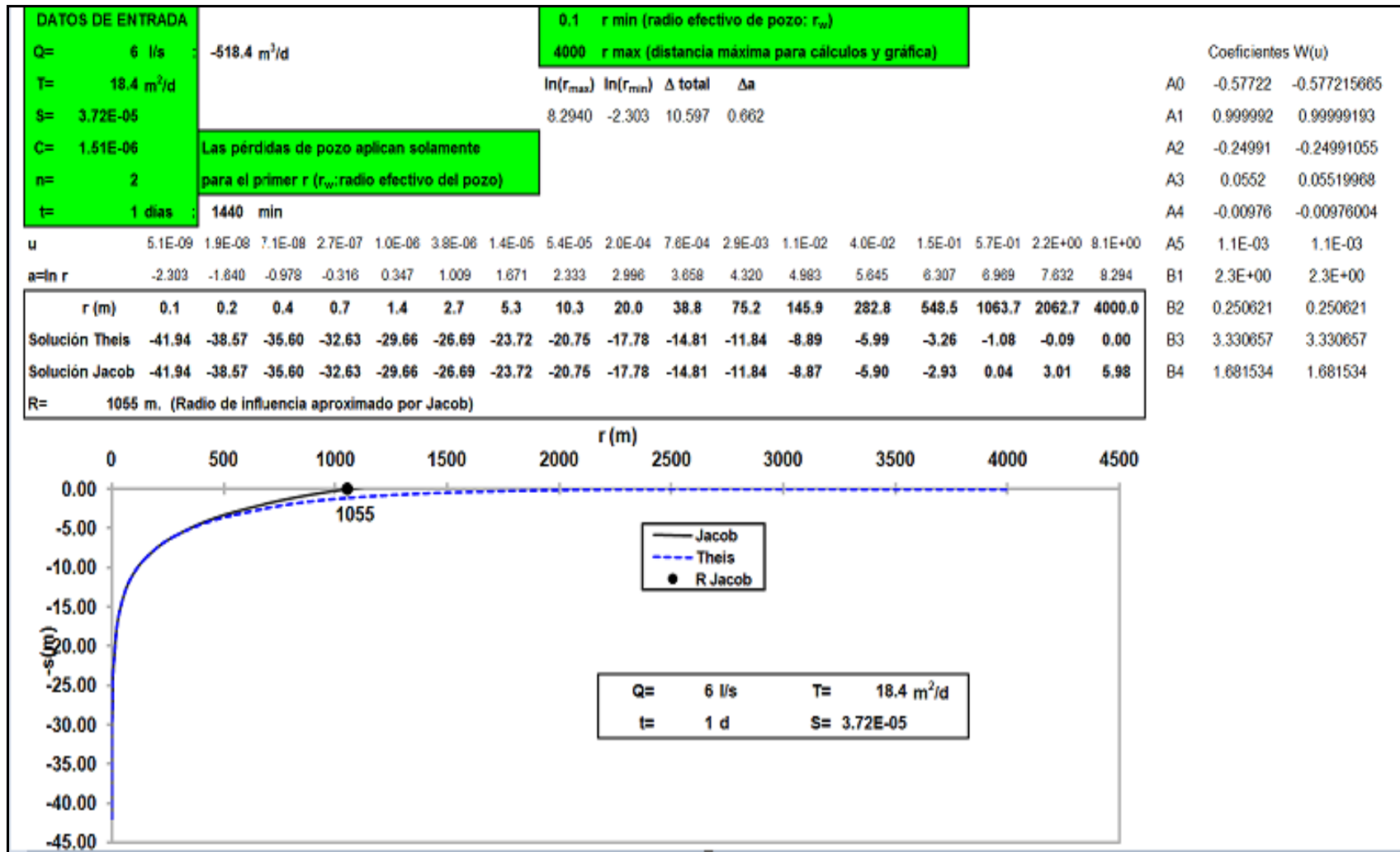
Analysis Results: Transmissivity: 1.77E+1 [m²/d] Conductivity: 5.35E-1 [m/d]

Test parameters:


Pumping Well:	P-22	Aquifer Thickness:	33 [m]
Casing radius:	0.05 [m]	Unconfined Aquifer	
Screen length:	33 [m]		
Boring radius:	0.076 [m]		
Discharge Rate:	5.5 [l/s]		
Pumping Time	720 [min]		


Comments: Acuífero captado: Calizas de Vjjes Superior
 Profundidad del pozo: 120 m
 Diametro del pozo: 4 pulg

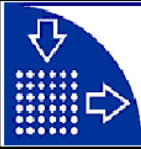
Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014



CURVA DEL RADIO DE INFLUENCIA GENERADO POR EL POZO P-22 PARA UN CAUDAL DE 6.0 l/s Y TIEMPO DE BOMBEO DE 24 horas/día

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-23	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-23		Pumping Test: CONSTANTE		
Distance from PW: 1.3 [m]		Pumping Well: P-23		
Depth to Static WL: 24.16 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La Calera, Cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 36 [m]		
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 36 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	24.16	0.00	
2	0.3	27.81	3.65	
3	1	30.18	6.02	
4	1.3	33.24	9.08	
5	2	35.77	11.61	
6	2.3	37.61	13.45	
7	3	39.03	14.87	
8	4	41.31	17.15	
9	5	43.08	18.92	
10	6	44.45	20.29	
11	7	45.62	21.46	
12	8	46.64	22.48	
13	9	47.78	23.62	
14	10	48.98	24.82	
15	12	50.61	26.45	
16	14	52.20	28.04	
17	16	53.75	29.59	
18	18	54.88	30.72	
19	20	55.86	31.70	
20	25	58.02	33.86	
21	30	59.84	35.68	
22	35	61.28	37.12	
23	40	62.47	38.31	
24	45	63.50	39.34	
25	50	63.90	39.74	
26	55	63.80	39.64	
27	60	63.87	39.71	
28	70	64.33	40.17	
29	80	65.23	41.07	
30	90	66.11	41.95	
31	100	66.74	42.58	

 Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798	Pumping Test Data Report		
	Project: Pruebas Hidraulicas P-23		
	Number: 123456		
	Client: Hidrogeocol S.A	Page 2	
Data observed at: PO-23		Pumping Test: CONSTANTE	
Distance from PW: 1.3 [m]		Pumping Well: P-23	
Depth to Static WL: 24.16 [m]		Casing radius: 0.05 [m]	
Location: La Calera, Cali		Boring radius: 0.076 [m]	
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 36 [m]	
Date: 30/03/2014		Aquifer Thickness: 36 [m]	
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]
32	120	67.56	43.40
33	140	68.63	44.47
34	160	68.78	44.62
35	180	70.13	45.97
36	210	70.07	45.91
37	240	64.87	40.71
38	270	64.07	39.91
39	300	64.21	40.05
40	360	64.50	40.34
41	420	65.26	41.10
42	480	65.48	41.32
43	540	65.95	41.79
44	600	67.48	43.32
45	660	67.44	43.28
46	720	67.45	43.29

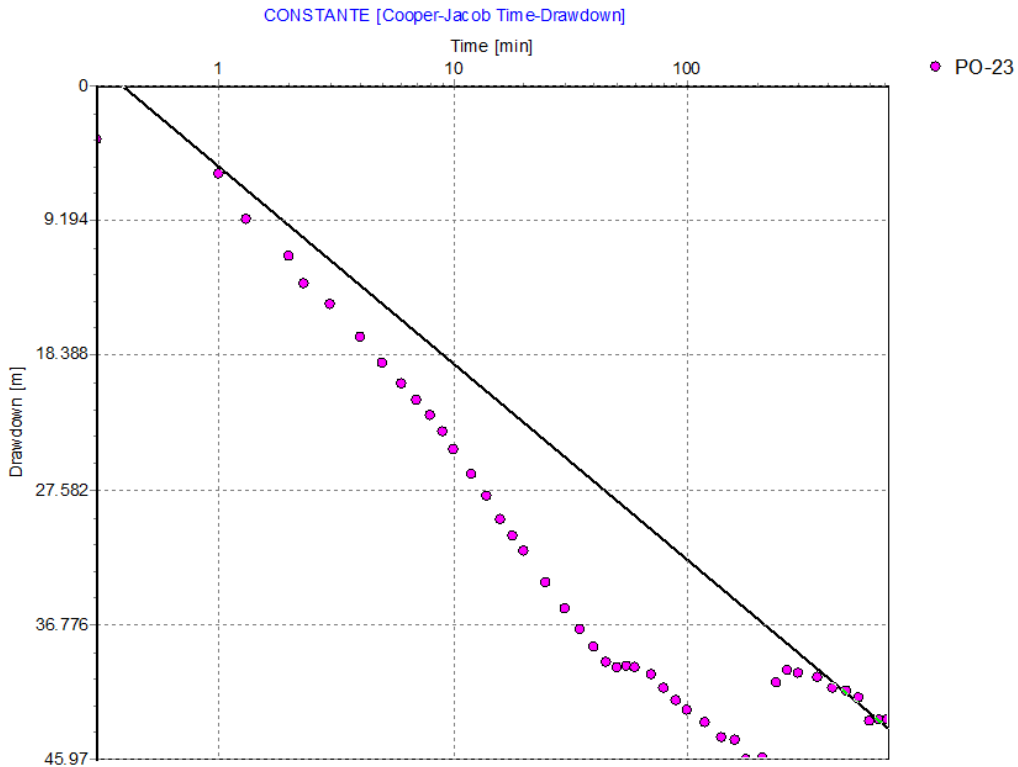


Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-23
 Number: 123456
 Client: Hidrogeocol S.A




Pumping Test: **CONSTANTE**
Analysis Method: **Cooper-Jacob Time-Drawdown**


<u>Analysis Results:</u>	Transmissivity:	7.90E-1 [m ² /d]	Conductivity:	2.20E-2 [m/d]
	Storativity:	2.84E-4		

<u>Test parameters:</u>	Pumping Well:	P-23	Aquifer Thickness:	36 [m]
	Casing radius:	0.05 [m]	Confined Aquifer	
	Screen length:	36 [m]		
	Boring radius:	0.076 [m]		
	Discharge Rate:	0.67 [l/s]		

Comments:

Evaluated by:
 Evaluation Date: 01/04/2014

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-23	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 1
Data observed at: PO-23		Pumping Test: RECUPERACION		
Distance from PW: 1.3 [m]		Pumping Well: P-23		
Depth to Static WL: 24.16 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La Calera, Cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 36 [m]		
Date: 10/03/2014		Aquifer Thickness: 36 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
1	0	67.57	43.41	
2	0.3	61.92	37.76	
3	1	59.13	34.97	
4	1.3	56.09	31.93	
5	2	54.33	30.17	
6	2.3	52.67	28.51	
7	3	50.73	26.57	
8	4	46.60	22.44	
9	5	45.15	20.99	
10	6	43.04	18.88	
11	7	41.35	17.19	
12	8	39.65	15.49	
13	9	38.32	14.16	
14	10	37.28	13.12	
15	12	35.28	11.12	
16	14	33.88	9.72	
17	16	32.88	8.72	
18	18	31.74	7.58	
19	20	31.20	7.04	
20	25	30.30	6.14	
21	30	29.67	5.51	
22	35	29.03	4.87	
23	40	28.84	4.68	
24	45	28.56	4.40	
25	50	28.44	4.28	
26	55	28.27	4.11	
27	60	28.10	3.94	
28	70	27.90	3.74	
29	80	27.60	3.44	
30	90	27.40	3.24	
31	100	27.24	3.08	

	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Philip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada Phone: +1 519 746 1798		Pumping Test Data Report	
			Project: Pruebas Hidraulicas P-23	
			Number: 123456	
			Client: Hidrogeocol S.A	Page 2
Data observed at: PO-23		Pumping Test: RECUPERACION		
Distance from PW: 1.3 [m]		Pumping Well: P-23		
Depth to Static WL: 24.16 [m]		Casing radius: 0.05 [m]		
Location: La Calera, Cali		Boring radius: 0.076 [m]		
Recorded by: Jorge Abril		Screen length: 36 [m]		
Date: 10/03/2014		Aquifer Thickness: 36 [m]		
	Time [min]	Depth to WL [m]	Drawdown [m]	
32	120	26.95	2.79	
33	140	26.70	2.54	

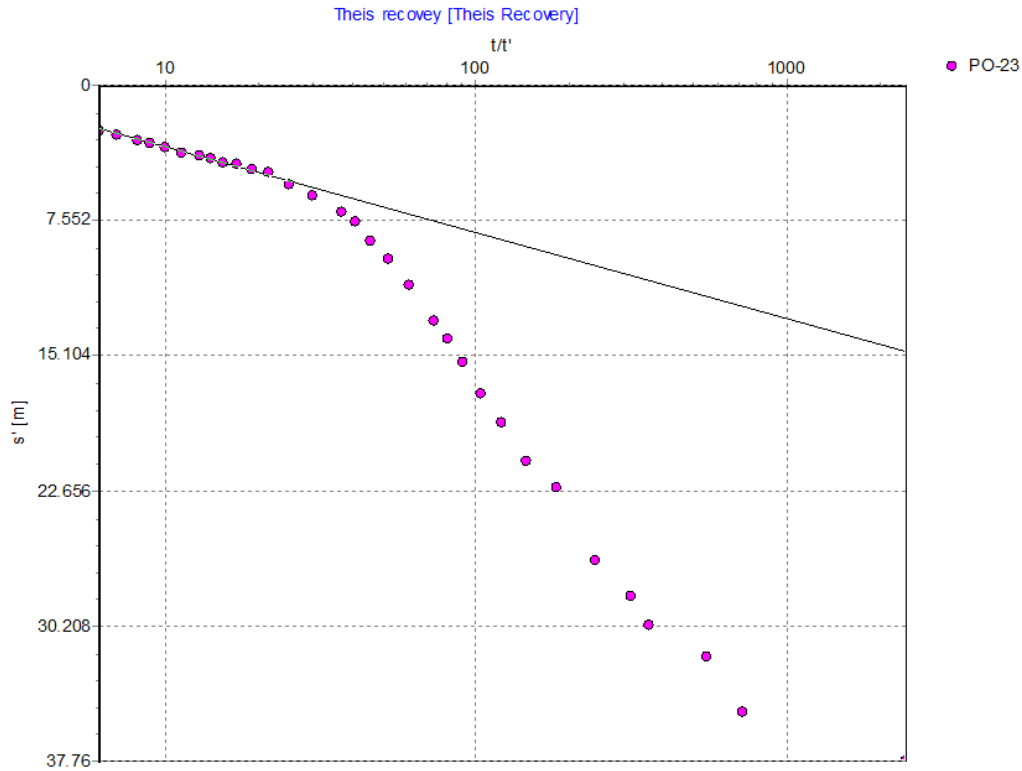


Waterloo Hydrogeologic, Inc.

460 Philip Street - Suite 101
 Waterloo, Ontario, Canada
 Phone: +1 519 746 1798

Pumping Test Analysis Report

Project: Pruebas Hidraulicas P-23
 Number: 123456
 Client: Hidrogeocol S.A



Pumping Test: **RECUPERACION**

Analysis Method: **Theis Recovery**

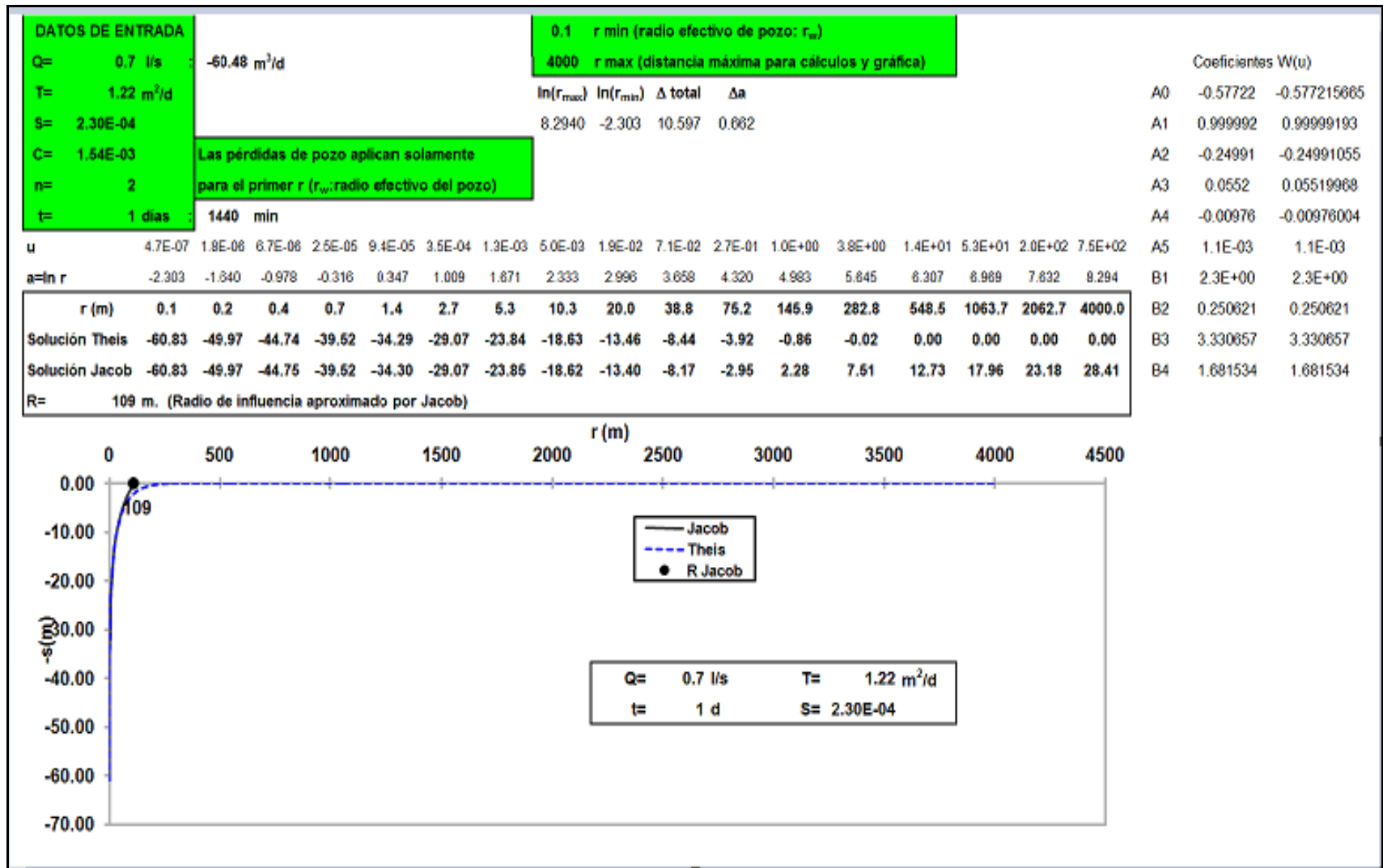
Analysis Results: Transmissivity: 2.21E+0 [m²/d] Conductivity: 6.15E-2 [m/d]

Test parameters:

Pumping Well:	P-23	Aquifer Thickness:	36 [m]
Casing radius:	0.05 [m]	Confined Aquifer:	
Screen length:	36 [m]		
Boring radius:	0.076 [m]		
Discharge Rate:	0.67 [l/s]		
Pumping Time:	720 [min]		

Comments: Acuifero captado: Deposito Fluvio Coluvial.
 Profundidad del pozo: 120 m
 Diametro: 4 pulg

Evaluated by: Jorge Abril
 Evaluation Date: 10/03/2014



CURVA DEL RADIO DE INFLUENCIA GENERADO POR EL POZO P-22 PARA UN CAUDAL DE 6.0 l/s Y TIEMPO DE BOMBEO DE 24 horas/día

**ANEXO C. Catalogo fotográfico del área de estudio (geología,
geomorfología)**

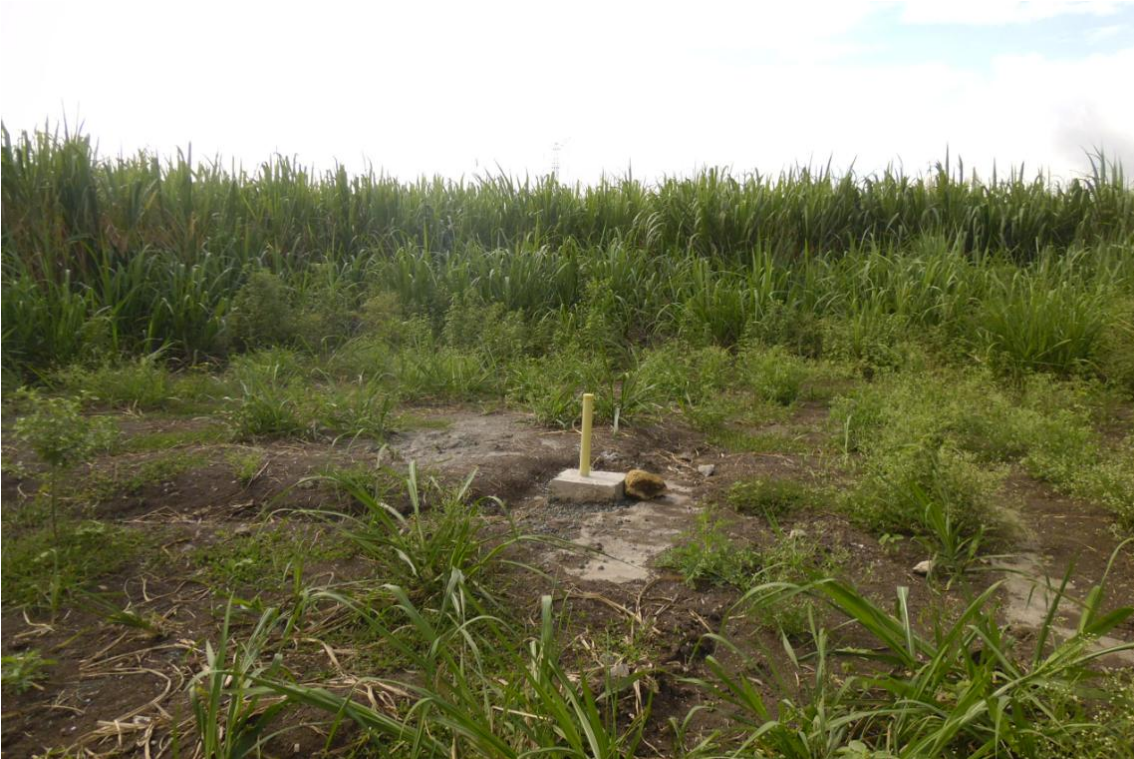


Foto 1 Localización del pozo de bombeo P-22, en la Mina la Calera



Foto 2 Morfología del área de estudio, al fondo paisaje de montaña alta a escarpada, paisaje de colina montañosa denudativa de rocas calizas y la parte plana correspondiente a depósitos del Cuaternario.



Foto 3. Afloramiento de basaltos pertenecientes a la Formación Volcánica (Kv), en la mina la Calera.



Foto 4. Afloramiento de la Formación Vijes, de edad Paleógeno, en la mina la Calera.



Foto 5. Afloramiento mostrando fallamiento de rocas volcánicas Basálticas con rocas de edad Paleógeno de la formación Vije



Foto 6. Deposito de origen fluvio coluvial asociado al Rio Cauca, cercano al piedemonte, donde tienen lugar las perforaciones P-20, P-22 y P-23.