

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EVALUAR EL
RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO CON FINES DE
ABASTECIMIENTO INDUSTRIAL EN ZONAS ALTOANDINAS –
SANTO TOMAS, CUZCO**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

KARLA GERALDINE CALDERÓN HIJUMA

Lima- Perú

2014

INDICE

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMEN..... | 4 |
| LISTA DE TABLAS..... | 6 |
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS..... | 8 |
| INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| CAPITULO I: MARCO TEÓRICO..... | 13 |
| 1.1 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ACUÍFEROS..... | 13 |
| 1.2 MODELOS MATEMÁTICOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 14 |
| 1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO | 15 |
| 1.4 ECUACIONES DE FLUJO | 15 |
| 1.4.1 Ecuación de Continuidad | 16 |
| 1.4.2 Ecuación de Cantidad de Movimiento..... | 16 |
| 1.4.3 Ley de Darcy | 17 |
| 1.5 INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES DE FLUJO | 17 |
| 1.6 CONDICIONES DE BORDE | 21 |
| 1.6.1 Condición de Dirichlet: Tipo I | 21 |
| 1.6.2 Condición de Neumann: Tipo II..... | 21 |
| 1.6.3 Condición de Cauchy: Tipo III | 22 |
| 1.7 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS | 22 |
| 1.8 LOS CÓDIGOS MODFLOW Y MODFLOW SURFACT..... | 24 |
| CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL Y DEL MODELO NUMÉRICO | 26 |
| 2.1 RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO | 26 |
| 2.2 GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO | 27 |
| 2.2.1 Basamento Rocosos y Techo del acuífero | 27 |
| 2.2.2 Límites de las formaciones..... | 27 |
| 2.2.3 Geometría de la napa freática..... | 28 |
| 2.2.4 Condiciones de frontera | 28 |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 28 |
| 2.3.1 Conductividad Hidráulica..... | 28 |

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2 | Coeficiente de Almacenamiento | 28 |
| 2.4 | INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA | 29 |
| 2.5 | CONSTRUCCIÓN DEL MODELO | 29 |
| 2.5.1 | Condiciones de Borde | 31 |
| 2.5.2 | Límite impermeable..... | 31 |
| 2.5.3 | Límite de carga constante | 31 |
| 2.5.4 | Límite de flujo impuesto | 31 |
| 2.5.5 | Extracciones por bombeo..... | 31 |
| 2.5.6 | Recarga | 31 |
| 2.5.7 | Ríos y drenes | 32 |
| 2.6 | FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL MODELO NUMÉRICO | 32 |
| 2.7 | CALIBRACIÓN DEL MODELO | 32 |
| 2.8 | ACCIONES SOBRE EL ACUÍFERO | 33 |
| CAPITULO III: CONDICIONES FÍSICAS DEL SITIO: DESCRIPCIÓN DE DATOS..... | | 34 |
| 3.1 | UBICACIÓN | 34 |
| 3.2 | CLIMA | 36 |
| 3.3 | GEOLOGÍA | 37 |
| 3.3.1 | Geología Regional..... | 37 |
| 3.3.2 | Geología Local | 37 |
| 3.4 | HIDROGEOLOGÍA | 40 |
| 3.4.1 | Reservorio Acuífero..... | 40 |
| 3.4.2 | Propiedades Hidráulicas | 41 |
| 3.4.3 | Niveles y Dirección del Flujo | 44 |
| 3.4.4 | Recarga y Descarga de Aguas Subterráneas | 46 |
| CAPITULO IV: MODELAMIENTO NUMÉRICO: ANÁLISIS Y RESULTADOS . | | 48 |
| 4.1 | MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO | 48 |
| 4.2 | CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO..... | 50 |
| 4.2.1 | Mallado | 51 |
| 4.2.2 | Propiedades Hidráulicas | 54 |
| 4.2.3 | Condiciones de Contorno..... | 56 |
| 4.2.4 | Calibración en Régimen Estacionario | 58 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS: SIMULACIONES PREDICTIVAS | 63 |
| 4.3.1 Evaluación de la Recarga Disponible | 63 |
| 4.3.2 Evaluación de los Descensos | 64 |
| CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 68 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 68 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 70 |
| ANEXOS | 72 |

RESUMEN

Unos de los principales problemas que adolecen la industria minera ubicados en zonas altoandinos es el abastecimiento de agua para sus operaciones. Si bien el recurso hídrico superficial es significativo durante una parte del año el aspecto social es uno de los condicionantes para el aprovechamiento de dicho recurso, es por ello que se opta por la explotación del recurso hídrico subterráneo como fuente de suministro de agua para las operaciones mineras.

En el contexto de esta evaluación se encuentra un proyecto minero (en adelante, El Proyecto), el cual se sitúa en el departamento de Cuzco a una altitud promedio de 4900 msnm.

Con la finalidad de evaluar el recurso hídrico subterráneo del sector previamente citado se realizó una caracterización y modelamiento hidrogeológico del acuífero del valle de la quebrada Anrohuyjo. Para dicho sector se dispone información de mediciones de nivel de agua en los piezómetros existentes, pruebas de bombeo, mediciones de flujo superficial y de un mapeo hidrogeológico de la zona de estudio.

De la información disponible se identificó un sistema de tres unidades hidrogeológicas: 1 Depósitos Cuaternarios, 2 Roca Fracturada y, 3 Roca Competente. Sobre dicho sistema se consideraron como ingresos a la infiltración de la precipitación y a la descarga de agua subterránea a los drenajes superficiales.

Posteriormente este sistema fue llevado a un modelo numérico para:

1 Representar la condición actual del sistema y, 2 Evaluar el uso de agua subterránea a partir de simulaciones predictivas mediante pozos de bombeo.

Dicho modelamiento fue realizado mediante el código de diferencias finitas MODFLOW SURFACT 3.0 (Hydrogeologic 1997) que fue calibrado para las condiciones actuales reproduciendo de manera robusta el régimen hidrodinámico subterráneo de la zona de estudio.

Una vez calibrado el modelo fue sometido a simulaciones predictivas dando como resultado que: para el pozo de prueba sea bombeado a 11 L/s (demanda de agua para la operación) de manera continua por 9 años (periodo de operación de la mina). Para ello se implementó el modelo en régimen transitorio y se evaluaron los descensos. Los descensos estimados por el modelo alcanzan los 2 m a 0.8 km, 1 m a 1 km y 0.5 m a 1.7 km, por lo tanto no son considerados significativos y se puede concluir que el acuífero cuaternario del valle de Anrohuyjo puede cubrir las demandas de agua de la operación minera sin causar impacto significativo en el agua subterránea de manera sostenible.

LISTA DE TABLAS

| | | |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla II.1 | Datos necesarios para la implementación de un modelo | 26 |
| Tabla II.2 | Métodos para la obtención de datos para el modelamiento | 27 |
| Tabla II.3 | Valores típicos de conductividad hidráulica | 29 |
| Tabla III.1 | Estaciones meteorológicas más cercanas | 36 |
| Tabla III.2 | Resumen de Resultados de la Prueba de Bombeo en el Pozo TW-2 | 42 |
| Tabla III.3 | Resumen de Resultados de la Prueba de Bombeo en el Pozo TW-3 | 42 |
| Tabla III.4 | Resumen de Piezómetros y Pozos Existentes | 44 |
| Tabla III.5 | Resumen de Gradientes Verticales | 45 |
| Tabla III.6 | Resumen de mediciones de Flujo Base | 46 |
| Tabla IV.1 | Resumen de los Espesores y Profundidades de las Capas de Construcción de Modelo Numérico | 53 |
| Tabla IV.2 | Comparación de Cargas Hidráulicas Calculadas y Observadas | 60 |
| Tabla IV.3 | Resultados Estadísticos de la Calibración | 61 |
| Tabla IV.4 | Parámetros Calibrados | 61 |
| Tabla IV.5 | Resultados de Balanace de Masa de Modelo | 62 |
| Tabla IV.6 | Balance hasta el Pozo TW-3 | 63 |
| Tabla IV.7 | Datos de Periodos de Simulación | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura I.1 | Descripción del sistema acuífero | 14 |
| Figura I.2 | Representación del Volumen de Control para el desarrollo de las ecuaciones | 20 |
| Figura II.1 | Metodología para la discretización de acuíferos | 30 |
| Figura III.1 | Ubicación de la zona de estudio | 34 |
| Figura III.2 | Hidrografía Local Cuenca de la quebrada Anrohuyo..... | 35 |
| Figura III.3 | Geología Regional..... | 39 |
| Figura III.4 | Iso – espesor de Acuífero Cuaternario | 40 |
| Figura III.5 | Registro de Pruebas de Bombeo en Pozos TW-2 y TW-3 | 43 |
| Figura III.6 | Ubicación de Piezómetros | 45 |
| Figura III.7 | Ubicación de Puntos de Aforo de Flujo Base..... | 47 |
| Figura III.8 | Flujo Base vs Área de Aporte | 47 |
| Figura IV.1 | Funcionamiento Hidrodinámico Actual..... | 49 |
| Figura IV.2 | Funcionamiento Hidrodinámico durante Bombeo | 50 |
| Figura IV.3 | Discretización del Modelo..... | 52 |
| Figura IV.4 | Distribución de la Elevación del Terreno..... | 53 |
| Figura IV.5 | Distribución de Permeabilidad en Capa 1 | 55 |
| Figura IV.6 | Distribución de Permeabilidad en Capa 2 | 55 |
| Figura IV.7 | Distribución de Permeabilidad en Capa 3 | 56 |
| Figura IV.8 | Distribución de Recarga | 57 |
| Figura IV.9 | Distribución de Celdas tipo Dren | 59 |
| Figura IV.10 | Carga Hidráulica Calculada vs Observada | 60 |
| Figura IV.11 | Superficie Freática Simulada y Dirección del Flujo..... | 62 |
| Figura IV.12 | Sección del Modelo Numérico..... | 63 |
| Figura IV.13 | Área de aporte al TW-3..... | 64 |
| Figura IV.14 | Cono de Descensos a 7 días de iniciado el Bombeo..... | 66 |
| Figura IV.15 | Cono de Descensos a 14 días de iniciado el Bombeo..... | 66 |
| Figura IV.16 | Cono de Descensos a 30 días de iniciado el Bombeo..... | 67 |
| Figura IV.17 | Cono de Descensos a 60 días de iniciado el Bombeo..... | 67 |

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A | Área de la sección transversal al flujo. |
| C_b | Conductancia en el borde entre el reservorio acuífero y la fuente o sumidero de agua en el exterior. |
| D_b | Espesor de la capa de un acuífero. |
| h | Carga Hidráulica |
| K | Conductividad Hidráulica (Permeabilidad) |
| K_b | Conductividad hidráulica de la capa borde |
| Km | Kilómetro |
| k_{rw} | Conductividad hidráulica relativa, la cual es una función del grado de saturación |
| L/s | Litros por segundo |
| M | Masa de agua subterránea – Principio de Conservación de la masa |
| mm | milímetros |
| q | Caudal por unidad de área transversal al flujo. |
| q_n | Componente normal del flujo ubicado en el borde de la condición de borde. |
| q_x, q_y, q_z | Flujos por área de sección transversal en las direcciones de los ejes coordenados principales. |
| Q | Caudal del flujo en medio poroso |
| Re | Número adimensional de Reynolds. |
| S_s | Coefficiente de Almacenamiento Especifico |
| S_w | Grado de saturación. |
| t | Tiempo |
| V | Volumen |
| W | Flujo que sale o ingresa al volumen de control por unidad de volumen |
| ρ | Densidad del agua |
| dh/dl | Gradiente de carga hidráulica. |
| dx, dy, dz | Dimensiones de los lados del volumen de Control en dirección de los ejes coordenados principales. |
| x_b, y_b, z_b | Representa un punto en el contorno de la condición de borde. |
| \bar{n} | Vector unitario que sale perpendicularmente a la superficie de control |

| | |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $\partial h / \partial n$ | Gradiente de carga con respecto al eje normal en el borde de la condición de borde. |
| v | Vector velocidad del fluido |
| \emptyset | Porosidad drenable que puede ser tomada como el rendimiento específico |
| θ | Contenido de humedad |
| m.s.n.m. | Metros sobre el nivel del mar. |
| PSAD 56 | Datum provisional sudamericano de 1956 |
| RMS | Error Medio Cuadrático. |
| SENAMHI | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. |
| SEV | Sondajes eléctricos verticales. |
| UTM | Universal Transverse Mercator. |

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico subterráneo es de esencial importancia tanto para el consumo doméstico como para fines industriales. Durante los últimos 20 años el avance industrial se ha incrementado en el país debido al impulso económico que ha ido en aumento. Por tanto la industria demanda un mayor volumen de agua, en particular la industria minera que se ubica en los andes peruanos. Por lo que la infraestructura necesaria para desarrollar la minería debe adecuarse tanto a la geografía, al clima y a los recursos hídricos disponibles.

El hecho de que la actividad minera se sitúe en estas altitudes tiene muchas veces un problema asociado al déficit de agua superficial. Este problema se presenta principalmente en una parte del año (periodo de estiaje). Para contrarrestar el problema de escasez, se pueden plantear diferentes estrategias de manejo de agua superficial como tomas de agua, almacenamiento, embalses, etc., sin embargo, estas estrategias muchas veces no pueden ser llevadas a cabo debido a conflictos sociales y problemas medio ambientales.

Es por ese motivo que el estudio del recurso hídrico subterráneo se vuelve imprescindible para evaluar la viabilidad y disponibilidad de las operaciones industriales a elevadas altitudes.

En el contexto de esta evaluación se encuentra un proyecto minero (en adelante, El Proyecto), el cual se sitúa en el departamento de Cuzco a una altitud promedio de 4900 msnm.

Diversos estudios han sido desarrollados previamente con la finalidad de evaluar la viabilidad de El Proyecto, dentro de los cuales se encuentran estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos. Asimismo, y como parte de la Ingeniería de Factibilidad de las instalaciones mineras que se implementarían, se ha identificado y estimado las necesidades de agua fresca que El Proyecto requeriría para poder llevar adecuadamente las operaciones industriales en la zona de estudio.

Las necesidades de agua o demanda, alcanzan los 11 L/s de manera continua durante el periodo de operación. El periodo de operación estimado alcanzaría aproximadamente 9 años.

Descartada la posibilidad de emplear agua superficial para cubrir la demanda de agua para las operaciones debido al déficit durante temporada seca, se ha identificado un valle como potencial fuente de abastecimiento de agua al SE del emplazamiento de las instalaciones mineras. Es por ello que en el presente informe se detalla la metodología y análisis que permiten evaluar la zona de estudio como fuente de abastecimiento de agua para las operaciones mineras.

Los objetivos del presente estudio son los de:

- Evaluar la capacidad de abastecimiento de recurso hídrico subterráneo para satisfacer las necesidades de consumo tanto industrial como poblacional.
- Desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para evaluar la disponibilidad hídrica y su impacto ambiental en la zona de estudio.

El modelo hidrogeológico será construido e implementado mediante el código MODFLOW- SURFACT (Hidro-geologic, 1997), que es una versión mejorada de la muy usada MODFLOW (US. Geological Survey, 1996). Este modelo aplica los conceptos fundamentales que rigen la hidrodinámica del fluido en medios porosos tanto saturados como no saturados.

Por otro lado, el presente informe se ha subdividido en V capítulos los cuales enfocan los aspectos más relevantes del presente tema de investigación

El capítulo I, presenta las deducciones de las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo en medio poroso las cuales dan sustento a la aplicación del modelo numérico a emplear. Asimismo se describe el modelo matemático MODFLOW.

El capítulo II, contiene la metodología empleada para la construcción del modelo conceptual y posterior simulación del modelo numérico. Se detalla obtención de los datos necesarios para la construcción del modelo como los procedimientos para la calibración del modelo.

El capítulo III, se describe las características generales de la zona de estudio (Ubicación Geográfica, Clima, Geología, etc.) y la recopilación de información (Data Meteorológica, Aforos, niveles de flujo, etc) y su posterior tratamiento

(Pruebas de Bombeo, Gradientes Verticales, Recarga y Descarga, etc). A partir de estos datos se determinan los parámetros necesarios para la construcción y simulación del modelo.

El capítulo IV, se encuentra los pasos de la construcción del modelo conceptual y modelo numérico como la simulación del mismo y su posterior calibración. Asimismo se presentan los resultados obtenidos en la simulación del modelo.

Finalmente el capítulo V, presenta las conclusiones y recomendaciones de la investigación para una profundización del tema.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ACUÍFEROS

Un sistema es un conjunto de componentes físicos y geométricos el cual está sometido por agentes externos y que funcionan bajo leyes.

En este contexto incluimos al acuífero, ya que es un elemento hidráulico que funciona bajo sus leyes particulares.

El concepto de sistema acuífero utilizado en el presente trabajo, abarca los componentes físicos (tales como la permeabilidad, transmisividad, etc.) y geométricos (tales como los límites impermeables, la topografía del terreno y del basamento rocoso); los agentes externos que a su vez pueden ser controlados, por ejemplo la explotación o recarga del acuífero, y los no controlados tales como la influencia de factores hidrológicos y/o climáticos sobre el acuífero.

Asimismo el sistema acuífero está sujeto a una serie de restricciones que vendrían a ser las leyes de funcionamiento, tales como la ley de la conservación de la masa, La Segunda Ley de Newton y la Ley de Darcy.

Matemáticamente podemos representar al acuífero como un sistema cuyos elementos son representados mediante parámetros y variables (ver Figura N° 1.1). En el campo de los parámetros encontramos tanto a los componentes físicos y geométricos, es decir la permeabilidad, la transmisividad, la dispersividad, etc., y en el de las variables a las cargas hidráulicas, concentraciones o velocidades.

La idea de representar un sistema matemáticamente es la de encontrar un valor óptimo como puede ser el encontrar un máximo o mínimo. Según Llamas y Custodio (1976), en acuíferos no es posible resolver el problema de encontrar un valor óptimo. Lo que se suele hacer es simular el sistema ante varias alternativas de explotación y elegir la más conveniente.

1.2 MODELOS MATEMÁTICOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

Podemos definir un modelo como una simplificación del sistema que representa el comportamiento del mismo de una manera aproximada ante acciones a las que se somete.

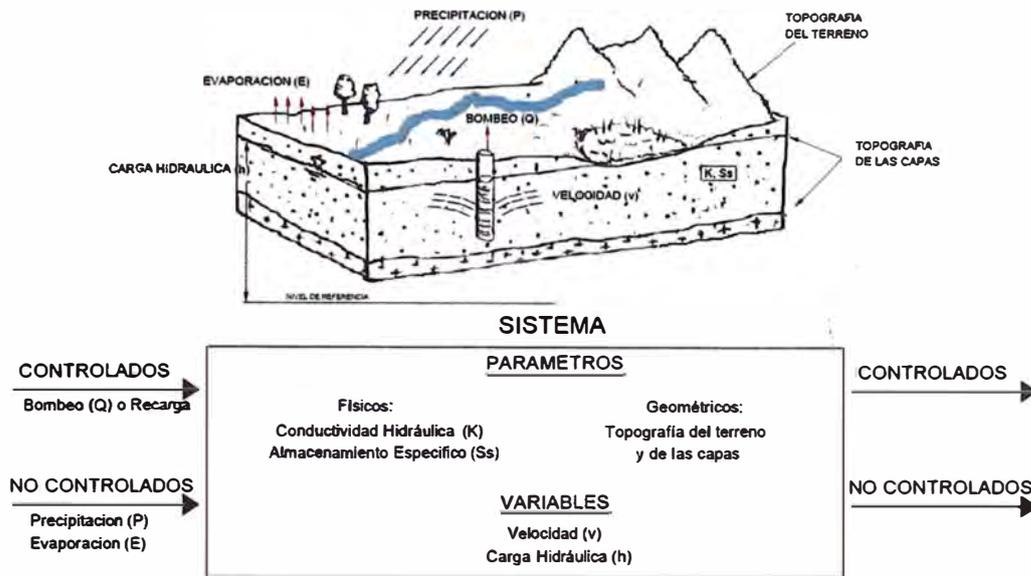


Figura I.1 Descripción del sistema acuífero

Fuente: Elaboración Propia, basada en Hidrología e Hidrogeología F. Javier Sánchez San Román- Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España, Sep 2013)

En aguas subterráneas los modelos pueden ser agrupados ampliamente en dos categorías: cantidad y calidad de agua.

Los modelos matemáticos, también llamados digitales, nos permiten reemplazar ecuaciones de flujo por sistemas de ecuaciones lineales cuyas variables son estimadas en un número finito de puntos.

Dada la variabilidad de las propiedades de los acuíferos y la complejidad de las condiciones de borde, la solución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento del flujo subterráneo, se hace imposible obtenerlas directamente. Por tal motivo se emplean métodos numéricos que nos permiten obtener las soluciones numéricas en forma aproximada.

Existen diversos métodos de solución tales como:

- Método de Diferencias Finitas

- Método de las Características
- Método de Elementos Finitos

El presente trabajo está enfocado a desarrollar un modelo que se ubica en la categoría de cantidad de agua, y aplicaremos el método de las diferencias finitas para la resolución del mismo.

1.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

El agua subterránea se mueve a través de la sub superficie de áreas de mayor carga hidráulica a áreas de menor carga hidráulica. El movimiento de agua subterránea depende de la pendiente de la carga hidráulica (gradiente hidráulica) y de las propiedades intrínsecas tanto del agua como del sistema acuífero. Esta gradiente es generada por efecto de la conductividad hidráulica que actúa homológamente a la fricción en tuberías o canales como pérdida de carga.

El movimiento de un líquido en general puede ser clasificado por su régimen como laminar o turbulento. En el movimiento laminar, el movimiento del agua es ordenado y uniforme con bajas velocidades donde predominan las fuerzas viscosas; en el movimiento turbulento, tienen lugar los remolinos, movimientos irregulares y con velocidades considerables. Hablando propiamente del movimiento del agua subterránea, el comportamiento de este es el de un movimiento laminar, que se verifica por las velocidades reducidas a la que se mueve.

Otros de los factores al cual está relacionado directamente el agua subterránea es la topografía. Existe una relación directa entre la topografía, el movimiento y forma del agua subterránea. Este sigue un patrón similar al de la forma del terreno natural y tiene una respuesta inmediata ante variaciones del terreno, por ejemplo en las construcciones de drenes, cuando se modifica el terreno por los trabajos realizados encuentra una inmediata respuesta en el nivel freático. En conclusión el agua subterránea y su movimiento dependen tanto de las propiedades del material poroso, del agua y de la topografía.

1.4 ECUACIONES DE FLUJO

Para explicar y predecir el movimiento del flujo en medios porosos y deducir la ecuación general, es preciso explicar las leyes que gobiernan el sistema.

El flujo en medios porosos es un caso especial de la mecánica de fluidos y está gobernada básicamente por dos leyes de la física, La Ley de Continuidad y la Segunda Ley de Newton o de la Cantidad de Movimiento. Estas dos leyes nos explica básicamente el movimiento de la masa de agua contenida en un medio poroso. Sin embargo también debemos aplicar la Ley de Darcy que es un caso particular de la Segunda Ley de Newton.

1.4.1 Ecuación de Continuidad

Es la primera ley fundamental del flujo de aguas subterráneas. Esta ley expresa el principio de la conservación de la masa, es decir que la masa de agua contenida en el material poroso por la que atraviesa se mantiene constante en el volumen de control.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(\theta \cdot \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz)}{dt} = 0 \quad (1.1)$$

Donde:

M : Masa de agua subterránea (M)

θ : Contenido de humedad.

ρ : Densidad del agua. (M/L³)

dx , dy y dz : Dimensiones de los lados del volumen de control infinitesimal en dirección de los ejes coordenados principales. (L)

1.4.2 Ecuación de Cantidad de Movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento establece que la fuerza resultante sobre un sistema es igual a la velocidad con que cambia la cantidad de movimiento del volumen de control.

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \vec{v} \cdot \rho \cdot \theta \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (1.2)$$

Donde:

$\sum \vec{F}$: Fuerzas actuantes en el sistema (M.L.T⁻²)

\vec{v} : Vector velocidad del fluido. (L.T⁻¹)

θ : Contenido de humedad

1.4.3 Ley de Darcy

Henry Darcy, ingeniero francés que en el año 1856 a partir de ensayos, encontró que el caudal que infiltra un medio poroso es proporcional a la gradiente potencial., es decir:

$$q = -K \cdot \frac{dh}{dl} \quad \rightarrow \quad Q = -K \cdot \frac{dh}{dl} \cdot A \quad (1.3)$$

Donde:

q : Caudal por unidad de área transversal al flujo. (L.T⁻¹)

Q : Caudal del flujo en medio poroso. (L³.T⁻¹)

K : Conductividad Hidráulica. (L. T⁻¹)

A : Área de la sección transversal al flujo. (L²)

dh/dl : Gradiente potencial en incrementos infinitesimales

donde h, es la carga hidráulica y l, longitud entre los puntos de carga hidráulica (el signo negativo se debe la carga potencial se reduce con un incremento de la longitud de recorrido del flujo.

Según Llamas y Custodio (1976), la Ley de Darcy es válida si $Re < 10$. La ley de Darcy es un caso particular de la Segunda Ley de Newton, ya que relaciona las fuerzas que actúan sobre el sistema con la velocidad del flujo en el medio poroso.

1.5 INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES DE FLUJO

Antes de pasar a deducir la ecuación general del movimiento tridimensional del flujo subterráneo se debe entender la diferencia entre sistema y volumen de control.

Un sistema es una masa definida de un fluido que se desplaza en un campo de flujo, en cambio un volumen de control es una región del espacio en la que entra o sale el fluido.

Para llegar a la expresión que nos represente el movimiento tridimensional del flujo subterráneo, utilizaremos la Ecuación de Reynolds que transforma el sistema a volumen de control:

$$\frac{dN_{SIST}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V.C} \eta \rho dV + \int_{S.C} \eta \rho \bar{n} \cdot \bar{v} dA \quad (1.4)$$

Donde:

N_{SIST} : Propiedad extensiva.

V : Volumen. (L^3)

A : Área de la sección de control. (L^2)

η : Relación de la propiedad del sistema por unidad de masa.

$$\eta = \frac{N_{SIST}}{M} \quad (1.5)$$

\bar{n} : Vector unitario que sale perpendicular a la superficie de control.

t : tiempo. (T)

El primer término de la derecha, nos representa la rapidez de cambio de la propiedad extensiva en el volumen de control. El segundo término de la derecha nos expresa el flujo neto de la propiedad extensiva a través de la sección de control.

Para nuestro análisis la propiedad extensiva viene a ser la masa de fluido, por lo que tenemos:

$$\eta = \frac{N_{SIST}}{M} = \frac{M}{M} = 1$$

y aplicando la ley de la conservación de la masa tenemos:

$$\frac{dM}{dt} = 0 = \frac{d}{dt} \int_{V.C} \rho dV + \int_{S.C} \rho \bar{n} \cdot \bar{v} dA \quad (1.6)$$

La rapidez de cambio de la masa de fluido en el volumen de control viene a ser la rapidez de cambio de la masa del fluido en almacenamiento, es decir:

$$\frac{d}{dt} \int_{V.C} \rho dV = \overbrace{\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dz}^{(a)} + \overbrace{\rho W dx dy dz}^{(b)} \quad (1.7)$$

Donde:

S_s : Coeficiente de almacenamiento específico. (L^{-1})

W : Flujo que sale o ingresa al volumen de control por unidad de volumen. $W=Q/(d_x d_y d_z)(T^{-1})$

h : Carga hidráulica. (L)

El término (a) incluye dos partes:

- La masa de agua producida por una expansión del agua bajo cambios en la densidad, y
- La masa de agua producida por la compactación del medio poroso debido al cambio en la porosidad.

El coeficiente de almacenamiento específico S_s , físicamente nos representa el volumen liberado del volumen de control por unidad de volumen del medio poroso cuando la carga hidráulica desciende en una unidad.

El término (b) nos representa una extracción o adición de volumen de agua por volumen unitario de medio poroso. Esto puede ser interpretado por ejemplo como la extracción y recarga de un acuífero mediante un pozo.

Asimismo, la cantidad de flujo neto sobre la sección de control del volumen control (Ver Figura 1.2), se expresa de la siguiente manera:

$$\int_{S.C} \rho \bar{n} \cdot \bar{v} dA = \rho \left(q_x + \frac{1}{2} \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz - \rho \left(q_x - \frac{1}{2} \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz + \rho \left(q_y + \frac{1}{2} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz - \rho \left(q_y - \frac{1}{2} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \rho \left(q_z + \frac{1}{2} \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy - \rho \left(q_z - \frac{1}{2} \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (1.8)$$

Simplificando tenemos:

$$\int_{S.C} \rho \bar{n} \cdot \bar{v} dA = \rho dx dy dz \frac{\partial q_x}{\partial x} + \rho dx dy dz \frac{\partial q_y}{\partial y} + \rho dx dy dz \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (1.9)$$

Donde:

q_x, q_y, q_z : Flujos por área de sección transversal en las direcciones de los ejes coordenados principales. ($L \cdot T^{-1}$)

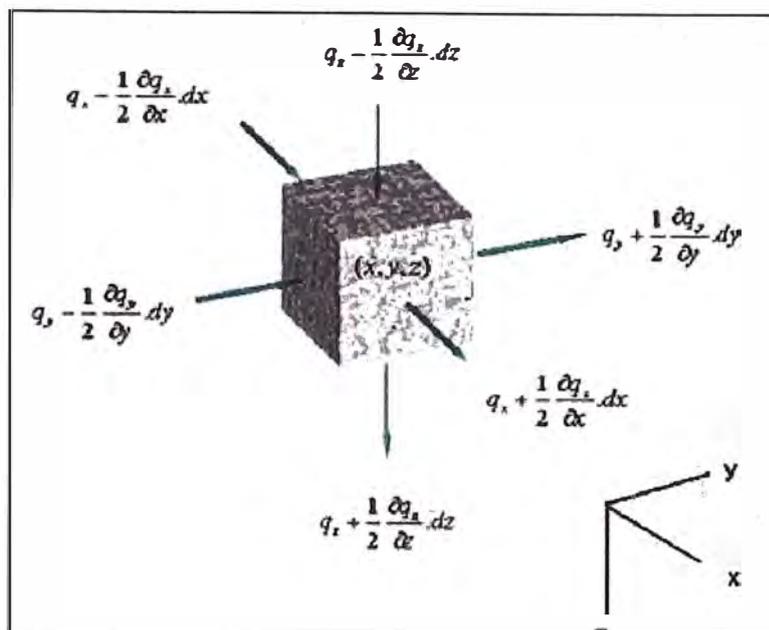


Figura I.2 Representación del Volumen de Control para el desarrollo de las ecuaciones

Sustituyendo (1.7) y (1.9) en la ecuación (1.6):

$$0 = \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \rho W \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (1.10)$$

Dividiendo la expresión entre $\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$; se obtiene:

$$0 = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + W + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (1.11)$$

Usamos la ley de Darcy en las tres direcciones:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} ; \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} ; \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.12)$$

Finalmente reemplazando en la ecuación (1.11) tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (1.13)$$

que es la ecuación general para un flujo tridimensional en régimen transitorio a través de un medio poroso heterogéneo y anisotrópico

1.6 CONDICIONES DE BORDE

La solución de la ecuación de flujo tridimensional requiere especificaciones de condiciones de borde. Existen tres tipos de condiciones de borde que se aplicarán al modelo

1.6.1 Condición de Dirichlet: Tipo I

Esta condición se aplica cuando el valor de la variable dependiente, vale decir la carga hidráulica, es conocida en todo el contorno.

$$h(x_b, y_b, z_b, t) = h_b(t) \quad (1.14)$$

Donde (x_b, y_b, z_b) representa un punto en el contorno y h_b , es una función conocida que depende del tiempo. Esta condición es usada cuando el flujo analizado se encuentra en contacto con cuerpos de agua, tales como, lagos, ríos o reservorios, etc.

1.6.2 Condición de Neumann: Tipo II

Esta condición también es conocida como condición de flujo, es usada cuando la cantidad de agua subterránea intercambiada a través del borde es conocida

$$q_n(x_b, y_b, z_b, t) = q_b(t) \quad (1.15)$$

Donde q_n representa el componente normal del flujo en el borde y q_b , es una función conocida que depende del tiempo. Este tipo de condición puede ser expresada en función de la variable dependiente (carga hidráulica). Usando la Ley de Darcy:

$$q_n = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} = q_b(t) \quad (1.16)$$

El término $\partial h / \partial n$ representa el gradiente de carga con respecto al eje normal al borde. En este tipo de condición de borde podemos mencionar los bombeos de pozos, las recargas acuíferas, infiltración, etc. En forma general, cualquier

situación en la que el flujo se asuma controlado o conocido, por ejemplo el borde impermeable dado que el componente de flujo normal al borde es aproximadamente cero ($q_n = q_b(t) = 0$).

1.6.3 Condición de Cauchy: Tipo III

Esta condición es una mezcla de los dos tipos anteriores, es decir se aplica cuando la carga y el componente de flujo normal al borde están relacionados uno del otro. Esta condición se aplica en el caso de que el flujo del reservorio acuífero analizado, se encuentre en contacto con un cuerpo de agua con una carga controlada h_b y el intercambio entre ellos debido a alguna resistencia es restringida.

$$q_n(x_b, y_b, z_b, t) = C_b (h_b(t) - h(x_b, y_b, z_b, t)) \quad (1.17)$$

Donde C_b representa la conductancia en el borde entre el reservorio acuífero y la fuente o sumidero de agua en el exterior. Físicamente este parámetro nos representa una capacidad conductiva de una capa de borde permeable presente entre el flujo del reservorio y el cuerpo de agua.

$$C_b = K_b / D_b \quad (1.18)$$

Donde K_b es la conductividad hidráulica de la capa borde y D_b su espesor. Como ejemplos de este tipo de condición podemos mencionar a un río que está hidráulicamente conectado con el flujo subterráneo, donde la interacción es restringida debido a la presencia de una capa de lodo en el lecho del río. Otro ejemplo es el de un pozo cuyo filtro está obstruido.

1.7 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

El método de las diferencias finitas es un proceso de cálculo que reemplaza las ecuaciones lineales por derivadas parciales.

Estas aproximaciones se desarrollan a partir de la serie de Taylor:

$$h(x + \Delta x) = h(x) + \Delta x \cdot \frac{dh}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \frac{d^2h}{dx^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \cdot \frac{d^nh}{dx^n} \quad (1.19)$$

Para obtener la primera derivada, despejamos el término dh/dx

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h(x + \Delta x) - h(x)}{\Delta x} \underbrace{\left[\frac{\Delta x}{2!} \cdot \frac{d^2 h}{dx^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^n h}{dx^n} \right]}_{W_1(x)} \quad (1.20)$$

Donde $W_1(x)$ puede aproximarse a cero teniendo en cuenta que Δx es pequeño.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h(x + \Delta x) - h(x)}{\Delta x} \quad (1.21)$$

Esta es la aproximación de las diferencias finitas hacia delante. Del mismo modo tenemos:

$$h(x - \Delta x) = h(x) - \Delta x \cdot \frac{dh}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \frac{d^2 h}{dx^2} - \dots + \frac{(-1)^n (\Delta x)^n}{n!} \cdot \frac{d^n h}{dx^n} \quad (1.22)$$

Análogamente al paso antes descrito tenemos:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-h(x) + h(x - \Delta x)}{\Delta x} \underbrace{\left[\frac{\Delta x}{2!} \cdot \frac{d^2 h}{dx^2} + \dots + \frac{(-1)^{n-1} (\Delta x)^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^n h}{dx^n} \right]}_{W_2(x)} \quad (1.23)$$

Asimismo hacemos que $W_2(x)$ se aproxime a cero quedándonos:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-h(x) + h(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (1.24)$$

Siendo esta la aproximación de las diferencias finitas hacia atrás. Para determinar la aproximación a la segunda derivada sumamos las ecuaciones 1.20 y 1.23 obteniendo:

$$h(x + \Delta x) - 2h(x) + h(x - \Delta x) = 2 \cdot \frac{(\Delta x)}{2!} \cdot \frac{d^2 h}{dx^2} + 2 \cdot \frac{(\Delta x)^4}{4!} \cdot \frac{d^4 h}{dx^4} + \dots \quad (1.25)$$

Luego:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = \frac{h(x + \Delta x) - 2h(x) + h(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \underbrace{\left[2 \cdot \frac{(\Delta x)^4}{4!} \cdot \frac{d^4 h}{dx^4} + \dots \right]}_{W_3(x)} \quad (1.26)$$

Por lo que la aproximación de la segunda derivada será

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = \frac{h(x + \Delta x) - 2h(x) + h(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (1.27)$$

1.8 LOS CÓDIGOS MODFLOW Y MODFLOW SURFACT

El modelo MODFLOW probablemente sea el más usado actualmente debido a su flexibilidad y generalidad pudiéndose aplicar a varios tipos de problemas. El modelo simula el flujo en medio poroso en tres dimensiones. Este modelo resuelve la ecuación general por el método de las diferencias finitas para simular el flujo transitorio o variable con el tiempo en tres dimensiones en un medio poroso que puede ser heterogéneo y anisotrópico. Simula también las condiciones estacionarias. Este modelo es capaz de determinar los cambios de las cargas piezométricas en el tiempo causados por los cambios en los agentes naturales tales como: precipitación, infiltración, y los ocasionados por el hombre como son la extracción de pozos. El modelo asume que los ejes principales de conductividad hidráulica son paralelos con los ejes de las coordenadas direccionales y que el agua tiene densidad constante.

El modelo MODFLOW utiliza la ecuación de flujo (1.13) deducida en la sección anterior.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

Por otro lado el modelo MODFLOW-SURFACT, una versión mejorada del modelo estándar de dominio público MODFLOW descrito líneas arriba, posee características más poderosas en cuanto a la capacidad de modelar tanto en medios saturados como no saturados, el método de solución de las ecuaciones diferenciales con mayor estabilidad numérica que el que emplea el MODFLOW.

Con la primera consideración, la ecuación que utiliza este modelo mejorado es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x k_{rw} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y k_{rw} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z k_{rw} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_w S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} W \quad (1.28)$$

Donde las nuevas variables (variables saturadas) se describen a continuación:

k_{rw} : Conductividad hidráulica relativa, la cual es una función del grado de saturación.

\emptyset : Porosidad drenable que puede ser tomada como el rendimiento específico S_y .

S_w : Grado de saturación.

De considerarse el medio como saturado, entonces los valores de grado de saturación y conductividad hidráulica relativa sería igual a 1 por lo que la Ecuación 1.28 sería igual a la ecuación 1.13 deducida anteriormente.

Las características adicionales de este modelo se describen en el capítulo IV del presente documento.

CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL Y DEL MODELO NUMÉRICO

2.1 RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La construcción de un modelo numérico implica recopilar y, laborar un conjunto de datos de modo que permita definir lo siguiente:

- La geometría del acuífero y de la napa freática; y
- Las características hidráulicas del mismo.

Este trabajo implica la realización de un inventario minucioso de la información disponible en estudios anteriores y en campo, interpretación de los mismos y depuración.

Mientras más información de calidad esté disponible, más fácil será la construcción y calibración del modelo numérico. Las tablas II.1 y II.2 muestran los datos necesarios para la construcción e interpretación de un modelo numérico así como los métodos para su obtención.

Tabla II.1 Datos necesarios para la implementación de un modelo

| | | | |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Recopilación | Preparar Inventarios Buscar en archivos Obtener datos en campo y en encuestas Interpretar los datos y filtrarlos Sintetizar los datos | | |
| Inventario | pozos fuentes manantiales galerías | geología informes topografía | pluviometría escorrentía evaporación meteorología |
| Aforos | caudales niveles de agua superficial niveles de agua subterránea recarga en pozos y piezómetros | | composición química del agua explotación vertidos planes de ordenación |
| Datos complementarios | Sondeos Pozos Experimentales Periodo de Observación Estaciones de Aforo e hidrometeorológicas | | |

Fuente: M. Llamas, E. Custodio (1976)

Tabla II.2 Métodos para la obtención de datos para el modelamiento

| Dato | Fuente de Dato |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geometría | Sondeos o perforaciones Cartografía geológica e Hidrogeológica (complementar con la geofísica) Observación de superficies piezométricas Deducciones de ensayos de bombeos e hidrogramas |
| Características Hidráulicas | Ensayos de bombeo (K, S) Ensayos de Descenso (K) Ensayos en piezómetros (K) Permeámetros (K) Granulometría (K) |
| Funcionamiento Hidráulico | Superficies piezométricas Hidrogramas |
| Acciones | Medidas hidrometeorológicas Medidas piezométricas |
| Respuestas | Análisis estadístico y cálculo Piezometría Aforos |

Fuente: M. Llamas, E. Custodio (1976)

2.2 GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

2.2.1 Basamento Rocoso y Techo del acuífero

Para determinar tanto el basamento rocoso como el techo del acuífero se debe contar con información topográfica del terreno y cartografía geológica. Asimismo se puede emplear las prospecciones geofísicas mediante el método de los sondajes eléctricos verticales (SEV). Con este método y a partir de la medida de resistividades se puede encontrar a que profundidad se encuentra el basamento rocoso y así poder definir en la construcción del modelo el límite impermeable inferior.

2.2.2 Límites de las formaciones

Tal como en la determinación del techo del acuífero se emplea la cartografía geológica que nos da una representación en planta de las diferentes formaciones. Asimismo podemos utilizar estudios geofísicos y sondeos eléctricos verticales que permitirán caracterizar el acuífero en capas utilizando el mismo método que en la determinación del basamento rocoso.

2.2.3 Geometría de la napa freática

Para poder construir la geometría de la napa freática, se debe tener información de niveles piezométricos en el área de estudio; cuanto más piezómetros se tengan más fina será la geometría que se pueda conseguir. Esta información debe ser analizada y depurada antes de ingresarlas al modelo como una condición inicial. La información piezométrica debe tener varias mediciones para periodos de tiempo diferentes. Además de recoger las mediciones de agua, se debe conocer las características del piezómetro tales como, la profundidad del filtro, la profundidad final y diámetro.

2.2.4 Condiciones de frontera

Aquí se definen los límites tanto físicos (tales como los límites impermeables) como hidráulicos (ríos, drenes, lagos, mares, etc.). Estos pueden ser obtenidos de la cartografía de la zona, del monitoreo de la superficie piezométrica y de un mapeo hidrogeológico.

2.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

2.3.1 Conductividad Hidráulica

Definida como el grado de facilidad de movimiento del agua en un medio poroso. Se define como la razón de flujo de agua en metros cúbicos por segundo que fluye a través de un metro cuadrado del acuífero cuando se impone un gradiente hidráulico unitario. Mientras mayor sea la conductividad hidráulica el agua se moverá con mayor facilidad. La Tabla II.3 muestra los rangos de conductividad hidráulica para diferentes materiales.

2.3.2 Coeficiente de Almacenamiento

Se define como el volumen de agua liberada por una columna de área unitaria y de altura igual al espesor del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad. Ambos parámetros, tanto la conductividad hidráulica como el coeficiente de almacenamiento, son obtenidos a partir de pruebas de bombeo y pruebas de descenso tanto en pozos de bombeo como en piezómetros. Siendo el coeficiente de almacenamiento un parámetro indispensable para simulaciones en régimen transitorio.

Tabla II.3 Valores típicos de conductividad hidráulica

| Tipo | Material | K (cm/seg) |
|------------------------|-------------------------------------------|------------------------|
| Sedimentos | Grava | 10^{-1} a 10^2 |
| | Arena gruesa | 10^{-3} a 1 |
| | Arena arcillosa | 10^{-5} a 10^{-1} |
| | Silt, loeSs | 10^{-6} a 10^{-4} |
| | Arcilla marina inalterada | 10^{-11} a 10^{-7} |
| Rocas Sedimentarias | Calizas karstificadas | 10^{-4} a 1 |
| | Calizas y dolomitas | 10^{-7} a 10^{-3} |
| | Areniscas | 10^{-8} a 10^{-3} |
| | Argilitas (siltstone) | |
| | Pizarras sedimentarias (Shale) intactas | 10^{-8} a 10^{-7} |
| Rocas cristalinas | Basalto permeable | 10^{-5} a 1 |
| | Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar | $< 10^{-8}$ |
| | Rocas ígneas y metamórficas fracturadas | 10^{-6} a 10^{-2} |

Fuente: Freeze, R, Allan y Cherry Jhon A (1979)

2.4 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

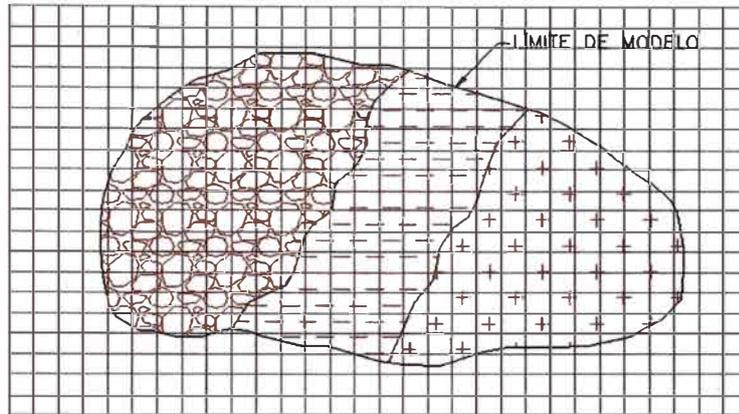
Este tipo de información, tales como la pluviométrica, hidrométrica, niveles de agua superficial, evaporación, temperatura, etc. permite conocer los agentes externos a los que está sometido el acuífero.

Con esta información se puede definir la recarga de un acuífero o si un río está conectado hidráulicamente con el acuífero en estudio.

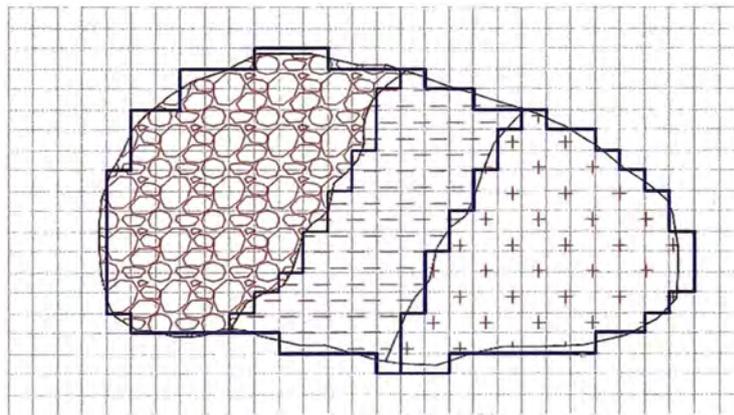
2.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para iniciar la construcción del modelo numérico, debemos formular un modelo conceptual con la información recopilada. Esto permitirá caracterizar adecuadamente tanto la geometría, funcionamiento hidráulico, y agentes externos a los que estará sometido en la simulación. Ver Figura II.1 Discretización del acuífero. Este es el procedimiento por el cual se divide el área de estudio en elementos que generan una malla de elementos del volumen del acuífero, tal como se muestra en la Figura II.1. El modelo superpone la malla de elementos sobre el mapa del acuífero y asimila las líneas reales, que son irregulares, a líneas poligonales que se ajusten a la rejilla superpuesta. Los bloques que se generan producto del mallado son pequeños en comparación con la extensión espacial del acuífero. Se debe tener la consideración de que en zonas donde exista mayor densidad de pozos el mallado deberá ser más fino. Los nodos son puntos de límite externo e interno del sistema acuífero en los

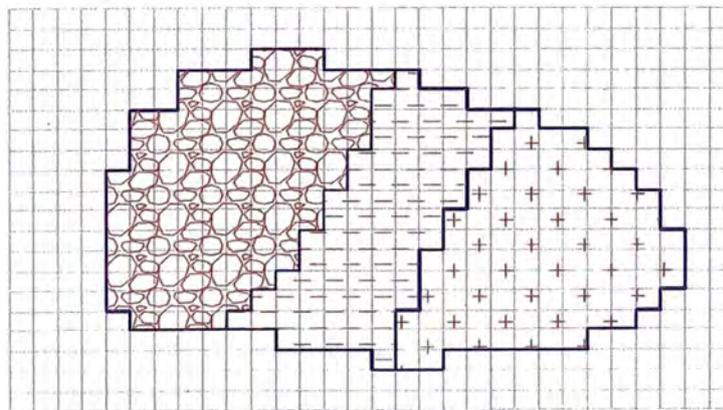
cuales se ubican los pozos. Los bloques están definidos por líneas verticales y horizontales, y las intersecciones de estas líneas forman nodos.



A) LÍMITE HIDROGEOLÓGICO DE UN SISTEMA ACUÍFERO



B) PROCEDIMIENTO DE MALLADO SOBRE UN MODELO



C) DISCRETIZACIÓN FINAL DE LAS ZONAS HIDROGEOLÓGICAS

Figura II.1 Metodología para la discretización de acuíferos

2.5.1 Condiciones de Borde

Una vez definida la geometría del acuífero y discretizada, se definen los diversos tipos de condiciones que se le asigna al modelo numérico en su contorno.

2.5.2 Límite impermeable

Esta condición se asigna a aquellas zonas donde el acuífero está en contacto con formaciones geológicas de características impermeables o a las zonas exteriores de las divisiones de aguas subterráneas similares a las cuencas. Con esta condición el modelo numérico no genera entrada ni salida de agua.

Esta condición puede ser definida con ayuda de las cartas geológicas, de los cuadrángulos, y estudios de la zona.

2.5.3 Límite de carga constante

Esta condición se toma en cuenta cuando encontramos al acuífero en contacto con masas de aguas superficiales tales como ríos, océanos o lagunas; o cuando encontramos zonas de recargas subterráneas.

2.5.4 Límite de flujo impuesto

Esta condición es considerada cuando los bordes del modelo son permeables y los valores de flujo de entrada y salidas son conocidos, a través de los contornos.

2.5.5 Extracciones por bombeo

Los caudales de extracción de bombeo son asignados como pozos de bombeo al modelo en forma puntual en cada celda.

Esta información debe ser ingresada al modelo con la ayuda de un plano de ubicación de pozos, de sus coordenadas y de sus características que fueron obtenidas de estudios anteriores o de un inventario en campo.

2.5.6 Recarga

La recarga, dependiendo de las características de uso de suelo y de la precipitación puede ser distribuida espacialmente en la primera capa del modelo (capa superior).

Se tienen varias consideraciones para estimar la recarga en un acuífero como son, el balance hídrico, la observación de mapas de superficies potenciométricas que permite definir la variación del volumen de agua. Además debe evaluarse el volumen recargado por riego.

2.5.7 Ríos y drenes

De tener influencia en el comportamiento del funcionamiento hidráulico del acuífero se deberá considerar su implementación en el modelo. Para obtener esta información se necesita la cartografía para el trazo en el modelo y la topografía para la definición de la sección transversal del cauce.

Los parámetros de conductividad hidráulica entre el lecho del río o dren y las capas del acuífero se obtienen de calicatas mediante ensayos de permeabilidad in situ o en laboratorio.

2.6 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL MODELO NUMÉRICO

Una modelación numérica de flujo necesita datos iniciales del sistema y datos de funcionamiento del mismo. La simulación del estado estacionario o permanente del sistema acuífero, si es posible, reviste mucha importancia. Los pasos que permiten posteriormente, reproducir el funcionamiento transitorio son indispensables para encarar modelos de gestión exitosos. Se debe contar con una serie prolongada (un mínimo de 5 años) y confiable de mediciones de niveles piezométricos para el caso de un modelamiento en régimen transitorio y para el caso de un modelamiento en régimen permanente basta con obtener solo una ronda de monitoreo. Para esto, debemos seleccionar aquellos pozos o piezómetros que puedan reproducir fielmente el comportamiento real que se pretende simular. La piezometría completa del área de estudio debe efectuarse en un breve lapso de tiempo para que responda a una “fotografía” representativa de la situación. Debe cuidarse que los datos que se incorporen pertenezcan a pozos medidos con bomba apagada durante tiempo suficiente para que no se vea alterada la piezometría del conjunto de datos.

2.7 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Es la última fase del modelamiento numérico. En este proceso se busca obtener un buen ajuste entre los niveles calculados por el modelo y los observados.

Se debe tener en consideración que la información geométrica e hidráulica que se definió en un principio no es la definitiva ni mucho menos exacta. Los diferentes métodos que se emplean para obtener los parámetros y la definición de las condiciones de bordes, que muchas veces son difíciles de determinar, ocasionan un gran margen de error.

Por lo mencionado y para lograr el objetivo del modelamiento, es necesario modificar los datos de entrada tales como las conductividades hidráulicas, tasa de recarga o condiciones de borde tantas veces sea necesario para poder representar significativamente el proceso real del movimiento del flujo subterráneo. Los resultados de las simulaciones deben ser comparadas con los datos obtenidos mediante mediciones reales. Se deben realizar ajustes hasta lograr replicar la información obtenida en las mediciones.

2.8 ACCIONES SOBRE EL ACUÍFERO

Luego que se ha logrado encontrar los valores de conductividad hidráulica que representan el comportamiento del acuífero, el modelo numérico construido y calibrado puede ser sometido a diversas acciones tales como:

- Aumento o disminución en la tasa de bombeo de los pozos
- Aumento o disminución en la recarga superficial del acuífero
- Aumento o disminución de la recarga subterránea del acuífero por una variación de las condiciones hidrológicas en la parte alta del acuífero

Esta etapa permite conocer el comportamiento de la napa freática frente a las acciones sometidas antes descritas, y nos da la pauta de cómo implementar un manejo óptimo del recurso hídrico subterráneo en el acuífero.

El acceso al sitio se realiza desde la ciudad de Arequipa mediante 345 Km. de carretera, de los cuales 27 Km. son de vía pavimentada y 318 Km. de vía afirmada. La ruta de acceso atraviesa los pueblos de Yura, Sumbay, Sibayo, Caylloma y Arcata.

A nivel de Hidrografía local, la zona de estudio pertenece a la cuenca de la quebrada Anrohuyjo. La quebrada Anrohuyjo constituye el cauce principal del río Tambo y cuenta con una extensión de cuenca de 50.5 km², con altitudes que varían desde 4 500 m.s.n.m hasta 5 350 m.s.n.m. El cauce se forma en las lagunas Ranracocha a 5 200 m.s.n.m., para luego discurrir en dirección Noreste con el nombre de quebrada Pulljopampa. El eje principal de la quebrada tiene una longitud aproximada de 12.4 km con una pendiente promedio de 7%. (Ver Figura III.2).

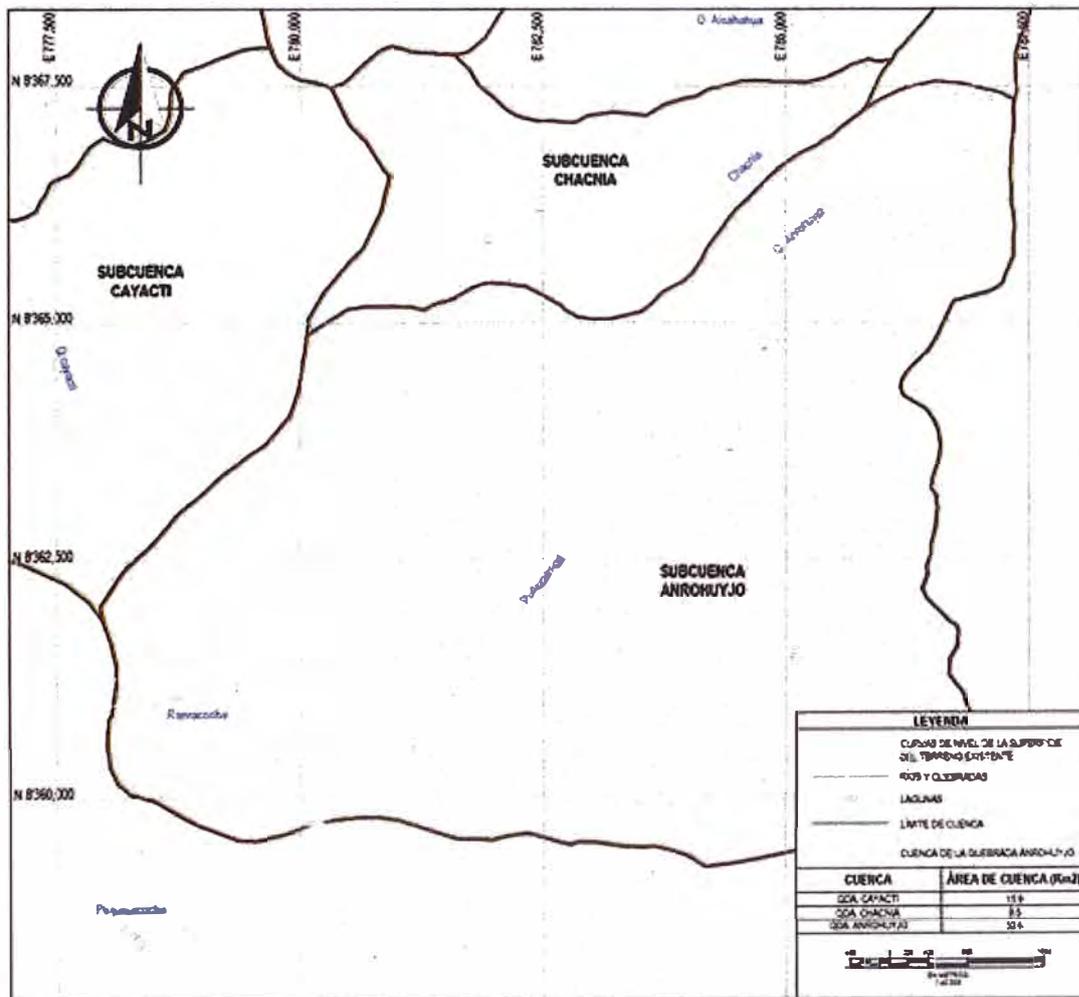


Figura III.2 Hidrografía Local Cuenca de la quebrada Anrohuyjo

Fuente: IGN, Carta Nacional 30-r, Cayarani.

3.2 CLIMA

El clima del área de estudio ha sido determinado mediante la información referencial de las estaciones meteorológicas adyacentes, específicamente de la estaciones Chinchayllapa, Cotahuasi y Orcopampa (Ver Tabla III.1). La precipitación normal promedio anual alcanza 950 mm, la evaporación de tanque promedio anual es de aproximadamente 1400 mm, y la temperatura promedio anual es de 5.9 °C.

Tabla III.1 Estaciones meteorológicas más cercanas

| Estación | Coordenadas Geográficas | | Altitud (msnm) | Departamento | Provincia | Tipo de Datos (Periodo de Registro) |
|---------------|-------------------------|-----------|----------------|--------------|-----------|-------------------------------------|
| | Latitud | Longitud | | | | |
| Chinchayllapa | 14°55'00" | 72°44'00" | 4,100 | Arequipa | La Unión | PM (1964-2009) |
| Cotahuasi | 15°21'01" | 72°52'59" | 2,883 | Arequipa | La Unión | PM (1964-2010) |
| Orcopampa | 15°15'00" | 72°19'59" | 3,779 | Arequipa | Castilla | PM (1951-2010) |

Fuente: Data Meteorológica del SENAMHI.

Nota: PM: Precipitación Total Mensual

En general, en la zona de estudio, la temperatura ambiental es baja y presenta grandes variaciones entre el día y la noche. Las temperaturas promedio están por debajo de los 6°C, pero debido a la altitud y la latitud, la radiación es considerable y la diferencia entre las temperaturas del día y la noche es muy marcada, pudiendo tener un rango de hasta 30° C.

Los vientos son fríos, secos y contribuyen enormemente a reducir la temperatura y a secar el ambiente.

La zona de estudio presenta dos tipos de clima predominantes:

- Clima frígido o de puna: entre los 4 000 y 5 000 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm anuales y temperaturas promedio anuales de 6 °C. Los veranos (diciembre - marzo) son lluviosos y nubosos y los inviernos (junio-agosto) son secos y con heladas nocturnas continuas.
- Clima gélido o de nieves perpetuas: encima de los 5 000 m.s.n.m. Se caracteriza por temperaturas promedio por debajo de los 0 °C. No obstante, en la zona de estudio no se observan glaciares, probablemente a consecuencia del retroceso de los mismos por el calentamiento global,

aunque algunas cumbres presentan nieve estacionalmente; principalmente en las épocas de precipitaciones intensas.

3.3 GEOLOGÍA

3.3.1 Geología Regional

El sector del área en estudio del territorio peruano presenta una morfología ondulada, donde destacan colinas y cimas truncadas, que se extienden con rumbo regional Noroeste-Sureste en un alineamiento de estructuras conformadas por conos volcánicos, separados por extensos valles glaciares y planicies alto andinas.

La estratigrafía regional está conformada por una potente secuencia rocas volcánicas constituidas por tobas y brechas, pseudo-estratificadas, con presencia de facies lacustres finamente estratificadas, riodacíticas a dacíticas, que corresponden a la formación Alpbamba, de edad Mioceno. Le sigue una intercalación de lavas andesíticas a traquiandesíticas, brechas, aglomerados volcánicos y tobas soldadas, de aspecto masivo, y lavas andesíticas, asignadas al Grupo Barroso de edad Plio-Pleistoceno. Cubriendo a estas unidades se presentan depósitos morrénicos, aluvioglaciares, y coluviales. (Ver Figura III.3)

3.3.2 Geología Local

a. Morfología

La morfología del área de estudio está marcada por la intensa actividad volcánica que ha afectado este sector entre el Terciario Inferior y el Pleistoceno, y por los subsiguientes procesos de erosión y depositación, debido a la actividad glacial. Se han distinguido las siguientes geoformas.

Cumbre Rocosa Aislada

Conformado por el cerro Crespo, cumbre rocosa de 5,200 msnm constituida por domos riolíticos, autobrechas, y brechas de inyección, con fuerte alteración hidrotermal, en parte silicificados, que resalta debido a su resistencia a la erosión.

Colinas Alineadas

Constituyen la divisoria de aguas entre las quebradas que disectan el área de estudio. Hacia el sector occidental la colinas presentan cimas rocosas y laderas

cubiertas por escombros rocosos, Hacia el sector oriental, las colinas culminan en laderas de fuerte pendiente, estando constituidas mayormente por suelos residuales y coluviales, donde destacan afloramientos rocosos aislados.

Depresión

Hondonada suave de aspecto alargado, ubicada al Oeste del cerro Crespo, hacia donde confluyen las aguas de escorrentía producto de las precipitaciones pluviales y el deshielo y donde se emplaza una pequeña laguna estacional. Está conformado por suelos aluviales de espesor variable.

Laderas de Pendiente Mediana a Fuerte

Se presenta laderas de mediana a fuerte pendiente disectado por incipientes quebradas, configurando en parte un relieve escalonado. Está constituido por suelos residuales, aluvioglaciales, y afloramientos rocosos alargados, que se distribuyen de manera irregular.

Domos

Geoformas de origen volcanoestructural, aspecto circular, aislados, que se distribuyen en diversos sectores del área de estudio. En general se presenta bastante disturbada por los procesos erosivos, pudiéndose distinguir más claramente al norte el área de estudio.

Valles

Es la red de drenaje que disecta en parte el área de interés. Conforman valles de flancos pronunciados y fondo amplio, conformados por suelos aluvioglaciales y residuales.

b. Estratigrafía

El área del proyecto presenta en su extensión secuencias volcánicas del Mioceno-Pleistoceno, cubiertas en parte por depósitos del Cuaternario reciente. Localmente se tienen tres unidades estratigráficas: Unidad basal piroclástica, Complejo de domos y Unidad superior lávica (pre, sin y Post-mineralización respectivamente).

Estas unidades se pueden correlacionar en general con la formación Alpbamba y el Grupo Barroso

Depósitos Cuaternarios

Están conformados por depósitos aluvioglaciales, coluviales, y de escombros rocosos.

- Depósitos Aluvioglaciales.- Son acumulaciones de sedimentos clásticos finos a gruesos. Presenta espesores que van desde 0.8 m a 21.0 m.
- Depósitos Coluviales.- Están constituidos por acumulaciones de sedimentos clásticos gruesos, mayormente sub angulosos, con una matriz limo-arcillosa a arenosa, con espesores que van de pocos centímetros a 5.0 m.
- Depósitos de Escombros Rocosos.- Están constituidos por acumulaciones de bolones y bloques de hasta 3 m de diámetro mayor, angulosos a sub angulosos, sin matriz. En algunos casos estos materiales se producen producto de la actividad del agua que al congelarse y descongelarse va abriendo las diaclasas y fracturas de las rocas, hasta que estas ceden y caen casi insitu.

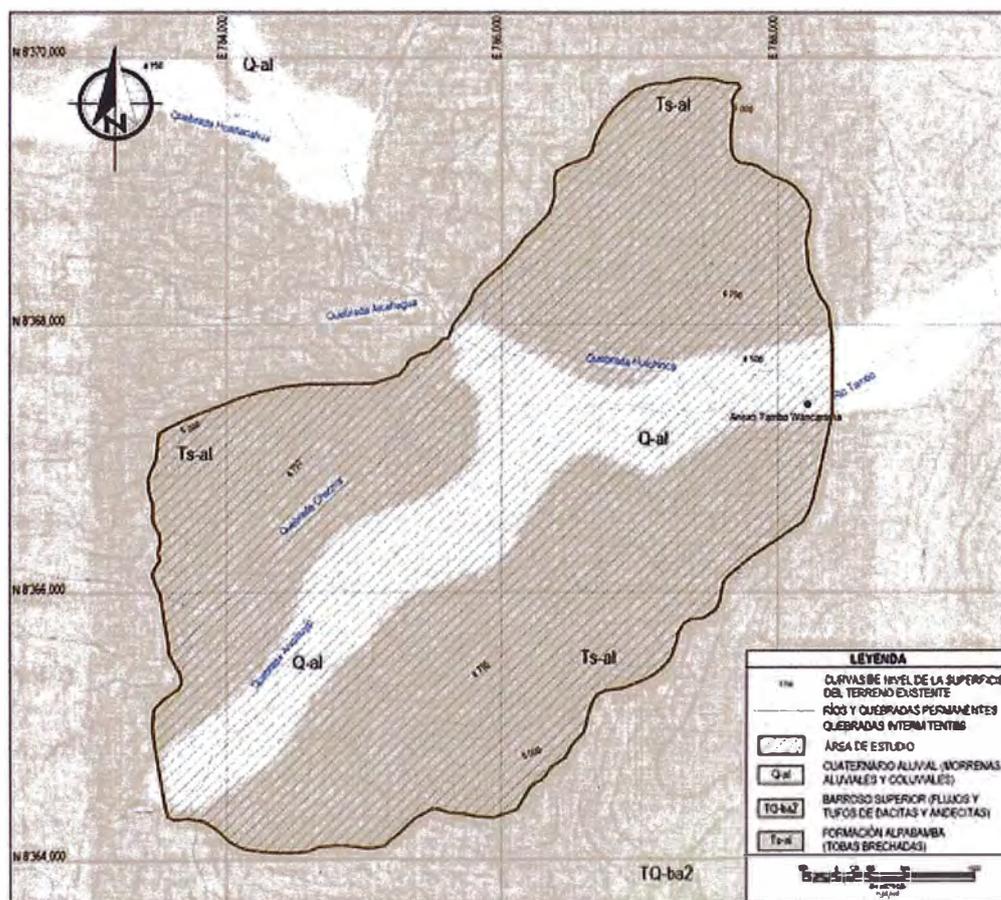


Figura III.3 Geología Regional

Fuente: INGEMET, Carta Geológica 30-r, 1975.
IGN, Carta Nacional 30-r, Cayarani.

3.4 HIDROGEOLOGÍA

3.4.1 Reservorio Acuífero

El reservorio acuífero está conformado por los sedimentos no consolidados de edad cuaternaria que se deposita en el fondo de valle del Río Tambo. El río Tambo se forma a partir de la confluencia de las quebradas Anrohuyjo y Huichinca. La profundidad o potencia de sedimentos no consolidados fue obtenida de los registros de perforación realizados a lo largo de este valle. En el sector más aguas arriba del valle (quebrada Anrohuyjo) se encontraron que los sedimentos alcanzaban espesores de entre 29 y 38 m. Aguas abajo, antes de la confluencia con la quebrada Huichinca el espesor de sedimentos no consolidados alcanza los 52 m.

La Figura III.4 muestra un mapa de espesores de acuífero inferidos a partir de los registros de perforación y a partir de fotografías aéreas.

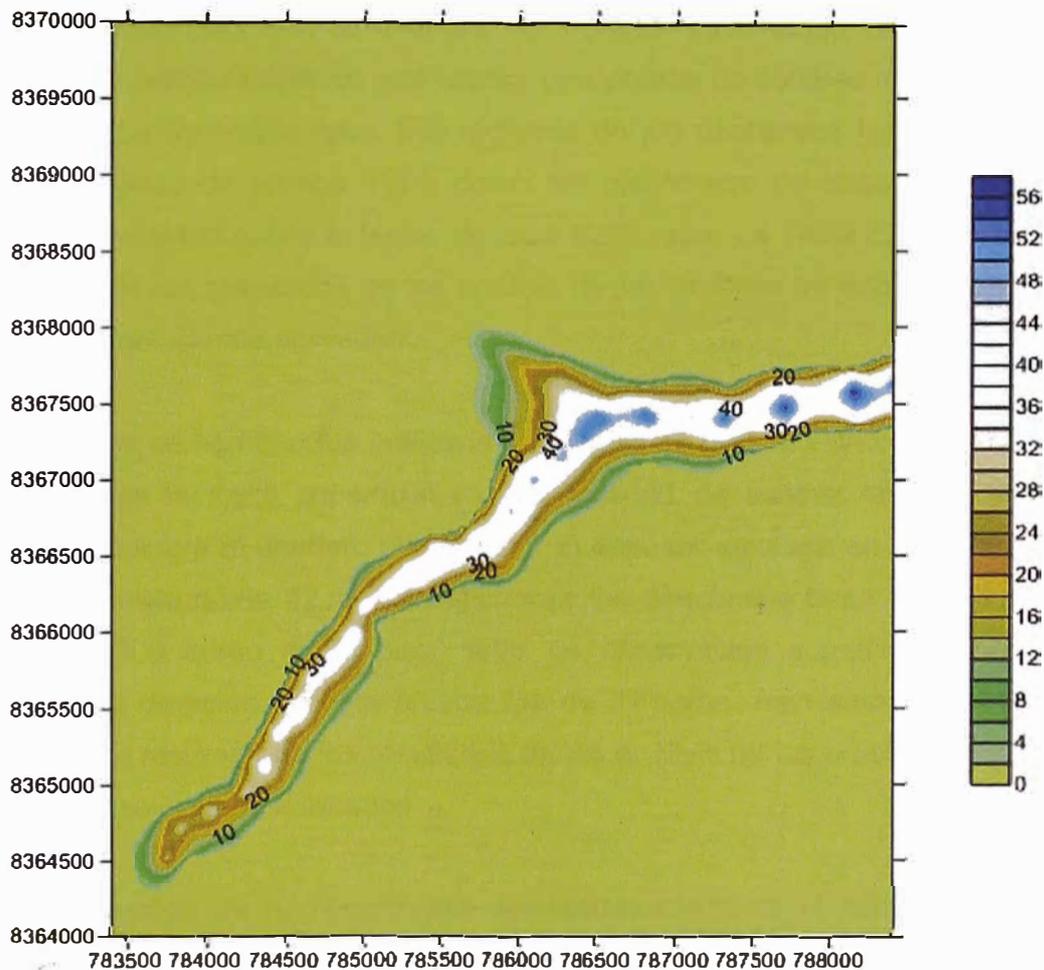


Figura III.4 Iso – espesor de Acuífero Cuaternario

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

3.4.2 Propiedades Hidráulicas

Las propiedades hidráulicas de los materiales fueron obtenidos a partir de pruebas de bombeo realizadas en pozos instalados a lo largo del valle (TW-2 y TW-3). Las pruebas ejecutadas consistieron en principio en pruebas escalonadas que permitieron definir un caudal que sea sostenible en el tiempo. Posterior a la prueba escalonada, se realizaron pruebas de bombeo a caudal constante por periodos considerables de tiempo con la finalidad de conseguir una mayor área de influencia posible.

Para llevar a cabo las pruebas fueron instalados dos pozos de pruebas, uno de ellos instalado sobre el propio material cuaternario y otro instalado en el tramo de roca fracturada. Los detalles constructivos de los pozos de prueba se muestran en el Anexo B.

El pozo de bombeo TW-2 fue instalado exactamente sobre el material de roca dacítica fracturada con la finalidad de obtener información de propiedades hidráulicas precisamente de este medio. Una prueba de bombeo de 48 horas de duración fue llevada a cabo. Los registros de los descensos fueron obtenidos tanto del pozo de prueba TW-2 como del piezómetro de observación PZ-2B también instalado sobre el tramo de roca fracturada. La Tabla III.2 muestra un resumen de los resultados de los análisis de las pruebas de bombeo mediante diferentes soluciones aplicables.

Otra prueba de bombeo fue realizada en el pozo de prueba TW-3. Este pozo fue instalado en la parte superficial con la finalidad de estimar las propiedades hidráulicas sobre el acuífero cuaternario. El espesor saturado en este sector es de aproximadamente 42 m. Se registraron los descensos tanto en el pozo de prueba TW-3 como en el piezómetro de observación superficial PZ-3A. El periodo de duración de esta prueba fue de 72 horas. Asimismo, la Tabla III.3 muestra un resumen de los resultados de los análisis de las pruebas mediante diferentes soluciones aplicables.

Ambas pruebas de bombeo fueron analizadas mediante el software Aqtesolv (Hydrosolve, 2007). El Anexo C muestra los análisis de las pruebas realizadas y la Figura III.5 muestra el registro de Pruebas de Bombeo en pozos TW-2 y TW-3.

Tabla III.2 Resumen de Resultados de la Prueba de Bombeo en el Pozo TW-2

| Pozo de Prueba | Tipo de Prueba | Pozo de Observación | Cooper Jacobs (1946) | | Theis Recovery (1935) | Tartakovsky-Neuman (2007) | | Transmisividad Promedio (m ² /d) | Conductividad Hidráulica Promedio (m/d) |
|----------------|----------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| | | | Transmisividad (m ² /d) | Coefficiente de Almacenamiento (adimensional) | Transmisividad (m ² /d) | Transmisividad (m ² /d) | Coefficiente de Almacenamiento (adimensional) | | |
| TW-2 | Flujo a Descarga Constante | TW-2 | 1.6 | NA | 2.7 | NA | NA | 3.06 | 8.75E-02 |
| | | PZ-2B | 6.5 | 3.0E-03 | NA | 4.9 | 4.3E-03 | | |

Fuente: Elaboración Propia

Notas:

- 1) Para el cálculo de la Conductividad Hidráulica se asumió un espesor de acuífero de dacita fracturada equivalente a 35m.
- 2) NA: El método utilizado no es aplicable al análisis de los parámetros del acuífero.

Tabla III.3 Resumen de Resultados de la Prueba de Bombeo en el Pozo TW-3

| Pozo de Prueba | Tipo de Prueba | Pozo de Observación | Cooper Jacobs (1946) | | Theis (1935) | | Theis Recovery (1935) | Transmisividad Promedio (m ² /d) | Conductividad Hidráulica Promedio (m/d) |
|----------------|----------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| | | | Transmisividad (m ² /d) | Coefficiente de Almacenamiento (adimensional) | Transmisividad (m ² /d) | Coefficiente de Almacenamiento (adimensional) | Transmisividad (m ² /d) | | |
| TW-3 | Flujo a Descarga Constante | TW-3 | 455.7 | NA | 493.2 | NA | 480.0 | 435.60 | 1.04E+01 |
| | | PZ-3A | 369.5 | 4.43E-03 | 424.0 | 2.15E-03 | NA | | |

Fuente: Elaboración Propia

Notas:

- 1) Para el cálculo de la Conductividad Hidráulica se asumió un espesor de acuífero cuaternario de 42m.
- 2) NA: El método utilizado no es aplicable al análisis de los parámetros del acuífero.

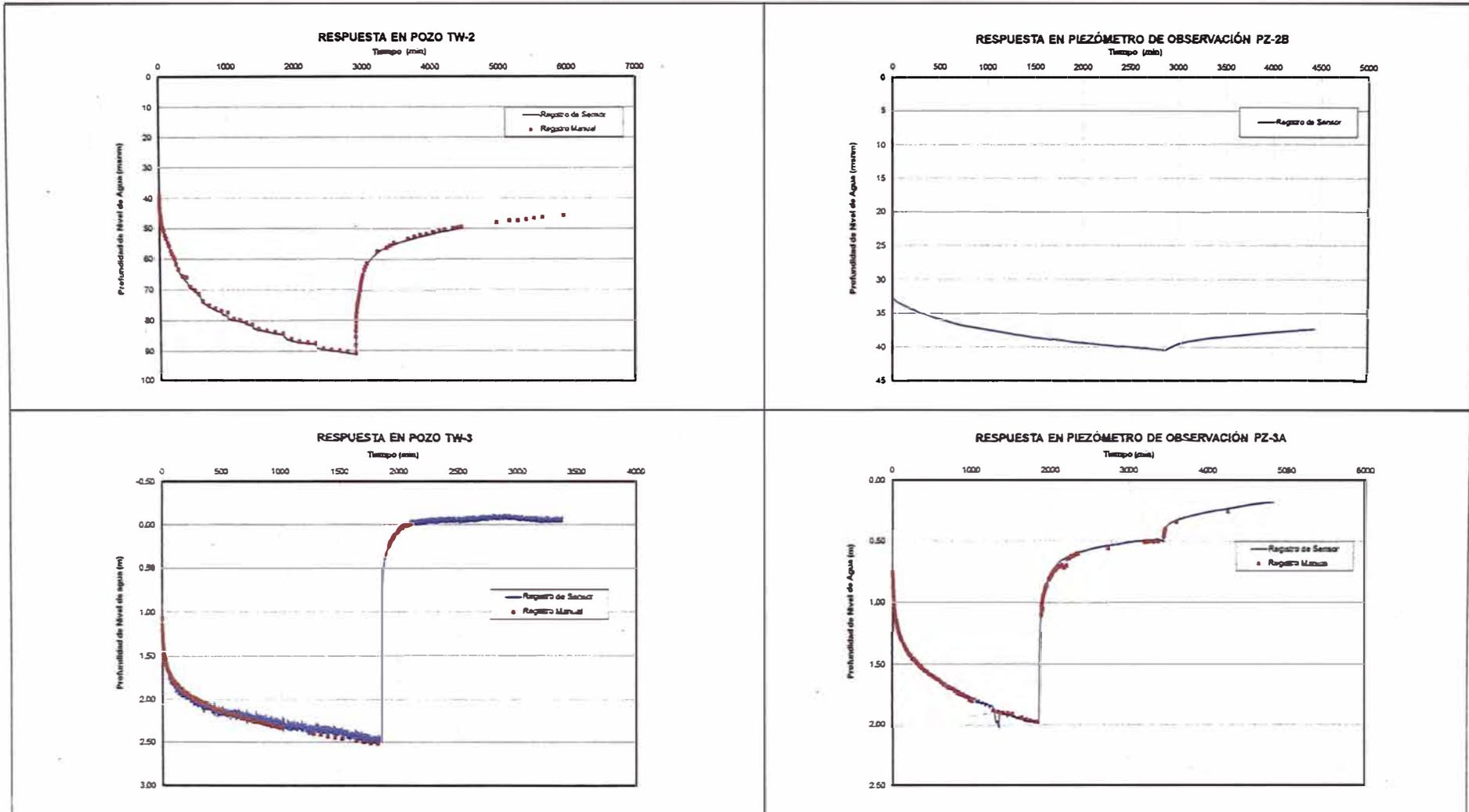


Figura III.5 Registro de Pruebas de Bombeo en Pozos TW-2 y TW-3

Fuente: Salidas del Aqtesolve (Hydrosolve, 2007)

3.4.3 Niveles y Dirección del Flujo

Dentro del área de estudio existen 6 piezómetros los cuales fueron instalados en 3 ubicaciones diferentes y a diferentes profundidades. Esto con la finalidad de evaluar las cargas hidráulicas tanto en el acuífero cuaternario (serie A) como en el intervalo de roca fracturada (serie B). La Tabla III.4 muestra un resumen de los piezómetros y pozos existentes en el área de estudio.

Tabla III.4 Resumen de Piezómetros y Pozos Existentes

| Piezómetro / Pozo | Coordenadas (UTM) | | Cota (msnm) | Tipo | Profundidad (m) | Intervalo de Filtro (m) | | Carga Hidráulica (msnm) |
|-------------------|-------------------|---------|-------------|------------|-----------------|-------------------------|----------|-------------------------|
| | Este | Norte | | | | Superior | Inferior | |
| PZ-1A | 783760 | 8364518 | 4560 | Piezómetro | 29 | 9 | 29 | 4543.4 |
| PZ-1B | 783769 | 8364523 | 4560 | Piezómetro | 82 | 32 | 82 | 4541.2 |
| PZ-2A | 784469 | 8365325 | 4542 | Piezómetro | 38 | 18 | 38 | 4537.1 |
| PZ-2B | 784462 | 8365319 | 4542 | Piezómetro | 74 | 39 | 74 | 4538.6 |
| TW-2 | 784468 | 8365323 | 4542 | Pozo | 74 | 39 | 74 | 4538.6 |
| PZ-3A | 786509 | 8367429 | 4515 | Piezómetro | 52 | 22 | 52 | 4504.7 |
| PZ-3B | 786501 | 8367424 | 4515 | Piezómetro | 74 | 54 | 74 | 4505.8 |
| TW-3 | 786504 | 8367419 | 4515 | Pozo | 52 | 12 | 52 | 4504.7 |

Fuente: Elaboración Propia

La Figura III.6 muestra la ubicación de los niveles de agua disponibles y medidos en los piezómetros instalados. Como se puede observar, tanto los pozos como los piezómetros, se encuentran ubicados en el centro del valle, precisamente donde se esperan que los mayores espesores de material cuaternario se espera, y de este modo poder medir la gradiente horizontal. Por otra parte, la disposición de piezómetros a diferentes profundidades permite medir el gradiente vertical del flujo.

Los registros de niveles de agua remarcan 2 aspectos importantes:

- El flujo de agua tiene una dirección predominante Suroeste – Noreste/Este. La profundidad de niveles de agua varia de 3.4 a 18.8 m
- Existe flujos ascendentes desde el macizo rocoso fracturado hacia el acuífero cuaternario. Esto fue contrastado con las mediciones en los piezómetros multiniveles. La Tabla III.5 muestra un resumen de los gradientes verticales.

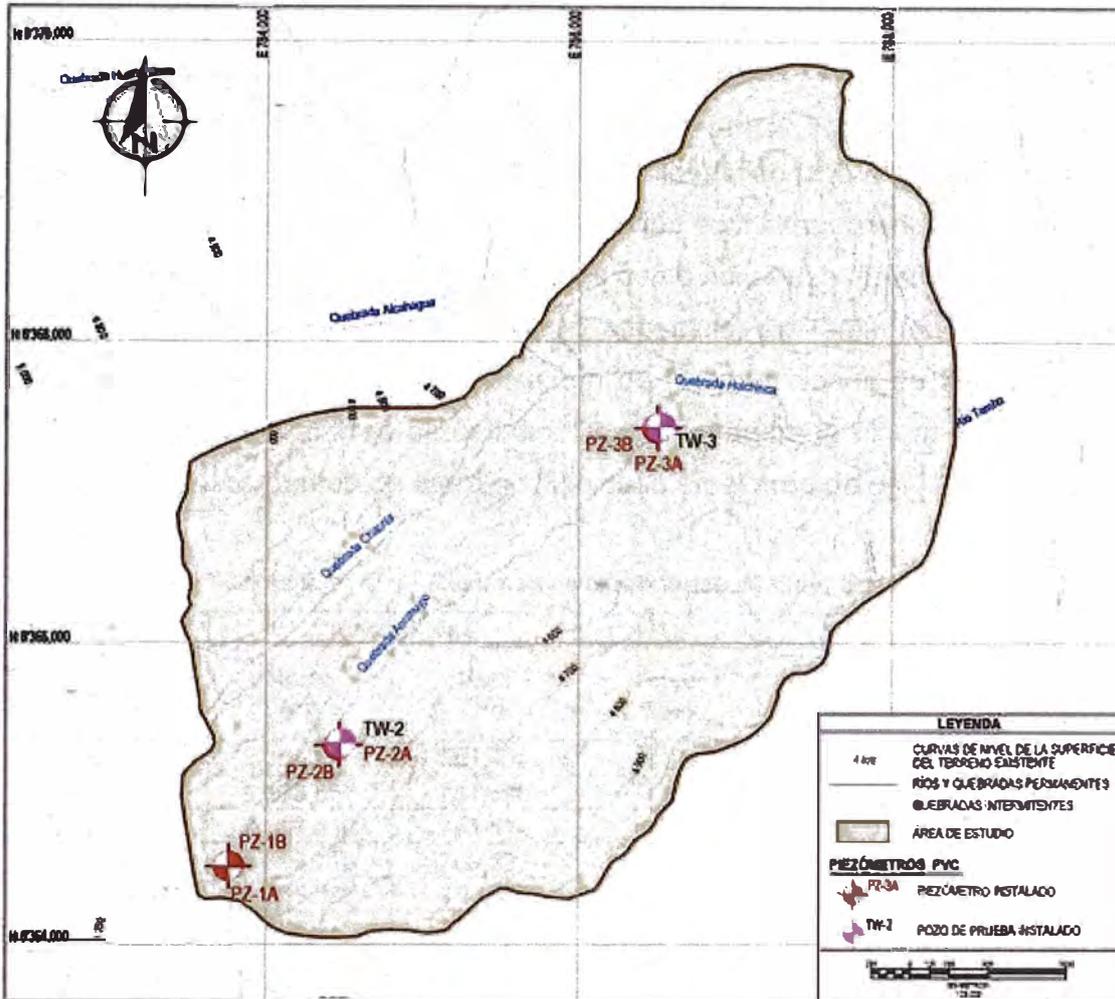


Figura III.6 Ubicación de Piezómetros

Fuente: IGN, Carta Nacional 30-r, Cayarani.

Tabla III.5 Resumen de Gradientes Verticales

| Piezómetro | Carga Hidráulica h (msnm) | Punto Medio del Filtro z (msnm) | Δh (m) | Δz (m) | Gradiente (*) (m/m) |
|------------|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| PZ-1A | 4543.4 | 4541.0 | -2.20 | 38.0 | -0.058 |
| PZ-1B | 4541.2 | 4503.0 | | | |
| PZ-2A | 4537.1 | 4514.0 | 1.48 | 28.5 | 0.052 |
| PZ-2B | 4538.6 | 4485.5 | | | |
| PZ-3A | 4504.7 | 4478.0 | 1.10 | 27.0 | 0.041 |
| PZ-3B | 4505.8 | 4451.0 | | | |

Fuente: Elaboración Propia

Nota: El signo negativo indica que el movimiento es para abajo

3.4.4 Recarga y Descarga de Aguas Subterráneas

La fuente de toda el agua subterránea en el área se genera por la infiltración de la precipitación. El agua que se infiltra, precipitación que no se pierde por evaporación o escorrentía superficial, fluye aguas abajo y lateralmente hacia el fondo de los cauces donde descarga al flujo superficial. Una manera de estimar la tasa de recarga es asumiendo que todo lo que se infiltra durante la temporada de lluvias es descargada por las quebradas como flujo base durante todo el año. Para ello se cuenta con aforos de flujo superficial en temporada seca (flujo base). La Tabla III.6 muestra en resumen de las mediciones de flujo base en quebradas aledañas al área de estudio. De igual manera la Figura III.7 muestra la ubicación de los puntos de aforo de flujo base en el área de estudio.

Tabla III.6 Resumen de mediciones de Flujo Base

| Punto | Coordenadas | | Flujo (L/s) | Area (km ²) | Rendimiento (L/s/km ²) |
|--------|-------------|----------|-------------|-------------------------|------------------------------------|
| | Norte (m) | Este (m) | | | |
| CRE_1 | 8,365,628 | 781,402 | 8.20 | 0.68 | 12.09 |
| CRE_11 | 8,368,051 | 784,190 | 4.50 | 3.17 | 1.42 |
| CRE_13 | 8,367,818 | 785,834 | 162.00 | 26.52 | 6.11 |
| CRE_20 | 8,369,716 | 783,201 | 74.00 | 8.35 | 8.86 |
| CRE_21 | 8,369,205 | 784,852 | 27.00 | 6.80 | 3.97 |
| CRE_27 | 8,361,478 | 781,446 | 30.75 | 4.19 | 7.34 |
| CRE_28 | 8,361,089 | 781,050 | 0.60 | 1.60 | 0.37 |
| CRE_29 | 8,361,440 | 781,858 | 2.80 | 4.03 | 0.69 |
| CRE_30 | 8,362,374 | 782,263 | 57.60 | 13.77 | 4.18 |
| CRE_31 | 8,365,821 | 784,771 | 254.40 | 44.53 | 5.71 |
| CRE_33 | 8,367,425 | 787,230 | 357.20 | 80.03 | 4.46 |
| CRE_34 | 8,367,377 | 787,215 | 359.10 | 80.53 | 4.46 |
| CRE_36 | 8,367,494 | 788,249 | 648.90 | 84.38 | 7.69 |
| CRE_4 | 8,366,452 | 781,867 | 35.00 | 1.90 | 18.44 |
| CRE_7 | 8,366,351 | 784,398 | 61.10 | 7.31 | 8.36 |
| CRE_8 | 8,367,723 | 785,860 | 51.00 | 8.98 | 5.68 |
| | | | | Promedio | 6.24 |

Fuente: Elaboración Propia

La Figura III.8 muestra la relación entre las mediciones de flujo base y sus correspondientes áreas de aporte. Esta relación permite establecer un rendimiento promedio de flujo base de manera general a partir de la pendiente de la recta de ajuste. Es así que se estima un rendimiento promedio de 5.6 L/s/km², que equivale a una tasa de recarga 177 mm/año (19% de la precipitación promedio anual – 950 mm/año).

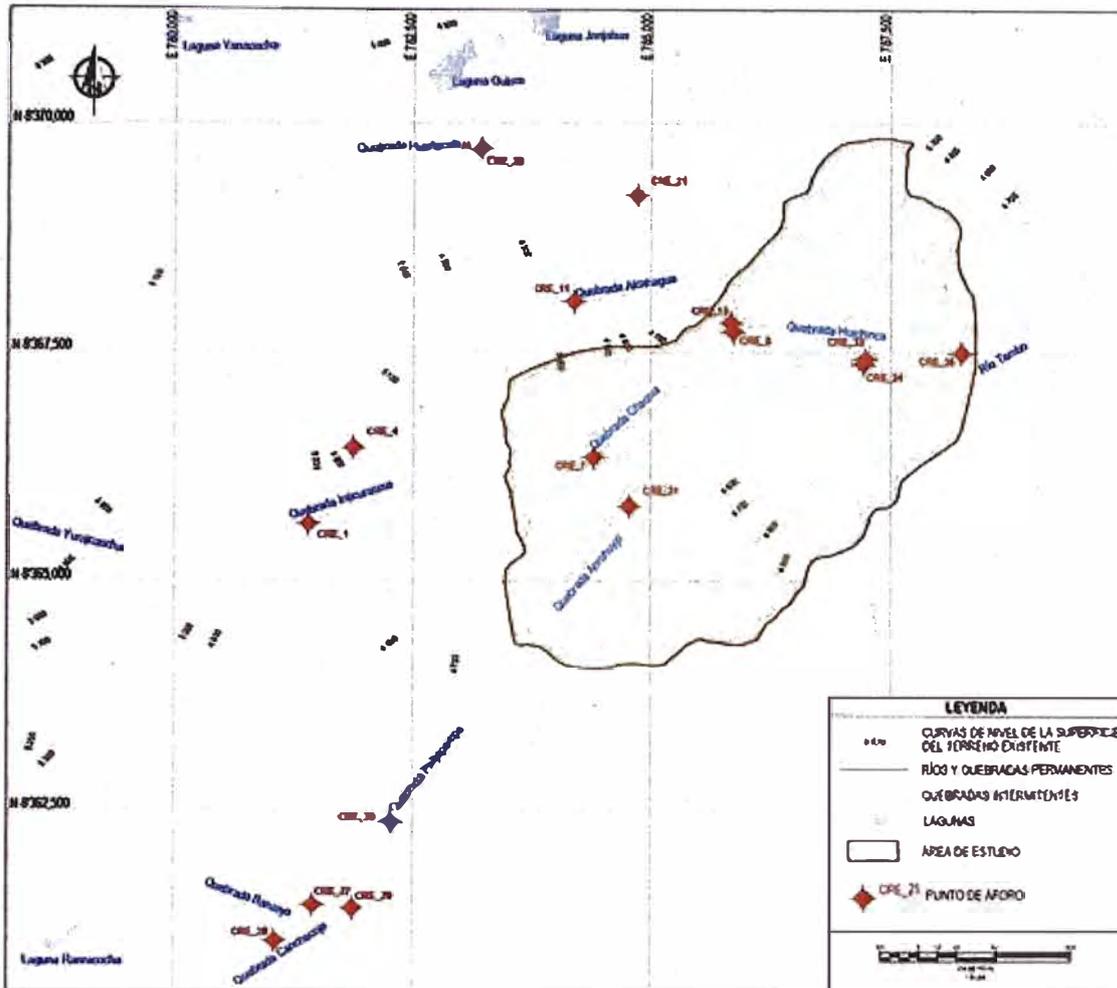


Figura III.7 Ubicación de Puntos de Aforo de Flujo Base

Fuente: IGN, Carta Nacional 30-r, Cayarani.

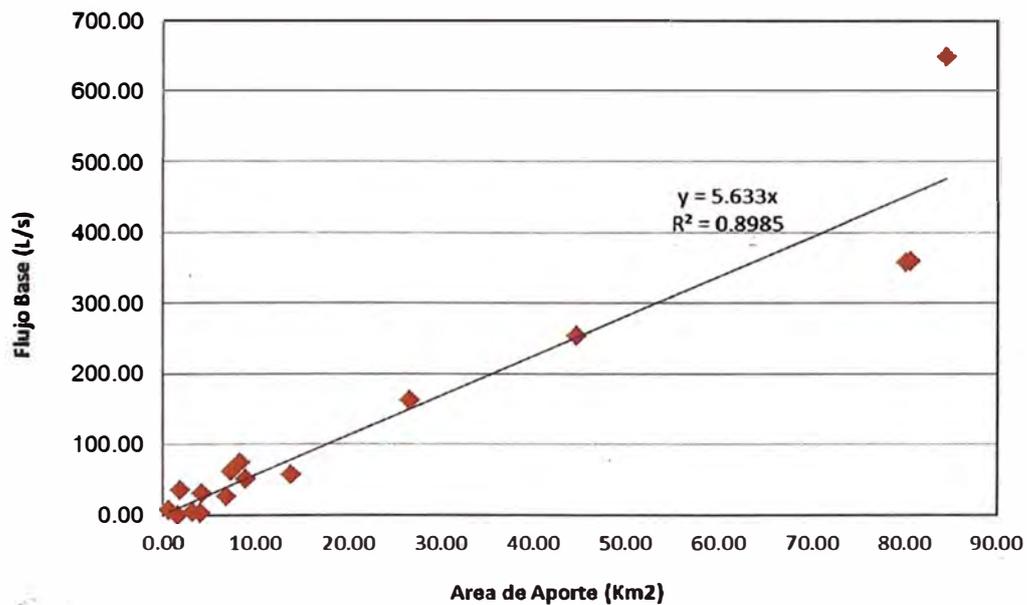


Figura III.8 Flujo Base vs Área de Aporte

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV: MODELAMIENTO NUMÉRICO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO

El régimen de flujo subterráneo en el área de estudio sigue un patrón similar al observado en otros ambientes alto andinos del Perú. El intenso tectonismo generado sobre el sistema rocoso (de tipo intrusivo) conjuntamente con la erosión, han formado valles, presentándose en la parte baja depósitos de relleno de edades recientes (Cuaternario) a los cuáles se les asocian mayores permeabilidades.

Las rocas que constituyen la zona de estudio suelen tener asociada una baja permeabilidad a través de la fracturación asociada. Dichos flujos pueden ser profundos y con mayores tiempos de tránsito dependiendo de la entidad de las fracturas conductivas por las que circulan.

Las aguas que circulan a través de los macizos rocosos se producen en los primeros metros de profundidad y descargan en los fondos de valle. Esto ha podido ser constatado a lo largo de la Quebrada Anrohuyjo donde la existencia de piezómetros dobles - instalados a diferentes profundidades - permite identificar que la mayoría de flujos son efectivamente ascendentes, hacia los materiales cuaternarios que rellenan esta cuenca. A través de las cuencas discurren los flujos superficiales asociados a escorrentías por precipitación, a los que se sumarían por tanto las descargas subterráneas. Estos materiales cuaternarios tienen un comportamiento diferente y que por su carácter poroso puede ser considerado acuífero. Estos materiales cuaternarios corresponden a rocas o fragmentos de edad geológica reciente los cuales han sido depositados gravitacionalmente como coluviones. Por debajo de ella, la propia formación rocosa encajante de los depósitos cuaternarios, no presentaría un contraste fuerte en términos de permeabilidad, esto debido principalmente a que estos primeros metros -a veces decenas de metros- pueden tener un grado alto de alteración y fisuración, constituyendo una primera superficie por la que el agua puede circular en flujos sub-superficiales donde el tiempo de tránsito es menor.

La Figura IV.1 pretende esquematizar el funcionamiento hidrodinámico en este tipo de medios. La figura muestra cómo se interrelacionan las aguas

superficiales con las aguas subterráneas. El flujo subterráneo, como se comenta, se produciría por infiltración principalmente a través de las principales fallas y fracturas existentes. Por otro lado, el hecho de que las fracturas sean las principales vías para el movimiento del agua, no conlleva que el agua no circule a través de las rocas. Sí lo hace, pero en mucho menor medida y con un volumen despreciable, dada la baja permeabilidad de las mismas.

El movimiento de las aguas o hidrodinámica es, por tanto, claramente gravitacional ocurriendo desde las zonas elevadas - donde se produce la mayor recarga - hacia las zonas de menor elevación (fondos de valle) por los que discurre el agua de escorrentía y donde adicionalmente se recibe la descarga de las aguas subterráneas infiltradas a través de la fracturación principal y sus conectividades.

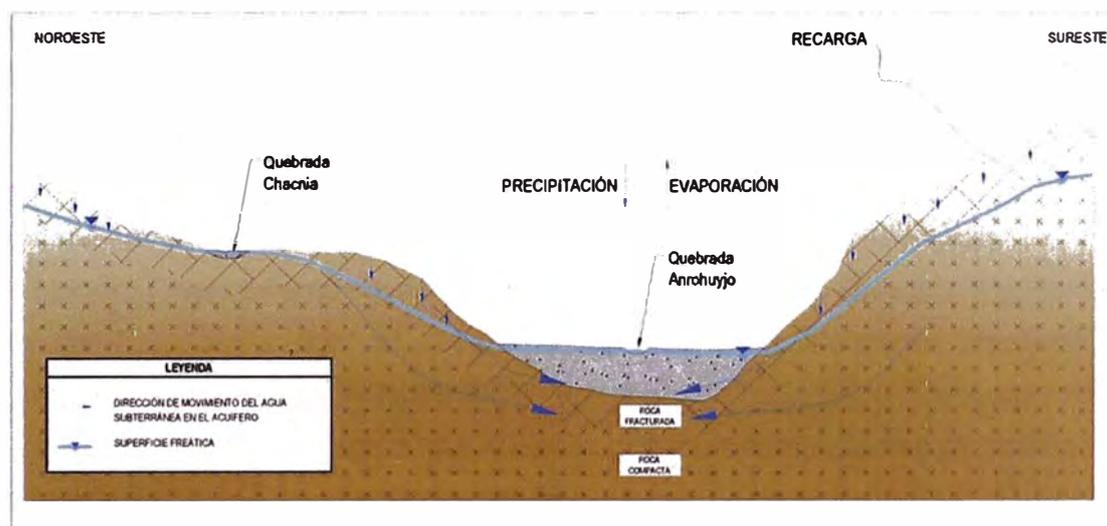


Figura IV.1 Funcionamiento Hidrodinámico Actual

Fuente: Elaboración Propia

Entendido el funcionamiento hidrodinámico de la cuenca en términos de flujo subterráneo, se espera que el acuífero pueda actuar como fuente de abastecimiento. La extracción de agua de este acuífero podría darse a partir de la construcción de pozos de bombeo. El bombeo a través de pozos ocasionarían conos de descensos que dependerán de los parámetros hidráulicos del medio.

La Figura IV.2 muestra el esquema conceptual del funcionamiento cuando el acuífero es sometido a estrés por causa del bombeo.

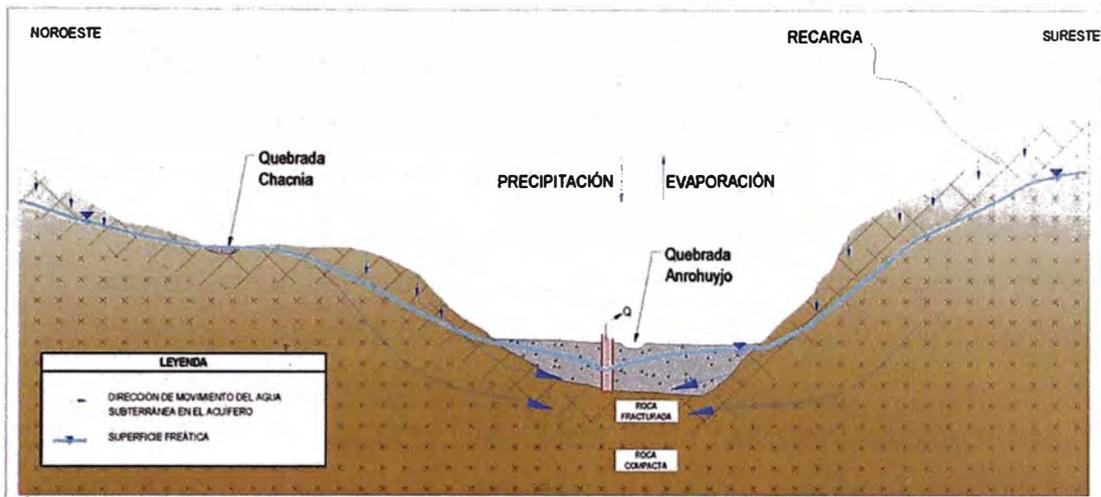


Figura IV.2 Funcionamiento Hidrodinámico durante Bombeo

Fuente: *Elaboración Propia*

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La modelación numérica pretende representar matemáticamente el comportamiento del sistema establecido en el modelo conceptual. Esta etapa de modelamiento fue realizada empleando MODFLOW-SURFACT. MODFLOW es una de las aplicaciones de modelamiento de flujo de aguas subterráneas tridimensional en diferencias finitas ampliamente utilizadas y aceptadas en todo el mundo. Originalmente producido por el Departamento de Estudios Geológicos de los Estados Unidos, el programa ha sido sustancialmente ampliado y mejorado en MODFLOW-SURFACT, un producto de Hydro GeoLogic, Inc. (1996). SURFACT contiene varias mejoras que fueron importantes al modelar el presente sistema incluyendo lo siguiente:

- Capacidad para manejar el problema de “celda seca”, permitiendo el secado y re-humedecimiento posterior de celdas en el curso de una corrida del modelo;
- Intervalo de tiempo adaptativo, permitiendo un ajuste dinámico de intervalos de tiempo en respuesta a la retroalimentación del programa durante las corridas y que es especialmente útil cuando los contrastes fuertes en condiciones modeladas en el tiempo o espacio causan inestabilidad numérica;
- Mejora en el método del gradiente conjugado pre condicionado (Preconditioned Conjugate Gradient, PCG 5), produciendo tiempos de

corrida más cortos y ofreciendo más opciones para tratar la inestabilidad numérica y problemas de convergencia;

- Método numérico de Newton-Raphson robusto y eficiente para problemas no lineales.
- Módulo de propiedades variables, el cual permite que los parámetros del acuífero para un volumen dado de roca, sean cambiados en parte a través de una corrida del modelo.

MODFLOW-SURFACT se utilizó en combinación con Groundwater Vistas, un programa producido por Environmental Simulations Incorporated. Groundwater Vistas incluye un pre-procesador y post-procesador con una interfaz gráfica de usuario que aumenta enormemente la eficiencia del modelamiento.

4.2.1 Mallado

El dominio abarca la divisoria de aguas que incluye las cuencas mostradas en la Figura III.2. El dominio tiene 5 Km en dirección este-oeste por 6 Km en dirección norte-sur. Las líneas de cuadrícula están espaciadas uniformemente a intervalos de 50 metros para columnas y filas. Hay 100 columnas y 120 filas. El origen del dominio está en 783 400E, 8 364 000N. La Figura IV.3 muestra el dominio del modelo así como la discretización tanto horizontal como vertical.

Las regiones que van más allá de las divisorias de aguas están ocupadas por celdas inactivas de modo que representen límites sin flujo. Esta suposición es consistente con el modelo conceptual, dado que las divisorias de aguas subterráneas tienden a corresponder con las divisorias de aguas superficiales.

El modelo está compuesto de 3 capas con espesor variable alcanzando un espesor total máximo de 155 m. La capa 1 (la más superficial) pretende representar el acuífero de materiales cuaternarios mientras que la segunda capa (intermedia) representa la roca encajante alterada y la capa 3 (la más profunda) representa la roca competente. La Tabla IV.1 muestra un resumen de los espesores y profundidades de las capas.

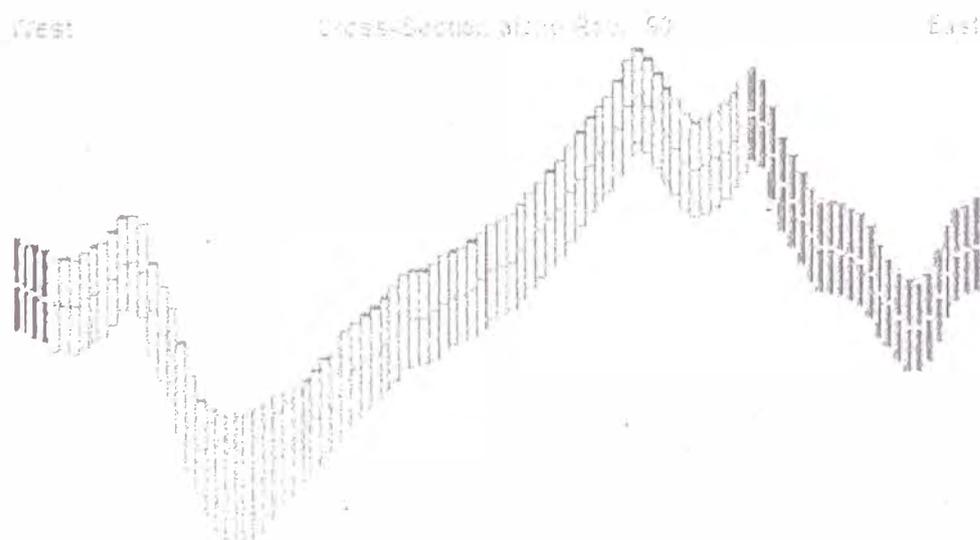
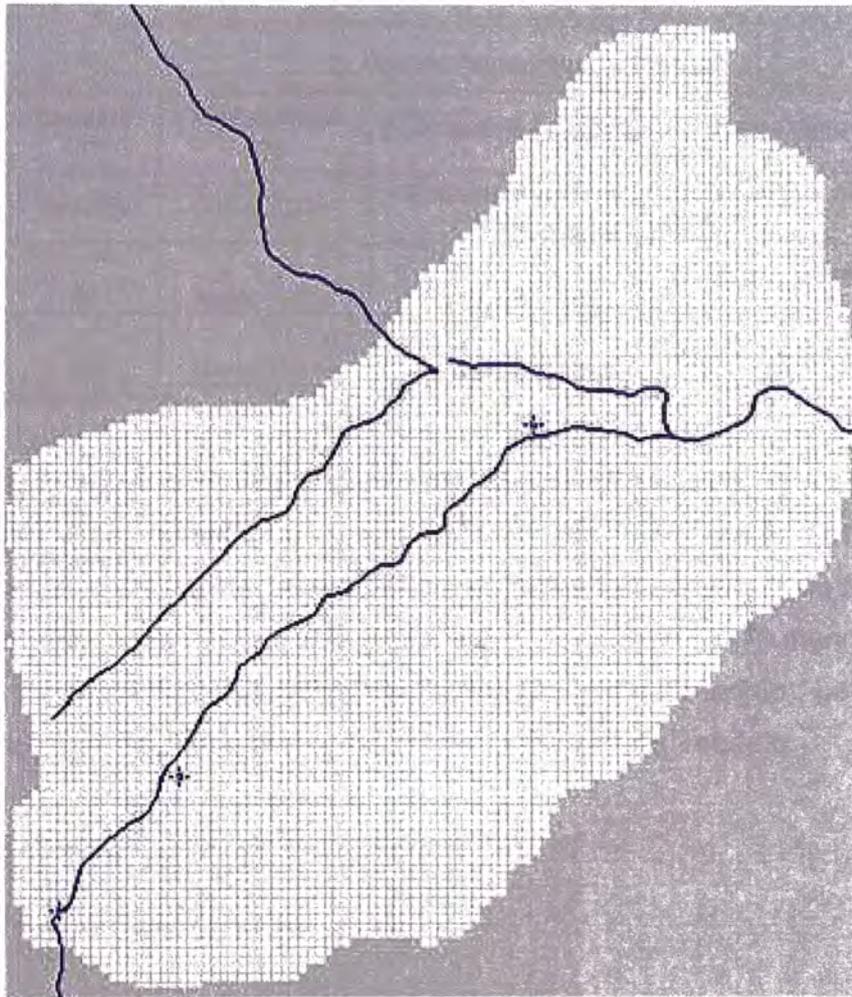


Figura IV.3 Discretización del Modelo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

Tabla IV.1 Resumen de los Espesores y Profundidades de las Capas de Construcción de Modelo Numérico

| Capa | Espesor (m) | Profundidad (m) | Permeabilidad (m/día) | Permeabilidad (m/día) |
|------|-------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Variable | hasta 52 m | Cuaternario / Roca Fracturada | Zona 1 = 10.4 / Zona 2 = 0.0875 |
| 2 | 50 | hasta 102 m | Roca Fractuada | Zona 2 = 0.0875 |
| 3 | 50 | hasta 152 m | Roca Compacta | Zona 2 = 0.01 |

Fuente: *Elaboración Propia*

La elevación de la superficie superior del dominio (Top Layer 1) es la superficie del terreno y es variable. La parte más alta de la superficie del terreno se encuentra aproximadamente a 5130 msnm cerca del borde sur de la región de celdas activas. El punto más bajo se encuentra a 4470 msnm, y es el correspondiente a la descarga del río Tambo (Al este del modelo). La Figura IV.4 muestra la superficie de elevación de terreno asignada al modelo.

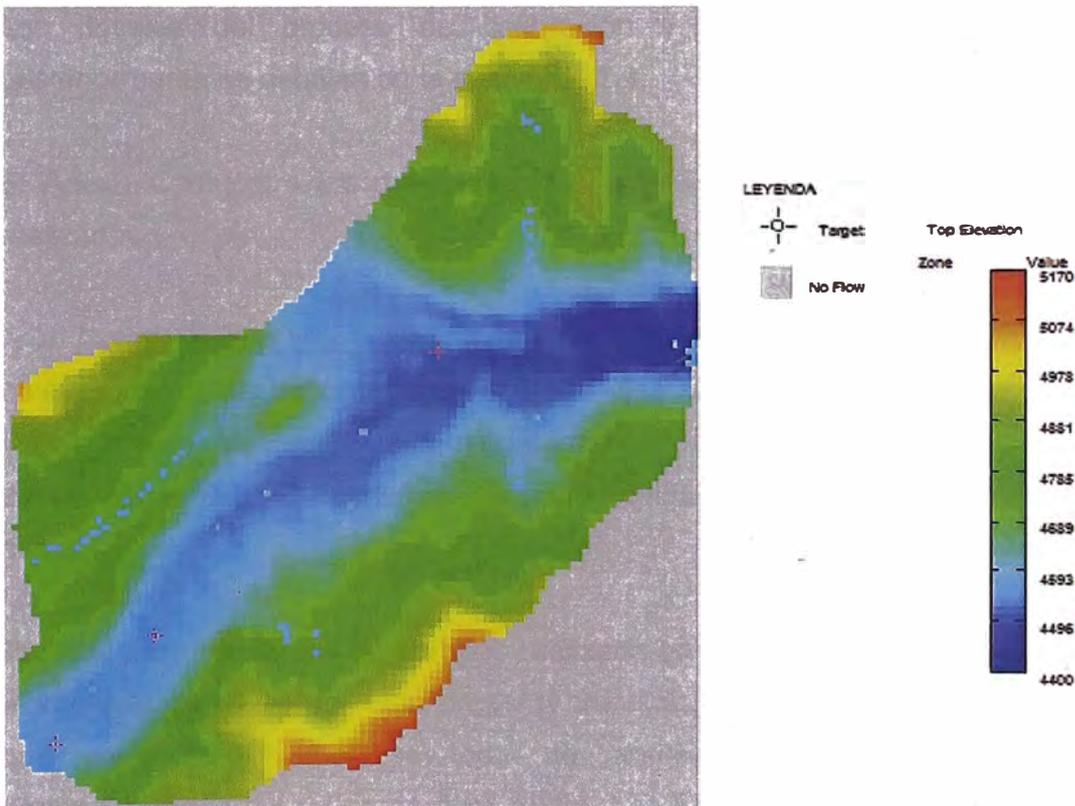


Figura IV.4 Distribución de la Elevación del Terreno

Fuente: *Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).*

4.2.2 Propiedades Hidráulicas

Las regiones del lecho de roca y cuaternario están representadas en el modelo por valores especificados para conductividad hidráulica y los parámetros del almacenamiento. Estos varían en todo el dominio.

En general, los valores iniciales utilizados al inicio de la calibración del modelo fueron aquellos sugeridos como adecuados por las pruebas de bombeo. Los valores iniciales fueron modificados progresivamente durante la calibración, para producir una simulación que igualó rigurosamente a la distribución de carga observada en el acuífero.

Aunque los valores de los parámetros indicados por las pruebas fueron modificados durante la calibración a condiciones observadas, se hizo un esfuerzo por asegurar que los valores finales adoptados en el modelo permanecieran dentro de los rangos de valores indicados por las pruebas.

Los detalles del proceso de calibración y los parámetros encontrados posteriormente se detallan en la sección 4.2.4.

El Anexo C muestra los detalles de los análisis de las pruebas de bombeo realizadas.

a. Conductividad Hidráulica (K)

Los resultados de las prueba de bombeo ejecutada en el pozo TW-3, que fue instalado en el reservorio acuífero cuaternario indican transmisividades del orden de los 200 m²/día. Esto implica una conductividad hidráulica aproximada de 10 m/día.

Por otra parte la prueba de bombeo realizada en el pozo TW-2, instalado sobre el intervalo de roca fracturada presenta transmisividades del orden de 2 m²/día que para un espesor saturado de aproximadamente 36 m, sugiere permeabilidades del orden de 0.04 m/día. Las Figuras IV.5 al IV.7 muestran la distribución de permeabilidad en las capas del modelo.

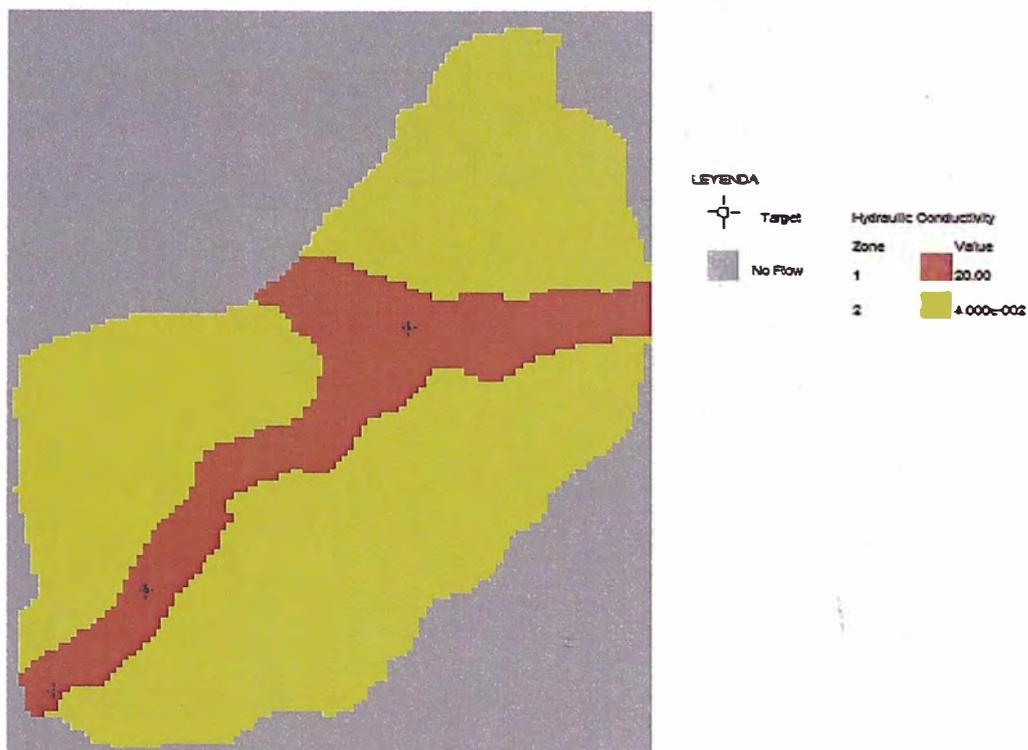


Figura IV.5 Distribución de Permeabilidad en Capa 1

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

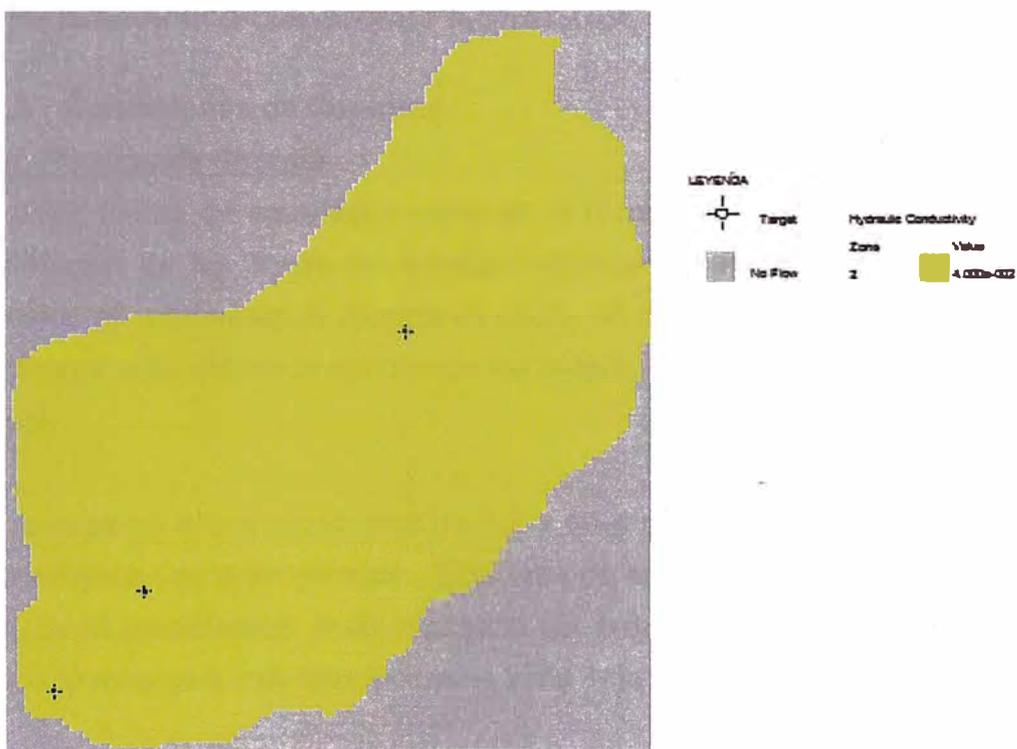


Figura IV.6 Distribución de Permeabilidad en Capa 2

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

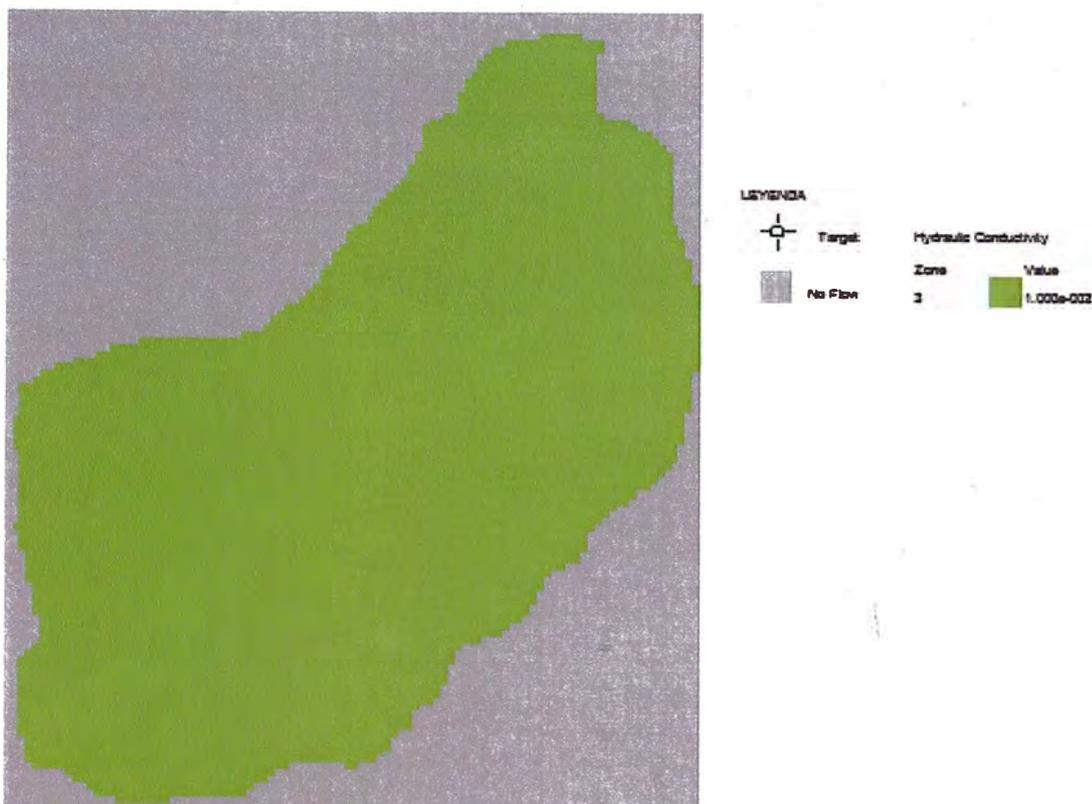


Figura IV.7 Distribución de Permeabilidad en Capa 3

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

4.2.3 Condiciones de Contorno

a. Recarga de Sistema

La única fuente de agua del modelo es la recarga. La Figura IV.8 muestra la distribución de las zonas de recarga numeradas en la Capa 1. También se muestra los volúmenes de recarga en m/día, en cada zona. Esta sección discute la recarga aplicada en la simulación de estado permanente de las condiciones actual.

La recarga se aplica a una tasa de 5.2×10^{-4} m/día para la mayoría de áreas que subyacen al lecho de roca. Esta tasa de recarga representa alrededor del 19% de la precipitación anual promedio del área de 950 mm/año. El área que recibe la recarga a esta tasa incluye la zona 1 de la Figura IV.8.

La tasa de recarga del cuaternario ha sido considerado en 1.2×10^{-4} m/día para la mayoría de áreas de aluviales, teniendo en cuenta que estas están cubiertas de capas de suelo orgánico de baja permeabilidad (bofedales).

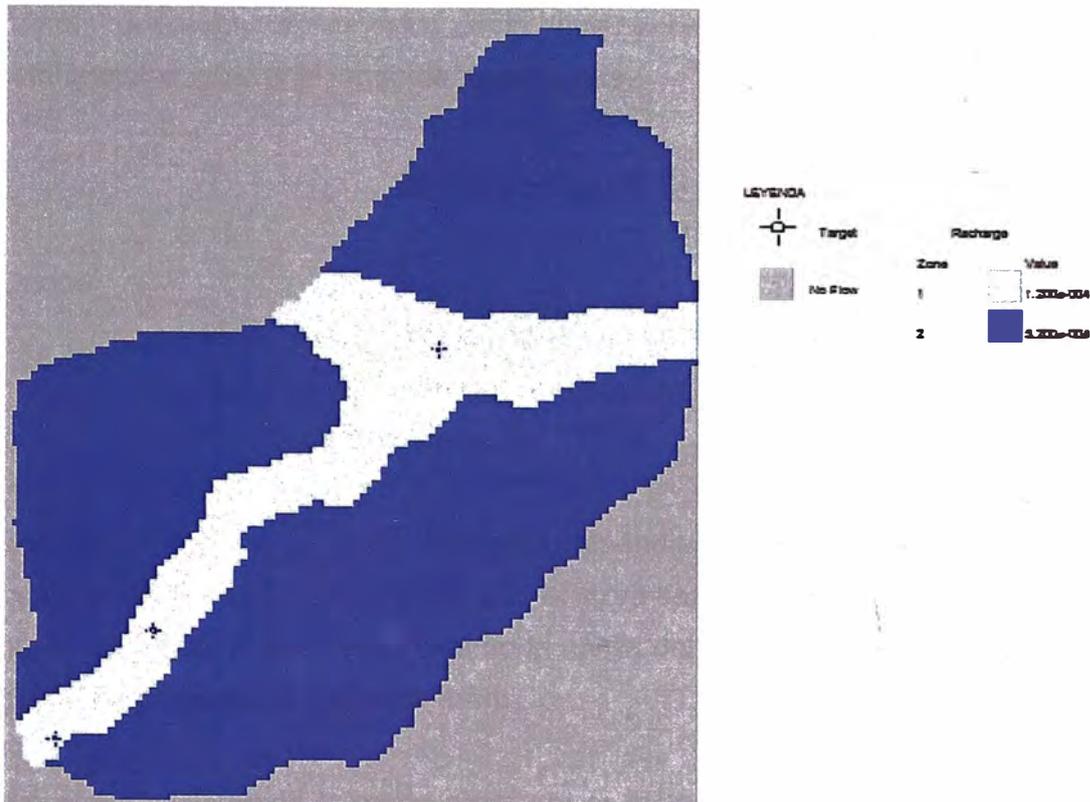


Figura IV.8 Distribución de Recarga

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

La recarga fue simulada empleando el paquete RSF4 (HydroGeologic, Inc, 2011). El paquete RSF4 proporciona varias mejoras sobre las limitaciones del paquete estándar de MODFLOW (Recharge package, RCH1). Cuando el paquete RCH1 es usado en un acuífero no confinado que está saturado hasta la superficie freática, este continuará aplicando la tasa de recarga especificada, lo cual resulta en obtener cargas hidráulicas por encima de la superficie de elevación del terreno (Top Layer 1). En cambio, el paquete RSF4, reduce la tasa de recarga especificada cuando un acuífero no confinado está saturado a la superficie de modo que las cargas simuladas no excedan la superficie del terreno o la elevación de encharcamiento preescrito. Los excesos de recarga (no aplicados por el paquete RSF4) es removida del modelo de aguas subterráneas.

b. Descarga de Agua Subterránea

Los cauces de flujo superficial o de quebradas, son representadas en el modelo mediante el empleo de celdas de drenaje (Drains BC). Las celdas de drenaje

fueron aplicadas al modelo como una serie de polilíneas, con cargas referenciales iguales al fondo de la quebrada.

$$\text{Si } H_{\text{dren}} < H_{\text{sim}} \rightarrow Q = 0$$

$$\text{Si } H_{\text{dren}} > H_{\text{sim}} \rightarrow Q = C. (H_{\text{dren}} - H_{\text{sim}})$$

Donde:

H_{dren} : Carga referencial asignada a la celda (L)

H_{sim} : Carga hidráulica simulada por el modelo (L)

C: Conductancia ($L^2.T^{-1}$)

Este es un tipo de condición de carga dependiente (mixta o de Cauchy) en la cual, las celdas tipo dren permiten que el agua sea descargada desde el acuífero hacia las aguas superficiales cuando la carga del acuífero simulada es más alta que la carga especificada en el dren.

Sin embargo, cuando la carga simulada es más baja, los drenes no muestran flujo de agua desde el cuerpo de agua superficial hacia el acuífero. De este modo, el modelo incluye la conceptualización de que las quebradas actúan como zonas de descargas con gradientes verticales ascendentes en los fondos de los valles y que el flujo de agua desde las quebradas hacia el acuífero es nulo.

Lo descrito previamente, es respaldado a partir de los niveles de carga hidráulica observados en los piezómetros existentes donde las cargas hidráulicas en los piezómetros ubicados cerca de las quebradas son mayores que los observados en otros lugares indicando un gradiente ascendente. La Figura IV.9 muestra la distribución de las celdas tipo dren asignada al modelo.

4.2.4 Calibración en Régimen Estacionario

a. Cargas Hidráulicas

El modelo fue calibrado a las condiciones previas al minado para condiciones estacionarias. Los objetivos de calibración están representados por niveles de agua medidos en los piezómetros (cargas hidráulicas en piezómetros Casagrande y en piezómetros de cuerda vibrante). Los puntos han sido subdivididos por capas del modelo de acuerdo a lo siguiente: 3 piezómetros en la capa 1; y 3 piezómetros en la capa 2.

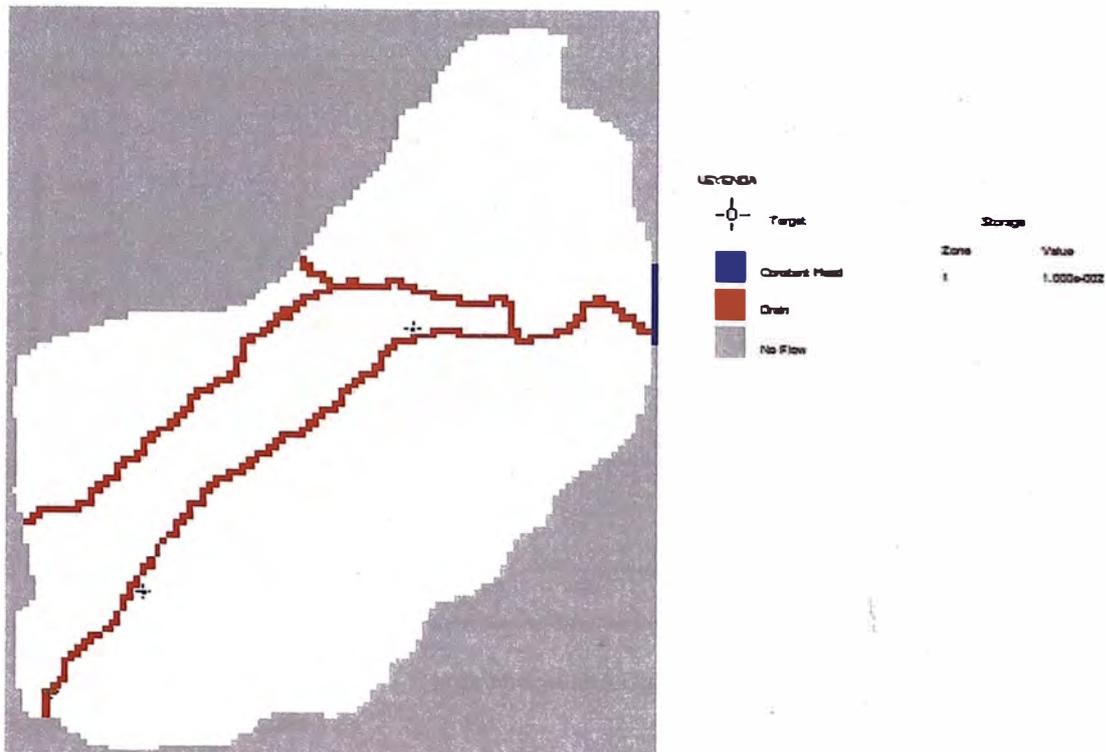


Figura IV.9 Distribución de Celdas tipo Dren

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

A partir de las elevaciones del intervalo de filtro y las mediciones de nivel de agua observadas, cada piezómetro fue asignado a determinada capa del modelo conteniendo el punto medio del intervalo de filtro.

El proceso de calibración consistió en variar los valores de conductividad hidráulica de modo que las cargas simuladas por el modelo puedan ser representativas y ajustadas a los valores de carga hidráulica observadas en los piezómetros.

La Figura IV.10 muestra la comparación de las cargas observadas versus simuladas en los 6 puntos observados (piezómetros y manantiales) en la calibración de estado estacionario. El gráfico también muestra la línea (línea 1:1) que representaría la correlación perfecta entre valores observados y simulados.

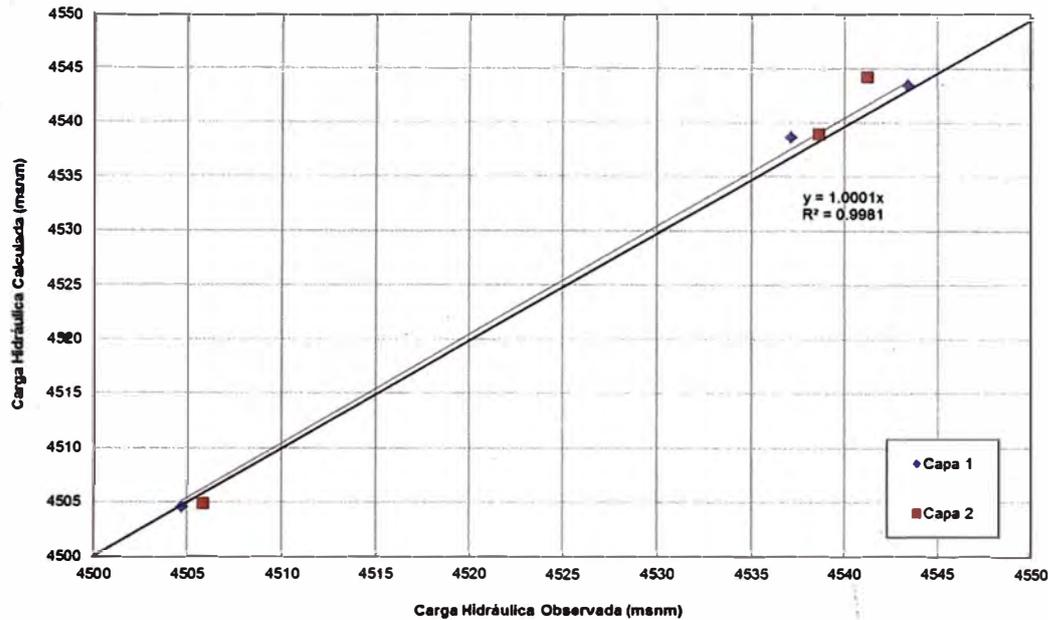


Figura IV.10 Carga Hidráulica Calculada vs Observada

Fuente: Elaboración Propia

La igualdad entre valores observados y simulados es buena en general, con un valor R^2 de 0.99 para la ecuación lineal que mejor se ajusta. La Tabla IV.2 muestra la comparación entre las cargas observadas y calculadas por el modelo. La diferencia promedio entre niveles de agua observados y simulados para los 6 puntos es -0.64 metros.

Tabla IV.2 Comparación de Cargas Hidráulicas Calculadas y Observadas

| Name | X | Y | Layer | Observed | Computed | Residual |
|-------|---------|-----------|-------|----------|----------|----------|
| PZ-1A | 783 760 | 8 364 518 | 1 | 4 543.40 | 4 543.42 | -0.02 |
| PZ-1B | 783 769 | 8 364 523 | 2 | 4 541.20 | 4 544.22 | -3.02 |
| PZ-2A | 784 469 | 8 365 325 | 1 | 4 537.12 | 4 538.62 | -1.50 |
| PZ-2B | 784 462 | 8 365 319 | 2 | 4 538.60 | 4 538.97 | -0.37 |
| PZ-3A | 786 509 | 8 367 429 | 1 | 4 504.70 | 4 504.53 | 0.17 |
| PZ-3B | 786 501 | 8 367 424 | 2 | 4 505.80 | 4 504.88 | 0.92 |

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla IV.3 muestra la estadística calculada de los objetivos de calibración. Los resultados estadísticos se basan sobre el residual, o la diferencia entre los valores observados (X_{obs}) y los valores simulados (X_{sim}), el cual es mostrado en la siguiente ecuación:

$$Residual = X_{obs} - X_{sim}$$

Otro de los parámetros que se presenta en la Tabla IV.3, es la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}$$

Asimismo, el error medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés) se define como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{N}}$$

El objetivo de la calibración fue el de minimizar los valores estadísticos presentados, dado que valores más bajos representan un mejor ajuste a las condiciones observadas.

Tabla IV.3 Resultados Estadísticos de la Calibración

| Parámetro Estadístico | Valor |
|-----------------------------------------------|-----------|
| Residual Medio (m) | -0.635903 |
| Promedio del Valor Absoluto de Residuales (m) | 1.002061 |
| Desviación Estándar de los Residuales (m) | 1.288212 |
| Suma de Residuales al Cuadrado, RSS | 12.383175 |
| Error medio Cuadrático, RMS (m) | 1.436615 |
| Residual Mínimo (m) | -3.018468 |
| Residual Máximo (m) | 0.924403 |
| Numero de Observaciones | 6 |
| Rango de Observaciones (m) | 38.7 |
| Desviación Estándar Escalado | 0.033287 |
| RMS escalado | 0.037122 |

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la calibración encontraron los siguientes valores de conductividad hidráulica para las zonas modeladas, Tabla IV.4

Tabla IV.4 Parámetros Calibrados

| Zona | Unidad Hidrogeológica | Color de Zona | Permeabilidad (m/d) | |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|-----------|
| | | | Pre Calibración | Calibrado |
| 1 | Aluvial | | 1.01E+01 | 1.42E+01 |
| 2 | Roca Fracturada | | 1.00E-03 | 8.00E-02 |
| 3 | Roca Compacta | | 1.00E-03 | 1.00E-02 |

Fuente: Elaboración Propia

El balance de masas del modelo indica un error 3% el cual puede considerarse admisible. La Tabla IV.5 muestra un resumen del Balance obtenido del modelo.

Tabla IV.5 Resultados de Balace de Masa de Modelo

| Item | Tasa m3/día | Tasa L/s |
|---------------------|---------------|---------------|
| INGRESOS (I) | 6923.0 | 80.1 |
| Recarga | 6923.0 | 80.1 |
| Carga Constante | 0.0 | 0.0 |
| SALIDAS (S) | 7133.0 | 82.6 |
| Quebradas | 3424.0 | 39.6 |
| Carga Constante | 3709.0 | 42.9 |
| I - S | 210.0 | 2.4 |
| ERROR (%) | -2.99% | -2.99% |

Fuente: Elaboración Propia

El modelo indica que casi el 48% de las salidas ocurren en las quebradas mientras que el 52% restante es descargada como salidas subterráneas. Las Figuras IV.11 y IV.12 muestran la superficie freática simulada y dirección del flujo, y la sección del modelo numérico, respectivamente

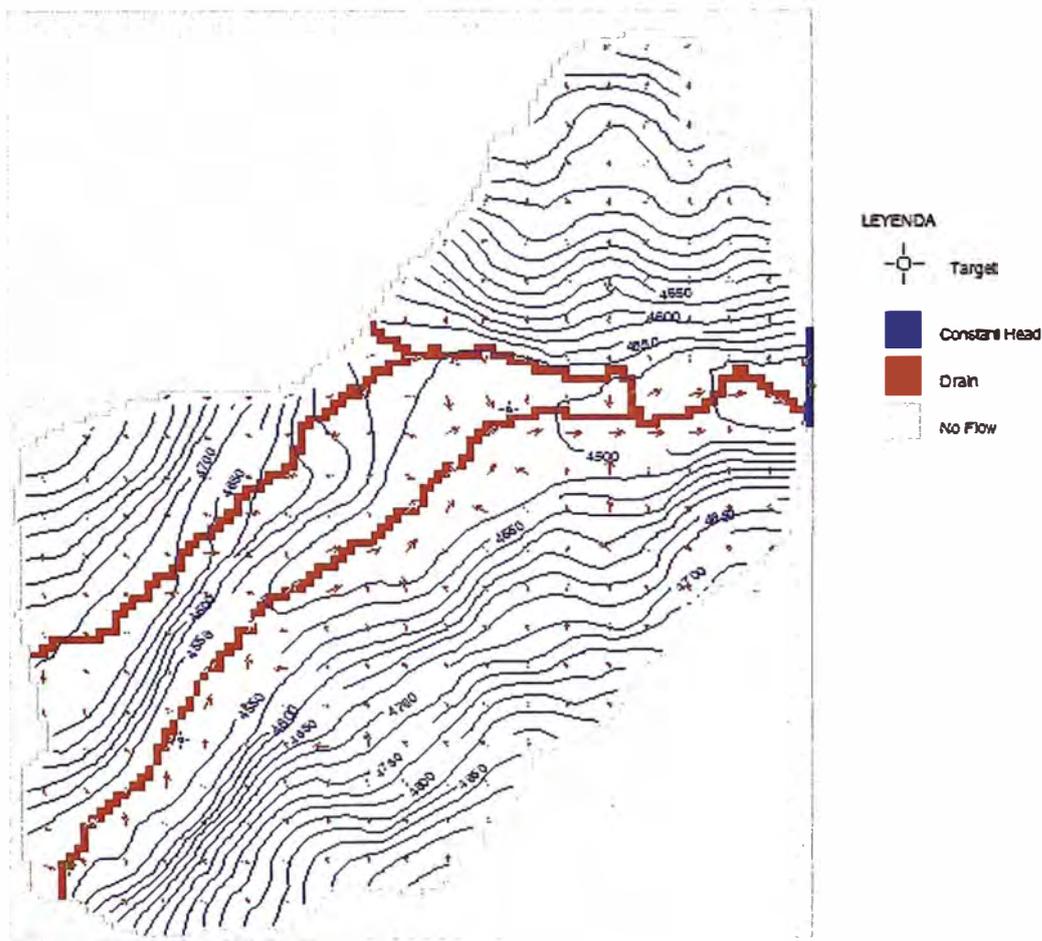


Figura IV.11 Superficie Freática Simulada y Dirección del Flujo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

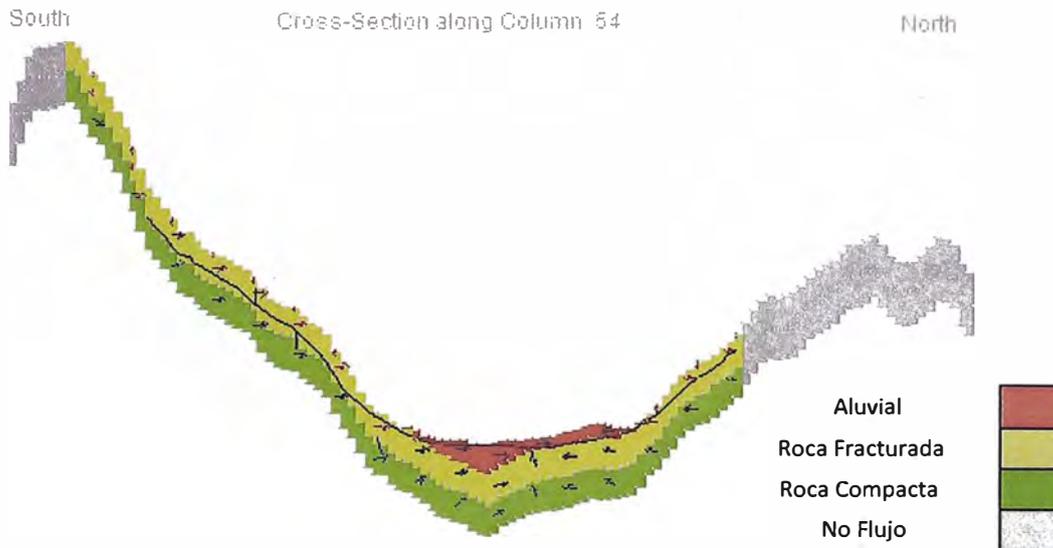


Figura IV.12 Sección del Modelo Numérico

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

4.3 EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS: SIMULACIONES PREDICTIVAS

La evaluación de los recursos hídricos subterráneos se basan principalmente en 2 aspectos:

- La recarga disponible
- Los descensos

4.3.1 Evaluación de la Recarga Disponible

Del modelo calibrado en régimen estacionario, se estimó la recarga neta al punto donde se sitúa el pozo TW-3. Para ello se efectuó el balance de masa del modelo calibrado hasta este punto. El aporte disponible hacia el TW-3 es la cantidad de agua que ha sido infiltrada hacia el acuífero y que no ha sido descargada hacia las quebradas. El área de aporte hacia el Pozo TW-3 se muestra en la Figura IV.13. Los resultados del balance se muestran en la Tabla IV.6.

Tabla IV.6 Balance hasta el Pozo TW-3

| Item | Tasa m3/día | Tasa L/s |
|--------------------------|----------------|---------------|
| INGRESOS (I) | 4207.0 | 48.7 |
| Recarga | 4207.0 | 48.7 |
| Carga Constante | 0.0 | 0.0 |
| SALIDAS (S) | 4434.0 | 51.3 |
| Descarga a Quebradas | 2827.0 | 32.7 |
| Aporte Disponible a TW-3 | 1607.0 | 18.6 |
| I - S | 227.0 | 2.6 |
| ERROR (%) | -5.25% | -5.25% |

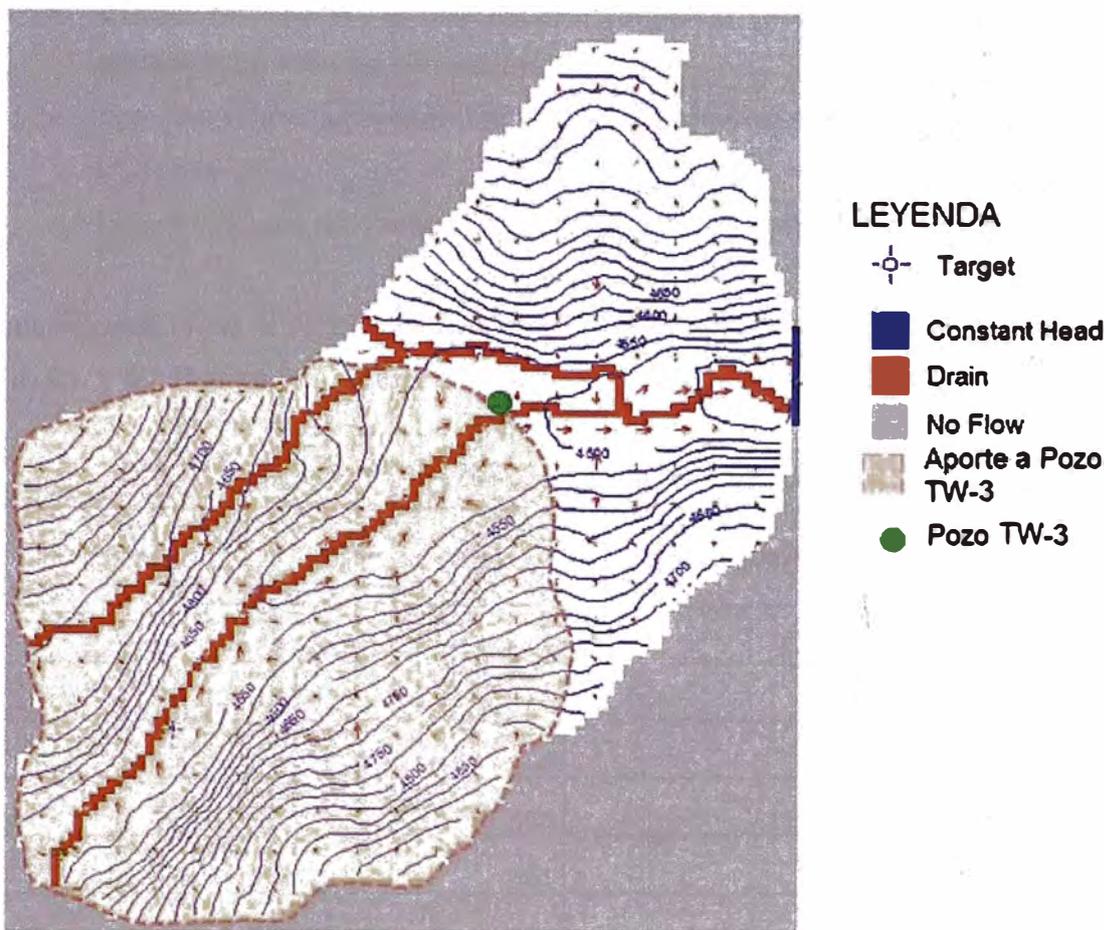


Figura IV.13 Área de aporte al TW-3

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

Como se observa en la Tabla 4.6, el aporte disponible hacia el TW-3 es de 18.6 L/s, siendo este caudal suficiente para cubrir las demandas de agua (11 L/s).

4.3.2 Evaluación de los Descensos

Para la evaluación de los descensos ocasionados por el bombeo del pozo TW-3, el modelo calibrado fue implementado para una simulación en régimen transitorio. Con la finalidad de representar y simular el bombeo de agua desde el pozo TW-3 durante la operación de la mina, el modelo consideró 20 periodos de tiempo (periodos de estrés) los cuales se resumen en la Tabla IV.7.

Las condiciones iniciales de carga hidráulica fueron las obtenidas de la calibración del modelo calibrado en régimen estacionario. Los resultados de la simulación indican lo siguiente:

- El sistema acuífero encuentra una condición pseudo-estacionaria a partir del segundo mes de simulación.
- Los descensos alcanzan únicamente 3.5 metros en las proximidades del pozo TW-3.
- Los descensos alcanzan 2 m a 0.8 km, 1 m a 1 km y 0.5 m a 1.7 km

Las Figuras IV.14 al IV.17 muestran la evolución del cono de descensos a los 7, 14, 31, y 60 días de bombeo.

Tabla IV.7 Datos de Periodos de Simulación

| Periodo | Tiempo (días) | Longitud (días) | Pasos de Tiempo |
|---------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 31 | 31 | 31 |
| 2 | 59 | 28 | 28 |
| 3 | 90 | 31 | 1 |
| 4 | 120 | 30 | 1 |
| 5 | 151 | 31 | 1 |
| 6 | 181 | 30 | 1 |
| 7 | 212 | 31 | 1 |
| 8 | 243 | 31 | 1 |
| 9 | 273 | 30 | 1 |
| 10 | 304 | 31 | 1 |
| 11 | 334 | 30 | 1 |
| 12 | 699 | 365 | 1 |
| 13 | 1064 | 365 | 1 |
| 14 | 1429 | 365 | 1 |
| 15 | 1794 | 365 | 1 |
| 16 | 2159 | 365 | 1 |
| 17 | 2524 | 365 | 1 |
| 18 | 2889 | 365 | 1 |
| 19 | 3254 | 365 | 1 |
| 20 | 3619 | 365 | 1 |

Fuente: Elaboración Propia

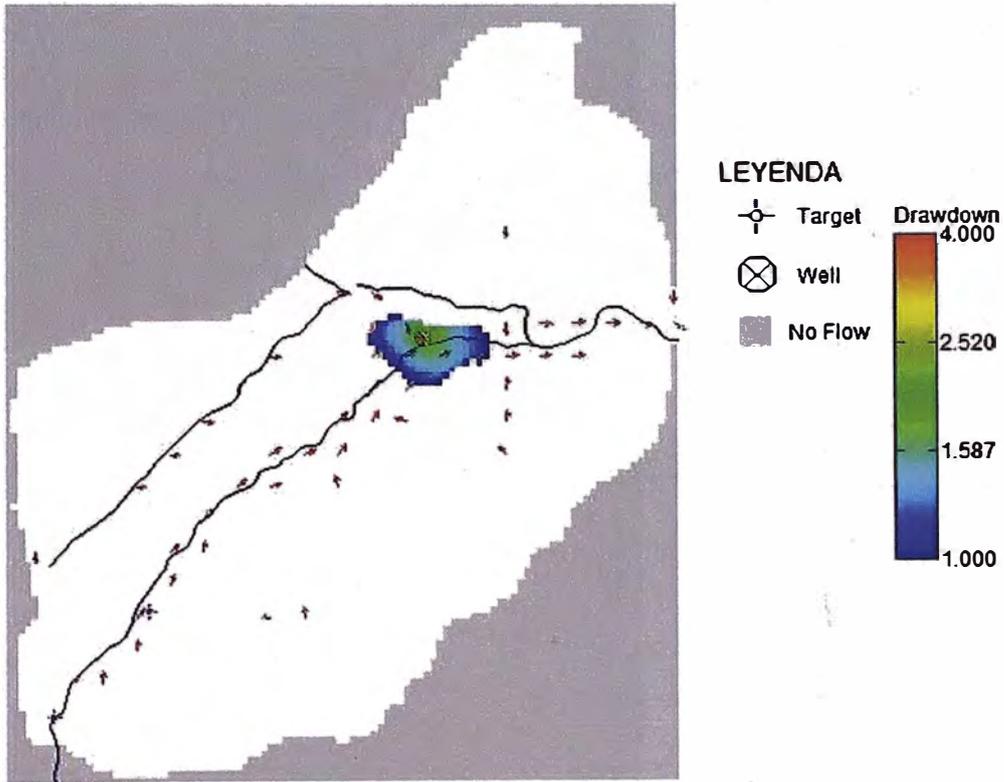


Figura IV.14 Cono de Descensos a 7 días de iniciado el Bombeo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

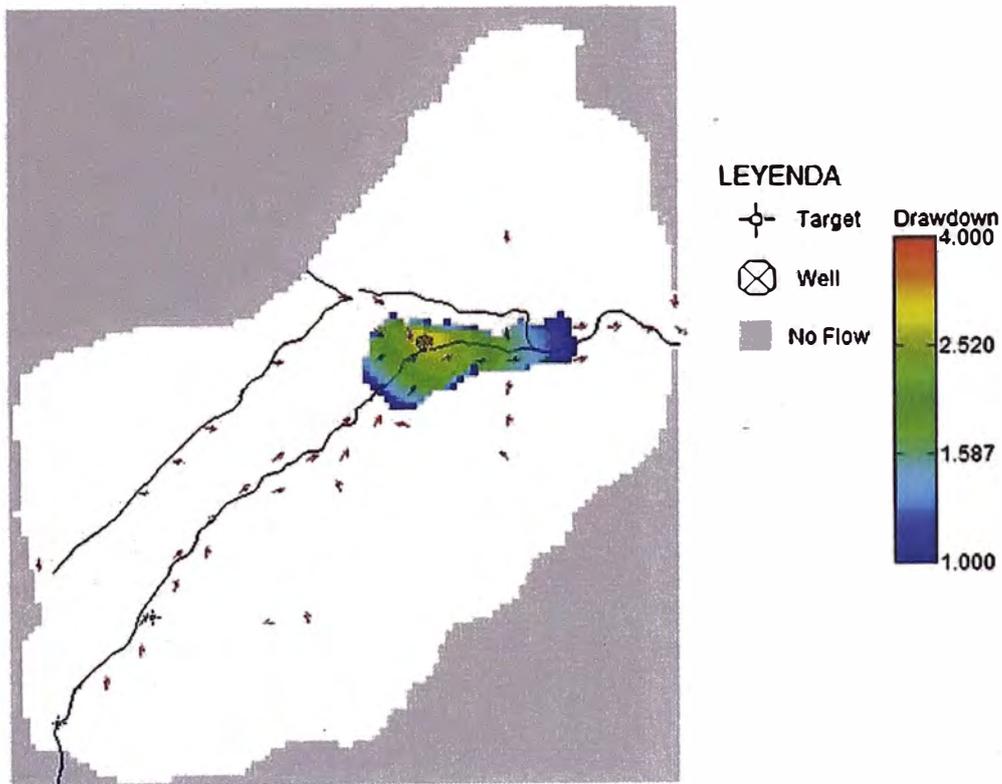


Figura IV.15 Cono de Descensos a 14 días de iniciado el Bombeo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

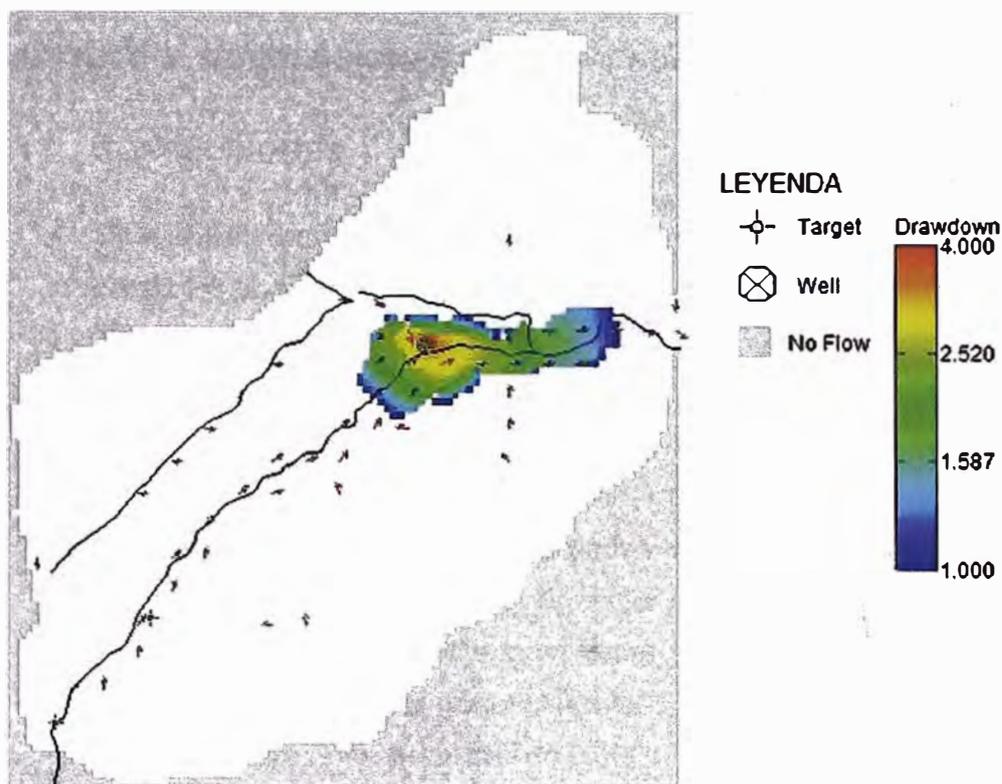


Figura IV.16 Cono de Descensos a 30 días de iniciado el Bombeo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

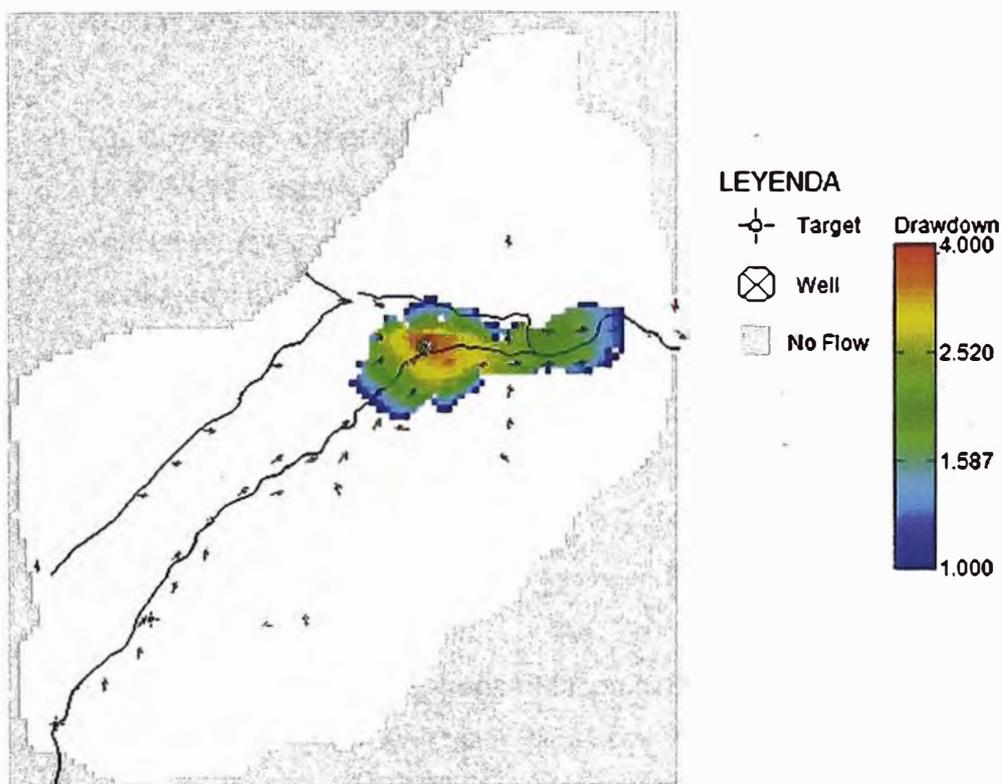


Figura IV.17 Cono de Descensos a 60 días de iniciado el Bombeo

Fuente: Salida del MODFLOW-SURFACT Hydro GeoLogic, Inc. (1996).

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- ✓ Se identificaron 3 Unidades Hidrogeológicas; una correspondiente a los depósitos cuaternarios (más productivo), otro a la roca fracturada y otra a la roca competente (muy baja permeabilidad).
- ✓ Para caracterizar los materiales se instalaron pozos de pruebas y piezómetros de observación en los que se ejecutaron pruebas de bombeo. Los resultados de las pruebas de bombeo determinaron que la permeabilidad del material aluvial es de 10.2 m/día mientras que la roca fracturada 0.0875 m/día. De igual forma se estimó que el Coeficiente de almacenamiento para el material aluvial es de 0.00215 mientras que para la roca fracturada es del orden de 0.0001.
- ✓ La tasa de recarga se estima como el 19 % de la precipitación, a partir de los registros de flujo asumiendo que todo lo que recarga es descargado por las quebradas como flujo base.
- ✓ Se construyó un modelo numérico empleando el código MODFLOW - SURFACT mediante la interface Groundwater Vistas. El modelo reprodujo satisfactoriamente el comportamiento de las cargas hidráulicas observado en los piezómetros instalados.
- ✓ Como resultado de la calibración del modelo se obtuvieron estadísticos bastante aceptables. Asimismo los valores de permeabilidad encontrados en la calibración guardan relación con los determinados en las pruebas de bombeo.
- ✓ La evaluación de los recursos hídricos subterráneos empleo dos criterios: 1) disponibilidad de recarga y 2) descensos de nivel freático. A partir del modelo calibrado se estimó que la recarga neta aprovechable es de 18.6 L/s.

- ✓ De igual forma, con el modelo calibrado se simuló el escenario en el que el pozo de prueba sea bombeado a 11 L/s (demanda de agua para la operación) de manera continua por 9 años (periodo de operación de la mina). Para ello se implementó el modelo en régimen transitorio y se evaluaron los descensos. Los descensos estimados por el modelo alcanzan los 2 m a 0.8 km, 1 m a 1 km y 0.5 m a 1.7 km, por lo tanto no son considerados significativos
- ✓ Finalmente se puede concluir que el acuífero cuaternario del valle de Anrohuyo puede cubrir las demandas de agua de la operación minera sin causar impacto significativo en el agua subterránea de manera sostenible.

5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Si bien los resultados de las pruebas de bombeo ya indican que el medio acuífero aluvial es productivo, se requeriría mejorar el conocimiento del basamento rocoso mediante investigaciones geofísicas, dado que para el presente estudio este ha sido inferido a partir de 3 perforaciones y así fue implementado en el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Barrera, R.C. (1994). "Estudio Hidrogeológico definitivo de la cuenca de la laguna Vizcachas". Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- ✓ Cárdenas Ramírez, J. L. (1997) "Simulación del Acuífero de Chilca y Control de la Intrusión Marina". Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- ✓ Custodio, E. y Llamas. (1986). Hidrogeología Subterránea. Ed. Omega. Barcelona.
- ✓ De Smedt, F. (1999). The handbook of groundwater Engineering. CRC PreSs. Bruselas.
- ✓ Domenico, P.A. (1972). Concepts and Models in ground water Hydrology. Mc Graw Hill Book Company.
- ✓ Freeze, R.A.; Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall. Upper
- ✓ Hydrogeologic, Inc., (1997). "MODFLOW-SURFACT" Documentation (Version 3.0). Vol. 1 and 2, Hydrogeologic, Inc., Herndon, Virginia, USA.
- ✓ HydroSOLVE, Inc. (2007), AQTESOLV for Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista: HydroSOLVE, Inc., Reston, Virginia, version 4.50.004 – Profesional.
- ✓ McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., (1988). "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations" Book 6, Chapter A1.

- ✓ Miyashiro, V.R. (1989). "Simulación del acuífero altiplánico El Ayro-Taw". Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

- ✓ Sánchez San Román, F. Javier (2013): Hidrología e Hidrogeología Dpto. Geología- Univ. Salamanca, España.

ANEXOS

ANEXO A

Registros Litológicos de Perforaciones

Registro de Perforación Hidrogeológica

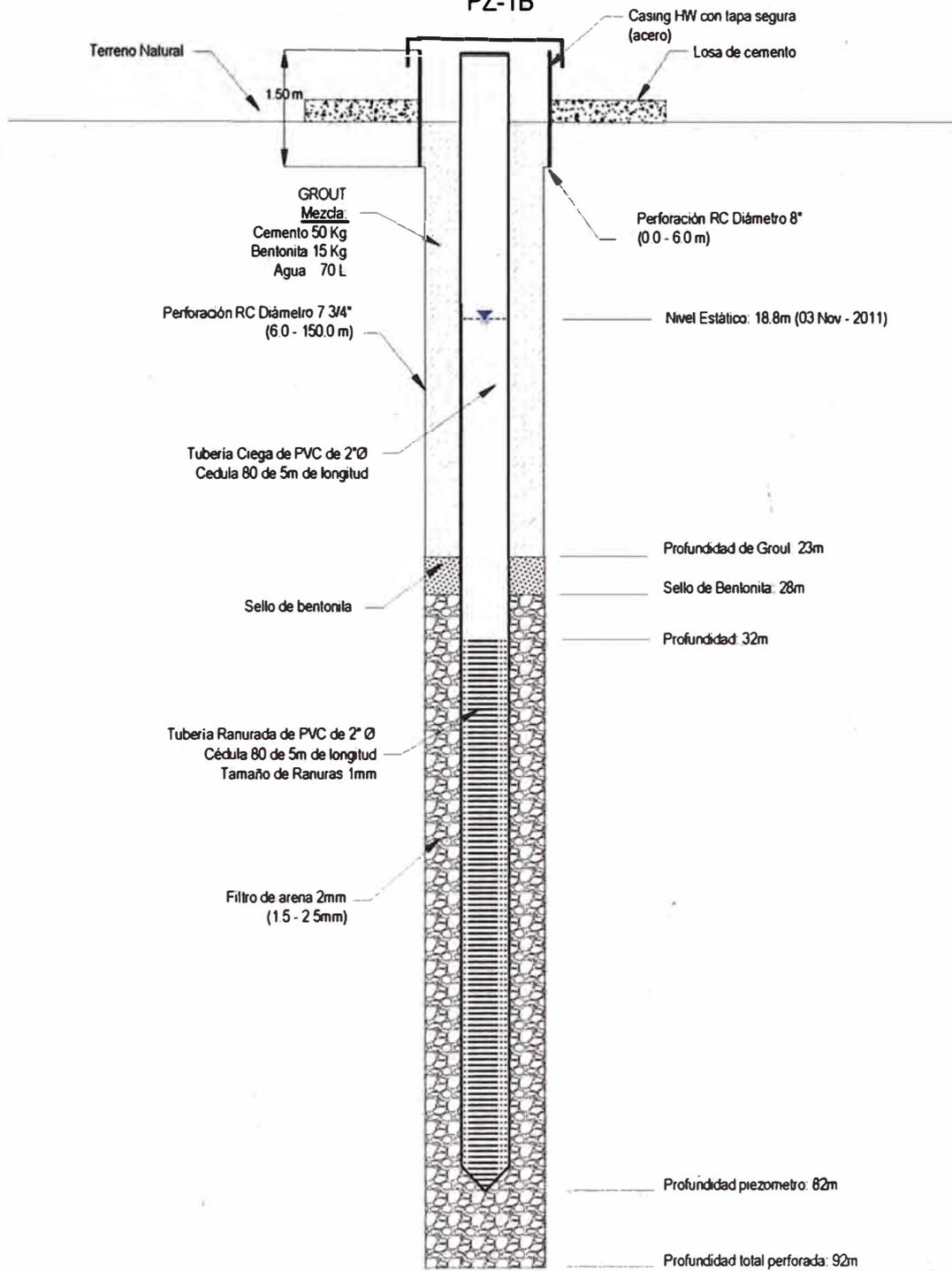
Proyecto : - **Sist. de Coordenadas** : PSAD 56 **Azímüt** : 0° **Sondaje** : TW-3
Proyecto N° : - **Norte** : 8,367,435 **Buzamiento** : -90 **Cía. de Perforación** : Ruen Drilling
Ubicación : Q. Anrohuyojo **Este** : 786,523 **Diámetro** : 16" **Tipo de Perforación** : RC
Fecha : 16/08/2011 **Elevación (mnm)** : 4,530 **Supervisor** : G. Calderón **Prof. Perforación (m)** : 52.00

| Profundidad (m) | Tiempo de Perf. (min) | Litología | Material Cuaternario | | | | Diámetro (pulg) | Caudal (L/s) | Comentarios |
|-----------------|-----------------------|--------------|----------------------|--------|--------|-----------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| | | | % Grav. | % Are. | % Límó | % Arcilla | | | |
| 0.00 | | | | | | | | | |
| 2.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 40 | 5 | 5 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 4.00 | | Dep. Aluvial | 45 | 40 | 10 | 5 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 6.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 35 | 10 | 5 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 8.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 10.00 | | Dep. Aluvial | 40 | 50 | 5 | 5 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 12.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 40 | 20 | 10 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 14.00 | | Dep. Aluvial | 35 | 50 | 10 | 5 | 16" | 1.3 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 16.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 18.00 | | Dep. Aluvial | 25 | 40 | 20 | 15 | 16" | Agua insignificante. Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 20.00 | | Dep. Aluvial | 20 | 45 | 20 | 15 | 16" | Agua insignificante. Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 22.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | Agua insignificante. Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 24.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 40 | 5 | 5 | 16" | Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 25.00 | | Dep. Aluvial | 45 | 40 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 26.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 35 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 27.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 28.00 | | Dep. Aluvial | 40 | 50 | 5 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 29.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 40 | 20 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 30.00 | | Dep. Aluvial | 35 | 50 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 31.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 32.00 | | Dep. Aluvial | 25 | 40 | 20 | 15 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 33.00 | | Dep. Aluvial | 20 | 45 | 20 | 15 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 34.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 35.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 40 | 5 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 36.00 | | Dep. Aluvial | 45 | 40 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 37.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 35 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 38.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 39.00 | | Dep. Aluvial | 40 | 50 | 5 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 40.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 40 | 20 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 41.00 | | Dep. Aluvial | 35 | 50 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 42.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 43.00 | | Dep. Aluvial | 25 | 40 | 20 | 15 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 44.00 | | Dep. Aluvial | 20 | 45 | 20 | 15 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 45.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 46.00 | | Dep. Aluvial | 50 | 35 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 47.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 48.00 | | Dep. Aluvial | 40 | 50 | 5 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 49.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 40 | 20 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 50.00 | | Dep. Aluvial | 35 | 50 | 10 | 5 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 51.00 | | Dep. Aluvial | 30 | 50 | 10 | 10 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |
| 52.00 | | Dep. Aluvial | 25 | 40 | 20 | 15 | 16" | 0.2 Suelo con presencia de gravas subangulosas de composición polimigica. | |

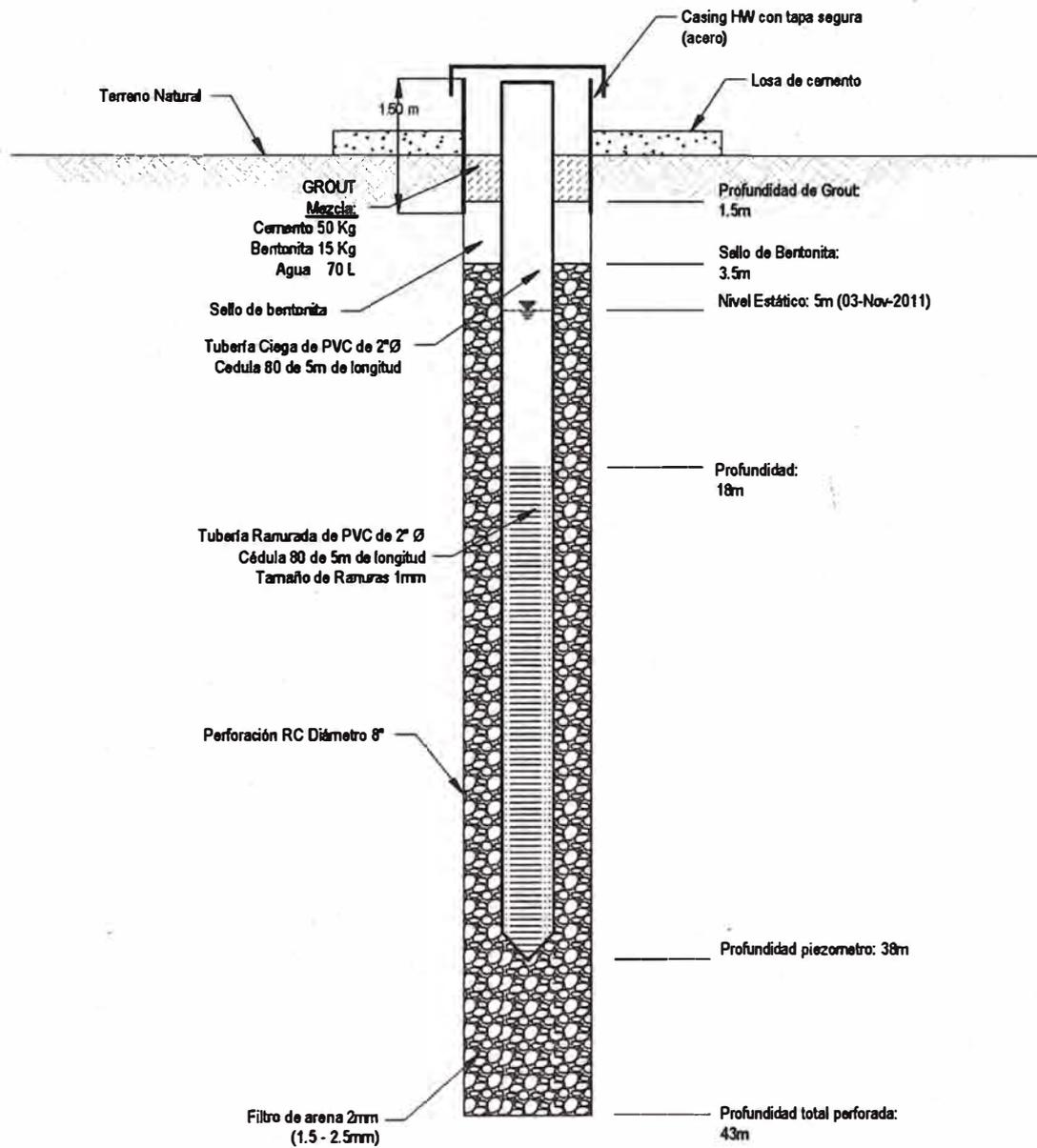
ANEXO B

Diagrama de Piezómetros y Pozos Instalados

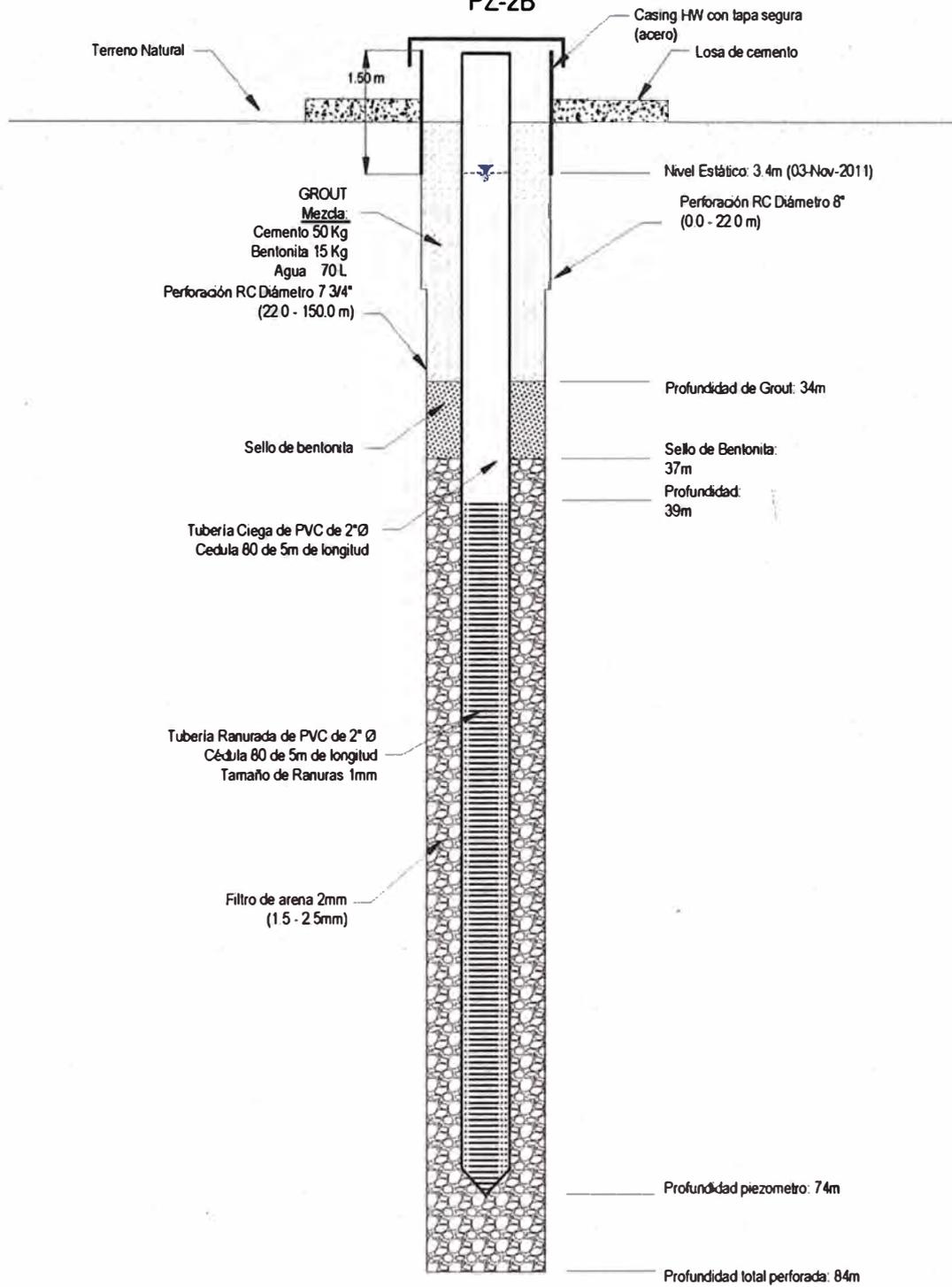
PIEZÓMETRO PVC PZ-1B



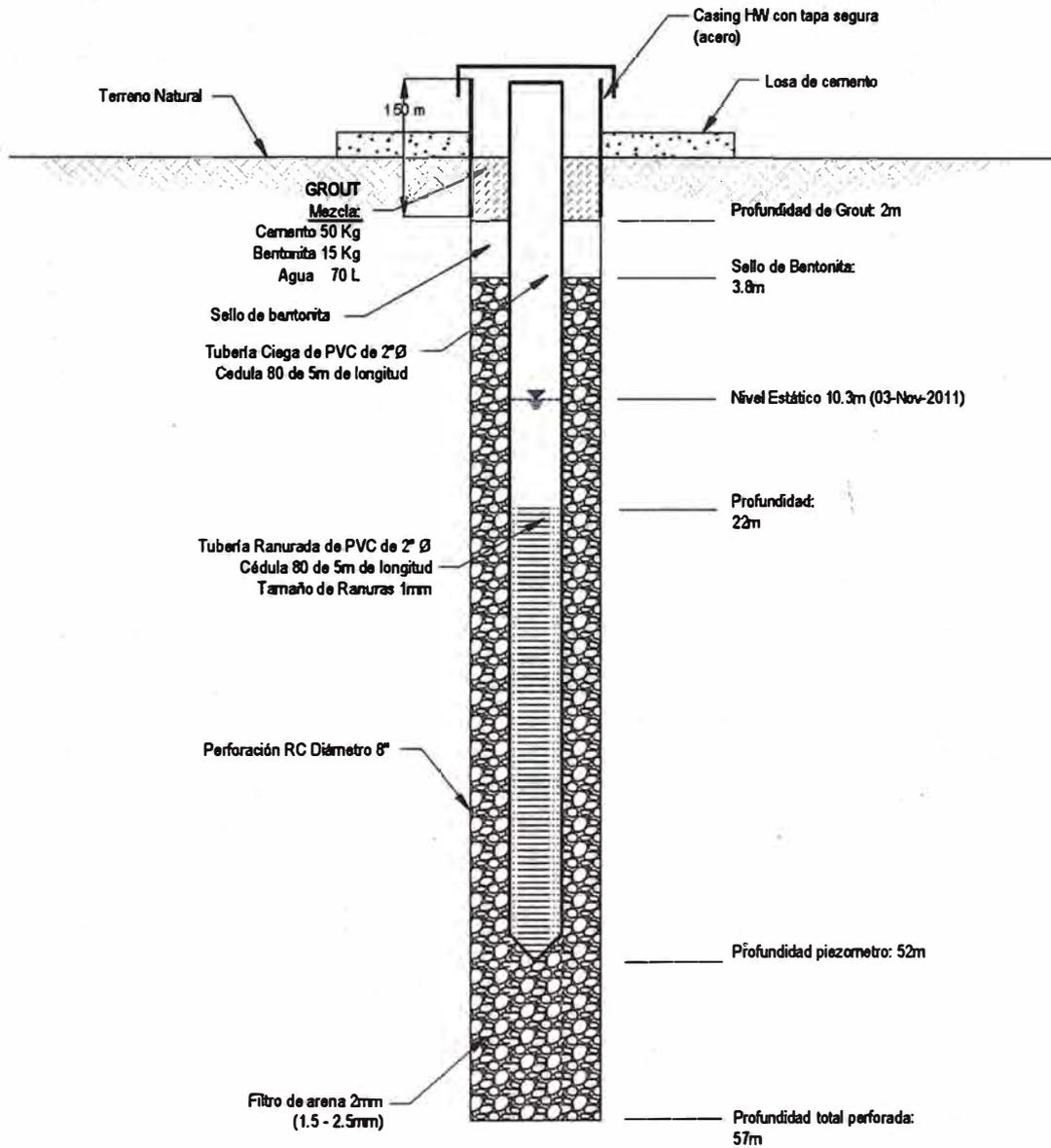
PIEZÓMETRO PVC PZ-2A



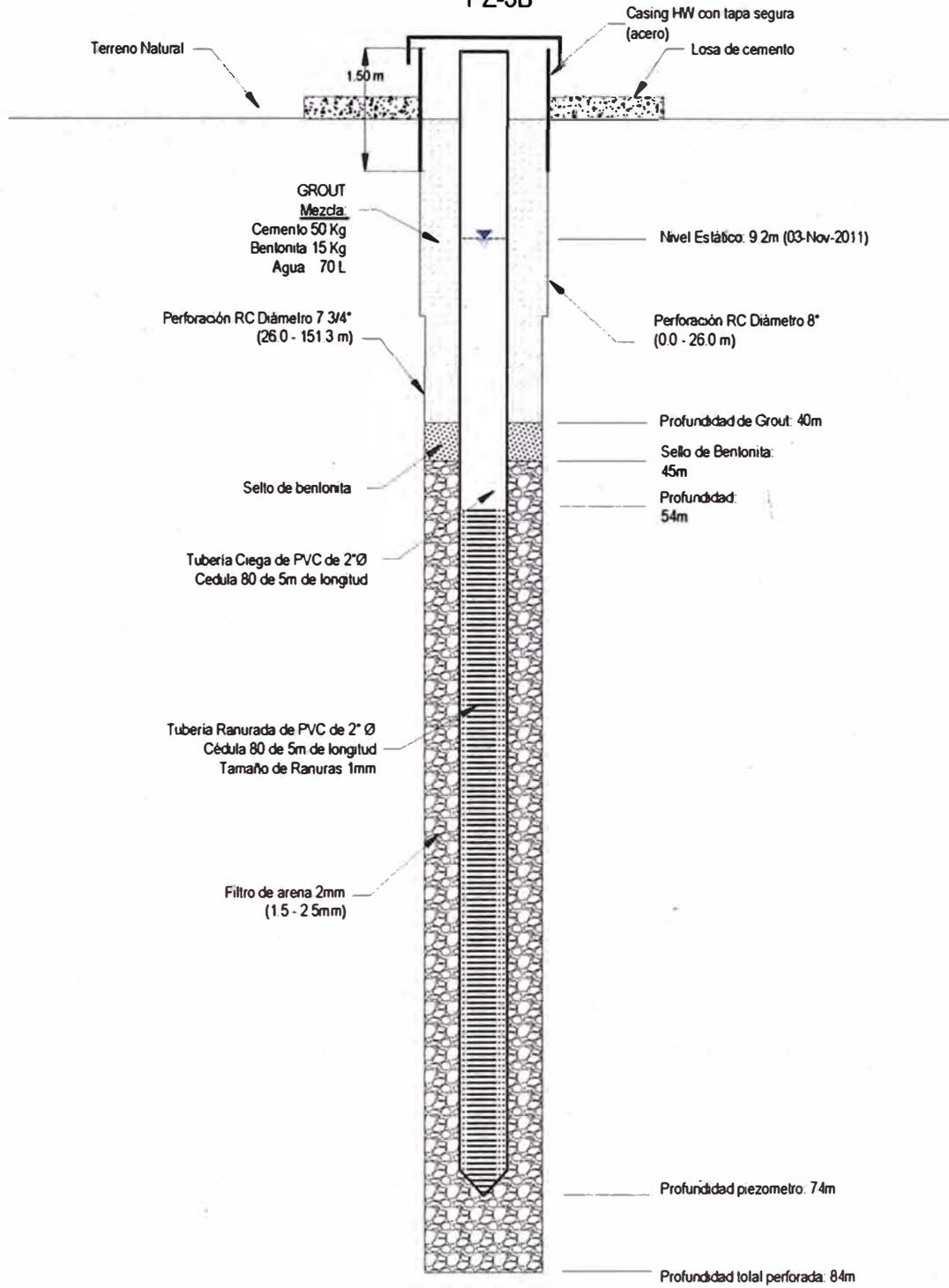
PIEZÓMETRO PVC PZ-2B



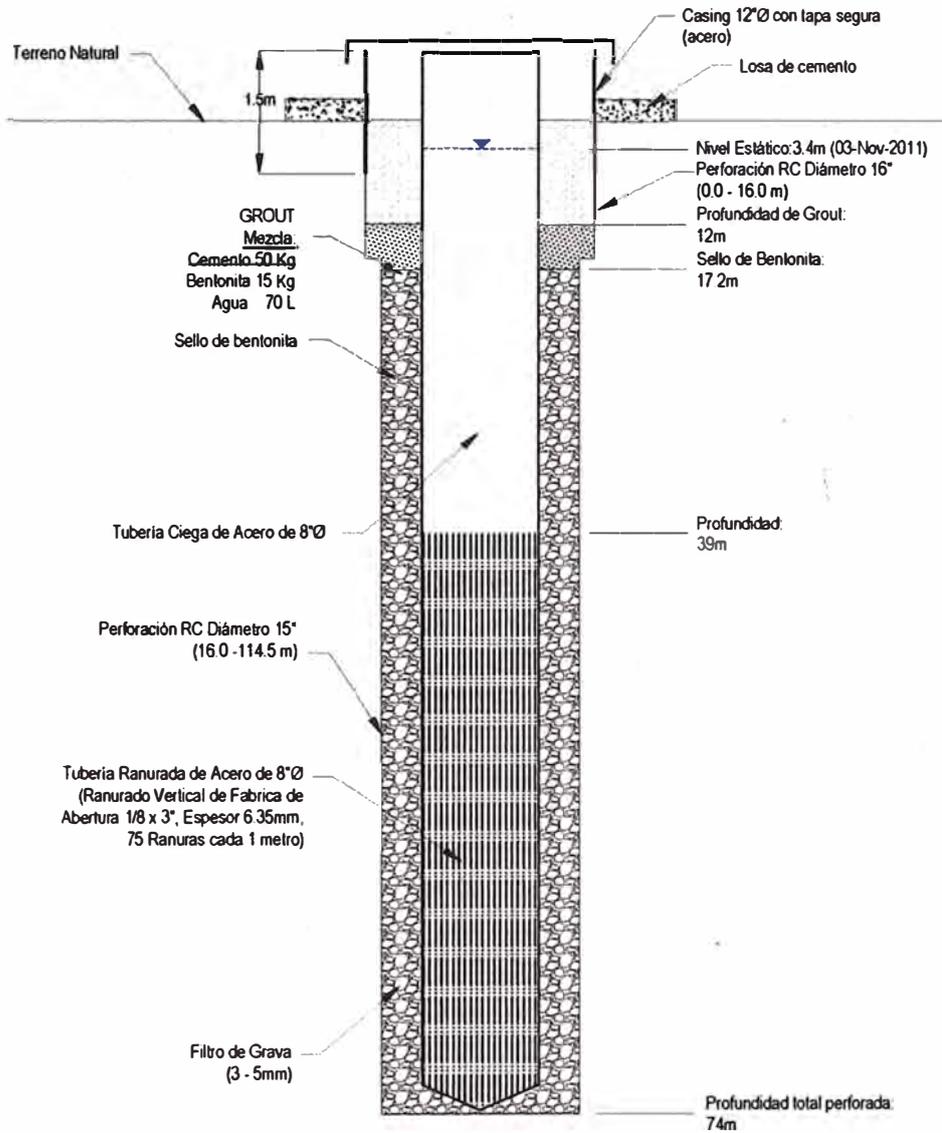
PIEZÓMETRO PVC PZ-3A



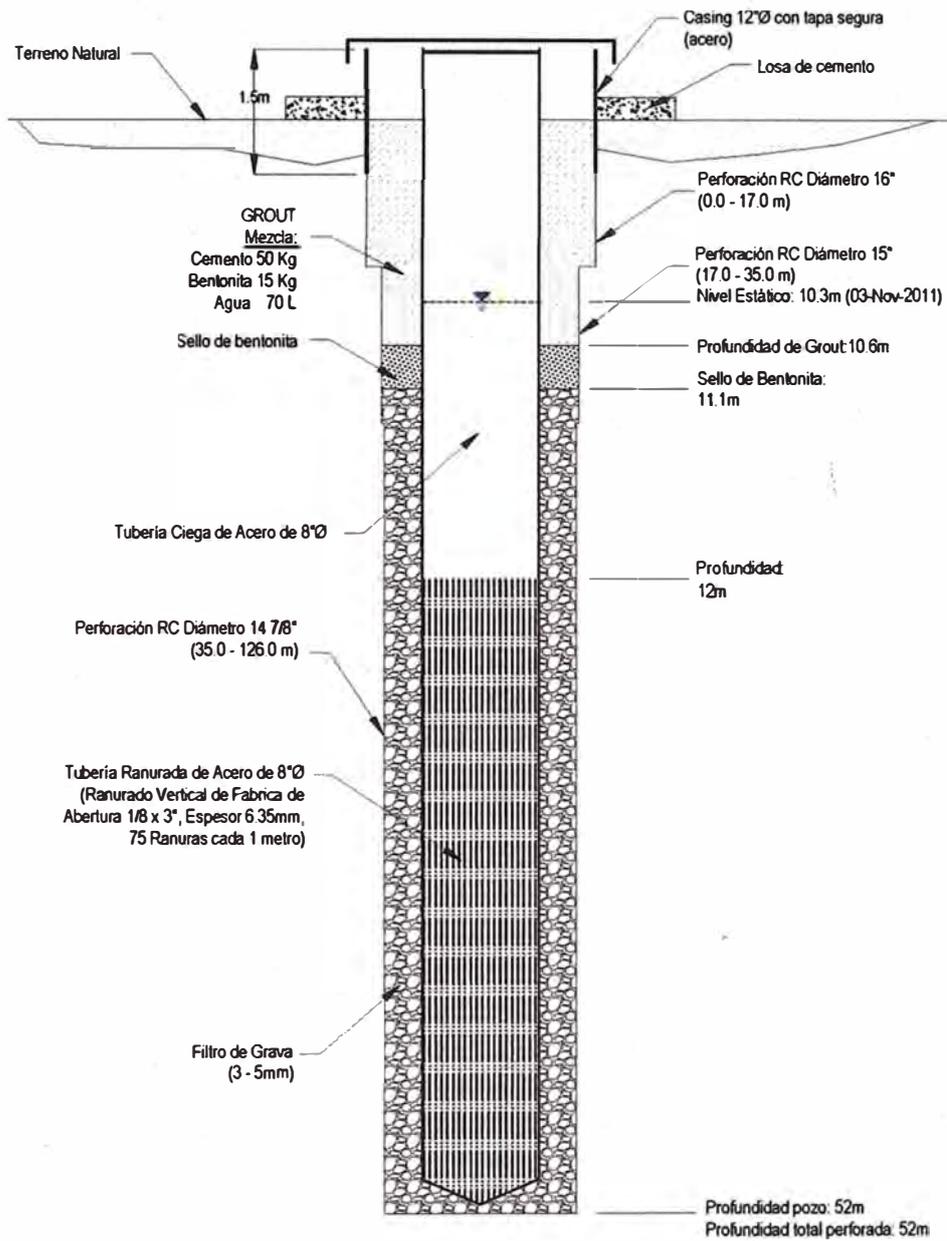
PIEZÓMETRO PVC PZ-3B



POZO DE PRUEBA TW2

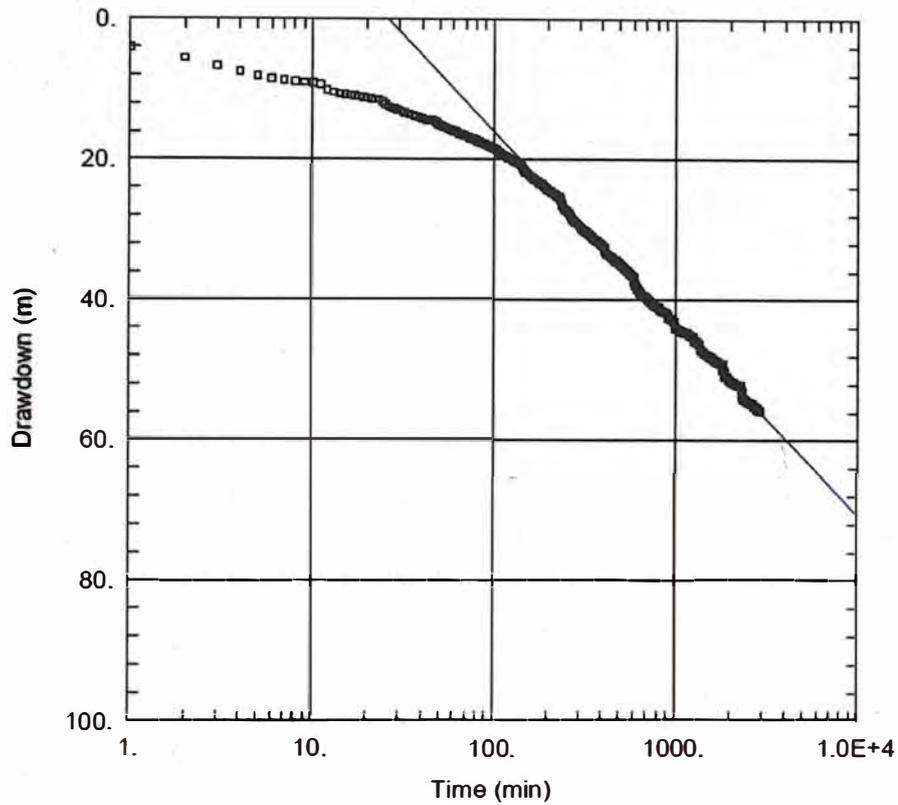


POZO DE PRUEBA TW3

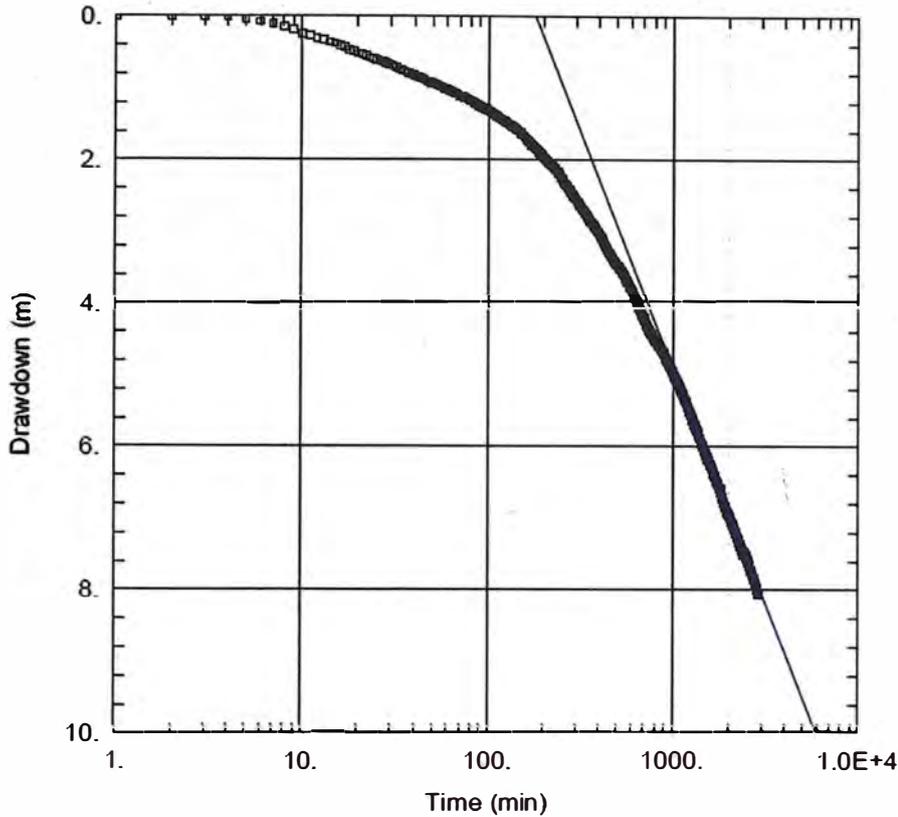


ANEXO C

Pruebas de Bombeo



| <u>ANALISIS DE DESCENSOS EN TW-2 - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-2</u> | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------|-------|-------|
| Data Set: C:\...laTW2_CJ.aqt | | | Time: 18:40:48 | | |
| Date: 03/19/14 | | | | | |
| <u>PROJECT INFORMATION</u> | | | | | |
| Company: <u>Karla Calderón</u> | | | | | |
| Client: <u>UNI</u> | | | | | |
| Location: <u>Cuzco</u> | | | | | |
| Test Well: <u>TW-2</u> | | | | | |
| <u>AQUIFER DATA</u> | | | | | |
| Saturated Thickness: <u>35. m</u> | | | Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u> | | |
| <u>WELL DATA</u> | | | | | |
| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-2 | 0 | 0 | □ TW-2 | 0 | 0 |
| <u>SOLUTION</u> | | | | | |
| Aquifer Model: <u>Confined</u> | | | Solution Method: <u>Cooper-Jacob</u> | | |
| T = <u>1.564</u> m ² /day | | | S = <u>0.5008</u> | | |



ANALISIS DE DESCENSOS EN PZ-2B - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-2

Data Set: C:\...bTW2_PZ2B_CJ_KBB.aqt
 Date: 03/27/14

Time: 20:09:47

PROJECT INFORMATION

Company: Karla Calderón
 Client: UNI
 Location: Cuzco
 Test Well: TW-2

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 35. m

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA

| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
|---------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-2 | 0 | 0 | □ PZ-2B | 24.64 | 0 |

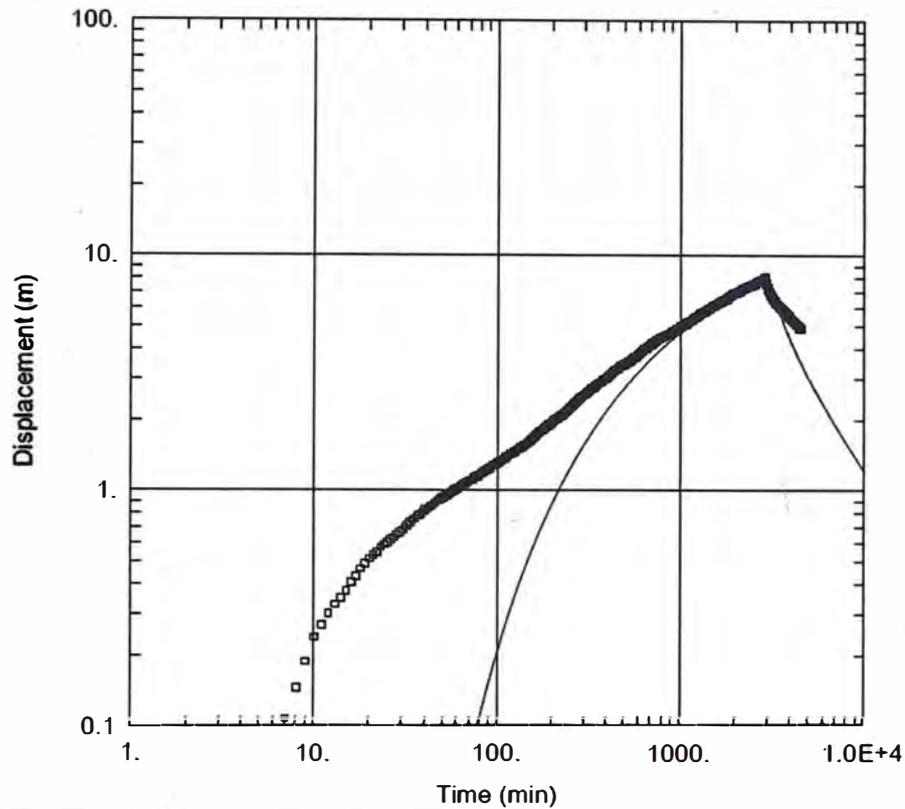
SOLUTION

Aquifer Model: Confined

Solution Method: Cooper-Jacob

T = 6.49 m²/day

S = 0.002993



ANALISIS DE DESCENSOS EN PZ-2B - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-2

Data Set: C:\...c\TW2 PZ2B TartakNeuman KBB.agt

Date: 03/19/14

Time: 18:42:04

PROJECT INFORMATION

Company: Karla Calderón

Client: UNI

Location: Cuzco

Test Well: TW-2

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 35 m

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 0.001

WELL DATA

Pumping Wells

| Well Name | X (m) | Y (m) |
|-----------|-------|-------|
| TW-2 | 0 | 0 |

Observation Wells

| Well Name | X (m) | Y (m) |
|-----------|-------|-------|
| □ PZ-2B | 24.64 | 0 |

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Tartakovsky-Neuman

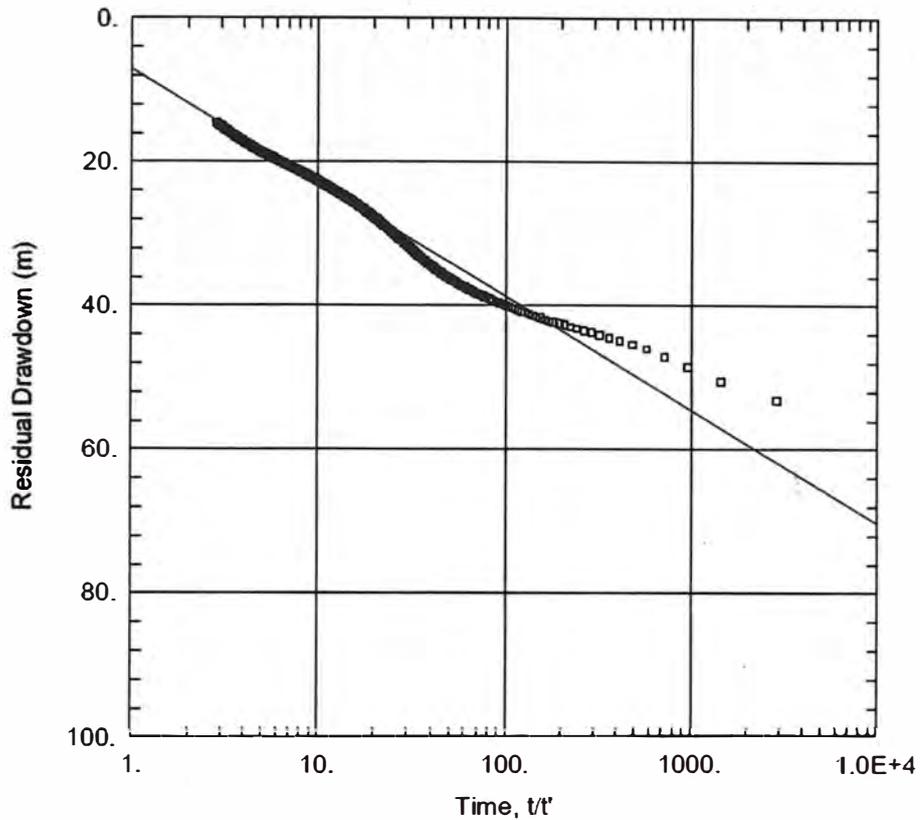
T = 4.915 m²/day

S = 0.004287

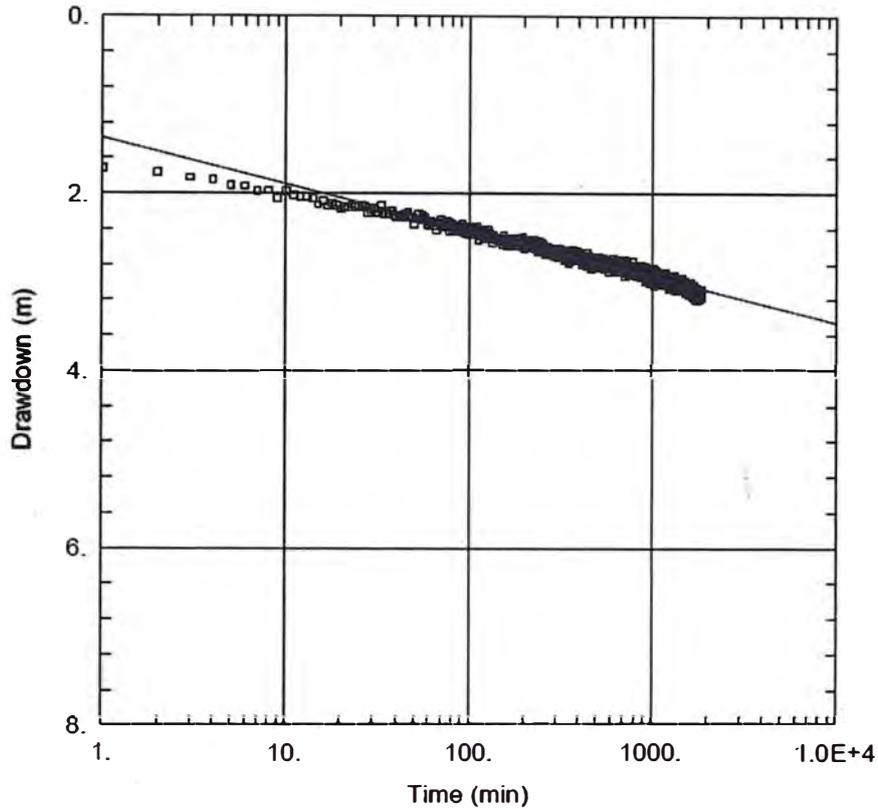
Sy = 0.001

Kz/Kr = 0.001

kD = 0.01



| <u>ANALISIS DE RECUPERACIÓN EN TW-2 - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-2</u> | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------|-------|-------|
| Data Set: <u>C:\...eTW2_TheisRC.aqt</u> | | | Time: <u>10:53:46</u> | | |
| Date: <u>03/27/14</u> | | | | | |
| <u>PROJECT INFORMATION</u> | | | | | |
| Company: <u>Karla Calderón</u> | | | | | |
| Client: <u>UNI</u> | | | | | |
| Location: <u>Cuzco</u> | | | | | |
| Test Well: <u>TW-2</u> | | | | | |
| <u>AQUIFER DATA</u> | | | | | |
| Saturated Thickness: <u>35. m</u> | | | Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u> | | |
| <u>WELL DATA</u> | | | | | |
| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-2 | 0 | 0 | □ TW-2 | 0 | 0 |
| <u>SOLUTION</u> | | | | | |
| Aquifer Model: <u>Confined</u> | | | Solution Method: <u>Theis (Recovery)</u> | | |
| T = <u>2.706 m²/day</u> | | | S/S' = <u>0.3549</u> | | |



ANALISIS DE DESCENSOS EN TW-3 - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-3

Data Set: C:\...lbTW-3_ObsTW-3_DescensoCooperJacob.aqt
 Date: 03/19/14 Time: 18:56:22

PROJECT INFORMATION

Company: Karla Calderon
 Client: UNI
 Location: Cuzco
 Test Well: TW-3

AQUIFER DATA

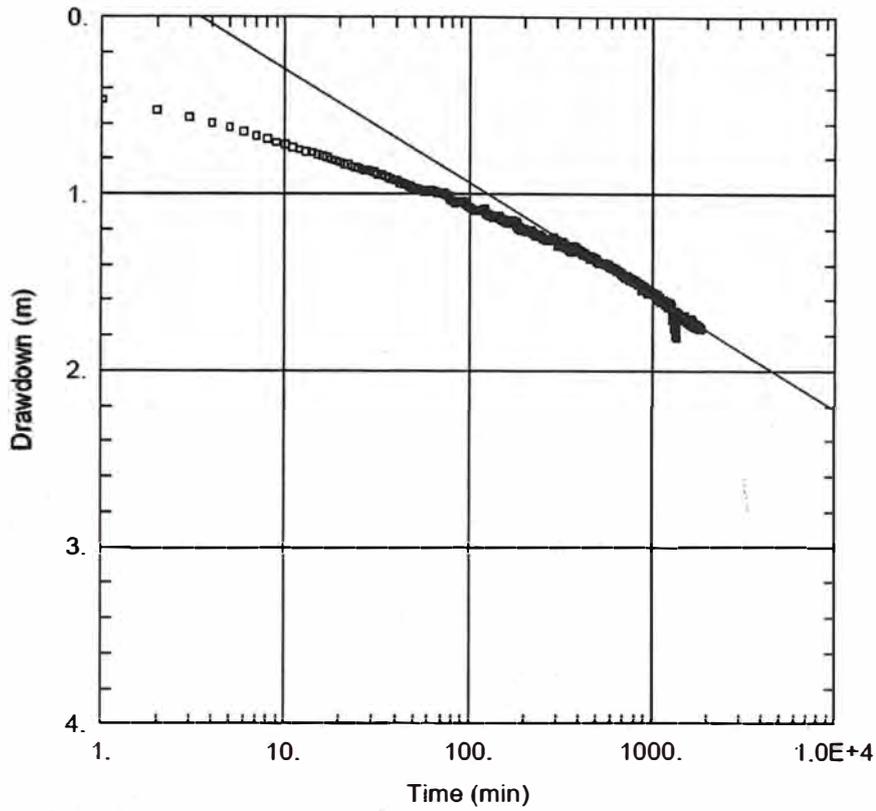
Saturated Thickness: 42. m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA

| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
|---------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-3 | 0 | 0 | □ TW-3 | 0 | 0 |

SOLUTION

Aquifer Model: Confined Solution Method: Cooper-Jacob
 T = 455.7 m²/day S = 0.07396



ANALISIS DE DESCENSOS EN PZ-3A - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-3

Data Set: C:\...cTW-3 ObsPZ-3A DescensoCooperJacob.aqt
 Date: 03/27/14 Time: 11:20:01

PROJECT INFORMATION

Company: Karla Calderón
 Client: UNI
 Location: Cuzco
 Test Well: TW-3

AQUIFER DATA

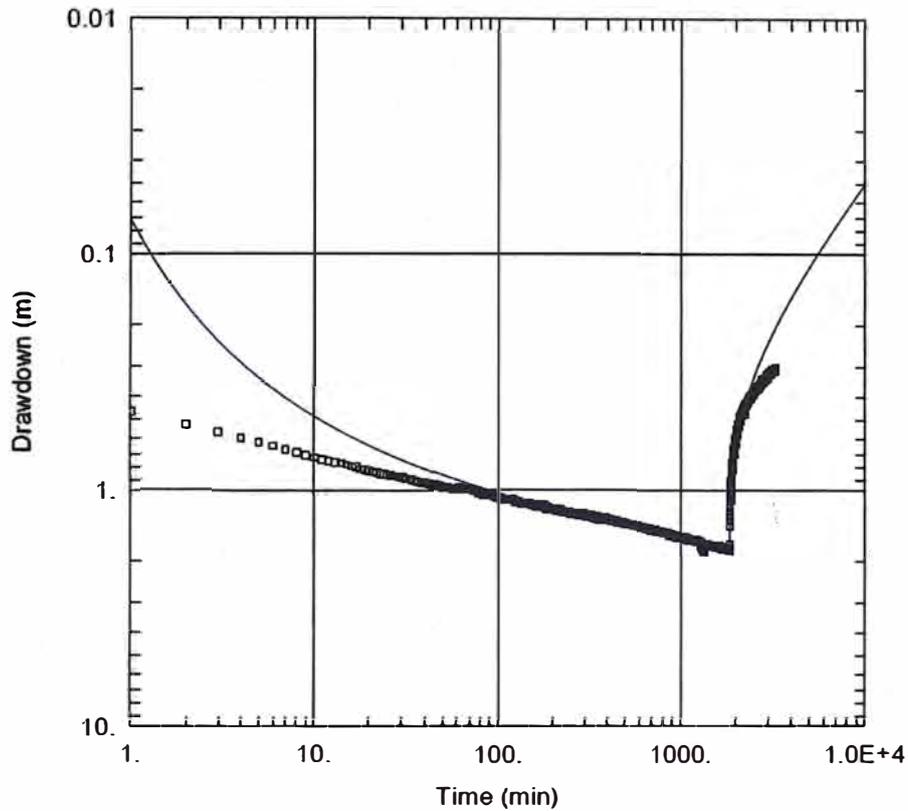
Saturated Thickness: 42. m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA

| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
|---------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-3 | 0 | 0 | □ PZ-3A | 0 | 21.3 |

SOLUTION

Aquifer Model: Confined Solution Method: Cooper-Jacob
 T = 369.5 m²/day S = 0.004434



ANALISIS DE DESCENSOS EN PZ-3A - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-3

Data Set: C:\...eTW-3_ObsPZ-3A_Theis.aqt
 Date: 03/27/14

Time: 11:21:40

PROJECT INFORMATION

Company: Karla Calderón
 Client: UNI
 Location: Cuzco
 Test Well: TW-3

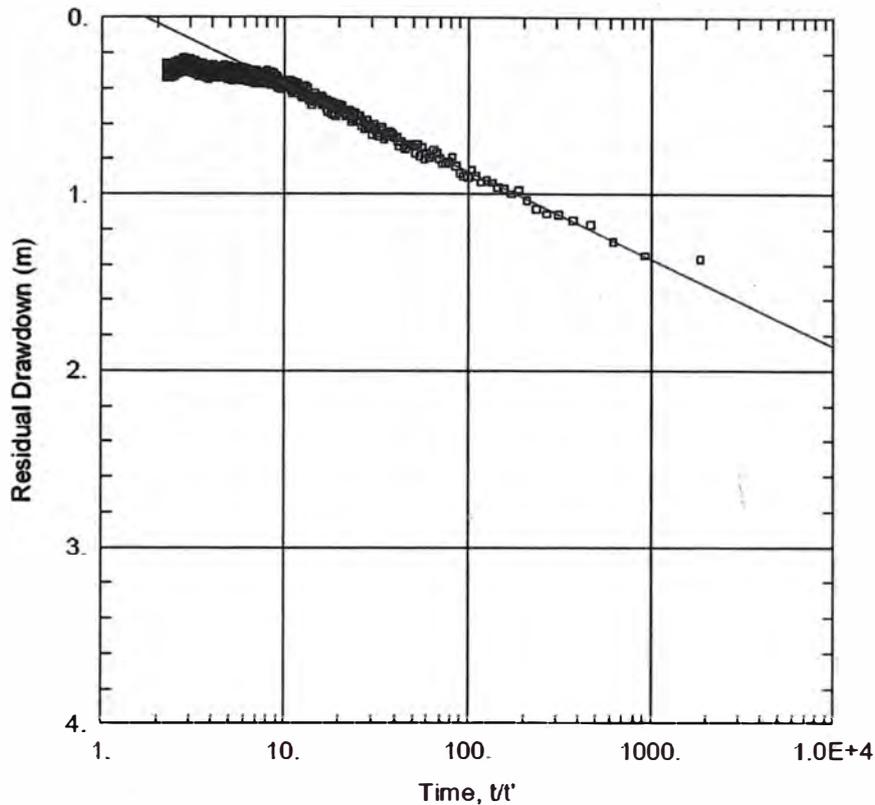
WELL DATA

| Pumping Wells | | | Observation Wells | | |
|---------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-3 | 0 | 0 | □ PZ-3A | 0 | 21.3 |

SOLUTION

Aquifer Model: Confined
 T = 424 m²/day
 Kz/Kr = 1

Solution Method: Theis
 S = 0.002154
 b = 42 m



| <u>ANALISIS DE RECUPERACIÓN EN TW-3 - PRUEBA DE FLUJO CONSTANTE TW-3</u> | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------|-------|-------|
| Data Set: C:\...dTW-3 ObsTW-3 RecuperacionTheis.aqt | | | | | |
| Date: <u>03/27/14</u> | | | Time: <u>11:20:55</u> | | |
| <u>PROJECT INFORMATION</u> | | | | | |
| Company: <u>Karla Calderón</u> | | | | | |
| Client: <u>UNI</u> | | | | | |
| Location: <u>Cuzco</u> | | | | | |
| Test Well: <u>TW-3</u> | | | | | |
| <u>AQUIFER DATA</u> | | | | | |
| Saturated Thickness: <u>42. m</u> | | | Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u> | | |
| <u>WELL DATA</u> | | | | | |
| <u>Pumping Wells</u> | | | <u>Observation Wells</u> | | |
| Well Name | X (m) | Y (m) | Well Name | X (m) | Y (m) |
| TW-3 | 0 | 0 | □ TW-3 | 0 | 0 |
| <u>SOLUTION</u> | | | | | |
| Aquifer Model: <u>Confined</u> | | | Solution Method: <u>Theis (Recovery)</u> | | |
| T = <u>480. m²/day</u> | | | S/S' = <u>1.718</u> | | |

ANEXO D

Mediciones de Niveles de Agua

Tabla D.1
Registro de Niveles de Agua en PZ-1A

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|------------|-----------------|-------------------------|
| 17/08/2011 | 11.10 | 4699.00 |
| 19/08/2011 | 11.30 | 4698.80 |
| 21/08/2011 | 12.60 | 4697.50 |
| 24/08/2011 | 12.00 | 4698.00 |
| 31/08/2011 | 12.00 | 4698.00 |
| 02/09/2011 | 12.10 | 4698.00 |
| 06/09/2011 | 12.20 | 4697.90 |
| 09/09/2011 | 12.30 | 4697.80 |
| 12/09/2011 | 12.40 | 4697.70 |
| 22/09/2011 | 16.40 | 4693.70 |
| 24/09/2011 | 14.40 | 4695.70 |
| 27/09/2011 | 13.80 | 4696.30 |
| 29/09/2011 | 13.60 | 4696.50 |
| 01/10/2011 | 13.60 | 4696.50 |
| 03/10/2011 | 13.60 | 4696.50 |
| 08/10/2011 | 13.70 | 4696.30 |
| 13/10/2011 | 13.80 | 4696.30 |
| 18/10/2011 | 14.30 | 4695.70 |
| 26/10/2011 | 15.90 | 4694.20 |
| 31/10/2011 | 16.50 | 4693.60 |
| 03/11/2011 | 16.60 | 4693.50 |

Tabla D.2

Registro de Niveles de Agua en PZ-1B

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|------------|-----------------|-------------------------|
| 17/08/2011 | 14.70 | 4695.50 |
| 19/08/2011 | 15.00 | 4695.20 |
| 21/08/2011 | 15.00 | 4695.20 |
| 24/08/2011 | 15.10 | 4695.10 |
| 31/08/2011 | 15.50 | 4694.70 |
| 02/09/2011 | 16.10 | 4694.20 |
| 06/09/2011 | 15.70 | 4694.50 |
| 09/09/2011 | 15.80 | 4694.40 |
| 12/09/2011 | 16.00 | 4694.20 |
| 22/09/2011 | 16.50 | 4693.70 |
| 24/09/2011 | 16.80 | 4693.40 |
| 27/09/2011 | 16.70 | 4693.50 |
| 29/09/2011 | 16.70 | 4693.50 |
| 01/10/2011 | 16.80 | 4693.40 |
| 03/10/2011 | 16.8 | 4693.40 |
| 08/10/2011 | 17.1 | 4693.10 |
| 13/10/2011 | 16.3 | 4694.00 |
| 18/10/2011 | 20.1 | 4690.10 |
| 26/10/2011 | 19.2 | 4691.00 |
| 31/10/2011 | 18.7 | 4691.50 |
| 03/11/2011 | 18.8 | 4691.40 |

Tabla D.3
Registro de Niveles de Agua en PZ-2A

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|
| 25/08/2011 | 4.70 | 4690.20 |
| 31/08/2011 | 4.70 | 4690.10 |
| 02/09/2011 | 4.70 | 4690.10 |
| 06/09/2011 | 4.70 | 4690.10 |
| 09/09/2011 | 4.90 | 4690.00 |
| 12/09/2011 | 4.90 | 4690.00 |
| 22/09/2011 | 5.00 | 4689.80 |
| 24/09/2011 | 5.00 | 4689.90 |
| 27/09/2011 | 5.00 | 4689.80 |
| 29/09/2011 | 5.00 | 4689.80 |
| 01/10/2011 | 5.10 | 4689.80 |
| 03/10/2011 | 5.00 | 4689.80 |
| 08/10/2011 | 4.50 | 4690.30 |
| 13/10/2011 | 4.80 | 4690.00 |
| 18/10/2011 | 4.80 | 4690.00 |
| 26/10/2011 | 4.90 | 4690.00 |
| 31/10/2011 | 4.90 | 4689.90 |
| 03/11/2011 | 5.00 | 4689.90 |

Tabla D.4
Registro de Niveles de Agua en PZ-2B

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|
| 25/08/2011 | -6.80 | 4701.50 |
| 31/08/2011 | 0.30 | 4694.50 |
| 02/09/2011 | 0.30 | 4694.50 |
| 06/09/2011 | 0.30 | 4694.50 |
| 09/09/2011 | 0.20 | 4694.60 |
| 12/09/2011 | 0.10 | 4694.70 |
| 22/09/2011 | 3.80 | 4691.00 |
| 24/09/2011 | 3.70 | 4691.10 |
| 27/09/2011 | 3.70 | 4691.10 |
| 29/09/2011 | 3.70 | 4691.10 |
| 01/10/2011 | 3.60 | 4691.10 |
| 03/10/2011 | 3.60 | 4691.10 |
| 08/10/2011 | 4.90 | 4689.80 |
| 13/10/2011 | 5.10 | 4689.60 |
| 18/10/2011 | 4.00 | 4690.80 |
| 26/10/2011 | 3.50 | 4691.20 |
| 31/10/2011 | 3.40 | 4691.30 |
| 03/11/2011 | 3.40 | 4691.40 |

Tabla D.5
Registro de Niveles de Agua en PZ-3A

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|
| 13/09/2011 | 9.90 | 4531.00 |
| 26/09/2011 | 10.10 | 4530.80 |
| 27/09/2011 | 10.00 | 4530.90 |
| 29/09/2011 | 10.10 | 4530.80 |
| 01/10/2011 | 10.20 | 4530.70 |
| 03/10/2011 | 10.20 | 4530.70 |
| 08/10/2011 | 10.20 | 4530.70 |
| 13/10/2011 | 10.20 | 4530.70 |
| 18/10/2011 | 10.30 | 4530.60 |
| 26/10/2011 | 10.30 | 4530.60 |
| 31/10/2011 | 10.30 | 4530.60 |
| 03/11/2011 | 10.30 | 4530.60 |

Tabla D.6
Registro de Niveles de Agua en PZ-3B

| Fecha | Profundidad (m) | Carga Hidráulica (msnm) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|
| 12/09/2011 | 9.80 | 4531.30 |
| 26/09/2011 | 9.90 | 4531.20 |
| 27/09/2011 | 9.90 | 4531.20 |
| 29/09/2011 | 9.70 | 4531.40 |
| 01/10/2011 | 9.70 | 4531.40 |
| 03/10/2011 | 9.60 | 4531.50 |
| 08/10/2011 | 9.50 | 4531.60 |
| 13/10/2011 | 9.30 | 4531.90 |
| 18/10/2011 | 9.10 | 4532.00 |
| 26/10/2011 | 8.90 | 4532.20 |
| 31/10/2011 | 9.20 | 4531.90 |
| 03/11/2011 | 9.20 | 4531.90 |