

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS



**“INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y
EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU”**

Presentada por :

CARLOS ALBERTO ALVA HUAPAYA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

Lima-Perú

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**“INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y
EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

CARLOS ALBERTO ALVA HUAPAYA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado

PRESIDENTE

Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar

*******CUGUQT**

Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco

MIEMBRO

Mg.Sc. Teresa Velasquez Bejarano

MIEMBRO

DEDICATORIA

A Dios, mi padre celestial quien siempre ilumina mi camino y me guía hacia la fe, esperanza y amor en mi vida cotidiana.

A mi madre Angélica Huapaya, quien desde el cielo cuida mis pasos rumbo al éxito personal, familiar y espiritual.

A mi padre Alberto Alva, quien siempre confía en mi persona como buen profesional e hijo, y siempre ha estado presente en toda mi formación profesional, así como su apoyo en los momentos difíciles.

A mis hermanos Luis y Silvana, quienes me han brindado su ayuda incondicional y apoyo en los momentos que los he necesitado.

A mi esposa Sandra Palomino y mi primogénito recién nacido Luke Liam Alva Palomino, quienes son mi motivo de seguir adelante y crecer profesionalmente día a día.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por brindarme su bendición y permitirme superarme cada día profesionalmente.

A toda mi familia por su apoyo incondicional, paciencia y colaboración en la realización y culminación del presente proyecto.

A la Escuela Postgrado de la UNALM, por brindarme una dedicada formación académica y profesional en los años de la maestría.

Al M.Sc. Guillermo Clemente Aguilar, asesor de la presente tesis de maestría, quien me brindó de manera desinteresada su orientación, consejo y amistad.

De igual manera agradecer a mis docentes de la maestría por sus enseñanzas y compartir sus experiencias y conocimientos en las clases dictadas en las aulas de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

RESUMEN

El estudio se desarrolló en la margen derecha del río Yuracyacu ubicado en el distrito Parcoy, provincia de Pataz, departamento de La Libertad. Tiene como objetivo general, desarrollar el modelo de simulación del transporte de contaminantes de un depósito de relaves hacia las aguas subterráneas de la microcuenca Yuracyacu para implementar medidas de prevención y mitigación ambiental. En base a resultados de geología y geofísica, el acuífero es clasificado como libre, su espesor saturado es variable, su base es impermeable y el techo es permeable. La profundidad de la napa del acuífero en estudio varía entre 24.12 m (PI-04) y 38.80 m (PI-06). El sentido de flujo es de NorEste a SurOeste con 9.6% de gradiente hidráulico promedio. Las cargas hidráulicas están comprendidas entre 1982 msnm y 2061 msnm, observándose que el techo de la napa subterránea es uniforme desde la zona media en dirección Oeste, y con cierta anomalía en la zona Este. Las conductividades hidráulicas se hallan comprendidas entre 0.0008 m/día y 0.231 m/día. El software empleado para elaborar el modelo es el Visual ModFlow 2011.1, el que resuelve las ecuaciones de flujo haciendo uso del método numérico en diferencias finitas. Se ha simulado la probable ruta que seguirían los contaminantes una vez ocurrida algún tipo de contaminación en la relavera, para ello se han inyectado trazadores en la zona de presa y la simulación ha sido efectuada para 1825 días con periodos de avance del contaminante de 100 días. La simulación muestra que entre 500 días a 700 días aproximadamente serían detectados por los piezómetros PI-08 y PI-01, consecuentemente estos dos piezómetros son de vital importancia para el monitoreo de la calidad y el nivel de las aguas. Después de conocer la ruta del contaminante se procedió a desarrollar la variación temporal y espacial del transporte contaminante en caso sucediera algún evento de fuga de algún contaminante proveniente de la presa relavera, para ello, se ingresaron datos al software visual modflow para la simulación de 1825 días, utilizando el flujo en régimen transitorio. La simulación muestra que en los 150 días aproximadamente serían detectados por el pozo de observación OBS-1, a los 750 días en donde estaría llegando al pozo de observación OBS-2, y a los 1450 días en el pozo de observación OBS-3. El presupuesto referencial para la remediación de las aguas contaminadas es de S/. 1 425 790,71 Soles.

Palabras claves: piezómetros, acuífero, conductividades hidráulicas, diferencias finitas, transporte contaminante

ABSTRACT

The study was carried out on the right bank of the Yuracyacu River located in the Parcoy district, Pataz province, La Libertad department. Its general objective is to develop the simulation model of the transport of pollutants from a tailings deposit to the groundwater of the Yuracyacu micro-basin to implement environmental prevention and mitigation measures. Based on geological and geophysical results, the aquifer is classified as free, its saturated thickness is variable, its base is impermeable, and the roof is permeable. The depth of the aquifer under study varies between 24.12 m (PI-04) and 38.80 m (PI-06). The flow direction is from Northeast to Southwest with a 9.6% average hydraulic gradient. Hydraulic loads are between 1982 meters above sea level and 2061 meters above sea level, observing that the ceiling of the underground layer is uniform from the middle zone to the West, and with a certain anomaly in the East zone. The hydraulic conductivities are between 0.0008 m / day and 0.231 m / day. The software used to develop the model is Visual ModFlow 2011.1, which solves the flow equations using the numerical method in finite differences. The probable route that the contaminants would follow once some type of contamination occurred in the tailings dam has been simulated, for this, tracers have been injected into the dam area and the simulation has been carried out for 1825 days with periods of advance of the contaminant of 100 days . The simulation shows that between 500 days to 700 days approximately they would be detected by the PI-08 and PI-01 piezometers, consequently these two piezometers are vitally important for monitoring water quality and level. After knowing the route of the pollutant, we proceeded to develop the temporal and spatial variation of the pollutant transport in the event of a leakage event of a pollutant from the tailings dam, for this, data was entered into the visual modflow software for the simulation of 1825 days, using transient flow. The simulation shows that in approximately 150 days they would be detected by the observation well OBS-1, at 750 days where it would be arriving at the observation well OBS-2, and at 1450 days in the observation well OBS-3. The referential budget for the remediation of polluted waters is S /. 1 425 790.71 Soles.

Keywords: piezometers, aquifer, hydraulic conductivities, finite differences, contaminant transport

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Registro de firmas del jurado evaluador.....	ii
Acta de Sustentación	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	vi
Abstract.....	vii
Índice General.....	viii
Índice de Cuadros	x
Índice de Figuras	xi
Índice de Planos.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 RELAVES	3
2.1.1 Accidentes y fallas en depósitos o presas de relaves.....	5
2.2 ACUÍFERO	7
2.2.1 Conductividad hidráulica vertical (K _{vi}).....	10
2.3 REACCIONES DE SUPERFICIE	10
2.3.1. Interacciones con la fase sólida	10
2.3.2. Interacciones con la fase líquida.....	11
2.4 FUERZAS DE FILTRACIÓN	12
2.4.1. Efecto del flujo sobre muros de retención.....	12
2.4.2. Efecto del flujo sobre taludes	12
2.5 FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE PRESAS DE TIERRA	13
2.5.1. Control de flujo en la cimentación de presas.....	13
2.6 MODELAMIENTO DEL SISTEMA ACUÍFERO.....	14
2.6.1. Modelo de aguas subterráneas.....	16
2.6.2. Modelo en transporte de contaminantes	19

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1 MATERIALES.....	23
3.1.1 Equipos y materiales.....	23
3.1.2 Descripción de la zona de estudio.....	23
3.1.3 Información climática.....	24
3.1.4 Inventario de fuentes de agua subterránea.....	27
3.1.5 Geología.....	28
3.1.6 Geomorfología.....	30
3.1.7 Prospección geofísica.....	32
3.1.8 El acuífero.....	54
3.1.9 Modelo conceptual del sistema acuífero.....	60
3.1.10 Modelo conceptual del transporte contaminante en el sistema acuífero.....	64
3.2 MÉTODOS.....	69
3.2.1 Tipo de investigación.....	69
3.2.2 Hipótesis.....	69
3.2.3 Variables.....	69
3.2.4 Procedimiento de los análisis de datos.....	69
3.3 SELECCIÓN DEL CÓDIGO DE MODELAMIENTO.....	73
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
4.1 DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO.....	74
a) Discretización del sistema acuífero.....	74
b) Unidades.....	75
c) Número de capas y tipo de acuífero.....	77
d) Condiciones de frontera.....	77
e) Parámetros de entrada del modelo.....	79
i. Conductividad hidráulica.....	79
ii. Rendimiento específico.....	79
iii. Puntos de observación de los niveles de agua subterránea.....	80
4.2 MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.....	83
a) Resultados de la calibración.....	83
b) Balance de agua en régimen estacionario.....	84
4.3 MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	87

a) Condiciones iniciales.....	87
b) Variación temporal de las cargas hidráulicas.....	87
c) Balance hídrico subterráneo en régimen transitorio.....	87
4.4 MODELO EN TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	89
4.5 INTERACCIÓN DE LA PRESA RELAVERA YURACYACU CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	100
4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	109
4.6.1 Condiciones hidrogeológicas del acuífero.....	109
4.6.2 Fuentes de contaminación de las aguas subterráneas	111
4.6.3 Medidas de remediación de las aguas contaminadas	114
V. CONCLUSIONES	118
VI. RECOMENDACIONES	120
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS.....	128

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1: Inventario de piezómetros.....	27
Cuadro 2: Resultados cuantitativos de los SEV's	37
Cuadro 3: Profundidad del nivel de agua subterránea en los piezómetros.....	55
Cuadro 4: Cargas hidráulicas en los piezómetros.....	56
Cuadro 5: Conductividades hidráulicas estimadas con Slug Test	57
Cuadro 6: Conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas	58
Cuadro 7: Cálculo de recarga del acuífero – Año Húmedo.....	63
Cuadro 8: Características técnicas de los piezómetros	64
Cuadro 9: Georeferenciación del sistema acuífero.....	74
Cuadro 10: Conductividades hidráulicas del medio poroso	79
Cuadro 11: Rendimiento específico del medio poroso.....	79
Cuadro 12: Puntos de observación de niveles de agua subterránea	80
Cuadro 13: Balance hídrico en el acuífero	85
Cuadro 14: Balance hídrico en el acuífero	89
Cuadro 15: Especies de plantas utilizadas en fitorremediación	116
Cuadro 16: Presupuesto referencial para remediación de aguas contaminadas	117

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Sistema acuífero hipotético discretizado.....	17
Figura 2: Características climáticas representativas para Yuracyacu.....	24
Figura 3: Temperatura	25
Figura 4: Humedad Relativa.....	25
Figura 5: Evapotranspiración.....	26
Figura 6: Precipitación.....	27
Figura 7: Valle del río Yuracyacu	31
Figura 8: Dispositivo Tetraelectródico Schlumberger (HGS PERU S.A.).....	34
Figura 9: Sección Geo-resistiva A – A'	44
Figura 10: Sección Geo-resistiva B – B'	45
Figura 11: Sección Geo-resistiva C – C'	47
Figura 12: Sección Geo-resistiva D – D'	48
Figura 13: Sección Geo-resistiva E – E'	50
Figura 14: Sección Geo-resistiva F – F'	51
Figura 15: Sección Geo-resistiva G – G'.....	53
Figura 16: Modelo conceptual del sistema acuífero.....	66
Figura 17: Cortes hidrogeológicos del sistema acuífero	67
Figura 18: Modelo conceptual del transporte contaminante en el sistema acuífero	68
Figura 19: Discretización del sistema acuífero.....	76
Figura 20: Condiciones de frontera del modelo	78
Figura 21: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas	81
Figura 22: Distribución espacial de los rendimientos específicos.....	82
Figura 23: Cargas calculadas y observadas (Modelo en régimen estacionario).....	83
Figura 24: Hidroisohipsas y líneas de flujo calculadas (modelo en régimen estacionario)	86
Figura 25: Variación temporal de las cargas hidráulicas calculadas (Agosto -2014 a Agosto -2023) - Modelo de simulación de flujo en régimen transitorio.....	88
Figura 26: Ingreso de datos para la simulación de 1825 días	90
Figura 27: Variación temporal y espacial de la ruta de contaminantes	91
Figura 28: Ingreso de datos para la simulación de 1825 días.....	92

Figura 29: Ingreso de datos de concentración constante	93
Figura 30: Ingreso de datos para avance de contaminante de 100 días	93
Figura 31: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 150 días	95
Figura 32: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 750 días	96
Figura 33: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1450 días	97
Figura 34: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1825 días	98
Figura 35: Grafico Concentración versus Tiempo	100
Figura 36: Redes de flujo para una presa de tierra homogénea, isotrópica sobre (a) cimientos impermeables y (b) cimientos permeables.....	102
Figura 37: Problema de valor de frontera para el sistema de flujo saturado-no saturado en la presa de tierra	103
Figura 38: Sección transversal del depósito de relaves Yuracyacu.....	106
Figura 39: Sección geo-resistiva del nivel freático	107
Figura 40: Sección transversal de la presa de relaves Yuracyacu	108

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	: Ubicación de piezómetros
Plano 2	: Geología
Plano 3	: Geomorfología
Plano 4	: Ubicación de SEVS
Plano 5	: Isobatas
Plano 6	: Isopacas
Plano 7	: Isoprofundidad del agua subterránea
Plano 8	: Hidroisohipsas
Plano 9	: Secciones hidrogeológicas
Plano 10	: Isoconductividad hidráulica
Plano 11	: Hidrogeoquímica

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen problemas de contaminación de aguas subterráneas generados por el uso de plaguicidas, derrames de combustibles y actividades mineras. Primordialmente la actividad minera ha dejado históricamente pasivos ambientales que tienen un impacto significativo sobre los recursos hídricos, siendo el medio más vulnerable a esta contaminación los acuíferos de la región andina debido a su ubicación cercana a estos puntos de filtración de fuentes contaminantes.

La contaminación desde un depósito de relaves mineros es un problema sensible para el país por la cantidad de pasivos ambientales mineros (PAM) que tiene el Perú; además, al tratarse de aguas subterráneas, este problema no se hace visible a corto plazo, lo que retrasa la toma de decisión para la ejecución de medidas de prevención, mitigación y remediación.

Las relaveras constituyen fuentes probables que podrían generar una pluma contaminante. La remediación de acuíferos contaminados requiere de diferentes medidas orientadas principalmente al aislamiento de la pluma contaminante para evitar su avance. Este aislamiento se realiza mediante pozos de bombeo que extraen el contaminante en disolución. Medidas posteriores comprenden el tratamiento ex situ de las aguas contaminadas y, dependiendo de la factibilidad económica y técnica, la reinyección de las aguas tratadas al acuífero.

Cuando se busca contener la pluma, se bombea permanentemente el caudal mínimo necesario para evitar la migración de contaminantes en el sentido del flujo subterráneo local sin sobreexplotar al acuífero. El éxito de la técnica de bombeo y tratamiento depende principalmente de dos factores: las características hidrogeológicas del acuífero y el tipo de contaminantes presentes. Las propiedades hidrogeológicas del sistema que disminuyen el

éxito del bombeo y tratamiento son dos: heterogeneidad del acuífero y la presencia de roca fracturada.

En ese sentido, es indispensable predecir el flujo del contaminante en las aguas subterráneas con el apoyo de modelos de simulación, con el fin de prevenir y mitigar los impactos de la contaminación y sus consecuencias, así de esta manera asegurar la calidad de las aguas subterráneas para el uso y consumo de la población.

El desarrollo de la presente investigación es necesaria para el país por el aporte que ofrecerá en la contribución de manera significativa en la visión presente y futura que los profesionales han de tener hoy en día, utilizando de manera adecuada las herramientas y técnicas con los que se cuentan para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas causadas por la presencia de depósitos de relaves, por la que la población utiliza las aguas subterráneas para su consumo doméstico, bebida de animales y para sembrar árboles frutales y otros cultivos.

Además, con la implementación de la presente investigación se aportará para desarrollar otras evaluaciones de interacción entre pasivos ambientales actuales e históricos y los acuíferos de las cuencas hidrográficas del país, de tal manera que se mejore la conservación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, y se preserve el recurso hídrico para el futuro.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el modelo de simulación del transporte de contaminantes de un depósito de relaves hacia las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu para implementar medidas de prevención y mitigación ambiental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones hidrogeológicas del acuífero.
- Evaluar las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas.
- Proponer las medidas de remediación de las aguas contaminadas así como la estimación de costos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 RELAVES

Se coincide con la noción expuesta por MMSD (2002), en la cual se afirma que los relaves son roca finamente molida en donde los valores minerales deseados han sido extraídos mediante el uso de reactivos químicos. Este residuo toma la forma de una solución acuosa compuesta al menos en un 50% de agua y puede ser transportada a través de cañerías. Los relaves por lo general son vaciados en instalaciones de almacenamiento donde son retenidos en estanques o diques construidos con los mismos relaves, desechos de minas o rellenos de tierra o roca. Dado que las instalaciones de almacenamiento por lo general contienen residuos químicos y elevados niveles de metales, es primordial asegurar su estabilidad física y química. Estas estructuras son propensas a las filtraciones, que pueden generar la contaminación de aguas subterráneas y superficiales.

El problema ambiental más grave y persistente relacionado con la minería es el drenaje de ácidos (DA), la cual es producida en aquellas regiones donde ocurren precipitaciones templadas, y generan un grave impacto sobre la productividad de los ecosistemas.

El DA se caracteriza por los bajos valores de pH y las altas concentraciones de metales pesados disueltos; además se conoce que el ácido sulfúrico disuelve fácilmente metales como hierro, cobre, aluminio y plomo. Uno de los aspectos más serios del drenaje de ácido es su persistencia en el medio ambiente, tal es así que, en una mina generadora de ácido puede provocar, en el largo plazo, graves impactos en aguas subterráneas y de superficie y en la vida acuática. Una vez que el proceso de generación de ácido ha comenzado es extremadamente difícil detenerlo. Se sabe que la combinación de acidez y contaminantes disueltos mata

la mayor parte de la vida acuática, deja a los ríos casi estériles y hace que el agua no sea apropiada para el consumo humano.

La generación de ácido comienza cuando los minerales de sulfuro de hierro son expuestos y reaccionan al oxígeno y al agua. Otros factores que influyen en la oxidación de los minerales de sulfuro son la temperatura, niveles de acidez (pH) y equilibrio de hierro ferroso/férrico. Estos materiales ricos en sulfuro se exponen generalmente en los relaves mineros.

Acorde con lo manifestado por Almerco (2014), en la cual expresa que las áreas de operación minera y la construcción de depósitos de relaves existentes y aquellas proyectadas en el Perú, se ubican principalmente en los valles y quebradas, sobre una vertiente montañosa empinada y escarpada, siendo terrenos muy accidentados con laderas que superan los 500 m de altura y con pendientes muy empinadas, con taludes comprendidos entre 40° y 60°. Ante ello, se debe tener presente la existencia de fenómenos que principalmente afectan los fondos de los valles y terrenos circundantes al área de las operaciones mineras y a los depósitos de relaves. Estos fenómenos generados por procesos de una geodinámica externa que podría ocurrir en el país, son los siguientes: erosión fluvial, derrumbes, desprendimientos de bloques, caídas de flujos de lodo y piedra denominados también como huaycos; los cuales son originados por las precipitaciones intensas de la zona. De otro lado, se tiene también la actividad sísmica, en donde el Perú forma parte de las regiones sísmicamente más activas en el mundo por ubicarse en el borde occidental de América del Sur, siendo su actividad sísmica más importante aquella que está asociada al proceso de subducción de la Placa de Nazca (oceánica), bajo la Placa Sudamericana (continental), generando con relativa frecuencia terremotos de gran magnitud, las cuales podría ocasionar inestabilidad y ruptura en los depósitos de relaves.

También, se tiene el fenómeno de licuación de suelos originado por el aumento de la variación en la presión de los poros, denominada también “poropresión”, la cual inducirán a la falla de determinadas estructuras como presa de relaves, taludes, terraplenes, entre otras. Además es preciso indicar que una condición saturada en

la superficie genera un mayor potencial de licuación de los suelos ante un sismo (Aliaga y Urbina 2015).

Las actividades mineras actuales e históricas tienen una herencia en filtraciones de relaves que son de preocupación tanto de la empresa minera, la población y las autoridades reguladoras. Asimismo, muchos de los relaves antiguos han sido depositados en suelos sin recubrimiento. Los depósitos de relaves deben de ser analizados de manera particular debido al terreno, detalles de instalación, la geología del cuerpo mineralizado, el tipo de minado, clima y otros parámetros. Actividades mineras recientes cuentan con mayor ingeniería en la instalación de depósito de relaves, además de un monitoreo para la evaluación de filtraciones. Existe, sin embargo, un riesgo de infiltración de proveniente de depósitos de relaves antiguos y modernos, y su transporte constituye un problema ambiental potencialmente serio en relación a las aguas subterráneas.

2.1.1 Accidentes y fallas en depósitos o presas de relaves

La ingeniería geotécnica y su metodología geoambiental tratan de manera moderna los principales problemas relativos al deterioro del ambiente en la minería, enfatizando en la construcción de los depósitos de desechos que originan efluentes líquidos y desperdicios sólidos que actualmente deben cumplir con las normas ambientales vigentes para evitar la contaminación ambiental de su entorno.

Las presas de relaves son generalmente las más peligrosas estructuras de la ingeniería. La falla de una presa, puede causar gran pérdida de vidas y de propiedades, cuyo valor puede ser mucho mayor que el de la presa en sí.

La manera en que una presa de relave puede fallar se relaciona con sus funciones básicas: fallas hidráulicas, debidas a erosión de la superficie de la estructura; filtraciones excesivas o incapacidad para resistir las filtraciones a través de la presa o su cimentación; y fallas estructurales, como derrumbes o colapso estructural de la presa o su cimentación. Cada falla puede incluir uno o más de estos componentes y puede tener lugar independientemente, aunque algunas veces son interdependientes. Es preciso indicar que casi todos los accidentes y fallas en

presas de relave por lo general han sido causados por ignorancia, descuido o indiferencia.

Rodríguez et al. (2009) manifestaron que las causas más comunes de falla de las estructuras de almacenamiento de residuos como las presas relaveras, son por deslizamiento del talud; terremoto; sobrepaso, tubificación y erosión; falla por problemas en las estructuras auxiliares; erosión del dique; subsidencias o colapso del terreno. Estas causas han sido citadas en orden decreciente del número de casos de presas que han fallado a nivel mundial.

Para el caso de deslizamiento, se presentan tres situaciones típicas tales como: a) Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud; b) Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recrecimiento (ritmo de recrecimiento excesivo que no permite la disipación de presiones de poro), durante la instalación de la cobertura o por tránsito de maquinaria pesada; y c) Licuación de las zonas saturadas del depósito debido a una acción sísmica. También esta situación peligrosa puede generarse por el congelamiento de las capas superficiales que impide el drenaje y provoca el aumento de las presiones de poro. Sin embargo, la posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes, en donde la aproximación de la superficie freática al talud puede ocurrir por: a) Elevación del nivel de agua en la laguna de decantación debido a aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de tuberías de evacuación; b) Por infiltración de agua de lluvia; c) Por operación inadecuada de la presa (mal manejo del vertido), provocando que la laguna de decantación se aproxime a la presa; d) Presencia de mantos de material fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados. En casos extremos, el nivel freático puede aflorar por la superficie del talud.

Respecto a la falla de estructuras auxiliares, estas se deben a fallas en los sistemas de decantación del agua sobrenadante del depósito, en donde es muy frecuente la falla de los conductos, lo que deriva en filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático. Otro incidente se debe a rotura de

tuberías de descarga de residuos mineros hacia el depósito, con el consiguiente vertido y peligro de erosión de la presa.

Un caso se tuvo en Perú el día viernes 25 de junio de 2010 a las 18:00 horas, en donde un dique con relave de la minera Caudalosa Chica en la Región Huancavelica, colapsó originando el derrame de productos tóxicos en la cuenca que comprende los ríos Huachocolpa y Opamayo hasta la localidad de Lircay, capital de la provincia de Angaraes, ocasionando una gran contaminación a los recursos hídricos de la zona.

2.2 ACUÍFERO

El acuífero viene a ser toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraerse en cantidades significativas mediante pozos u otras obras de captación (Collazo y Montañaño 2012).

El acuífero presenta el siguiente parámetro hidráulico de importancia para el presente estudio:

Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad

Se coincide con Collazo y Montañaño (2012), cuando definen que la permeabilidad o conductividad hidráulica (K) viene a ser la facilidad que tiene un acuífero en dejar pasar el agua, la cual depende de las características del medio (porosidad, tamaño, forma y arreglo de las partículas, compactación) y de la viscosidad del fluido. Este parámetro es considerado como el principal ya que caracteriza las propiedades hídricas de los materiales y el que registra mayor variación en función del material. Su unidad es: m/día.

De acuerdo a lo expresado por Espinoza (2009), la ecuación de Darcy puede ser modificada para mostrar que el coeficiente K tiene las dimensiones de longitud/tiempo, o velocidad. Este coeficiente ha sido llamado conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, tal como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$Q = -K \cdot A \cdot \left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (a.1)$$

$$K = - \frac{Q}{A \cdot \left(\frac{dh}{dl}\right)} \quad (a.2)$$

El flujo Q tiene dimensiones de volumen/tiempo (L^3/T), el área A (L^2), y el gradiente hidráulico (L/L). Sustituyendo estas dimensiones en la ecuación (a.2) obtenemos:

$$K = - \frac{\left(\frac{L^3}{T}\right)}{(L^2) \cdot \left(\frac{L}{L}\right)} = \left(\frac{L}{T}\right)$$

Asimismo, describió que la constante de proporcionalidad de Darcy, K, es una función de propiedades del medio poroso y el fluido que pasa a través de él. De hecho es intuitivo pensar que un fluido muy viscoso, por ejemplo petróleo, se moverá a una tasa menor que agua en un mismo tipo de suelo. La descarga es directamente proporcional al peso específico del fluido, γ , e inversamente proporcional a la viscosidad dinámica del fluido, μ . A partir de esta información podemos escribir:

$$K = k \cdot \frac{\gamma}{\mu}$$

O

$$K = k \cdot \frac{\rho g}{\mu}$$

Donde k es la permeabilidad intrínseca del suelo la cual tiene unidades de área, L^2 . En la última expresión ρ es la densidad del fluido y g es la aceleración de gravedad.

Existen diversos métodos para evaluar o determinar la conductividad hidráulica de un medio poroso. En términos generales estos métodos se pueden clasificar en dos categorías mayores: indirectos y directos. A su vez los métodos directos pueden ser divididos en métodos de laboratorio y de terreno. Para el caso de la presente investigación se aplica el método directo de terreno, la cual permitirá identificar la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa a través de experiencias que involucran la excavación de pozos superficiales.

Acorde con Barbecho y Calle (2012), en donde plantean que la conductividad hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación. Así tenemos que, en un suelo el agua que ocupa espacios vacíos generalmente se encuentra distribuida en zonas verticales de humedad, las cuales la podemos definir en dos tipos:

– **Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados**

Aquí, el movimiento del agua en el suelo se controla por la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo. Ante ello, la ley de Darcy relaciona la proporción de flujo con estos dos factores. Es entonces que, el flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva, ósea que el potencial matricial del suelo viene a ser cero. En ese sentido, la mayoría de suelos se presenta con el 95% del espacio del poro totalmente lleno con agua, y el 5% restante se encuentra lleno con aire atrapado.

– **Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados**

Esta situación se da cuando los poros se encuentran parcialmente llenos de agua por lo que su contenido de agua es inferior a la porosidad y la presión del fluido es menor a la atmosférica. En ese sentido, se puede verificar que la ley de Darcy es

válida para flujo de agua en medios parcialmente saturados, con la condición de que la conductividad hidráulica sea dependiente con el contenido de humedad.

2.2.1 Conductividad hidráulica vertical (K_{vi})

González et al. (2003) determinaron en su evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero en la cuenca hidrográfica del río Laja en el centro-sur de Chile, que la infiltración de agua de lluvia tiene relación con la conductividad hidráulica vertical (K_{vi}) de los suelos sobreyacentes al acuífero y depende de la textura de éstos, en la cual ha resultado una variación considerable de la conductividad hidráulica vertical (K_{vi}), por lo que la vulnerabilidad de que el agua subterránea pueda contaminarse con facilidad por la actividad humana desde la superficie, resulta desde muy baja a muy alta. Es así que los suelos de la cuenca del río Laja, constituidos por materiales arenosos más finos, contienen un bajo porcentaje de arcilla y, por lo tanto, la conductividad hidráulica vertical es elevada, lo que resulta un menor grado de protección al acuífero subyacente; por el contrario, los suelos de granulometría gruesa, con un elevado porcentaje de arcilla y que tienen baja conductividad hidráulica vertical, proporcionan un grado mayor de protección al acuífero subyacente.

2.3 REACCIONES DE SUPERFICIE

Las reacciones entre los solutos y la superficie de los sólidos disponen de un importante control en la composición química de las aguas subterráneas, a su vez por sus características pueden retardar y minimizar el transporte de contaminantes. Ante ello, se puede mencionar que las relaciones de equilibrio entre el agua que contiene un elemento traza y los sólidos granulares que conforman el acuífero, se representan a través de isotermas de adsorción, la cual podría ser lineal cóncava, convexa o una combinación de ellas (Oyarzún 2007).

De acuerdo a lo expresado por Oyarzún (2007), se tiene interacciones químicas del agua subterránea en el acuífero las cuales figuran las siguientes:

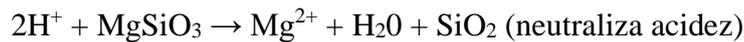
2.3.1. Interacciones con la fase sólida

La litología de los acuíferos son las que determinan la composición del agua subterránea en donde se modifican la presencia de cationes y aniones.

Estas interacciones se pueden dar con cristales (granos clásticos) o con material de la matriz (arcilla). Esto se puede verificar en acuíferos con presencia de CaCO_3 , en donde la interacción con el agua le confiere un pH cercano a 8, lo que puede llevar a la precipitación de metales que se hidrolizan tales como el Cu. De igual manera puede precipitar el metal como carbonato, si este tiene bajo Kps, tal es el caso del Pb ya expuesto como PbCO_3 .

Para el caso de las arcillas, se puede producir cambio de bases o adsorción, en donde la arcilla recibe un catión metálico a cambio de H^+ o de otro catión, modificando la composición del agua.

Ahora, con relación a los acuíferos formados por rocas ígneas, las reacciones agua-acuífero del material sólidos tienden a neutralizar o hacer levemente básico el pH del medio, esto debido a la hidrolisis de los silicatos, lo mismo que se puede representar así:



2.3.2. Interacciones con la fase líquida

Primeramente, la interacción podría darse con mezclas de aguas subterráneas de distinta procedencia en un sector del acuífero, dando como resultado la precipitación de distintos metales y aniones, ya sea por cambio de pH o por formación de compuestos bajo Kps.

Otra manera sería cuando corresponde a la reacción del agua del acuífero con residuos acuosos presentes en forma de agua de interfase, en la cual sus mecanismos son similares pero su efecto es más restringido.

2.4 FUERZAS DE FILTRACIÓN

Juárez y Rico (1974) establecen que en el momento que el agua fluye a través del suelo su efecto no se limita a la presión hidrostática que tiene lugar en el agua en equilibrio, sino que ejerce una presión hidrodinámica sobre las partículas del suelo, en la dirección del flujo, efecto que se representa por empujes hidrodinámicos en la misma dirección del flujo. La magnitud de esas presiones o empujes hidrodinámicos depende sobre todo del gradiente hidráulico prevaleciente. Además se puede afirmar que la fuerza de filtración depende del peso específico del agua y del gradiente hidráulico prevaleciente, pero es independiente de la velocidad del flujo y del coeficiente de permeabilidad del suelo, de modo que es la misma en suelos cohesivos y en suelos friccionantes, aunque las velocidades del flujo en ambos tipos de suelos difieran mucho.

La fuerza de filtración es debido a la resistencia viscosa que la estructura sólida del suelo genera en el fluido; por ella el agua consume energía en forma de presión hidrodinámica capaz de vencerla, es así en donde se aprecia que el empuje hidrodinámico es debido a la pérdida de carga que el agua pierde en el recorrido a través del estrato.

2.4.1. Efecto del flujo sobre muros de retención

Cuando el relleno de un muro de retención queda expuesto a la acción de la infiltración del agua, se forma en él una red de flujo en donde la intensidad de la presión de tierras ejercida por el relleno durante la infiltración del agua puede ser estimada por los métodos basados en la Teoría de Coulomb. También podemos plantear cual es la influencia de un filtro en el relleno, desde el punto de vista de evitar la presión hidrostática que sin él actuaría contra el respaldo del muro al saturarse el relleno; aquí el filtro hace que las líneas equipotenciales dentro de cualquier cuña deslizante que se considere sean horizontales, así se eliminan las presiones del agua y el empuje de tierras será simplemente el que corresponde a la presión activa causada por la masa de suelo saturado (Juárez y Rico 1974).

2.4.2. Efecto del flujo sobre taludes

Juárez y Rico (1974) manifiestan que las presiones hidrodinámicas y las fuerzas de filtración que existen en la zona de flujo de agua, ejercen una poderosa

influencia sobre la estabilidad de los taludes, siendo esta influencia de carácter negativo, es decir que cuando un talud está sujeto a flujo, su estabilidad se ve normalmente disminuida respecto al caso en que se considere seco al talud.

Entendamos que las fuerzas de filtración son debidas a un cambio de la carga hidráulica causado por la fricción viscosa del flujo de agua, en donde en un medio poroso uniforme esta fricción obra en los granos del suelo constituyendo una fuerza de volumen. El valor de esta fuerza por unidad de volumen es igual al producto del peso específico del agua por el gradiente hidráulico, y su dirección es la misma velocidad de la corriente en el punto considerado. Se tiene así que al considerar una superficie hipotética de falla, la zona comprendida arriba de ella está sujeta además de la fuerza de gravedad a la fuerza de filtración, en la cual esta fuerza tiene como efecto el aumentar el momento motor que tiende a hacer girar a la masa deslizante alrededor del centro del círculo de la falla.

2.5 FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE PRESAS DE TIERRA

En toda presa de tierra se dispone de una región de flujo, en la cual trazando su red de flujo para las condiciones de frontera que se tengan, se podrá calcular el gasto de filtración, los gradientes hidráulicos, las velocidades del agua en cualquier punto, las presiones hidrodinámicas, las fuerzas de filtración, etc. Además, la línea de flujo que limita la zona de flujo dentro de la presa se denomina línea de corriente superior, y tendrá que ser aproximadamente determinada para establecer el trazo de la red de flujo, cuyas características influyen en su compleja determinación. Ante ello, se puede afirmar que la línea de corriente superior no sólo es línea de flujo sino que también es línea equipresión, en la que todos los puntos tienen la presión cero. Entonces mencionaremos que en la línea de corriente superior se cumplirán no sólo las propiedades de las líneas de flujo, sino también las de las líneas equipresión, es decir, por ejemplo, las líneas equipotenciales cortarán a la línea de corriente superior a intervalos verticales iguales entre sí (Juárez y Rico 1974).

2.5.1. Control de flujo en la cimentación de presas

Juárez y Rico (1974) manifiestan que el control del gasto de filtración en los terrenos en que se apoya una presa de tierra o de concreto, resulta el problema

principal a superar, ya que el agua que fluye a través del suelo no vaya ocasionar daños al mismo produciendo subpresiones perjudiciales en la estructura, erosiones, tubificación, etc. siendo éste el problema más importante que se tiene que preocupar en relación con las infiltraciones bajo la cortina de una presa. Para evitar ello, se tiene el tipo de estructuras auxiliares que tratan de controlar los malos efectos del agua que se infiltra, disminuyendo su gasto, siendo éstas unas estructuras impermeables tales como: destellones, pantallas de inyección, delantales impermeables, etc. Otro tipo de estructuras auxiliares para controlar los efectos nocivos del flujo está constituido por obras permeables, las cuales tratan de recoger el agua que fluye eliminándola de modo que no genere subpresiones o fuerzas de filtración peligrosa o de producir arrastres y tubificación.

Sin embargo, el modo de trabajar las estructuras impermeables, de acuerdo con la idea de que el gasto de filtración disminuye si se opone al paso del agua un obstáculo impermeable que cierre su paso o que por lo menos la obligue a aumentar la longitud de su trayectoria. Los destellones o los delantales impermeables logran ese efecto, aumentando el número de líneas equipotenciales en la red de flujo bajo la presa, para un mismo número de canales de flujo, con lo que el gasto disminuye correspondientemente; también se logra en este caso que disminuya la caída de carga hidráulica entre dos equipotenciales sucesivas, signo de la disminución de los gradientes hidráulicos en todos los puntos de la región de flujo y en particular, en las zonas de salida del agua en aguas debajo de la presa, que es donde sus efectos pueden ser más peligrosos.

2.6 MODELAMIENTO DEL SISTEMA ACUÍFERO

Acorde con Cruces y Martínez (2007), en relación al concepto de modelo, en la cual lo define como cualquier representación simplificada de la realidad. Desde un punto de vista físico, lo definen como la representación matemática de un fenómeno físico, y por tanto cuantificable. Además incluye acepciones tan variadas como:

- a) Teórico: conjunto de hipótesis, leyes experimentales, simplificaciones, etc. que permiten una representación simplificada de la realidad (Darcy);

- b) Matemático: descripción de las leyes físicas y relaciones mediante expresiones matemáticas, funciones, ecuaciones lineales o diferenciales, etc.; éstos a su vez pueden ser analíticos (fórmula de Thiem o modelo de Green-Ampt) o numéricos, si las ecuaciones resultantes no admiten soluciones analíticas y deben ser resueltas mediante métodos numéricos;
- c) Programa: código informático que permite llevar a cabo los cálculos necesarios para ejecutar un modelo numérico (MODFLOW);
- d) Específico: de su aplicación a un sistema acuífero concreto (Modelo Madrid, Modelo GRAPES).

Por otro lado, el modelo conceptual de un sistema viene a ser un conjunto de ideas, leyes y relaciones que permiten la representación de un fenómeno físico y es usualmente la base de cualquier tipo de modelo.

En nuestro caso, los modelos de acuífero tratan de representar el funcionamiento hidrológico de las formaciones geológicas permeables, teniendo en cuenta con mayor o menor detalle, según sus objetivos, los distintos mecanismos de circulación y almacenamiento, relaciones con masas de agua superficiales, etc. a partir de sus formulaciones físicas, con más o menos simplificaciones.

Entre los modelos matemáticos hidrogeológicos, citaremos al grupo de los modelos distribuidos, los cuales consideran la distribución espacial del acuífero, sus propiedades hidrodinámicas, la localización de los límites, los tipos de condiciones de contorno y la situación de las acciones exteriores, dando la evolución, tanto espacial como en el tiempo, de las variables hidrodinámicas. Dentro de éste grupo de modelos, mencionaremos a los modelos en diferencias finitas, la cual utiliza el concepto de sustituir las propiedades de una parte del medio denominado celda, por unos valores medios representativos del mismo. Asimismo, aplica el método de diferencias finitas para resolver las ecuaciones diferenciales. La malla está limitada a redes ortogonales normalmente o con simetría cilíndrica o esférica, donde se puedan discretizar las ecuaciones.

2.6.1. Modelo de aguas subterráneas

Para el desarrollo de la investigación se utilizará el software MODFLOW, el cual es un modelo para aguas subterráneas de diferencias finitas y de dominio público desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), ampliamente utilizado y validado en estudios hidrogeológicos. El modelo tiene una estructura modular que consiste de un programa principal y una serie de subrutinas en paquetes. Cada paquete representa alguna característica específica del sistema hidrológico como recarga, evapotranspiración, ríos y drenes. Además, desde su desarrollo original han sido incorporados al programa un amplio rango de módulos adicionales, tales como anisotropía variable en el espacio y re-humedecimiento de celdas (Estrada 2009).

La forma general de la ecuación diferencial parcial gobernante para describir el flujo de agua subterránea bajo condiciones de tiempo variables en un acuífero heterogéneo y anisotrópico es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (*)$$

Donde x , y , z son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de los valores de conductividad hidráulica K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} , h es la cabeza en el acuífero, W es el flujo por unidad de volumen que representa fuentes y/o sumideros de agua, S_s es el almacenamiento específico y t es el tiempo.

La ecuación (*), junto con las condiciones de cabeza y/o flujo en las fronteras del acuífero, y la especificación de las condiciones de cabeza inicial, constituyen una representación matemática del sistema de flujo de agua subterránea. En caso de sistemas muy simples, la ecuación (*) puede resolverse analíticamente definiendo $h(x, y, z, t)$, y sustituyendo las derivadas de h con respecto al espacio y el tiempo.

En general, un método numérico como el de diferencias finitas debe aplicarse para lograr soluciones aproximadas de un problema, teniendo en cuenta la complejidad de los sistemas de flujo en casos reales de aplicación. Para cambiar del sistema continuo descrito por la ecuación (*), este es reemplazado por un conjunto finito de puntos discretos espacial y temporalmente, y términos calculados a partir de las diferencias en los valores de las cabezas en el acuífero; la solución de este sistema de ecuaciones lineales algebraicas simultaneas produce distintas distribuciones aproximadas de cabeza que varían con el tiempo (Estrada 2009).

La discretización espacial en MODFLOW se logra considerando acuíferos reales como un sistema de malla conformado por celdas, las cuales son caracterizadas en términos de filas (i), columnas (j), y capas (k) (Figura 1). Cada celda se considera uniforme con respecto a sus propiedades. Hay un punto por celda denominado nodo, en el cual es calculada la cabeza; dependiendo de la ubicación de los nodos se pueden tener dos configuraciones: bloque central (los nodos están en el centro de las celdas) y punto central (los nodos están en la intersección de las celdas); el flujo de agua subterránea es simulado por MODFLOW usando solo la configuración de bloque central de diferencias finitas (Estrada 2009).

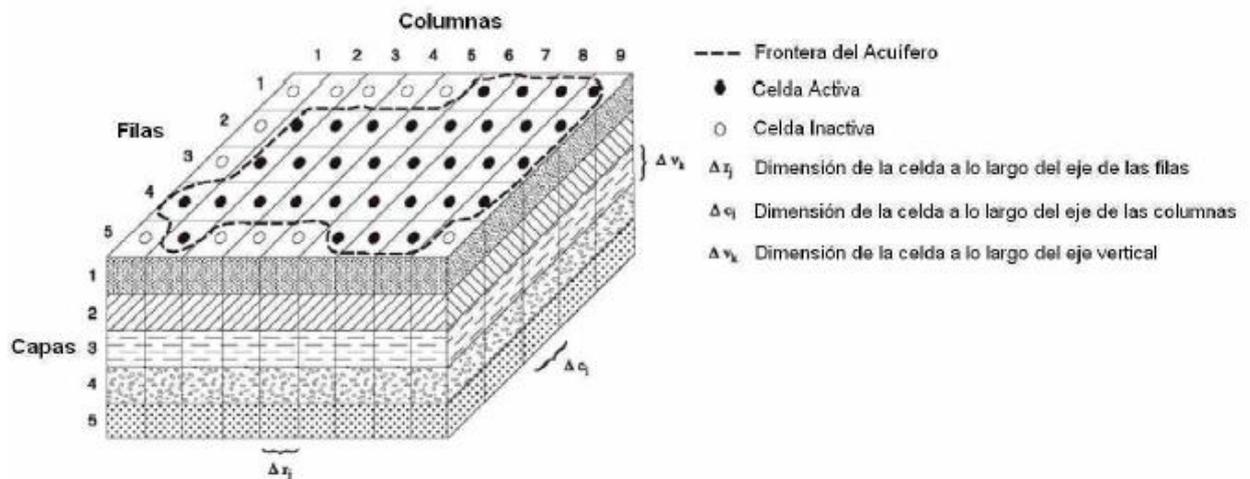


Figura 1: Sistema acuífero hipotético discretizado

La discretización temporal está basada en pasos de tiempo, los cuales se agrupan en periodos de stress. Un periodo de stress es un periodo de tiempo en el cual una

serie de parámetros específicos (condiciones de frontera, tasas de bombeo, etc.) permanecen constantes en el sistema. En muchos casos, los datos obtenidos en una zona de estudio no están sincronizados en términos de periodos de stress, para lo cual MODFLOW puede acoplar automáticamente los horarios en las diferentes condiciones de frontera y pozos de bombeo, con el fin de determinar la longitud de cada periodo de stress durante una simulación transitoria. Cada periodo de stress puede ser discretizado en uno o más pasos de tiempo. La selección del paso de tiempo y la construcción de la malla son pasos críticos en el diseño del modelo debido a que los valores de la discretización espacial y temporal tienen una influencia importante en los resultados numéricos (Estrada 2009).

En MODFLOW se pueden realizar tanto corridas de un modelo en estado permanente, así como simulaciones en estado transitorio. Las simulaciones en estado permanente son generalmente realizadas para obtener aproximaciones de las condiciones de equilibrio o promedias en el largo plazo. Las simulaciones en estado transitorio se realizan desde de un tiempo inicial (t_0) hasta un tiempo final (t_f), a partir de una serie de pasos de tiempo. Los niveles del acuífero cambian durante el periodo de simulación dependiendo de las variaciones que se presentan en las condiciones de frontera, las perturbaciones externas, la transmisividad del acuífero y las propiedades de almacenamiento del acuífero.

El MODFLOW permite un ingreso interactivo de datos (pre-procesamiento) y una salida interactiva de resultados (pos-procesamiento); además, las principales virtudes de este software radican en que proporciona pantallas de ingreso amigables, en las cuales se ingresan números como datos de entrada para el modelo, crea o lee mapas de curvas de nivel de las propiedades del modelo, edita las propiedades de cada celda de la cuadrícula o grupos de ellas y crea un conjunto de datos basado en archivos de texto estándar para MODFLOW. También ejecuta el modelo y proporciona una visión general del comportamiento de la interpolación numérica mientras se está emprendiendo y presenta los resultados de salida: balance hídrico, mapas de isopiezas, mapas de descenso dinámico y estadísticas de calibración (Donado 2002).

Este software especializado, básicamente se divide en tres módulos: INPUT, RUN y OUTPUT. En el primero se construye el modelo, asignando las condiciones de frontera. El segundo módulo, es el encargado de ejecutar la interpolación para encontrar las cargas hidráulicas en cada celda, ya sea en estado estable o transitorio; aquí se asignan las condiciones iniciales. El último módulo se encarga de mostrar los resultados del proceso, gráficamente; aquí se destaca las líneas de flujo, velocidades y líneas equipotenciales (Donado 2002).

2.6.2. Modelo en transporte de contaminantes

Se coincide con Oyarzún (2007), en la cual manifiesta que existen dos procesos físicos en donde los elementos químicos son transportados mediante fluidos en la napa freática, siendo estos la advección y difusión. Respecto al proceso de la advección, podemos describir que el elemento químico presente en el agua será llevado por este movimiento advectivo de masas, es así que el centro de masa del elemento químico es transportado por advección lo cual se mueve a una velocidad promedio del fluido. Por otro lado se tiene el proceso por difusión, en donde el elemento químico se mueve desde una alta concentración a otra baja, por efecto de un movimiento aleatorio de difusión molecular a un movimiento del agua que acarrea al elemento químico como una difusión turbulenta o por una combinación de ambos.

De acuerdo con Cruces y Martínez (2007), en relación a los modelos de transporte de masa, en la que persiguen obtener la evolución de la transferencia de masa de solutos existentes en el agua subterránea a través del acuífero, incluyendo fenómenos de advección, dispersión, reacciones químicas de intercambio con el medio u otros solutos presentes en el agua, decaimiento, etc. Su principal resultado es la evolución de las concentraciones de los diferentes solutos considerados en el espacio y en el tiempo. Sus principales utilidades incluyen: a) estudios de ubicación de vertederos; b) inyección de residuos; c) seguimiento de contaminantes químicos o radiactivos; d) técnicas de recuperación de acuíferos contaminados.

El tema de los metales pesados en aguas subterráneas tiene dos aspectos: a) las condiciones químicas bajo las cuales los elementos se mantienen en solución y,

por lo tanto, pueden ser transportados, y b) las interacciones químicas del agua subterránea en el acuífero, ya sea con minerales o materia orgánica sólida o con otros fluidos (mezcla de aguas). De hecho, de todos los procesos que influyen en el transporte de solutos, la disolución y precipitación son dos de los más importantes en términos de su influencia en la química de las aguas subterráneas. En general, los metales en aguas subterráneas son más móviles en ambientes ácidos o de bajo pH, bajo la forma de iones metálicos con carga. Sin embargo, existen condiciones diferentes para los distintos metales bajo las cuales éstos se presentan en solución o precipitan, lo que condiciona evidentemente la posibilidad de ser transportados en los sistemas de aguas subterráneas. De hecho, a pH muy básicos algunos metales (Se, V, As, Cr) pueden volver a movilizarse bajo la forma de aniones solubles complejos, formando hidroxicomplejos. Además, el potencial redox (Eh) influye en el estado (oxidado o reducido) del ión metálico y, por lo tanto, su mayor o menor movilidad (Oyarzún 2007).

Los minerales de un importante grupo de elementos (“metales de base”) como Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Co, están constituidos por sulfuros. Incluso el Fe, del cual se explotan principalmente los óxidos (Fe_2O_3 y Fe_3O_4), también está presente junto a los sulfuros de Cu, Zn, entre otros, en forma de pirita (FeS_2). Cuando los sulfuros se oxidan, se forman sulfatos, lo que provoca una acidificación del agua (dada la formación de hidróxidos, que precipitan, y el “enriquecimiento” relativo del medio en $[\text{H}^+]$). El mayor generador de acidez es pirita, puesto que posee un átomo de azufre “de más”, que forma directamente H_2SO_4 , un ácido fuerte: $\text{FeS}_2 + 15/4\text{O}_2 + 7/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4 + 4\text{H}^+$. A ello se une la posterior oxidación del Fe y su consiguiente hidrólisis, lo que implica la formación de más hidrogeniones ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$, y $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}^+\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$), es decir, más acidez. De esta manera el drenaje ácido, vale decir agua ácida generada por oxidación de sulfuros en un yacimiento no explotado, en una mina (yacimiento explotado) o en los depósitos residuales generados por la explotación y beneficio de minerales (desmontes o pilas de mineral de baja ley, desechos de lixiviación, relaves) puede migrar a través de las aguas superficiales y subterráneas. Como en una mina se generan abundantes nuevas superficies de contacto roca/aire/agua (“ingredientes necesarios”), a la manera de vasos capilares, es mayor la posibilidad de ocurrencia de este problema, así como su magnitud (Oyarzún 2007).

Oyarzún (2007) describe la solución matemática analítica para todo estudio de procesos de transporte contaminantes en las aguas subterráneas. Para ello, se parte de la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = -v * \frac{dC}{dx} + \frac{d}{dx} \left(D * \frac{dC}{dx} \right) + r \quad (1)$$

La ecuación (1) se reescribe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dx \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - Vx \frac{\partial C}{\partial x}$$

Ahora, considerando las condiciones iniciales o de borde que se presentan a continuación:

$$C(0,t)=C_0$$

Para $x = 0$ y para todo tiempo, la concentración es C_0 , fuente continua.

$$C(x,0)=0$$

Para todo punto x , al tiempo 0, la concentración es 0.

Es posible obtener una solución exacta de la ecuación de advección-dispersión para una fuente continua, tal como la ecuación de Ogata-Banks (1961) que se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} * \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{(x-vt)}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}} \right] + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{(x+vt)}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}} \right] \right) \quad (2)$$

Donde:

D: coeficiente de dispersión hidrodinámica.

erfc: función del error complementario.

v: velocidad lineal del agua subterránea.

Dado que en la ecuación (2), en su segundo término, suele carecer de importancia para muchas situaciones prácticas, pero si se considera que $D = \alpha_x v$ (al ignorar el efecto de la difusión en la dispersión hidrodinámica), la ecuación (2) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} * \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{(x-vt)}{2(\alpha_x vt)^{\frac{1}{2}}} \right] \right)$$

III. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 MATERIALES

3.1.1 Equipos y materiales

En la presente investigación se han utilizado los siguientes equipos y materiales:

a) Equipos:

- Laptop TOSHIBA, procesador Intel Core i5, memoria RAM de 4GB
- Impresora HP Deskjet F4180
- Escáner HP

b) Materiales:

- Software Visual MODFLOW, SURFER
- Software Arcview 3.3
- Datos Hidrogeológicos de la zona de estudio (Ubicación y cotas de pozos, transmisividad, conductividad hidráulica, etc.)
- Datos Hidrológicos de la microcuenca del río Yuracyacu (caudales máximos anuales)
- Mapa base de la microcuenca del río Yuracyacu (Escala 1: 250 000)
- Carta Nacional de Yuracyacu (Escala 1: 100 000)

3.1.2 Descripción de la zona de estudio

La zona de emplazamiento de la presa de relaves Yuracyacu se encuentra ubicada en la margen derecha del río Yuracyacu. Políticamente se ubica en el distrito Parcoy, provincia de Patate, departamento de la Libertad.

Geográficamente se localiza entre las coordenadas UTM E222210 m, N9121740m y E224650m, N9122740m (Datum WGS84, zona 18 Sur), con altitudes que varían entre 1990 a 2140 m.s.n.m.

Hidrográficamente se ubica en la microcuenca del río Yuracyacu, subcuenca del río Parcoy, afluente del río Marañón.

La vía de acceso para llegar al área de estudio es a través de la capital de Lima por vía aérea mediante vuelos que cubren desde el aeropuerto Jorge Chavez y el aeropuerto Pias, desde donde nace una vía afirmada de 2 km de longitud hasta llegar a la zona de la investigación.

3.1.3 Información climática

Las variables climáticas han sido descritas con información proporcionada por CMH correspondiente a la estación meteorológica Matibamba, localizada a 2300 m de altitud y en la quebrada Alpamarca, tal como se muestra en la Figura 2, siendo esta estación la más cercana y representativa para el área en estudio.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	17.1	17.6	81	82	9.4	24.5	4.23
Febrero	16.9	17.4	80	99	9.3	24.5	4.17
Marzo	17.9	18.5	70	101	8.5	22.8	4.13
Abril	17.7	18.2	71	28	9.1	22.2	3.77
Mayo	18.4	19.0	61	110	7.4	18.2	3.45
Junio	18.9	19.6	49	109	6.4	15.9	3.26
Julio	21.8	22.8	37	68	6.3	16.1	3.30
Agosto	21.9	22.9	37	96	5.9	16.9	3.88
Septiembre	22.5	23.2	43	306	6.5	19.1	5.82
Octubre	20.2	21.0	60	50	6.7	20.2	4.01
Noviembre	18.8	19.4	73	140	7.0	20.7	4.03
Diciembre	17.9	18.4	72	90	9.7	24.7	4.43
Promedio	19.2	19.8	61	107	7.7	20.5	4.04

Figura 2: Características climáticas representativas para Yuracyacu

a) Temperatura

Las temperaturas máximas se hallan comprendidas entre 17.4°C (Febrero) y 23.2°C (Septiembre), con un promedio anual de 19.8°C, mientras que las temperaturas mínimas se hallan en el rango 16.9°C (Febrero) y 22.0°C (Septiembre), con 19.2°C de promedio anual.

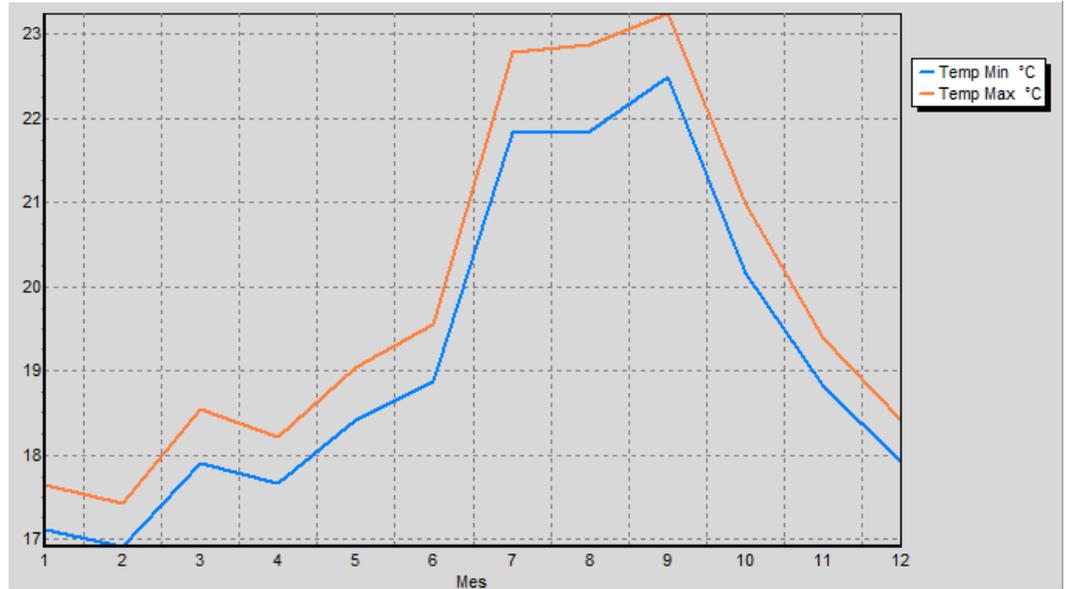


Figura 3: Temperatura

b) Humedad relativa

La humedad relativa se encuentra comprendida entre 37% (Julio) y 81% (Enero) variable que se manifiesta en la sensación de calor.

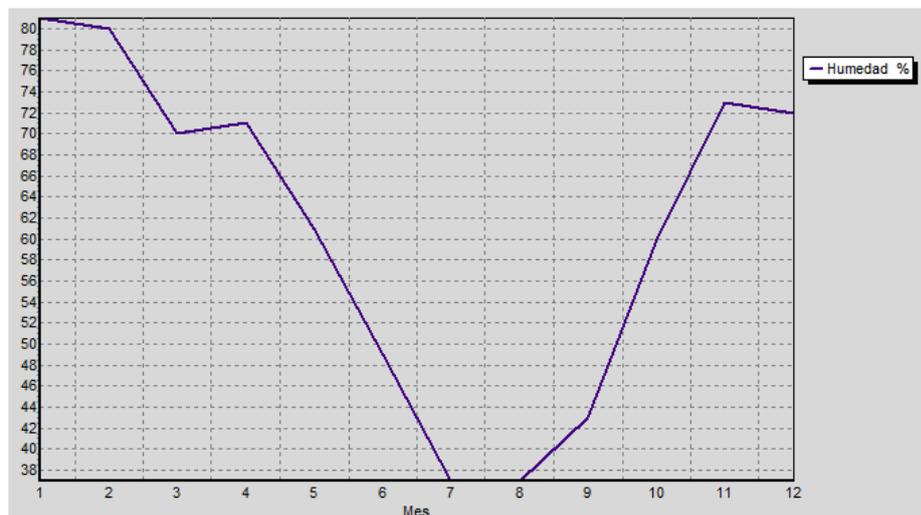


Figura 4: Humedad Relativa

c) Velocidad del viento

La velocidad del viento se encuentra en el rango 29 a 306 km/d con direcciones predominantes Oeste-Este (WE).

d) Horas de sol

El número de horas de sol en la zona de estudio varían entre 5.9 horas/día (Agosto) y 9.7 horas/día (Diciembre), con 7.7 horas/día de promedio anual.

e) Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial es importante para determinar la intensidad de pérdida de agua desde cuerpos abiertos tales como relavera, sus valores varían entre 3.26 mm/d (Junio) y 5.82 mm/d (Septiembre) con 4.04 mm/d de promedio anual.

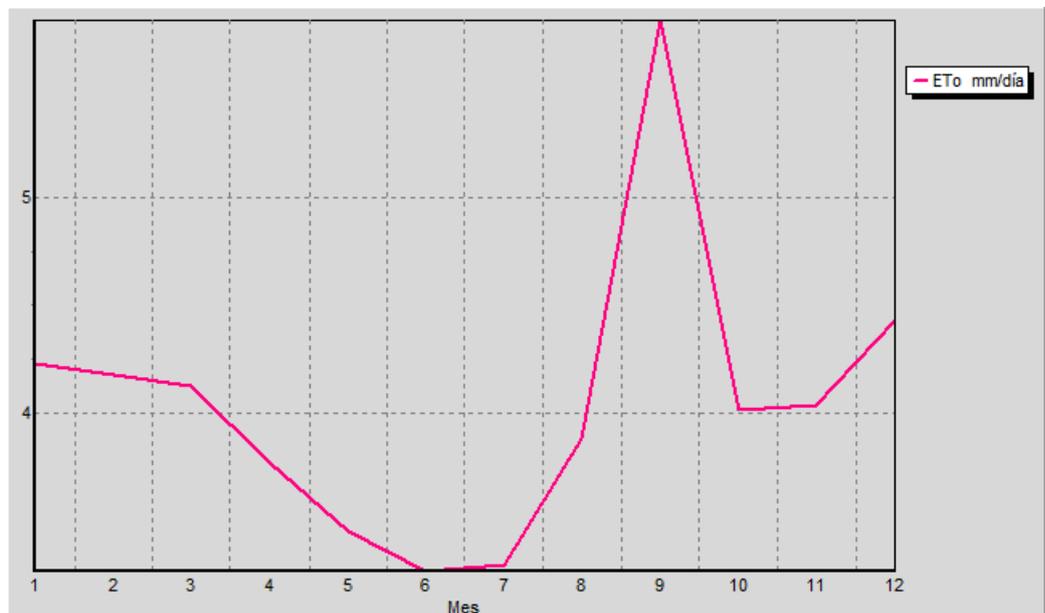


Figura 5: Evapotranspiración

f) Precipitación

Las precipitaciones se producen durante los meses de Enero a Marzo con valores comprendidos entre 37 mm/mes (Marzo) a 201.4 mm/mes (Enero) y Noviembre (42.6 mm/mes) a Diciembre (107.2 mm/mes) el resto de meses en mínima o nula. La precipitación total anual es 515 mm/año.

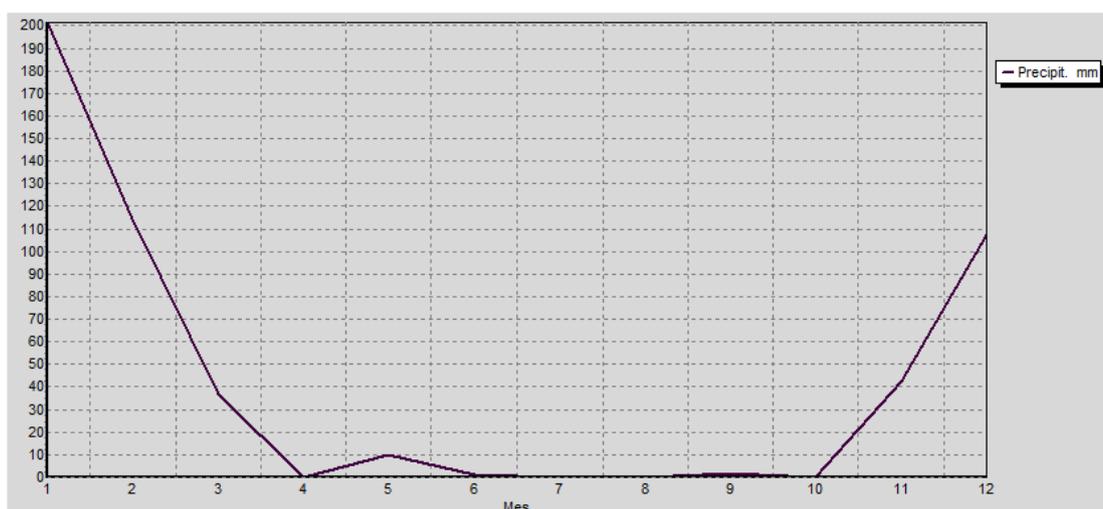


Figura 6: Precipitación

3.1.4 Inventario de fuentes de agua subterránea

Se tiene perforado 04 piezómetros destinados al monitoreo de los niveles y calidad de las aguas subterráneas en el acuífero que subyace los depósitos de relaves de la zona de estudio. Como se ha mencionado, las perforaciones han alcanzado el basamento rocoso, información importante para conocer las reservas de las aguas subterráneas y las profundidades respectivas.

Cuadro 1: Inventario de piezómetros

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	N.E/pr	pr(m)	N.E./s	H(m)	Profundidad(m)	D(″)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	26.42	0.82	25.60	1982.86	100.70	4
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	24.80	0.68	24.12	2061.58	105.20	4
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	39.53	0.73	38.80	2047.67	95.00	4
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	25.48	0.73	24.76	1975.66	60.20	4

N.E/pr= profundidad del nivel estático medido desde el punto de referencia

Pr= punto de referencia (m), N.E/s = profundidad del nivel estático medido desde el suelo (m)

H= Carga hidráulica, D(*) = diámetro de perforación (pulgadas)

En el Cuadro 1 y Plano 1 del anexo, se muestra la información técnica de los piezómetros, entre las principales se tiene la profundidad que varía desde un mínimo de 60.20 m (PI-08) hasta 100.70 m (PI-01), y la profundidad del nivel freático comprendido entre 25.48 m (PI-08) y 39.53 m (PI-06).

3.1.5 Geología

a) Geología regional

El área de estudio está constituida por rocas intrusivas graníticas y/o granodioríticas correspondientes al Batolito de Pataz, constituido por el intrusivo que cubre una superficie que supera los 200 Km².

La Geología de la zona está vinculada a la evolución estratigráfica y estructural de la cordillera Andina del Norte del Perú, la cual está formada por la superposición de tres ciclos orogénicos: el Precámbrico, el Hercínico y el Andino.

El Precambriano corresponde a las rocas del Complejo Marañón y está formado por fillitas, esquistos y meta volcánicos. El Hercínico está formado por las pizarras de la Formación Contaya. El plegamiento Eohercinico sucede en un periodo de distensión con la formación de una cuenca intramontañosa que es rellenada por rocas del Grupo Ambo; en el Permiano superior tenemos una acumulación volcánica andesítica conocida como Volcánico Lavasen, una fase Epirogenética genera una emersión y la acumulación de las rocas ferruginosas del Grupo Mitu. La sedimentación del ciclo Andino comienza con las calizas del Grupo Pucará, cubiertas posteriormente por areniscas del Grupo Goyllarisquizga, calizas de la Formación Crisnejas y por las capas rojas de la Formación Chota. Finalmente se encuentran depósitos aluviales, coluviales y fluviales del Cuaternario Reciente, que desde el punto de vista hidrogeológico son las más importantes por cuanto en ellos se ha identificado la presencia de agua subterránea.

b) Estratigrafía

La secuencia estratigráfica desde la base hacia la superficie está conformada por: Formación Chota (Ksp-cho), Depósito Aluvial (Q-al), Depósito Coluvial (Q-col).

- **Formación Chota (ksp-cho)**

Secuencia continental rojiza púrpura consistente hacia la base de areniscas gris violáceas a gris rojizas pasando a gris amarillentas y verdosas, de grano fino a medio, intercalada con niveles pelíticos gris violáceos. Las areniscas se presentan en estratos medianos a gruesos, de 50 cm a 1 m de grosor, tabulares, con estratificación sesgada, micáceos, compactos, que disminuyen hacia la parte superior aumentando a su vez las limoarcillitas.

La Formación Chota sigue el mismo patrón de distribución que presentan el resto de materiales mesozoicos. En el área de estudio aflora como una gruesa franja que se extiende de Norte a Sur, siguiendo una dirección aproximada NO- SE.

- **Tonalita- Granodiorita (C-tn/gd)**

Roca grisácea de grano mediano a grueso, compuesta fundamentalmente por cristales de hornblenda negra, plagioclasa blanca y cuarzo. Respecto a la edad de la granodiorita se sabe que ésta se emplazó posteriormente al Precambriano pero antes del Terciario medio o superior. En base de su similitud litológica con los batolitos post-orogénicos de otras regiones andinas se supone que es un intrusivo del Terciario inferior. Lo cierto es que no muestra ninguna evidencia de haber sufrido una fuerte compresión, y el hecho de que se encuentra en contacto con rocas cretáceas no metamorfizadas se explica por fallamiento posterior.

En el área de estudio se presenta como una gruesa franja de dirección NO-SE, siguiendo el contacto con la Falla Parcoy.

- **Depósito aluvial (Q-al)**

Estos depósitos se encuentran formando terrazas ligeramente inclinadas, y paralelas a al cauce del río Yuracyacu. Los materiales que los constituyen son producto de la acción fluvio coluvial, los

clastos son de tamaños heterogéneos de formas redondeadas y están contenidos en una matriz areno limosa con gravas, su estratificación es indefinida. Los granos gruesos alcanzan los 4 a 5 metros de diámetro.

- **Depósito coluvial (Q-col)**

Constituidos por materiales de diferente tamaño que van desde arenas hasta bloques de rocas intrusivas (granitos, tonalitas y granodioritas) y volcánicas conformadas por andesitas englobadas en una matriz arenosa con gravas angulosas a sub-angulosas, mal clasificadas.

Se han formado por la alteración y desintegración de las rocas ubicadas en las laderas superiores adyacentes y a la acción de la gravedad, este depósito predomina en el emplazamiento de la presa de relaves proyectado. En el Plano 2 del anexo, se muestra la geología local del área de interés del proyecto.

3.1.6 Geomorfología

El área de estudio corresponde a la parte baja y derecha de la microcuenca del río Yuracyacu, muy próximo a su desembocadura al río Parcoy enmarcada en la Cordillera Oriental de los Andes.

El valle del río Yuracyacu es juvenil, con forma de “U” y taludes que se levantan desde las márgenes del río, la pendiente de la terraza es en promedio 10% y con cambios bruscos al finalizar la terraza.

El valle está surcado por el río Yuracyacu con pendiente aproximada que varía entre 10% a 20%, el lecho está constituido por bloques y cantos sub-redondeados, con presencia de gravas y arenas. La litología de estos materiales es variada, con predominio de rocas ígneas: grano dioritas, cuarzomonzoníticas dioritas y rocas andesíticas, entre otras.



Figura 7: Valle del río Yuracyacu

En el área de estudio se han identificado las siguientes unidades geomorfológicas:

a. Unidad quebrada

El lugar de emplazamiento de la presa de relaves es denominado quebrada Yuracyacu, constituida por una depresión estrecha, poco profunda (adyacente a la unidad de laderas con pendientes fuertes), rellena en su totalidad por depósitos fluviales, cubierta con arbustos. Los depósitos que rellenan esta unidad son gravas y arenas pobremente seleccionadas, que se acumulan en forma de cono de deyección en su desembocadura al Río Parcoy.

b. Unidad valle

Unidad geomorfológica desarrollada por el río Yuracyacu, ocupa la zona de depresión y se caracteriza por tener actividad fluvial durante el año y se ubica adyacente a las terrazas y a las laderas con pendiente pronunciada. Presenta una sección transversal en “U”, con fondo plano que está relleno por depósitos fluviales y aluviales no consolidados constituidos por gravas, arenas, limos y grandes bloques.

c. Unidad terrazas

Son geoformas que han sido depositadas principalmente en la margen derecha del río Yuracyacu, en ambas márgenes de los cauces de los ríos Yuracyacu y Parcoy en los lugares en los que la pendiente de los ríos decrece y a la vez disminuye su capacidad de arrastre. Estas terrazas tienen una altura que no supera en varios casos los 20 m.

d. Laderas

De acuerdo a su pendiente se ha dividido en tres tipos:

Laderas de pendiente suave. Son superficies de laderas suaves adyacentes a la unidad de laderas de pendientes moderadas, donde el ángulo de la pendiente varía entre 20 y 30°.

Laderas con pendientes moderadas. Son adyacentes a las laderas de pendiente fuerte, constituye normalmente las zonas medias a altas de los flancos de los valles y quebradas, cuya pendiente se halla entre 30 y 40°, se observan suelos con poco espesor que son erosionados intensamente.

Laderas con pendientes fuertes. Poseen relieves escarpados y abruptos cuya cobertura inicial fue deslizado y acumulado formando las terrazas como las de Yuracyacu, en la actualidad estas laderas tiene cobertura de suelos de espesores reducidos producto de la meteorización de las rocas, en otros casos estos se encuentra denudados. En el Plano 3 del anexo, se muestra la geomorfología del área de proyecto.

3.1.7 Prospección geofísica

En el lugar de emplazamiento de la Presa Yuracyacu, se han realizado 18 sondajes eléctricos verticales con la disposición Schlumberger; con el fin de conocer la estratigrafía, investigar el espesor del estrato permeable, así como la profundidad del basamento rocoso. Esta correlación geofísica geológica nos permitirá realizar secciones georesistivas y mapas de líneas isopacas de la zona de estudio, dichos resultados serán de importancia a fin de mejorar el modelo conceptual y el modelo numérico de la zona de estudio.

a. Método por resistividad eléctrica (sev)

La tierra es un buen conductor de la corriente eléctrica, por sus componentes mineralógicos, que provienen fundamentalmente de la cantidad de minerales metálicos y no metálicos, del grado de humedad y mineralización del agua que ocupan los espacios intersticiales de las rocas y formaciones sedimentarias; la temperatura también influye en la conductividad de las rocas. Estas son las características más importantes que definen la resistividad del medio físico.

El método de Resistividad Eléctrica se aplica por medio de un doble dipolo de electrodos: El primer dipolo corresponde al circuito de los electrodos de corriente AB y pueden ser construidos de fierro común, por donde se envía una intensidad de corriente eléctrica (mA) hacia tierra, desde una fuente de corriente continua que pueden ser acumulador de corriente, generador, panel solar u otras formas con alto amperaje para suelos dieléctricos; el segundo dipolo corresponde al circuito de potencial MN, donde se mide el potencial eléctrico creado por el flujo de la corriente eléctrica (DV).

Los parámetros eléctricos de intensidad de corriente (I en mA) y potencial (DV en mV) se ha medido con un georesistivímetro con alta impedancia de entrada y con sensibilidad menor a la milésima, tanto para la corriente como para el potencial. Para efectuar las medidas de los parámetros resistivos I y DV, los electrodos MN y AB se han dispuesto en línea recta, efectuándose las medidas desde los primeros metros, hasta un máximo que permitan investigar las profundidades requeridas por el proyecto.

Para la distribución de los electrodos AB y MN existen varias escuelas, las principales son las ideadas por Wenner, Lee y Schlumberger (puede ser simétrico o asimétrico) entre otros; resultando el de mayor aplicación en Perú el ideado por Schlumberger, normalmente utilizada para estudios hidrogeológicos, por permitir anular con facilidad las fuertes variaciones laterales que conllevan a lecturas erradas.

La distribución electródica de Schlumberger se caracteriza por ser tetra electródica, lineal, simétrica y/o asimétrica, que permite investigar la profundidad requerida en la parte central de la distribución electródica. El gráfico resultante de plotear en coordenadas rectangulares, las resistividades aparentes en el eje de ordenadas y el espaciamento de electrodos AB/2 en el eje de abscisas, ambas en escala logarítmica, es denominado sondaje eléctrico vertical o SEV. En la Figura 8, se muestra la disposición de electrodos para el arreglo Schlumberger.

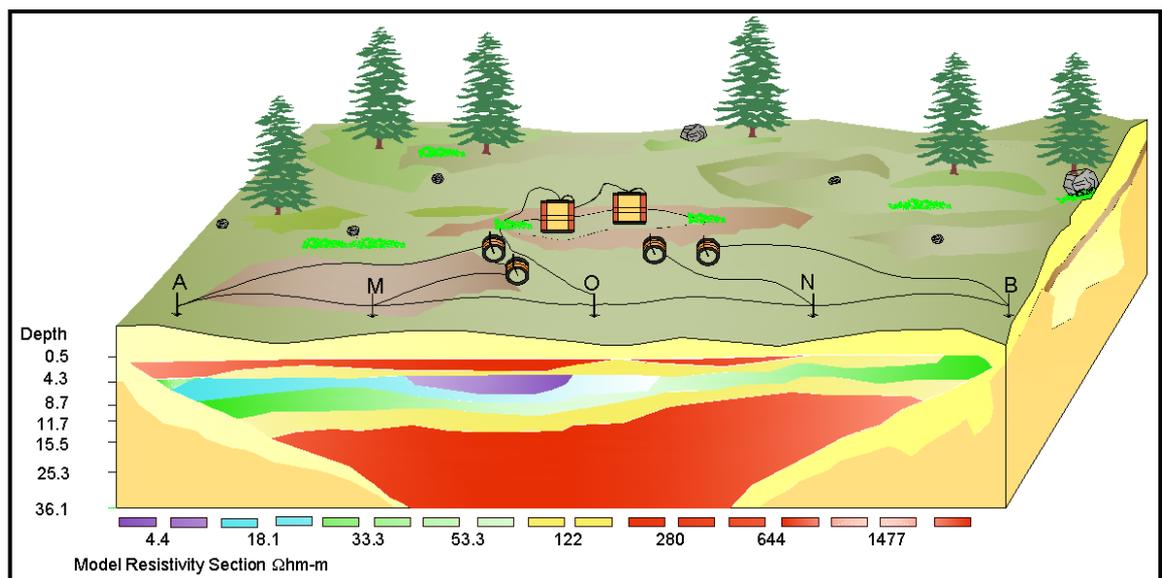


Figura 8: Dispositivo Tetraelectródico Schlumberger (HGS PERU S.A.)

b. Trabajo de campo

Previo a los trabajos de campo, la empresa ha recopilado la mayor información necesaria a fin de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Establecer a priori el que exista contraste de resistividad entre el objetivo buscado (estrato impermeable) y su entorno.
- Establecer a priori el que exista materiales con capacidad de retener carga eléctrica (agua estado líquido).
- El relieve topográfico.
- La ubicación y accesos.

En consecuencia la información ha estado constituido por:

- Cartografía topográfica
- Mapas y cortes geológicos
- Información del subsuelo obtenida de perforaciones
- Informes geológicos existentes
- Datos de campañas geofísicas anteriores
- Información geográfica
- Información hidrogeológica preexistente (niveles freáticos, acuíferos, precipitación, datos de recarga y de pozos de bombeo cercanos, etc).

Los trabajos han consistido en realizar 18 sondajes eléctricos verticales, acorde con el método expuesto, en su configuración Schlumberger, mediante la medición de la resistividad y su relación con la profundidad. Los puntos de los SEVs fueron georeferenciados con el objeto de plasmar los resultados y elaborar los planos de isobatas e isopacas, entre otros. En el plano N° 4 se muestra la ubicación de los sondajes eléctricos verticales.

c. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete ha consistido en procesar la información recopilada en campo referente a los resultados de los sondeos eléctricos, para luego elaborar los mapas temáticos y secciones geo resistivas, dichos resultados se complementarán con las observaciones y criterios geológicos - geomorfológicos de la zona en estudio, a fin de aproximar la interpretación cualitativa y cuantitativa de las características georesistivas a la realidad geológica de la zona en estudio.

i) Interpretación cualitativa

Cualitativamente los resultados de los 18 SEVs muestran que la zona estudiada está compuesto de material de arrastre y deposición reciente, principalmente en los primeros metros; como lo identifican el SEV 02, SEV 05, SEV 08, SEV 11, SEV 14 y SEV 17, a partir del

estrato 2 al estrato 3 se identificaron estratos con características de permeabilidad distinta a la primera, con altas resistividades variando entre 1756 a 3906 ohmios – m y en algunos casos entre 103 a 701 ohmios – m . De los ensayos de SEV realizados se obtuvieron valores de resistividad aparente, cuyas curvas variables en función de los parámetros de la resistividad aparente y de la distancia AB/2, y de la litología y humedad, se obtuvieron las curvas tipo HA, KHA y HQA.

ii) Interpretación cuantitativa

Se ha interpretado cada inflexión de la curva del SEV, en términos de resistividades verdaderas y espesores, utilizando ábacos elaborados por Orellana – Money; posteriormente los resultados fueron reajustados mediante el software IPI2WIN. El cuadro de resultados refleja prácticamente la columna geo resistiva de la zona en estudio. El Cuadro 2 muestra los estratos geo resistivos identificado de la zona de estudio, basado en datos obtenidos en campo.

Cuadro 2: Resultados cuantitativos de los SEV's.

Nº SEV	Coordendas UTM (WGS 84)			R1		R2		R3		R4	
	Este	Norte	Cota	ρ_1	Z1	ρ_2	Z2	ρ_3	Z3	ρ_4	Z4
01	222880	9122198	2017	518	2,4	153/2948	3,4/10,8	71,9	20	9850	
02	222893	9122137	2017	471,5	1,5	2154	16,3	380,8	49,5	855	
03	222926	9122028	1997			3256/1771	6,5/14	419	120	3069	
04	223067	9122252	2040	83,5	3	980	20	84	23	9000	
05	223000	9122138	2034	741	5,1	3288	11,2	103	13,6	969	
06	223107	9122080	2036	3339	7,5	1589	20,8	242	160	12083	
07	223283	9122277	2050	212	2,5	1544	16,3	273	75,4	4686	
08	223317	9122217	2050	175	3,2	2119	11,5	539			
09	223347	9122121	2047			2505	22,7	234	25,2	14027	
10	223454	9122331	2046	224	4,5	1310	11	67	32,5	28421	
11	223511	9122255	2058	512	1,5	2283	18,5	300	31	827	
12	223569	9122178	2074	703	1,5	3327	18,1	595	63,3	1132	
13	223694	9122328	2092	107	3	2418	11,5	136	22,8	1842	
14	223737	9122266	2089	704	1,8	1756	21,3	268	30,6	1847	
15	223799	9122113	2083			2225	2	637	20,2	30000	
16	223965	9122359	2125	891	3,2	3231	18,5	488	48,6	5566	
17	223963	9122299	2221	753	1,5	3906	14	701	48	3309	
18	223983	9122216	2107			267/2321	2,8/11	297	29,6	9918	

Dónde:

R(n) Estrato u horizonte georesistivo

$\rho(n)$ Resistividad en (Ω -metro)

Z(n) Espesor del estrato georesistivo en metros

SEV Sondaje Eléctrico Vertical

Las interpretaciones para cada sondaje basado en la información recopilada en campo es la siguiente:

SEV Nº 01

N1. Horizonte de arenas y material de deposición reciente de 518 Ω m, hasta 2.4 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad elevada variables de 153 a 2948 Ωm , de 2.4 a 16.6 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 71 Ωm , de 16.6 a 36.6 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 9850 Ωm estimado a partir de 36.6 metros de profundidad (no saturado).

SEV N^o 02

N1. Horizonte de arenas y material de deposición reciente de 471 Ωm , hasta 1.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 2154 Ωm , de 1.5 a 17.8 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 380.8 Ωm , de 17.8 a 67.2 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 855 Ωm a partir de 67.1 metros de profundidad (no saturado).

SEV N^o 03

N2. Horizonte con resistividad de 1771 a 3256 Ωm , de 20.5 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 419 Ωm , de 20.5 a 140.5 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 3069 Ωm , a partir de 140.5 metros de profundidad (no saturado).

SEV N^o 04

N1. Horizonte de arenas y material de deposición reciente de 83.5 Ωm , hasta 3.0 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad elevada variables 980 Ωm , de 3.0 a 13.0 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 84 Ωm , de 13.0 a 46.0 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 9000 Ωm estimado a partir de 46.0 metros de profundidad (no saturado).

SEV №05

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 741 Ωm , hasta 5.1 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad variable de 3288 Ωm , de 5.1 a 16.3 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 103 Ωm , de 16.3 a 29.9 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosó con 969 Ωm a partir de 29.9 metros de profundidad (no saturado).

SEV № 06

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 3339 Ωm , hasta 7.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad variable de 1589 Ωm , de 7.5 a 28.2 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 242 Ωm , de 20.8 a 188.8 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosó de 12083 Ωm a partir de 188.8 metros de profundidad (no saturado).

SEV № 07

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 212 Ωm , hasta 2.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad variable de 1544 Ωm , de 2.5 a 18.8 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 273 Ωm , de 18.8 a 94.2 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosó con 4686 Ωm a partir de 94.2 metros de profundidad (no saturado).

SEV №08

N2. Horizonte de material de deposición reciente de 175 Ωm , hasta 3.2 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con resistividad de 2119 Ωm , de 3.2 a 14.7 metros de profundidad (saturado).

N4. Horizonte permeable con 539 Ωm , a partir de 14.7 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°09

N2. Horizonte con resistividad de 2505 Ωm , hasta 22.7 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte de elevada permeabilidad con 234 Ωm , de 22.7 a 47.9 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 14027 Ωm , a partir de 47.9 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°10

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 224 Ωm , hasta 4.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 1310 Ωm , de 4.5 a 15.5 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte permeable con 67 Ωm , de 15.5 a 48 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 28421 Ωm a partir de 48 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°11

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 512 Ωm , hasta 1.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 2283 Ωm , de 1.5 a 20 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 300 Ωm , de 20 a 51 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocoso con 827 Ωm a partir de 51 metros de profundidad (no saturado).

SEV №12

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 703 Ωm , hasta 1.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 3327 Ωm , de 1.5 a 19.6 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 595 Ωm , de 19.6 a 82.9 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 1132 Ωm a partir de 82.9 metros de profundidad (no saturado).

SEV №13

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 107 Ωm , hasta 3 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 2418 Ωm , de 3 a 14.5 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 136 Ωm , de 14.5 a 37.2 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 1842 Ωm a partir de 37.2 metros de profundidad (no saturado).

SEV №14

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 704 Ωm , hasta 1.8 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 1756 Ωm , de 1.8 a 20.1 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 268 Ωm , de 20.1 a 50.7 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 1847 Ωm a partir de 50.7 metros de profundidad (no saturado).

SEV №15

N2. Horizonte con resistividad de 2225 Ωm , de 2 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 637 Ωm , de 2 a 22.2 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 30000 Ωm a partir de 22.2 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°16

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 891 Ωm , hasta 3.2 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 3231 Ωm , de 3.2 a 21.7 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 488 Ωm , de 21.7 a 70.3 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 5566 Ωm a partir de 70.3 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°17

N1. Horizonte de material de deposición reciente de 753 Ωm , hasta 1.5 metros de profundidad (no saturado).

N2. Horizonte con resistividad de 3906 Ωm , de 1.5 a 15.5 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 701 Ωm , de 15.5 a 63.5 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 3309 Ωm a partir de 63.5 metros de profundidad (no saturado).

SEV N°18

N2. Horizonte con resistividad de 267 a 2321 Ωm , hasta 17.3 metros de profundidad (no saturado).

N3. Horizonte con elevada permeabilidad con 297 Ωm , de 17.3 a 46.9 metros de profundidad (saturado).

N4. Basamento Rocosos con 9918 Ωm a partir de 46.9 metros de profundidad (no saturado).

d. Secciones geo-resistivas

Las ocho (08) secciones geo resistivas en las cuales se distinguen 4 estratos se presentan a continuación:

i) Sección geo-resistiva A-A'

La presente sección se muestra en la Figura N° 09 cuya orientación es de SO a NE, tiene una longitud de 1161.7 metros, fue elaborada con los SEV 02, SEV 05, SEV 08, SEV 11, SEV 14 y SEV 17.

El nivel freático se estimaría entre los 12 – 20 metros a lo largo de la sección geo resistiva y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de 14 metros como se indica en el SEV-05 hasta 49 metros tal como indican los SEV-02 y SEV-17.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 175 a 741 Ω m presentando espesores de 1.5 a 5.1 metros, El registro de las medidas mostró valores variables de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material superficial es principalmente arenas y material recientemente depositada que permite el flujo de corriente. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 1756 a 3906 Ω m presentando espesores variables que van desde 11.2 a 21.3 metros, los valores de resistividad nos determinan de permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 103 a 701 Ω m presentando espesores de 13.6 a 49.5 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propio de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 539 a 3339 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

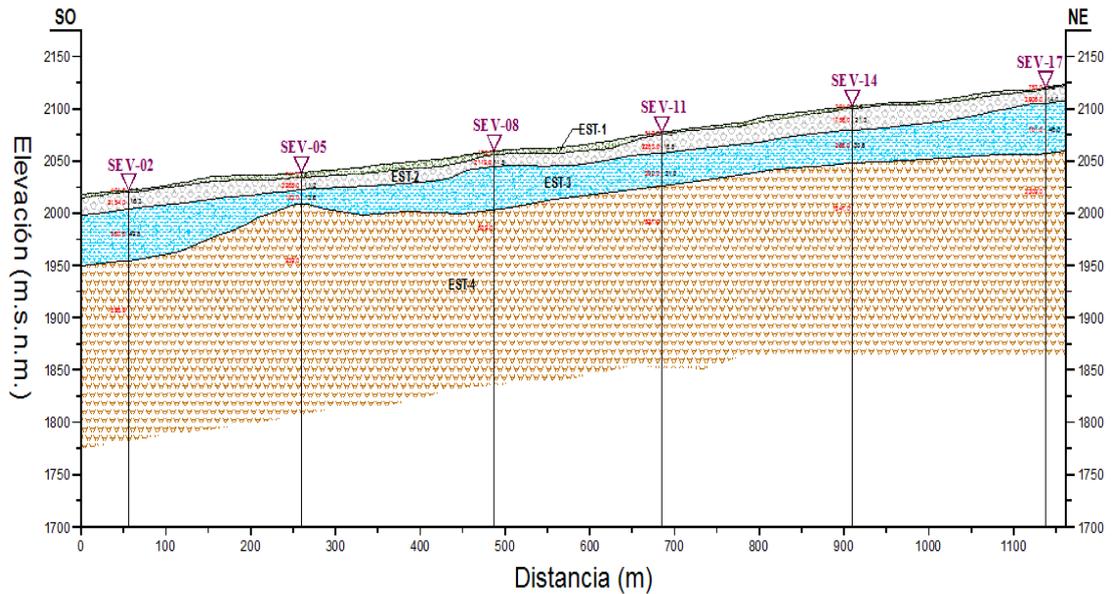


Figura 9: Sección Geo-resistiva A – A'

ii) Sección geo-resistiva B-B'

La presente sección se muestra en la Figura 10 cuya orientación es de NO a SE, tiene una longitud de 214.4 metros, fue elaborada con los SEV 01, SEV 02 y SEV 03.

El nivel freático se estimaría entre los 10 –16 metros de profundidad a lo largo de la sección geo resistiva y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de 20 metros como se indica en el SEV-01, 49 metros tal como lo indican los SEV-02 y de potencia elevadas de 120 metros en la cercanías del Río Yurac Yacu como lo indica el SEV-03.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 471.5 a 518 Ωm presentando espesores de 1.5 a 2.4 metros, El registro de las medidas mostró valores variables de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material en superficie es

arena y material recientemente depositada. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 1771 a 2948 Ωm , presentando espesores variables que van desde 10.8 a 16.3 metros, los valores de la resistividad determinan que el medio tiene una permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 71.9 a 419 Ωm presentando espesores de 20 a 49.5 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propios de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 855 a 9850 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

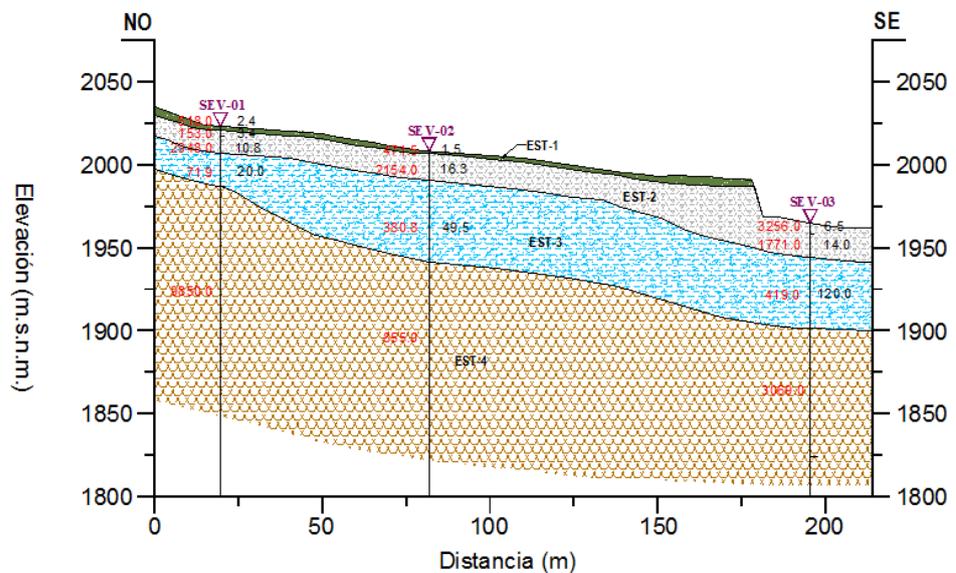


Figura 10: Sección Geo-resistiva B – B'

iii) Sección geo-resistiva C-C'

La presente sección se muestra en la Figura 11 cuya orientación es de SE a NO, tiene una longitud de 313 metros, fue elaborada con los SEV 04, SEV 05, y SEV 06.

La profundidad del nivel freático se estimara entre los 11 –20 metros de profundidad a lo largo de la sección geo resistiva y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de 14 metros como se indica en el SEV-05, 20 metros tal como indica el SEV-04 y de potencia elevada de 160 metros en la cercanías del Ríos Yurac Yacu como muestra la interpretación del SEV-06.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 83.5 a 741 Ω m presentando espesores de 3.0 a 5.1 metros, El registro de las medidas mostró valores variables de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material en superficie está compuesta por arena y material depositado recientemente. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 980 a 3339 Ω m presentando espesores variables que van desde 11.2 a 20.8 metros, los valores de resistividad indican que se trata de un estrato con permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 84 a 242 Ω m presentando espesores de 13.6 a 23.0 metros, las resistividades determinadas indican que el estrato posee una permeabilidad media a elevada propio de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 969 a 12083 Ω m con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

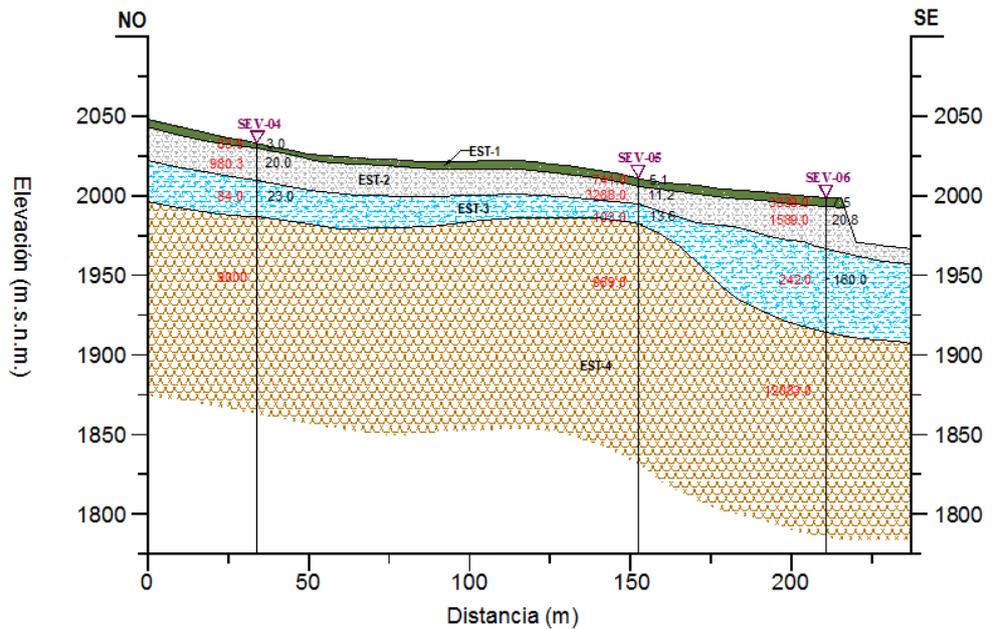


Figura 11: Sección Geo-resistiva C – C'

iv) Sección geo-resistiva D-D'

La presente sección se muestra en la Figura 12 cuya orientación es de NO a SE, tiene una longitud de 215 metros, fue elaborada con los SEV 07, SEV 08, y SEV 09.

La profundidad del nivel freático se estima entre los 12 – 23 metros a lo largo de la sección geo resistiva y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de 26 metros como se indica en el SEV-05 y de potencia de 75 metros como muestra la interpretación del SEV-06.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 175 a 212 Ωm presentando espesores de 2.5 a 3.2 metros, El registro de las medidas mostró variables valores de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material en superficie está compuesta por arena y material depositado recientemente. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 1544 a 2505 Ωm presentando espesores variables que van desde 11.5

a 22.7 metros, las resistividades determinadas indican que el estrato posee una permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 234 a 359 Ωm presentando espesores de 25.2 a 75.4 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propios de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 4686 a 14027 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

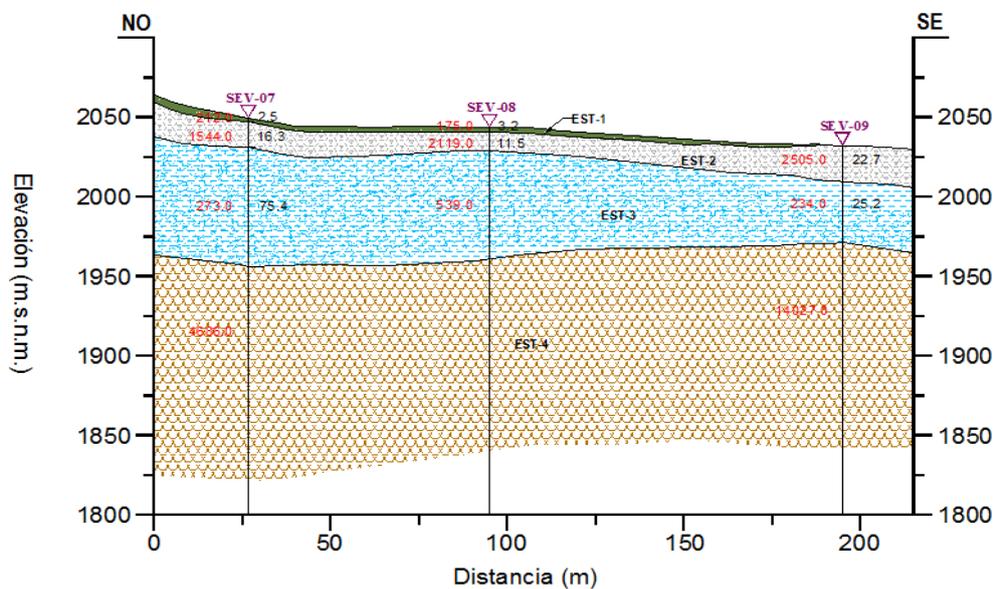


Figura 12: Sección Geo-resistiva D – D'

v) Sección geo-resistiva E-E'

La presente sección se muestra en la Figura 13 cuya orientación es de NO a SE, tiene una longitud de 253.5 metros, fue elaborada con los SEV 10, SEV 11, y SEV 12.

La profundidad del nivel freático se estima entre los 11 – 19 metros a lo largo de la sección geo resistiva y el espesor del estrato

permeable tendría una potencia de 31 metros como indica los SEV-10 y SEV-1, y de potencia de 64 metros como muestra la interpretación del SEV-12.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 224 a 703 Ωm presentando espesores de 1.5 a 4.5 metros, El registro de las medidas mostró variables valores de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material en superficie está compuesta por arena y material depositado recientemente. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 1310 a 3327 Ωm presentando espesores variables que van desde 11.0 a 18.5 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 67 a 595 Ωm presentando espesores de 31 a 63 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propios de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 827 a 28421 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

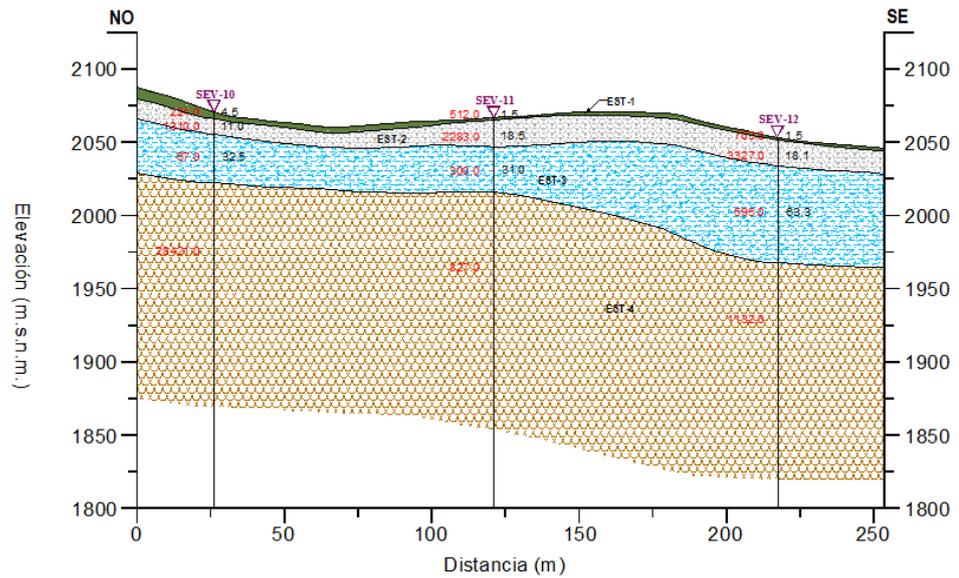


Figura 13: Sección Geo-resistiva E – E'

vi) Sección geo-resistiva F-F'

La presente sección se muestra en la Figura 14 cuya orientación es de NO a SE, tiene una longitud de 299.4 metros, fue elaborada con los SEV 13, SEV 14, y SEV 15.

La profundidad del nivel freático se estima entre los 11 – 22 metros en los SEV-13 y SEV-14 y a 2 metros de profundidad en cercanías del Río Yurac Yacu como indica el SEV-15, y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de 22 metros como indica los SEV-13 y SEV-15, y de potencia de 30 metros como muestra la interpretación del SEV-14.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 107 a 704 Ω m presentando espesores de 1.8 a 3 metros, El registro de las medidas mostró valores variables de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material superficial es arenas mezclada con material de deposición reciente. Este estrato no se encuentra saturado.

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 1756 a 2418 Ω m presentando espesores variables que van desde 2 a

21.3 metros, los valores de resistividad indican que se trata de un estrato con permeabilidad media, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 136 a 637 Ωm presentando espesores de 20.2 a 30.6 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propios de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado.

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 1842 a 30000 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

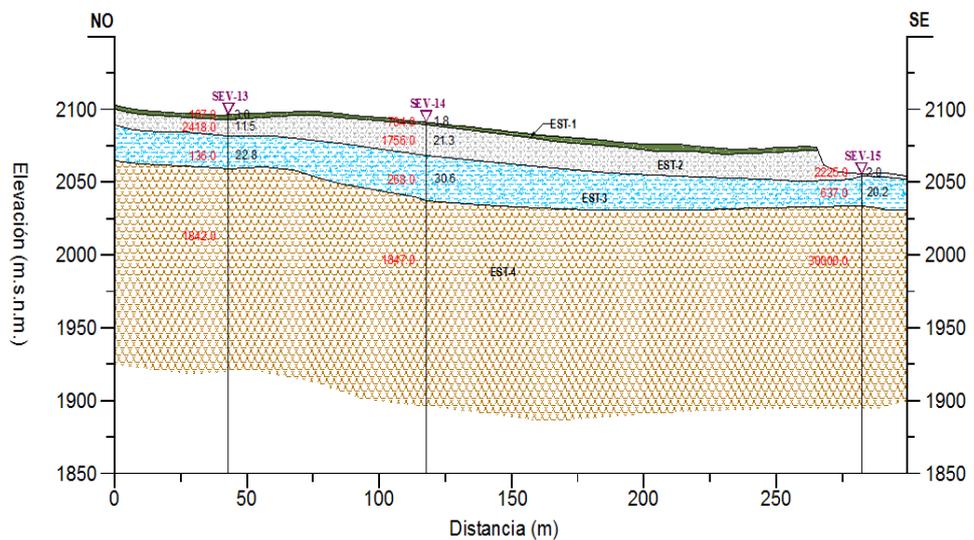


Figura 14: Sección Geo-resistiva F – F'

vii) Sección geo-resistiva G-G'

La presente sección se muestra en la Figura 15 cuya orientación es de NO a SE, tiene una longitud de 299.4 metros, fue elaborada con los SEV 16, SEV 17, y SEV 18.

La profundidad del nivel freático estaría entre los 15 – 18 metros en los SEV-16 y SEV-17 y a 11 metros de profundidad como indica el SEV-18, y el espesor del estrato permeable tendría una potencia de

49 metros como indica los SEV-16 y SEV-17, y una potencia de 30 metros como muestra la interpretación del SEV-18.

PRIMER ESTRATO: Este estrato posee resistividades variables que van de 753 a 891 Ωm presentando espesores de 1.5 a 3.2 metros, El registro de las medidas mostró valores variables de resistividad aparente para esta primera capa, ya que el material en superficie es arena mezclada con material de deposición reciente. Este estrato no se encuentra saturado

SEGUNDO ESTRATO: Este estrato posee resistividades altas de 297 a 701 Ωm presentando espesores variables que van desde 29.6 a 48.6 metros, los valores de resistividad indican que se trata de un estrato con permeabilidad media, conformado por material granular saturado.

TERCER ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 297 a 701 Ωm presentando espesores de 29.6 a 48.6 metros, las resistividades determinadas indican una permeabilidad media a elevada propios de conglomerados y materiales de arrastre. Este estrato se encuentra saturado

CUARTO ESTRATO: Este estrato posee resistividades que van de 3309 a 9918 Ωm con espesor no determinado, según a los valores de resistividad se determinó como el basamento rocoso.

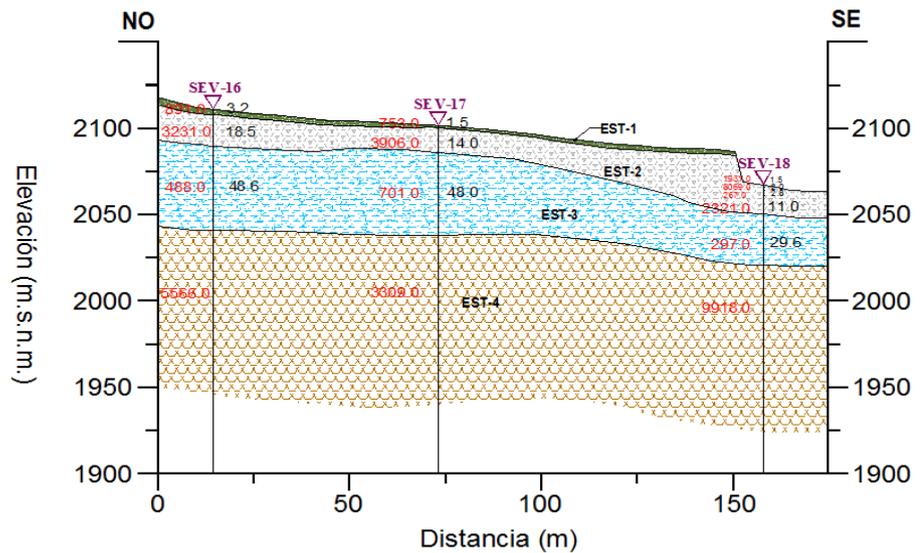


Figura 15: Sección Geo-resistiva G – G'

e. Mapa de isobatas al techo del estrato permeable

Este mapa se construyó con valores en profundidad del techo del estrato permeable, en la cual podemos observar valores mínimos de 14.0 metros con tonalidades azules y máximos de 29.0 metros con tonalidades de color naranja, los valores mínimos nos indica las zonas donde el estrato permeable se encuentra más superficial.

f. Mapa de isobatas a la base del estrato permeable

Este mapa nos indica las profundidades en metros sobre las que se encuentra el estrato permeable o la profundidad del basamento rocoso impermeable, en la cual podemos observar que los valores máximos son de 77.0 metros en las zonas de coloración rosada y valores mínimos de 22.0 metros en las zonas de coloración celeste, se puede apreciar claramente que los mayores valores se encuentran en los SEV N°12, SEV N°08 y SEV N°07. Como complemento de la información geofísica y de las perforaciones de los piezómetros, se ha elaborado el plano N° 5 correspondiente a las isobatas, en dicho plano se observa profundidades del basamento impermeable entre 46 m (zona Oeste) y 86 m (zona Este), con una elevación a especie de cuña en la orientación Este – Oeste.

g. Mapa de isopacas del estrato permeable

Para la construcción de este mapa se utilizó la información de los espesores en metros del estrato permeable, en la cual se describe que las zonas de coloración rosada presenta los espesores máximos de 75.0 metros, lo que nos indica que esta zona tiene mayor espesor del estrato saturado, se registró el menor espesor con 10.0 metros en zonas de coloración celeste.

Como en el caso anterior se ha correlacionado la información geofísica y los resultados de las perforaciones de los piezómetros, habiéndose elaborado el plano N° 6, en el que el espesor impermeable está comprendido entre 17 m en la zona Oeste del área estudiada hasta 62 m en la zona Este.

h. Mapa de iso resistividades del estrato permeable

Para la construcción de este mapa se utilizaron las resistividades del estrato permeable, en la cual se puede apreciar una distribución de resistividades variable (mínimas de 50 Ohm*m en zonas de coloración azul y máximas de 600 Ohm*m de coloración naranja como se aprecia en el SEV 15 y SEV 17.

3.1.8 El acuífero

Con base en los resultados de la geología y geofísica, se infiere que el acuífero está formado fundamentalmente por depósitos del cuaternario reciente constituidos bolonerías, cantos rodados, arena gruesa y gravas, con predominancia de arena gruesa en los estratos superficiales principalmente y con intercalaciones de limo y arenisca. Hidráulicamente el acuífero es clasificado como libre, por cuanto las aguas en los piezómetros se encuentran a presión atmosférica, el espesor saturado es variable, su base es impermeable y el techo es permeable, caracterizándose la recarga como localizado principalmente producto de la precipitación y esorrentía superficial.

a. La napa subterránea

La napa freática en la zona en estudio tiene como fuente principal de recarga las aguas de la precipitación que ocurren durante los meses de Enero a Marzo, como se ha mencionado el acuífero es libre, recargándose también

de pequeñas áreas de riego y a través del canal de tierra que conduce aguas de escorrentía superficial.

i. Profundidad de la napa

La profundidad de la napa en el acuífero en estudio, en base a las observaciones de los niveles de agua en los piezómetros para Agosto del 2014, varían entre 24.12 m (PI-04) y 38.80 m (PI-06) zona Este del acuífero, hacia el Oeste del acuífero se observa reducción en la profundidad de los niveles de agua, tal como se muestra en el Plano 7 del anexo y Cuadro 3. Hacia el Este se observan anomalías en la profundidad del nivel de agua probablemente por la cota topográfica y/o por el comportamiento de los lentes de arcilla en el perfil del suelo.

Cuadro 3: Profundidad del nivel de agua subterránea en los piezómetros

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	N.E/pr	pr(m)	N.E.(m)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	26.42	0.82	25.60
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	24.80	0.68	24.12
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	39.53	0.73	38.80
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	25.48	0.73	24.76
NE/pr= profundidad del nivel estatico desde el punto de referencia						
pr= punto referencia						
N.E= profundidad del nivel estatico						

ii. Morfología de la napa

La morfología de la napa fue analizada con la información de las cotas topográficas y profundidad del nivel de agua subterránea para Agosto del 2014. El sentido de flujo es de NorEste a SurOeste con 9.6% de gradiente hidráulico promedio. En el tramo del río Yuracyacu comprendido entre los SEVs 12 y 18, se observa recarga del medio acuífero desde el mencionado río, tal como se puede observar el sentido de flujo, para luego continuar en dirección Oeste tal como se muestra en el Plano 8 del anexo y Cuadro 4.

Las cargas hidráulicas están comprendidas entre 1982 msnm y 2061 msnm, observándose que el techo de la napa subterránea es uniforme

desde la zona media en dirección Oeste, y con cierta anomalía en la zona Este explicado por el efecto de recarga del acuífero proveniente del río Yuracyacu.

Cuadro 4: Cargas hidráulicas en los piezómetros

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	N.E/pr	pr(m)	N.E.(m)	H(m)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	26.42	0.82	25.60	1982.86
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	24.80	0.68	24.12	2061.58
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	39.53	0.73	38.80	2047.67
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	25.48	0.73	24.76	1975.66
NE/pr= profundidad del nivel estatico desde el punto de referencia							
pr= punto referencia							
N.E= profundidad del nivel estatico							
H= carga hidraulica (m)							

En el Plano 9 del anexo, se muestran 4 cortes hidrogeológicos elaborados en base a la información de las cargas hidráulicas de los piezómetros. El corte AA, muestra el espesor saturado aproximadamente uniforme, mientras que el corte hidrogeológico BB', el espesor saturado es variable reduciéndose considerablemente en la dirección Oeste. El corte hidrogeológico BA, refleja lo mencionado anteriormente, es decir el espesor saturado en el piezómetro PI-08 y aproximadamente la mitad del espesor saturado en el piezómetro PI-01, mientras que en el corte hidrogeológico B'Á' el espesor saturado es aproximadamente constante.

b. Hidrodinámica

i. Parámetros hidráulicos del acuífero

Los parámetros hidráulicos del acuífero tales como conductividad hidráulica (K), Transmisividad (T) y rendimiento específico (Sy), son obtenidos a partir de las pruebas de acuífero a caudal constante y pruebas como el slug test.

Con el propósito de estimar las propiedades hidráulicas del acuífero en el área en estudio se ha efectuado pruebas de slug test en cada

uno de los piezómetros, los resultados son reportados en el Anexo-Hidrodinámica.

Las conductividades hidráulicas se hallan comprendidas entre 0.0008 m/día y 0.231 m/día, cuya distribución espacial se muestra en el Plano 10 del anexo y Cuadro 5. Valores bajos han sido estimados en la zona Este del área de interés mientras que hacia el Oeste los valores se incrementan. Amerita mencionar que los valores de conductividad hidráulica se clasifican entre muy bajo a bajo, están caracterizadas por los estratos limo arcillosos los cuales se hallan entre la bolonería, con reacción tardía frente a la recarga del acuífero o frente al proceso de bombeo en caso esto ocurriera.

Cuadro 5: Conductividades hidráulicas estimadas con Slug Test

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	Profundidad(m)	K(m/d)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	100.70	0.104
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	105.20	0.076
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	95.00	0.00088
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	60.20	0.231
NE/pr= profundidad del nivel estatico desde el punto de referencia					
K= conductividad hidraulica (m/d)					

c. Hidrogeoquímica

La evaluación de la calidad del agua subterránea, se ha efectuado en base a los resultados de los análisis físicos químicos de 03 muestras de agua proveniente de los piezómetros PI-01, PI-04 y PI-06.

i. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica de las aguas permite evaluar la salinidad de la misma. Los valores de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas varían entre 132.3 $\mu\text{S/cm}$ (PI-04) a 179.3 $\mu\text{S/cm}$ (PI-06), correspondiendo a aguas con salinidad baja y baja mineralización.

En el Cuadro 6, se reporta los valores de conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas.

Cuadro 6: Conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas

Piezómetro	Coordenadas		Cota (msnm)	pH	C.E (μS/cm)
	Este	Norte			
PI-01	222858	9122070	2008	7.00	163.6
PI-04	223766	9122165	2086	7.81	132.3
PI-06	223677	9122311	2086	7.26	179.3

Fecha de medición: 22 de Agosto del 2014. Datum: WGS84 Zona 18 Sur

ii. pH

Los valores de pH en las aguas subterráneas varían entre 7.00 (PI-01) y 7.81 (PL-04), clasificándose como neutras y aguas básicas.

iii. Composición química de las aguas subterráneas

Acorde con los resultados de los análisis físicos - químicos realizados por el Laboratorio Inspectorate Services Peru S.A.C, a 03 muestras de agua subterránea correspondiente a los piezómetros PI-01, PI-04 y PI-06, cuya ubicación se muestra en el plano N° 11, se conoce que los iones predominantes son el Calcio (Ca^{++}) entre los cationes, el Bicarbonato (HCO_3^-) entre los aniones, tratándose de aguas bicarbonatadas cálcicas, tal como podemos apreciar en los diagramas Piper y Schoeller. La familia química bicarbonatada cálcica corresponde aguas con corto periodo de residencia en el medio poroso, por lo que se estima que la fuente de recarga se halla cercana los piezómetros, pudiendo ser el río Yuracyacu y/o las precipitaciones que ocurren durante los meses lluviosos.

DIAGRAMA PIPER

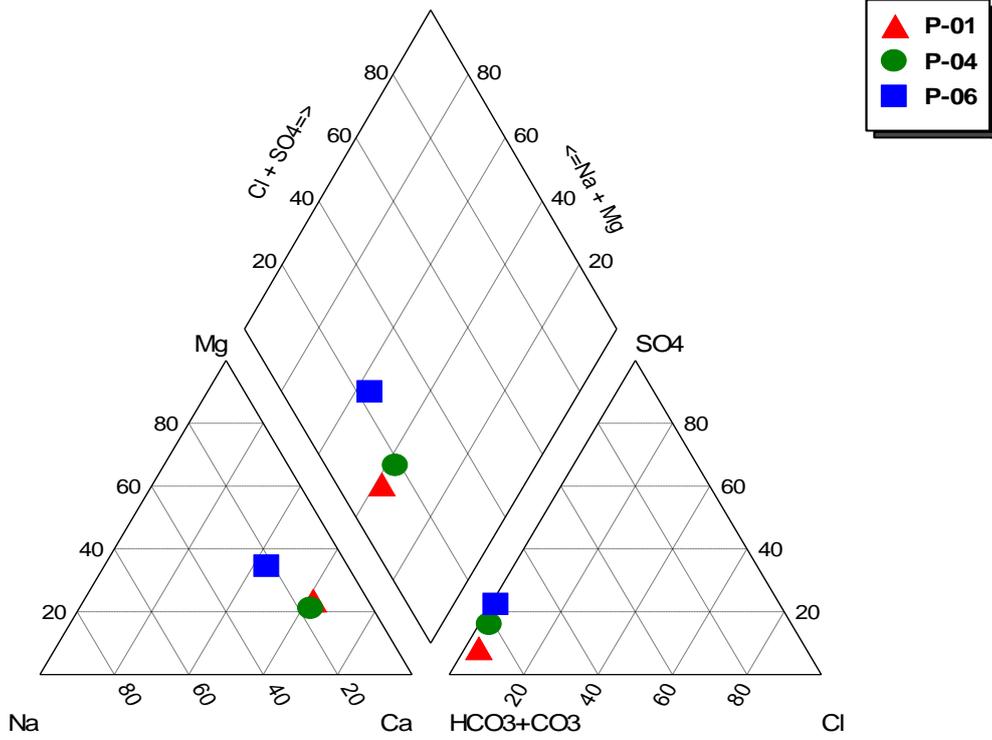
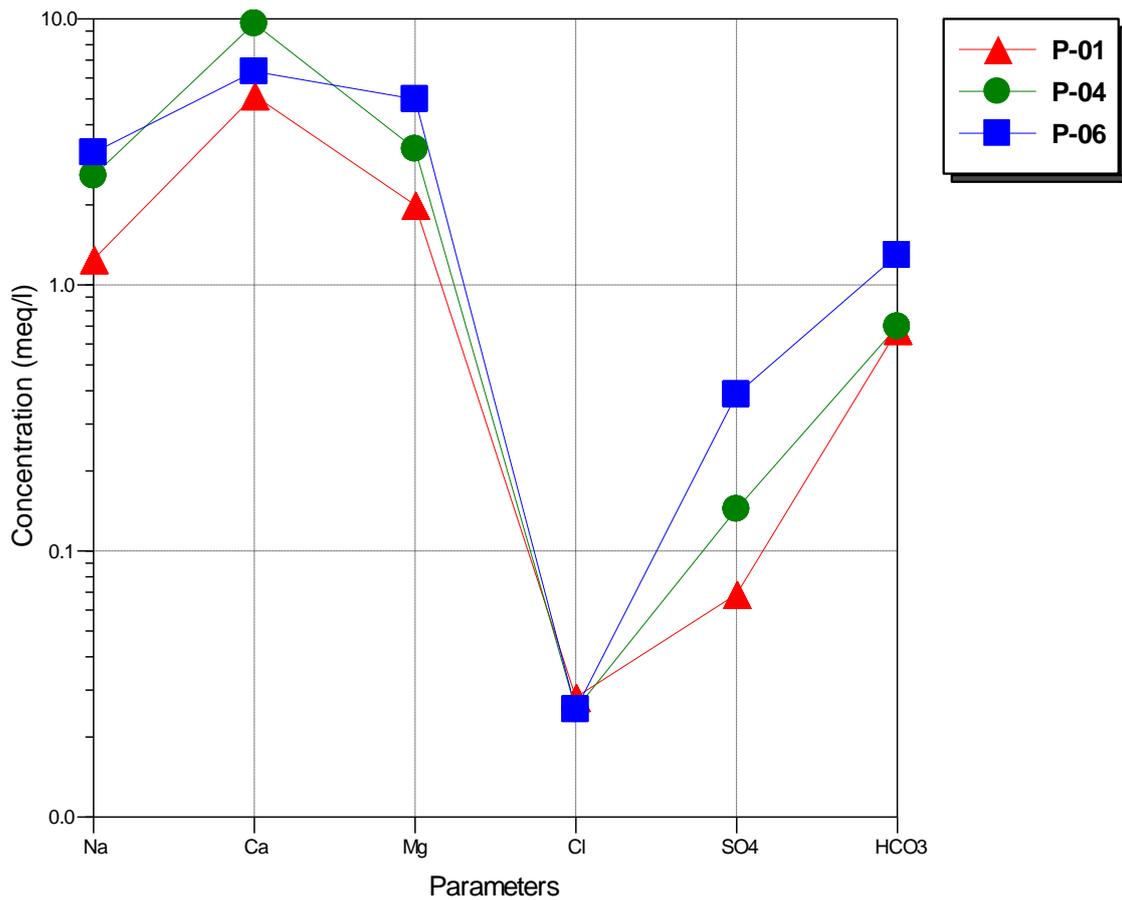


DIAGRAMA SCHOELLER



3.1.9 Modelo conceptual del sistema acuífero

El desarrollo del modelo conceptual es uno de los pasos de importancia en el desarrollo de los modelos de simulación de acuíferos. Por definición, el modelo conceptual es la representación simplificada de las características hidrogeológicas del sistema acuífero, así como los detalles del comportamiento hidrológico del acuífero y sus externalidades. Durante el proceso de elaboración del modelo conceptual, es frecuente realizar asunciones y simplificaciones a fin de representar múltiples procesos complejos. Las asunciones son explicadas debido a la imposibilidad de reconstruir completamente el sistema acuífero a ser modelado. Consecuentemente en la formulación del modelo conceptual emplearemos el principio de simplicidad, de modo que sea lo más simple posible, manteniendo la suficiente complejidad para la representación adecuada de los elementos físicos del sistema acuífero y reproducir su comportamiento hidráulico y la respuesta frente a escenarios tales como la construcción de la presa de relaves, probables escenarios bombeos de agua subterránea, sequías, y cambios hidrológicos naturales y antrópicos, el que se muestra en las Figuras 16 y 17.

El modelo conceptual del acuífero ha sido elaborado acorde con la información geológica, límites permeables e impermeables, marco hidrológico, sus variaciones naturales, y los factores antropogénicos preponderantes, los cuales serán detallados a continuación.

a. Marco geológico

Desde el punto de interés hidrogeológico se distinguen la formación del cuaternario reciente constituida por depósitos coluviales - aluviales de aproximadamente 17 m a 60 m en promedio de espesor, sobre los cuales ocurren lluvias que se infiltran y recargan al sistema acuífero, hidráulicamente conectados parcialmente al río Yuracyacu que conduce aguas de escorrentía directa y flujo base en periodos de estiaje.

Las formaciones geológicas de importancia que limitan lateralmente y en su base el depósito coluvio - aluvial en la que se emplazara la presa

son las formaciones geológicas Tonalita – granodiorita (C-tn-gd), y la formación Chota hacia el Oeste.

La Tonalita – granodiorita (C-tn-gd), son rocas del terciario inferior grisáceas de grano grueso a mediano compuesto por hornblenda negra, plagioclasa blanca y cuarzo, cuya orientación es NO-SE, hidrogeológicamente fracturado en la superficie (permeable) y competente a mayor profundidad (impermeable).

En menor proporción, hacia el Oeste de la presa proyectada, buza en la dirección NO-SE la formación geológica Chota (ksp-cho), tratándose de rocas rojizas compuesto por areniscas gris violáceas con estratos de medianos a gruesos, hidrogeológicamente se tratan de rocas impermeables, sin embargo sobre él se encuentran depositadas los rellenos aluviales.

b. Límites permeables e impermeables

El medio permeable está constituido por los depósitos aluviales en el lugar del emplazamiento de la presa Yuracyacu, morfológicamente estos han sido acumulados en distintos periodos en cuyos contactos existe material limo, arcilla, arena, cantos rodados y bolonerías propiciando la formación de acuífero, recargado por las precipitaciones y las aguas de escorrentía.

El lecho impermeable está constituido por formaciones geológicas Tonalita – granodiorita (C-tn-gd), y la formación Chota hacia el Oeste. Dichas formaciones no almacenan ni transmiten agua, salvo la presencia de fallas y/o fracturamiento que podrían modificar el comportamiento hidrodinámico o la morfología del agua subterránea, las cuales no han podido ser constatadas mediante las perforaciones exploratorias con fines de instalación de piezómetros.

c. Marco hidrológico

i. Precipitación y recarga de acuífero

El marco hidrológico ha sido analizado en base a los registros de estaciones cercanas a la microcuenca Yuracyacu. Acorde a estimaciones en base a información climatológica de estaciones vecinas, la intensidad de recarga estimada es 45.4 mm/año la misma que ocurre durante los meses de Marzo y Abril, tal como se muestra en el Cuadro 7.

ii. Descargas de la quebrada Yuracyacu y Sillaguanga

La quebrada cuya cuenca es alargada y de reacción rápida frente a los eventos de precipitación, tiene la capacidad de intercepción y almacenamiento medio. Las descargas estimadas se hallan comprendidas entre 0.28 m³/s a 10.18 m³/s, con reacciones rápidas frente a un evento de precipitación, debido a la morfología de los lechos de río, así como a la pendiente alta.

Cuadro 7: Cálculo de recarga del acuífero – año húmedo

Parámetros	Reserva Máxima en mm												Total Anual
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Evapotraspiración Potencial (ETP) en mm/mes	57.4	50.2	53.2	51.2	51.1	46.8	45.2	47.8	49.5	54.8	57.3	59.4	623.7
Precipitación Total Mensual (mm/mes)	81.9	120.3	111.3	59.1	18.1	9.4	8.1	8.5	18.2	61.4	88.5	97.9	682.6
Evapotraspiración Real (ETR) en mm/mes	57.4	50.2	53.2	51.2	51.1	46.8	37.7	8.5	18.2	54.8	57.3	59.4	545.7
Déficit en mm/mes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	39.3	31.3	0.0	0.0	0.0	78.0
Reserva en mm/mes	24.5	94.6	100.0	100.0	67.0	29.7	0.0	0.0	0.0	6.7	37.9	76.4	
Excedentes en mm/mes	0.0	0.0	52.7	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.5
Recarga en mm/mes	0.0	0.0	39.5	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.4

d. Factores antropogénicos

Los factores antropogénicos, está conceptualizado por la acciones realizadas o por realizar por el hombre sobre el medio, entre las que podemos destacar, la perforación de piezómetros, construcción de diques de tierra, construcción de caminos, movimiento de tierra superficial, entre otras actividades.

Como antecedente, en la zona de emplazamiento de la presa, fueron instalados 09 piezómetros en Abril del 2010 (Cuadro 8) con fines de estudio geotécnico, y en virtud a la profundidad somera, han sido reemplazadas por 04 piezómetros mucho más profundos, las cuales han alcanzado la base impermeable, cuya información servirá para actualizar el modelo matemático del sistema acuífero.

Cuadro 8: Características técnicas de los piezómetros

CODIGO	COORDENADAS UTM (PSAD 56 -18S)		COTA TERRENO m.s.n.m	PERFORACIÓN	
	ESTE (m)	NORTE (m)		PROF. Act. (m)	Ø (mm)
BH-01	9122257.90	223952.79	2109.52	25.00	96.7 con casing 114.3
BH-02	9122357.04	223936.27	2113.76	25.00	96.7 con casing 114.3
BH-03	9122146.65	223735.97	2082.54	20.00	96.7 con casing 114.3
BH-04	9122337.13	223680.15	2090.50	30.00	96.7 con casing 114.3
BH-05	9122153.35	223419.41	2059.88	25.00	96.7 con casing 114.3
BH-06	9122302.60	223382.83	2060.57	20.00	96.7 con casing 114.3
BH-07	9122177.83	223133.78	2034.99	25.00	96.7 con casing 114.3
BH-08	9122250.18	223038.73	2036.49	50.00	96.7 con casing 114.3
BH-09	9122102.37	222806.48	2005.00	28.00	96.7 con casing 114.3

Fuente: Buenaventura Ingenieros S.A

3.1.10 Modelo conceptual del transporte contaminante en el sistema acuífero

El desarrollo del modelo conceptual del transporte contaminante derivado del depósito de relave minero en el sistema acuífero de la microcuenca del río Yuracyacu, ha considerado los mecanismos que influyen en el transporte, tales como el movimiento y transferencia de masa de los elementos nocivos, a fin de poder visualizar las fuentes donde se desplaza la pluma contaminante, así como

su mecanismo de transporte y su trayecto de exposición en donde llega hasta los receptores que son la misma población de la zona y sus actividades socioeconómicas como la agricultura y ganadería.

La presa de relave minero Yuracyacu considerado como fuente primaria donde se genera la pluma contaminante que va disuelta en las aguas subterráneas como fuente secundaria, se desplaza como mecanismo de transporte por lixiviación hacia el acuífero, en la cual llega a los pozos de agua subterránea que son utilizados por la misma población de la zona para su consumo doméstico, agricultura y ganadería.

En la Figura 18 se puede observar el modelo conceptual del transporte contaminante en las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu.

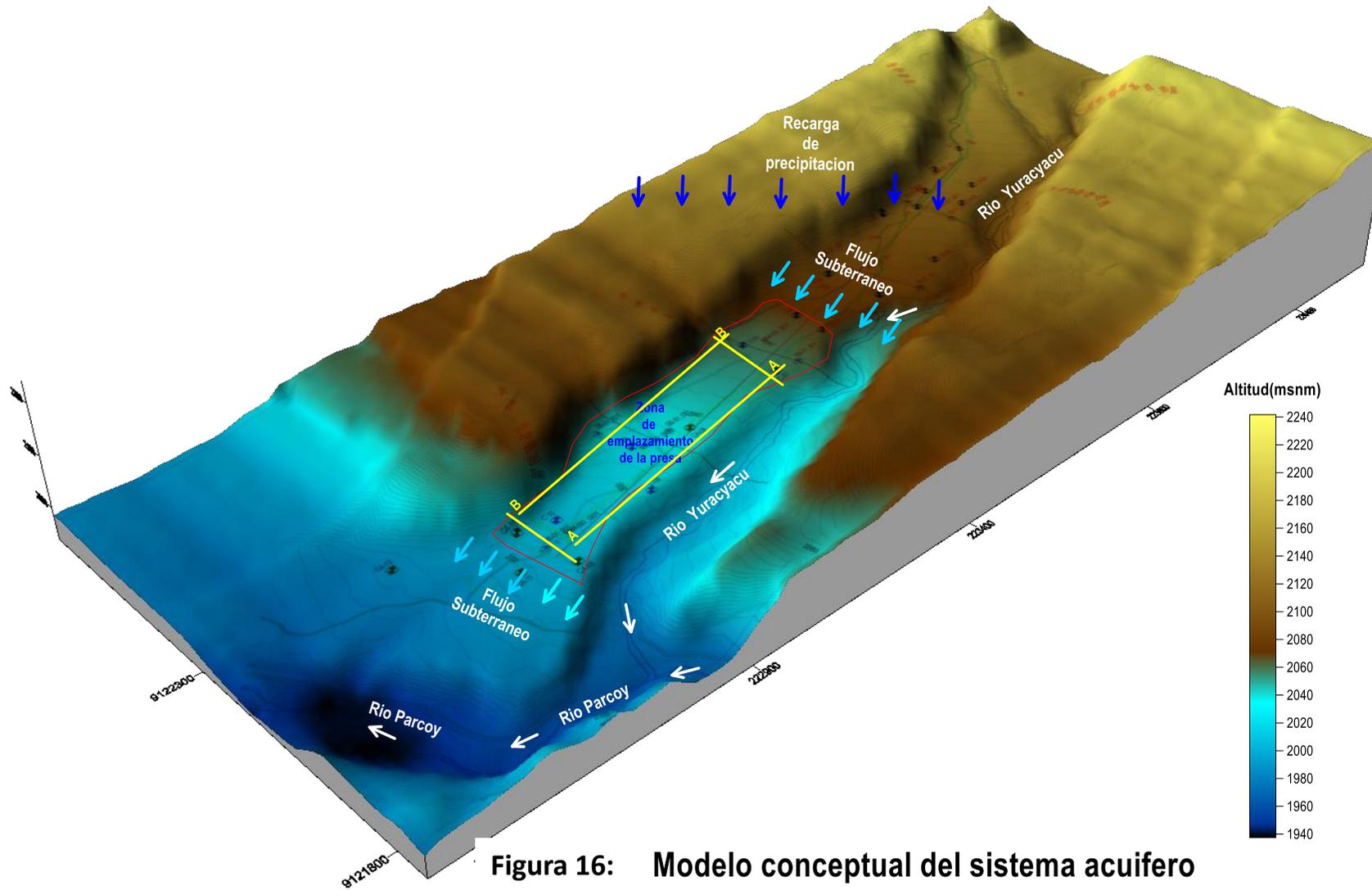


Figura 16: Modelo conceptual del sistema acuifero

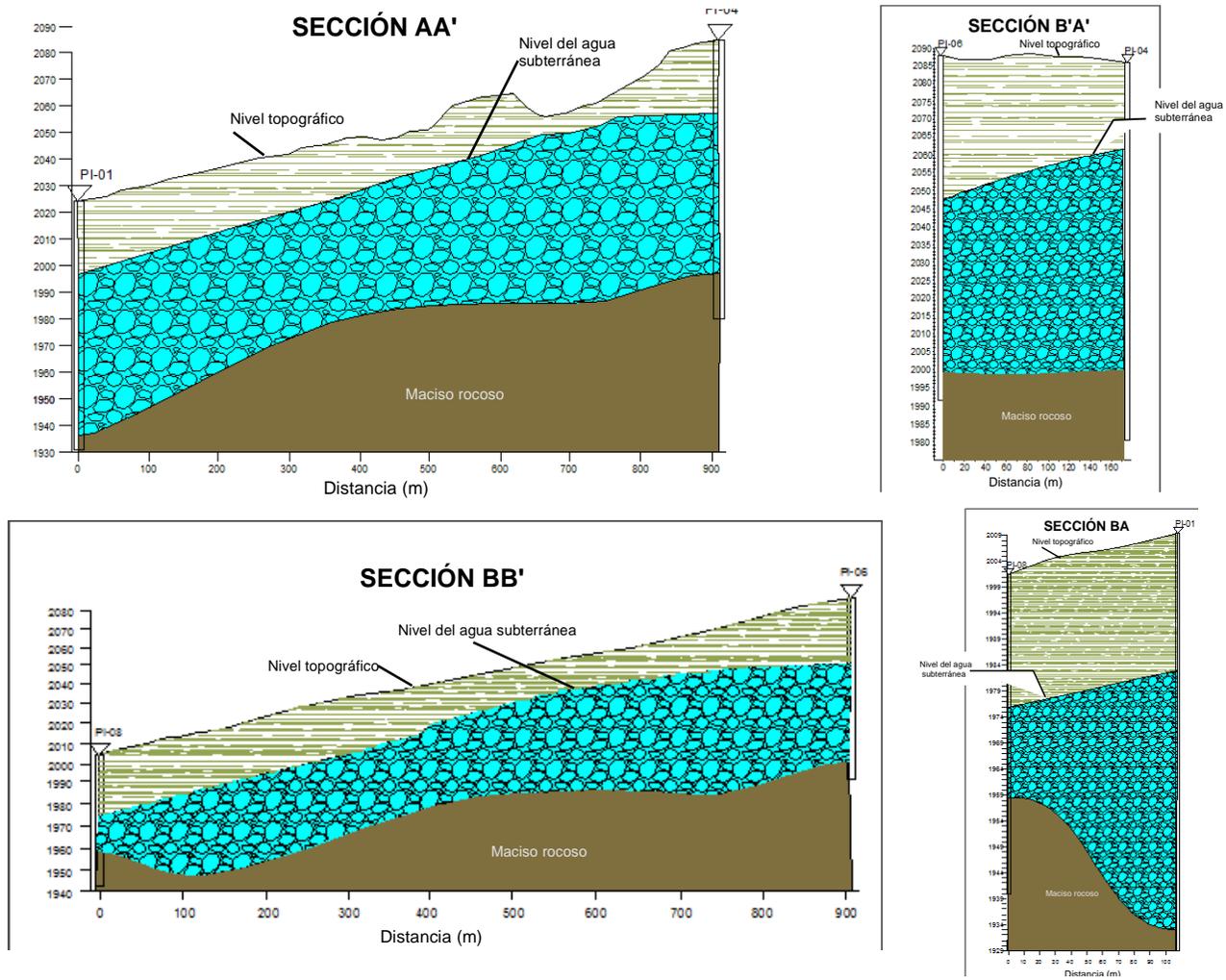


Figura 17: Cortes hidrogeológicos del sistema acuífero

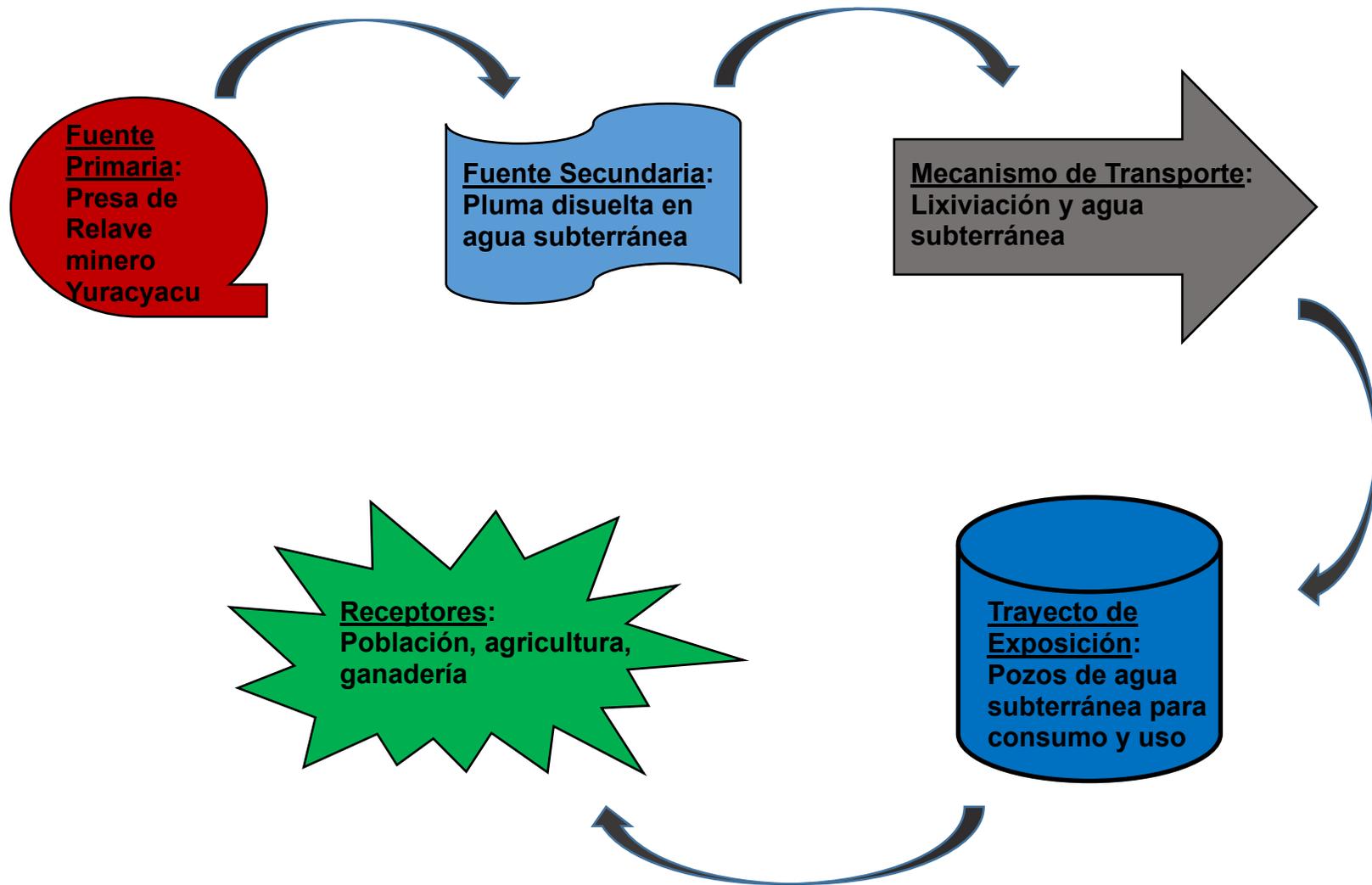


Figura 18: Modelo conceptual del transporte contaminante en el sistema acuífero.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo Experimental por utilizarse varias variables independientes para analizar las consecuencias que se generan sobre la variable dependiente.

3.2.2 Hipótesis

Hipótesis Alternativa (Ha): Las interacciones hidráulicas y químicas en la relavera y acuífero determinará la calidad de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu.

Hipótesis Nula (Ho): Las interacciones hidráulicas y químicas en la relavera y acuífero no determinará la calidad de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu.

3.2.3 Variables

a) Variables independientes

X₁= Interacción hidráulica en la relavera y acuífero

X₂= Fuerzas de filtración en el suelo

X₃= Propiedades hidráulicos del acuífero

X₄= Interacciones químicas del agua subterránea en el acuífero

b) Variable dependiente

Y = Alteración de la calidad de las aguas subterráneas

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$$

3.2.4 Procedimiento de los análisis de datos

La metodología a seguir para el logro de los objetivos de la presente investigación, contemplan trabajos de campo y gabinete, las cuales son detallados a continuación:

a. Recopilación de información hidrológica e hidrogeológica

Se comenzará a recopilar datos y registros de caudales medias mensuales del río Yuracyacu, a fin de conocer su disponibilidad en el tiempo para el uso de riego en el valle y uso de consumo para la población, de esta manera poder estimar los periodos de recarga del acuífero a través del lecho, así como desde las áreas de uso con dicha fuente. La disponibilidad del recurso hídrico superficial será estimada para el 75% de probabilidad de ocurrencia, tratándose de un valle propiamente agrícola.

La etapa de campo contempla el reconocimiento in situ del ámbito de estudio, su amplitud, linderos, condiciones de frontera, la problemática de las aguas subterráneas, las áreas de cultivo en actual desarrollo, y sus proyecciones, fuentes contaminantes, toma de información de los niveles de agua subterránea en los piezómetros, con ayuda de un GPS y sonda eléctrica.

La etapa de gabinete consistirá en recopilar información referente a la geología del acuífero, geomorfología, prospección geofísica, propiedades del acuífero (conductividad hidráulica, rendimiento específico, transmisividad, resistencia hidráulica), hidrogeoquímica; así como la recopilación de los registros históricos del control de los niveles de agua subterránea en los piezómetros.

b. Recopilación y análisis de la información topográfica

Se realizará la recopilación y análisis de información topográfica provista de las bibliografías consultadas las cuales serán contrastadas en una visita de campo con el apoyo de un GPS marca Garmin, altímetro, carta nacional del distrito de Parcoy a una escala de 1:100 000 y una cámara fotográfica.

c. Análisis de la información de cotas de los piezómetros

Se realizará el análisis de inventario de piezómetros provistos en el valle de la microcuenca del río Yuracyacu, a fin de analizar la

profundidad del nivel freático, su carga hidráulica y profundidad del nivel estático medido desde el suelo, de esta manera se conocerá las reservas existentes de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

Además se realizará el análisis con registros de datos de 18 sondajes eléctricos verticales con la disposición Schlumberger, a fin de conocer la estratigrafía, investigar el espesor del estrato permeable, así como la profundidad del basamento rocoso. Esta correlación geofísica geológica nos permitirá realizar secciones georesistivas y mapas de líneas isopacas de la zona de estudio, dichos resultados serán de importancia a fin de mejorar el modelo conceptual y el modelo numérico de la zona de estudio.

En base a la información recopilada referente a los resultados de los sondeos eléctricos, se procederá a elaborar los mapas temáticos y secciones geo resistivas, dichos resultados se complementarán con las observaciones y criterios geológicos - geomorfológicos de la zona en estudio, a fin de aproximar la interpretación cualitativa y cuantitativa de las características georesistivas a la realidad geológica de la zona en estudio.

d. Caracterización del acuífero

En base a la información proporcionada se realizará la descripción de la profundidad de la napa freática y su morfología, a fin de conocer el techo y recarga de la napa subterránea, las cuales permitirá elaborar los planos correspondientes a cortes hidrogeológicos. Asimismo, éste análisis nos permitirá conocer los parámetros hidráulicos del acuífero tales como la conductividad hidráulica (K), Transmisividad (T) y rendimiento específico (Sy), las cuales serán obtenidas a partir de las pruebas de acuífero a caudal constante y pruebas como el slug test.

También se evaluará y analizará los resultados de la calidad del agua subterránea a partir de 03 muestras de agua obtenidas en 03 piezómetros.

e. Elaboración del modelo de acuífero y su interacción con la relavera

Se realizará el modelo conceptual del acuífero en base a la información geológica, límites permeables e impermeables, marco hidrológico, sus variaciones naturales, y los factores antropogénicos preponderantes. Para ello, se empleará el principio de simplicidad, de modo que sea lo más simple posible, manteniendo la suficiente complejidad para la representación adecuada de los elementos físicos del sistema acuífero y reproducir su comportamiento hidráulico y la respuesta frente a escenarios tales como la construcción de la presa de relaves, probables escenarios bombeos de agua subterránea, sequías, y cambios hidrológicos naturales y antrópicos.

Luego, se procederá al diseño del modelo de acuífero a través de un sistema de mallas cuadradas, aplicando la discretización del sistema acuífero con el número de filas y columnas correctas, de esta manera generar el número adecuado de mallas sobre el cual se emplazará la presa de relaves. Además se establecerá las condiciones de frontera tipo II y tipo III, con el objeto de proporcionar estabilidad al modelo.

Posteriormente, se realizará el modelo en régimen estacionario a partir del proceso de calibración, en donde se podrá distinguir la diferencia entre las cargas observadas y calculadas, en la cual tendremos como resultado la morfología del agua subterránea que estará representada mediante una imagen de hidroisohipsas y líneas de flujo calculadas.

f. Elaboración del modelo en transporte de contaminantes

A partir de los modelos de flujo de agua subterránea calibrado se procederá a realizar la simulación de la probable dirección que

seguirían los contaminantes provenientes del lixiviado de depósito de relave, en la cual se obtendrá la imagen de la variación temporal y espacial de la ruta de contaminantes en las aguas subterráneas.

A partir de ello se procederá a elaborar las medidas de remediación de las aguas subterráneas contaminadas ocurridas en el valle de la microcuenca del río Yuracyacu.

3.3 SELECCIÓN DEL CÓDIGO DE MODELAMIENTO

El código de modelamiento es el programa de cómputo que contiene los algoritmos para resolver numéricamente las ecuaciones de flujo del agua en medio poroso o fracturado saturado.

El software empleado para elaborar el modelo es el Visual ModFlow 2011.1, el que resuelve las ecuaciones de flujo haciendo uso del método numérico en diferencias finitas. Dispone de interfaces gráficas para el ingreso de datos, tanto para los parámetros del acuífero así como las condiciones de frontera, con verificadores de precisión de ingreso de datos. El proceso de calibración y el progreso de la misma son evaluados gráfica y estadísticamente. El programa hace uso del método numérico en diferencias finitas para la solución de la ecuación diferencial parcial (ecuación de flujo del agua subterránea), y los métodos de solución de las ecuaciones son múltiples. Cuenta con opciones para modelar acuíferos libres y confinados, con múltiples capas, en régimen estacionario y no estacionario. Este modelamiento resolverá la siguiente ecuación diferencial parcial para describir el flujo de agua subterránea bajo condiciones de tiempo variables en un acuífero heterogéneo y anisotrópico:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde x , y , z son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de los valores de conductividad hidráulica K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} , h es la cabeza en el acuífero, W es el flujo por unidad de volumen que representa fuentes y/o sumideros de agua, S_s es el almacenamiento específico y t es el tiempo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO

a. Discretización del sistema acuífero

La discretización del sistema acuífero en diferencias finitas, ha sido realizada empleando mallas cuadradas $\Delta x = 20 \text{ m}$ y $\Delta y = 20 \text{ m}$, habiéndose discretizado el sistema acuífero mediante 50 filas y 122 columnas, haciendo un total de 6100 mallas, de este total 804 mallas corresponden al acuífero sobre el cual se emplazara la presa de relaves. El sistema acuífero discretizado se muestra en la Figura 19.

El sistema ha sido georeferenciado en sus coordenadas, las cuales se presentan en el Cuadro 9:

Cuadro 9: Georeferenciación del sistema acuífero

Descripción	Coordenadas UTM	
	Este(m)	Norte(m)
Display Area (Ventana de trabajo)	X1= 222210 X2 =224650	Y1= 9121740 Y2= 9122740
Model Origin (origen del modelo)	X= 222210	Y = 9121740
Angle (ángulo del mallado)	$\Theta = 0$	
Model Corners (vértices del modelo)	X1= 222210 X2 =224650	Y1= 9121740 Y2= 9122740

b. Unidades

Las unidades empleadas para las variables del modelo son:

<u>Variable</u>	<u>Unidad</u>
Longitud	m
Conductividad hidráulica	m/d
Recarga o ETo	mm/año
Descarga	m ³ /d

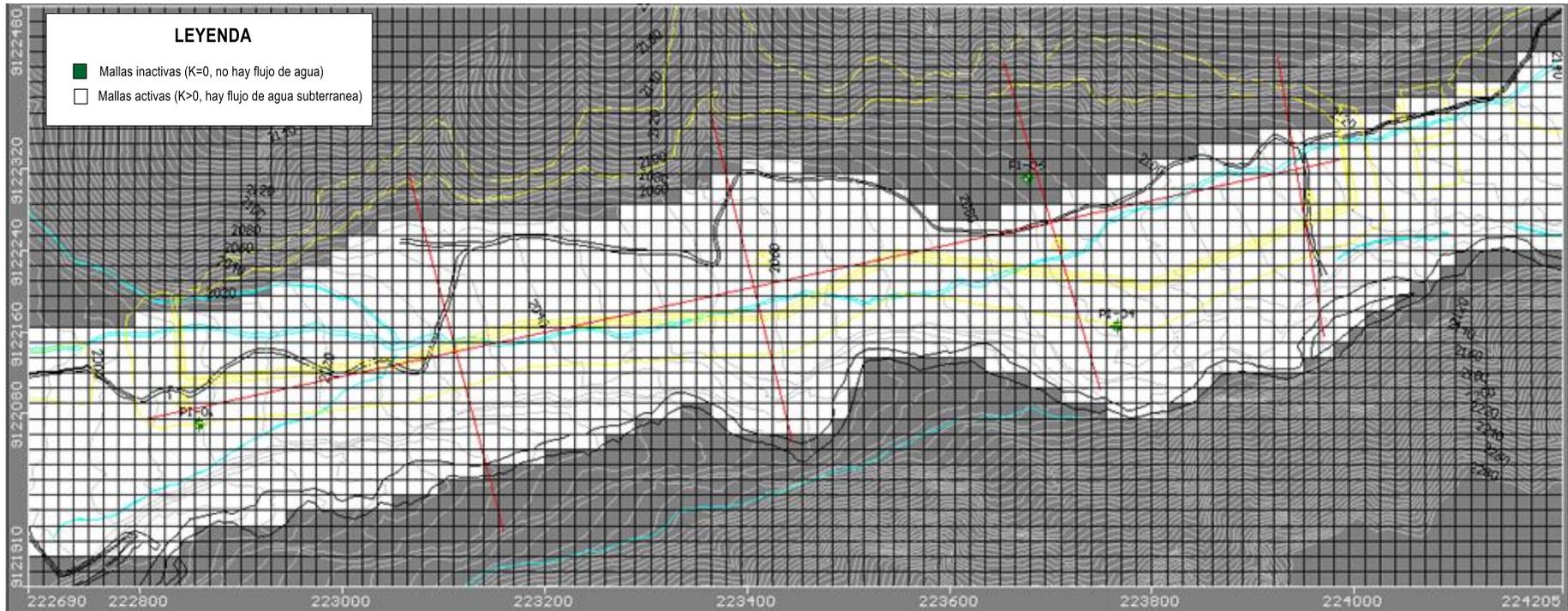


Figura 19: Discretización del sistema acuífero

c. Número de capas y tipo de acuífero

El modelo de flujo del agua subterráneo ha sido discretizado verticalmente en dos capas con 30 m de espesor promedio, el estrato está constituido por el depósito cuaternario, siendo el techo del estrato la topografía del terreno y tiene como base al impermeable constituida por tonalitas y granodioritas.

d. Condiciones de frontera

Se ha identificado dos tipos de condiciones de frontera, la (i) condición de frontera tipo II (flujo impuesto) constituido por la recarga superficial producto de la precipitación estimado 45.4 mm/año (las cuales ocurren en los meses de Marzo y Abril), y la condición de frontera tipo III (flujo dependiente de la carga hidráulica), las cuales están definidas por cierto tramo del curso del río Yuracyacu, que conduce aguas durante el año, siendo la conductancia hidráulica promedio de 4 m²/d. Con el objeto de proporcionar estabilidad al modelo se han establecido zonas con carga general así como también para conocer el caudal que ingresa al sistema acuífero. En la zona Oeste, las mallas tienen 1975 m de carga hidráulica y 0.75 m²/d de conductancia hidráulica mientras que al Este del área, las mallas tienen una carga hidráulica igual a 2065 m y la 4.0 m²/d de conductancia hidráulica, tal como se muestra en la Figura 20.

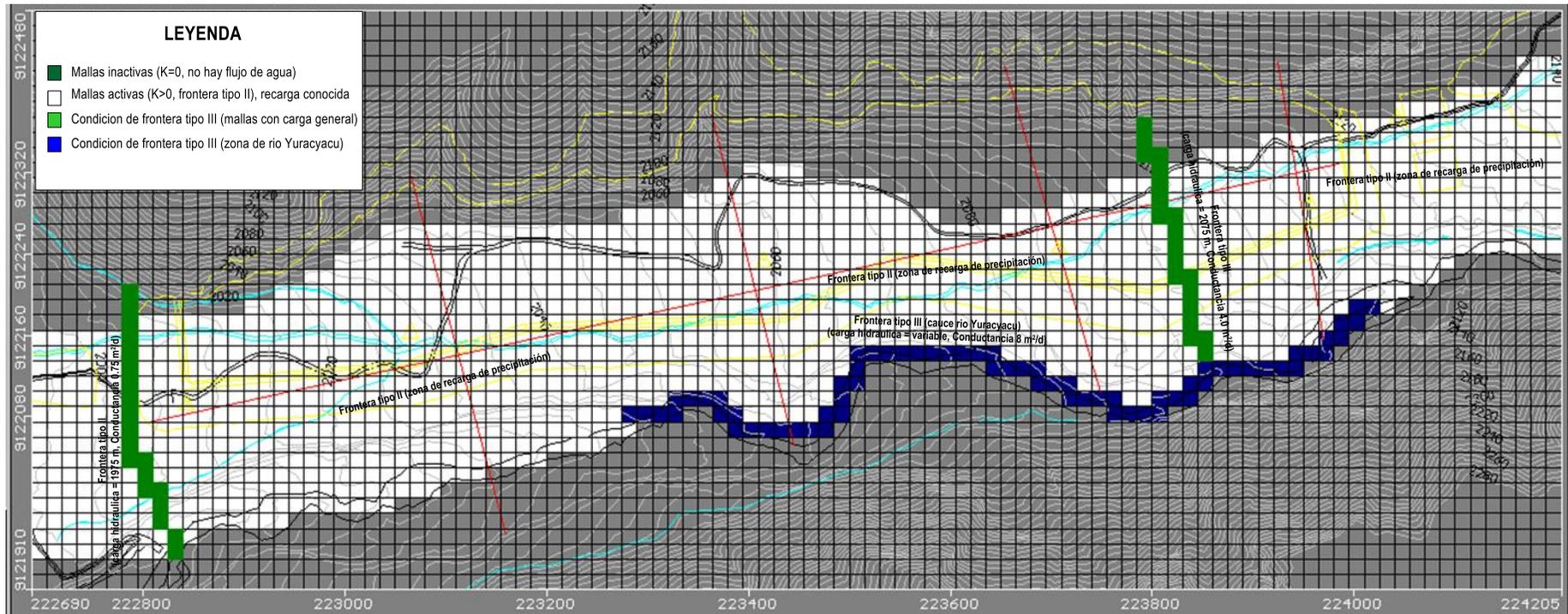


Figura 20: Condiciones de frontera del modelo

e. Parámetros de entrada del modelo

i. Conductividad hidráulica

Las conductividades hidráulicas de la zona permeable han sido estimadas en base a pruebas slug test en los piezómetros, las cuales han sido utilizadas para extrapolar sobre las áreas consideradas en el modelo, la media geométrica es 0.12 m/d y la media armónica 0.11 m/d, sin considerar la conductividad hidráulica del piezómetro PI-06, considerado muy bajo, tal como se muestra en el Cuadro 10 y Figura 21.

Cuadro 10: Conductividades hidráulicas del medio poroso

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	Profundidad(m)	K(m/d)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	100.70	0.104
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	105.20	0.076
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	95.00	0.00088
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	60.20	0.231
K= conductividad hidraulica (m/d)					

ii. Rendimiento específico

El rendimiento específico ha sido determinado mediante el método saturación volumétrica de las muestras permeables recuperadas durante las perforaciones de los 04 taladros con fines de instalación de los piezómetros, variando sus valores entre 0.001 a 0.05, con fines prácticos se ha considera 0.04 (4% como valor representativo para el medio), tal como se muestra en el Cuadro 11 y Figura 22.

Cuadro 11: Rendimiento específico del medio poroso

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)	Profundidad(m)	Sy
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	100.70	0.04
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	105.20	0.05
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	95.00	0.001
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	60.20	0.03
Sy= rendimiento especifico ()					

iii. Puntos de observación de los niveles de agua subterránea

Los puntos de observación de los niveles de agua subterránea están constituidos por 04 piezómetros, las observaciones de los niveles de agua corresponden a Agosto del 2014, cuyas cargas hidráulicas se reportan en el Cuadro 12.

**Cuadro 12: Puntos de observación de niveles de agua subterránea
(Agosto - 2014)**

Piezómetro	Este	Norte	scID	scElev	ObsTime	H(m)
PI-01	222858.34	9122070.04	1	1968.46	31	1982.86
PI-04	223765.85	9122165.45	1	2045.70	31	2061.58
PI-06	223676.99	9122310.95	1	2046.47	31	2047.67
PI-08	222787.16	9122149.77	1	1960.42	31	1975.66

Este y Norte=Coordenadas UTM (m), datum WGS84-Zona 18. Cota= cota de terreno en (msnm), H= carga hidráulica (msnm),

scElev= cota del inicio de la tubería raurada (msnm), ObsTime= periodo de observación (días).

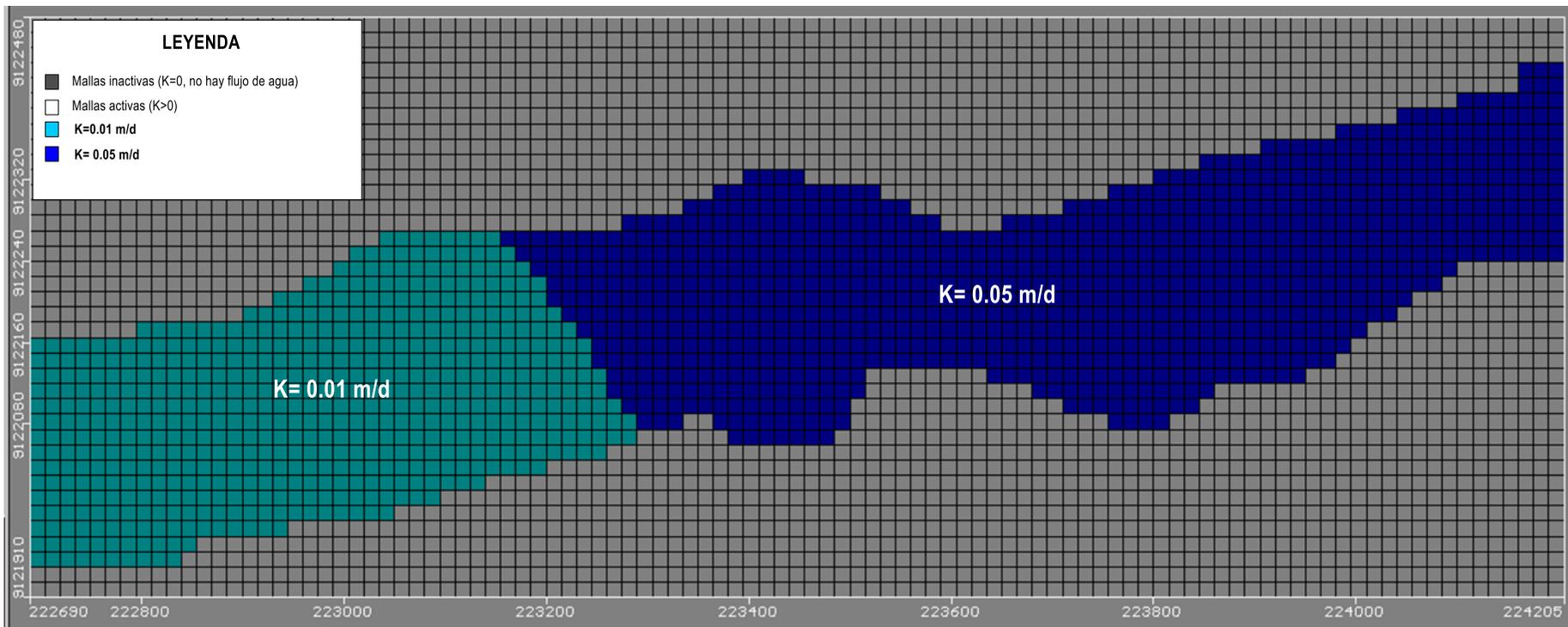


Figura 21: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas

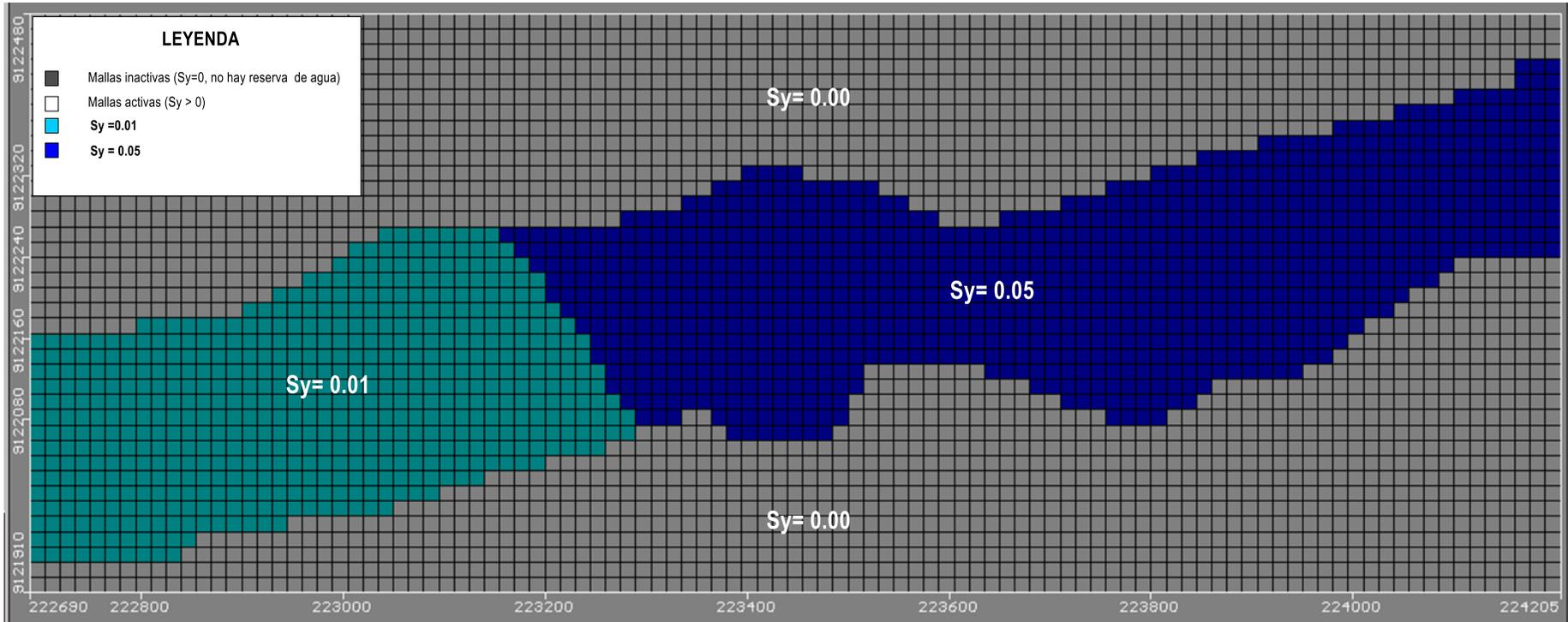


Figura N° 22: Distribución espacial de los rendimientos específicos

4.2 MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

El proceso de calibración del modelo en régimen estacionario ha consistido en minimizar la diferencia entre las cargas observadas en 04 puntos de observación y las calculadas por el modelo, mediante la modificación de la conductividad hidráulica inicialmente ingresada, así como la conductancia del lecho de río y la conductancia de las mallas con cargas generales.

a. Resultados de la calibración

En la Figura 23, se muestra la diferencia entre las cargas observadas y calculadas, cuantificadas mediante los estadísticos principalmente por la raíz media cuadrática normalizada igual a 3.58 %, valor que se encuentran en el rango de los modelos apropiadamente calibrados.

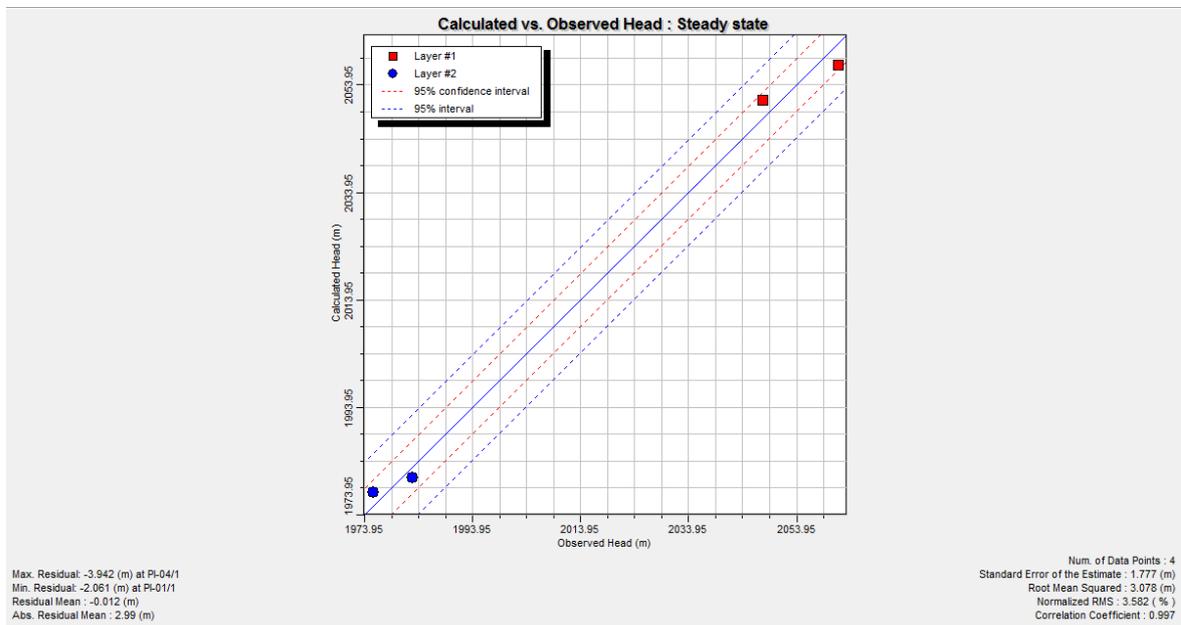


Figura 23: Cargas calculadas y observadas (Modelo en régimen estacionario)

Las conductividades hidráulicas estimadas durante el proceso de calibración son:

Conductivity				
Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	
1	0.25	0.25	0.25	
2	1	1	1	
3	1.25	1.25	0.5	

Las conductancias hidráulicas en la mallas al Este fueron modificadas de 4 m²/d a 3 m²/d, mientras que en las mallas localizadas al Oeste, fueron modificadas de 0.75 m²/d a 2 m²/d. Finalmente la recarga del acuífero producto de la precipitación fue modificada de su valor inicial 450 mm/año a 250 mm/año.

Los resultados del proceso de calibración han sido plasmados en la Figura 24, en la que se observa la morfología del agua subterránea, descritas por las líneas equipotenciales elaboradas con las cargas hidráulicas calculadas por el modelo en régimen estacionario.

b. Balance de agua en régimen estacionario

El resultado del balance hídrico subterráneo, indica que la recarga producto de la precipitación es 249.96 m³/d, mientras que la recarga subterránea es 375.81 m³/d, lo que hacen un total de 625.77 m³/d (7.24 l/s). La descarga esta explicada por el flujo subterránea aguas abajo del área estudiada con 623.51 m³/d, el detalle de las estimaciones han sido plasmados en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Balance hídrico en el acuífero

MODELO DE FLUJO EN REGIMEN ESTACIONARIO				
Recarga				
Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Subterránea	375.81	4.35	0.00	0.14
Recarga superficial	249.96	2.89	0.00	0.09
Rio	0	0.00	0.00	0.00
Total	625.77	7.24	0.01	0.23
Descarga				
Fujo subterráneo	623.51	7.22	0.01	0.23
Rio (flujo base)	0	0.00	0.00	0.00
Total	623.51	7.22	0.01	0.23
Diferencia	2.26	0.03	0.00	0.00
Discrepancia (%)	0.36	0.36	0.36	0.36

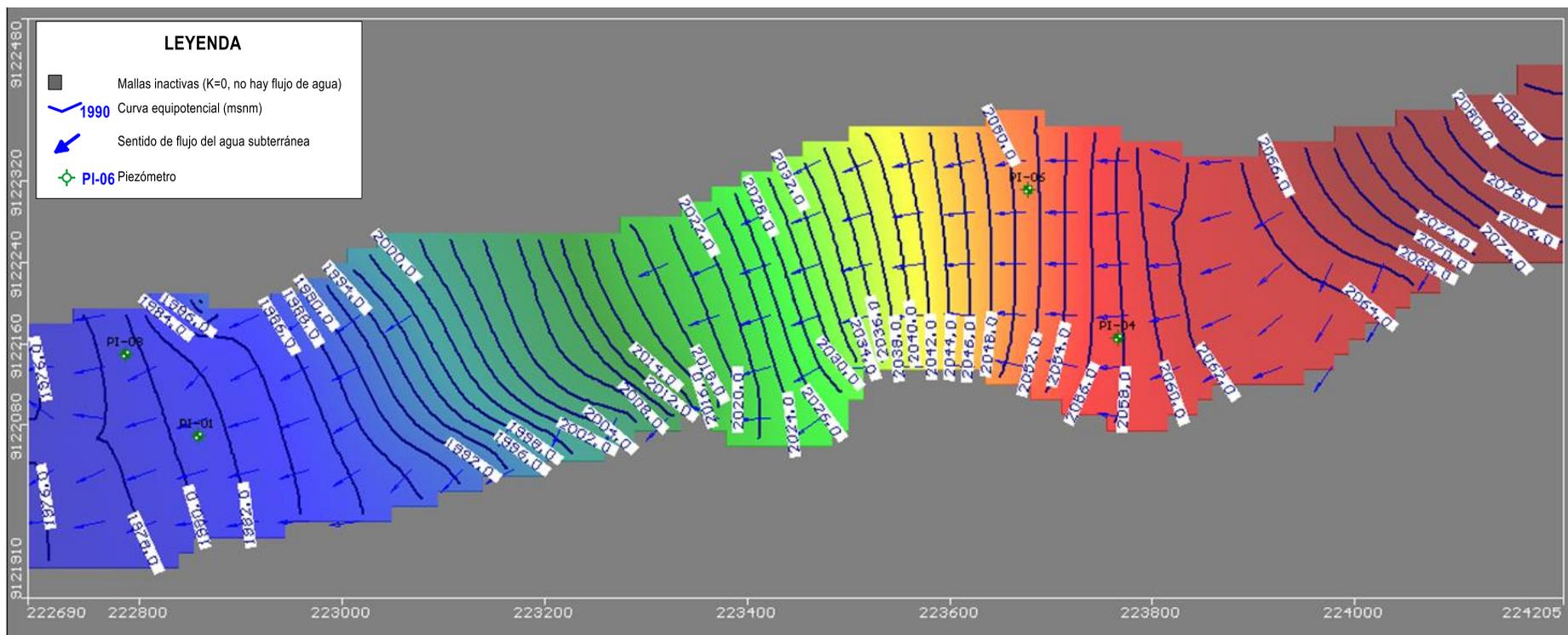


Figura 24: Hidroisohipsas y líneas de flujo calculadas (modelo en régimen estacionario)

4.3 MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

a. Condiciones iniciales

El modelo el régimen transitorio ha sido formulado a fin de conocer la variación temporal de las cargas hidráulicas y descargas a través del medio poroso y la interacción de la disminución de la recarga acuífero como producto de la construcción de la presa de relaves.

Los rendimientos específicos considerados para el modelo en régimen transitorio son 0.01 y 0.05 asignadas a dos zonas. Las cargas iniciales corresponden a las calculadas por el modelo en régimen estacionario calibrado.

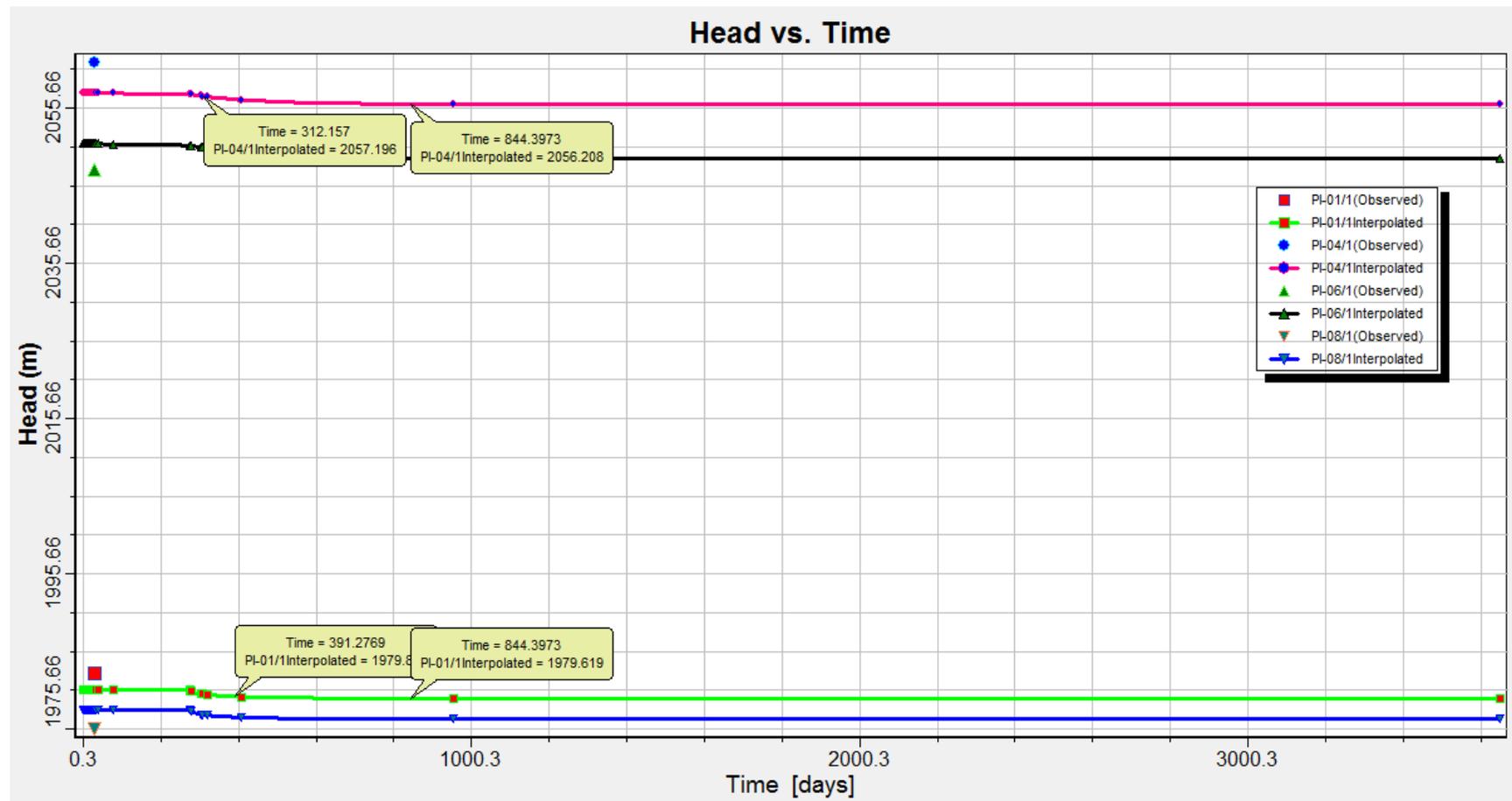
El periodo de simulación es de 10 años (3650 días), que inicia en agosto del 2014 y culmina en el mismo mes del 2023.

b. Variación temporal de las cargas hidráulicas

Acorde con los resultados de la variación de las cargas hidráulicas del modelo, se observa que en la zona alta (Piezómetros 4 y 6), se prevé un descenso de 0.98 m en el periodo simulación, mientras que en la zona baja (Piezómetros 1 y 8), la magnitud del descenso será 0.20 m, tal como se expone en la Figura 25.

c. Balance hídrico subterráneo en régimen transitorio

El balance hídrico subterráneo para en régimen de flujo transitorio en el acuífero es mostrado en el Cuadro 14, se observa que el caudal del recarga ha sido estimado en 521.70 m³/d, compuesta por la recarga superficial igual a 44.99 m³/d y la recarga subterránea igual a 476.7 m³/d, los que representa una reducción en la recarga del sistema acuífero igual a 105 m³/d. De otro lado la descarga esta explicada únicamente por el flujo natural subterránea igual a 526.21 m³/d.



**Figura 25: Variación temporal de las cargas hidráulicas calculadas (Agosto -2014 a Agosto -2023)
Modelo de simulación de flujo en régimen transitorio**

Cuadro 14: Balance hídrico en el acuífero

MODELO DE FLUJO EN REGIMEN TRANSITORIO				
Recarga				
Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Subterránea	476.7	5.52	0.01	0.17
Recarga superficial	44.99	0.52	0.00	0.02
Reservas	0.011	0.00	0.00	0.00
Total	521.70	6.04	0.01	0.19
Descarga				
Fujo subterráneo	526.21	6.09	0.01	0.19
Reservas	0	0.00	0.00	0.00
Total	526.21	6.09	0.01	0.19
Diferencia	-4.51	-0.05	0.00	0.00
Discrepancia (%)	-0.86	-0.86	-0.86	-0.86

4.4 MODELO EN TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Con el modelo de flujo del agua subterránea calibrado, se ha simulado la probable ruta que seguirían los contaminantes una vez ocurrida algún tipo de contaminación en la relavera, para ello se han inyectado trazadores en la zona de presa y la simulación ha sido efectuada para 1825 días con periodos de avance del contaminante de 100 días.

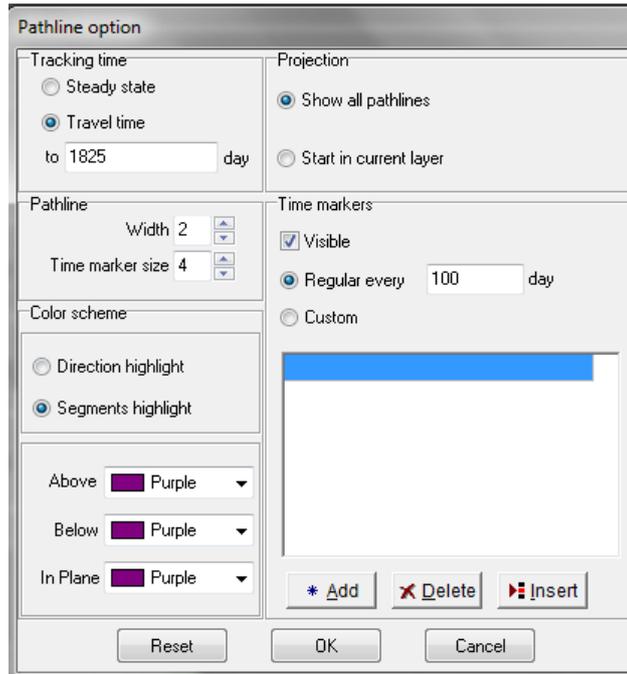


Figura 26: Ingreso de datos para la simulación de 1825 días

En la Figura 27, se muestra la variación espacial y temporal de la ruta del contaminante, en caso sucediera fuga de algún contaminante. La simulación muestra que entre 500 días a 700 días aproximadamente serian detectados por los piezómetros PI-08 y PI-01, consecuentemente estos dos piezómetros son de vital de importante para el monitoreo de la calidad y el nivel de las aguas.

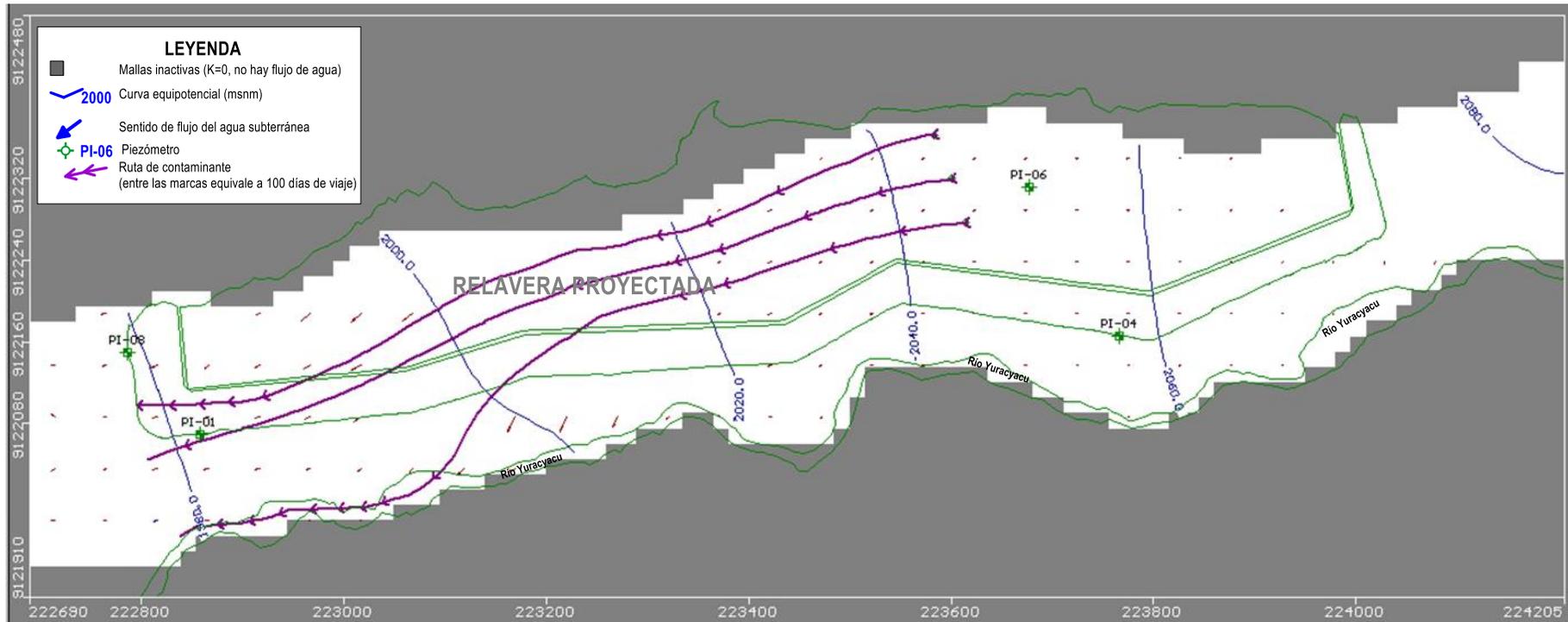


Figura 27: Variación temporal y espacial de la ruta de contaminantes

Después de conocer la ruta del contaminante se procedió a desarrollar la variación temporal y espacial del transporte contaminante en caso sucediera algún evento de fuga de algún contaminante proveniente de la presa relavera, en la cual podría alterar la calidad de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu. Para ello, se ingresaron datos al software visual modflow para la simulación de 1825 días, utilizando el flujo en régimen transitorio.

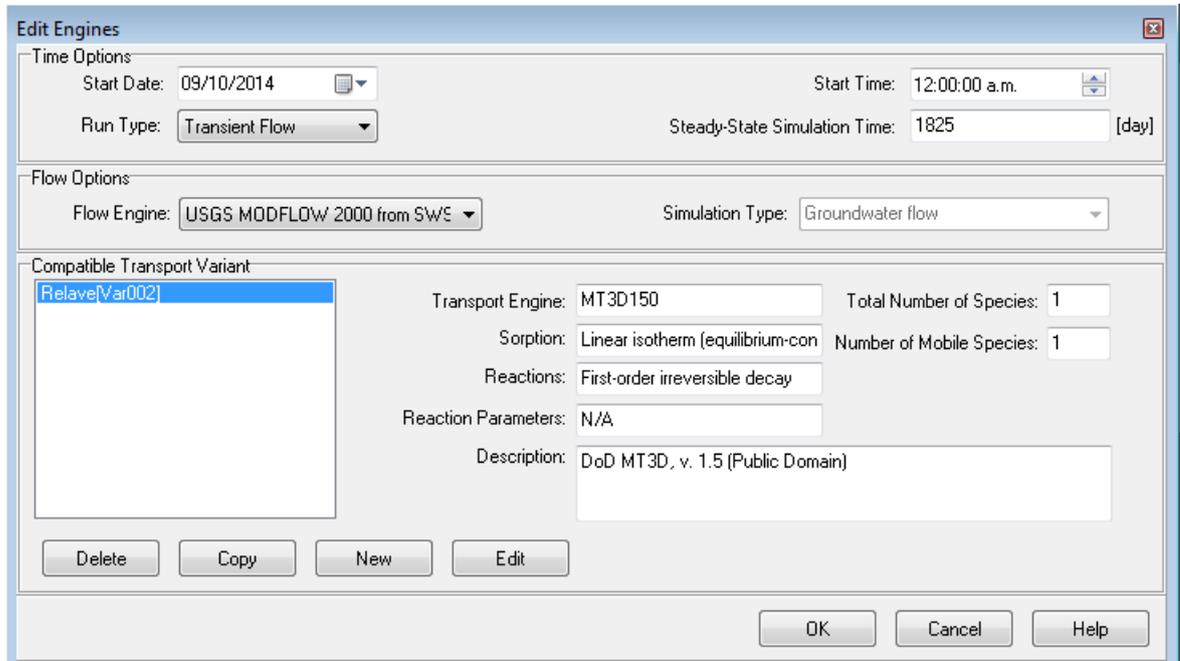


Figura 28: Ingreso de datos para la simulación de 1825 días

Además, para el desarrollo del modelo se ha inyectado una concentración constante de contaminante en la zona de presa con valor de 12500 mg/L y la simulación ha sido efectuada para 1825 días con periodos de avance del contaminante de 100 días.

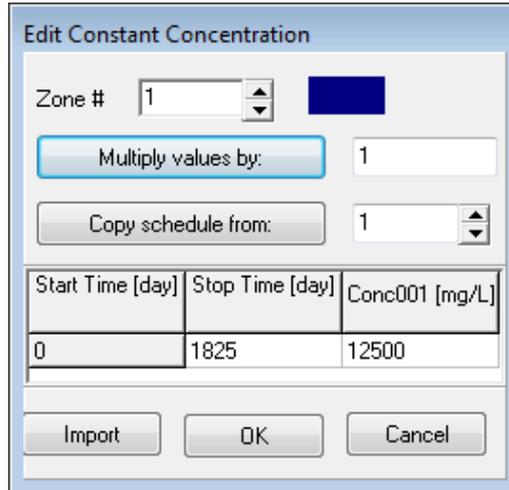


Figura 29: Ingreso de datos de concentración constante

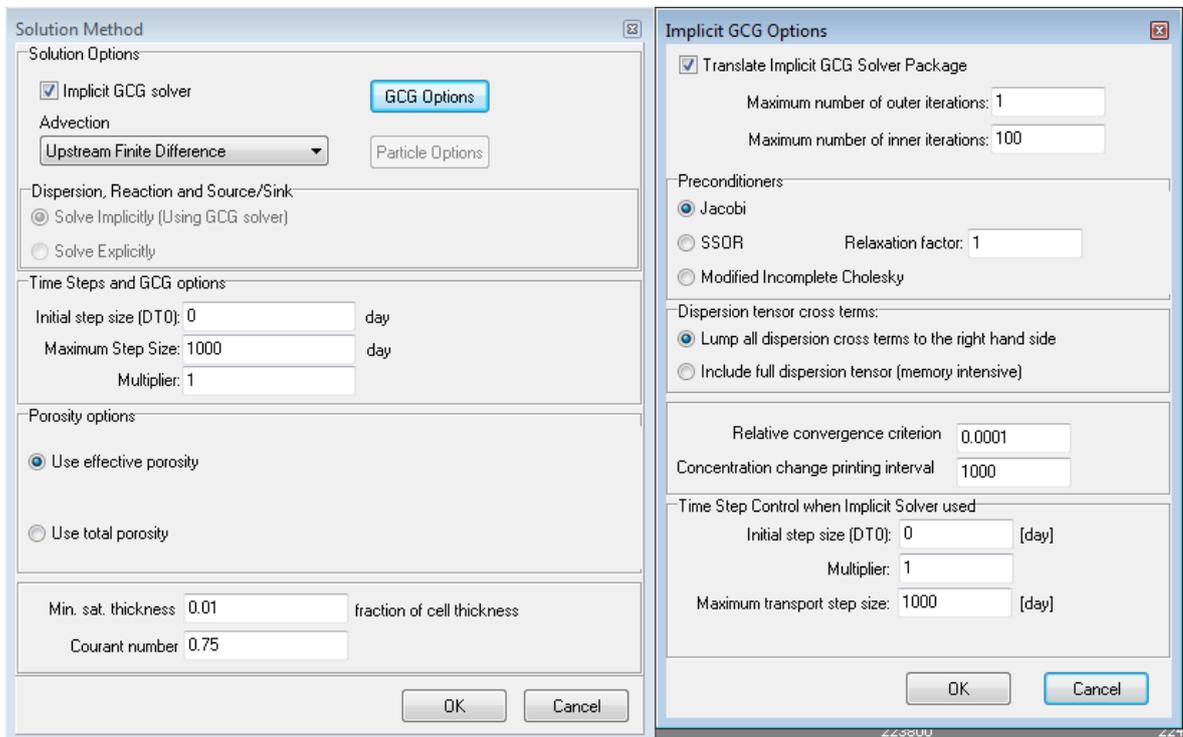


Figura 30: Ingreso de datos para avance de contaminante de 100 días

En la Figura 31, se muestra la variación espacial y temporal del transporte contaminante, en caso sucediera fuga de algún contaminante. La simulación muestra que en los 150 días aproximadamente serían detectados por el pozo de observación OBS-1, siendo éste pozo de vital importancia para el monitoreo de la calidad y el nivel de las aguas subterráneas.

En la Figura 32, se visualiza la simulación de transporte contaminante a los 750 días en donde estaría llegando al pozo de observación OBS-2, la cual sería también de importancia para la vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas del acuífero de Yuracyacu.

En la Figura 33, se describe el transporte contaminante que llega aproximadamente a los 1450 días en el pozo de observación OBS-3. Asimismo, en la Figura 34, se muestra la variación espacial y temporal del transporte contaminante en la microcuenca del río Yuracyacu a los 1825 días.

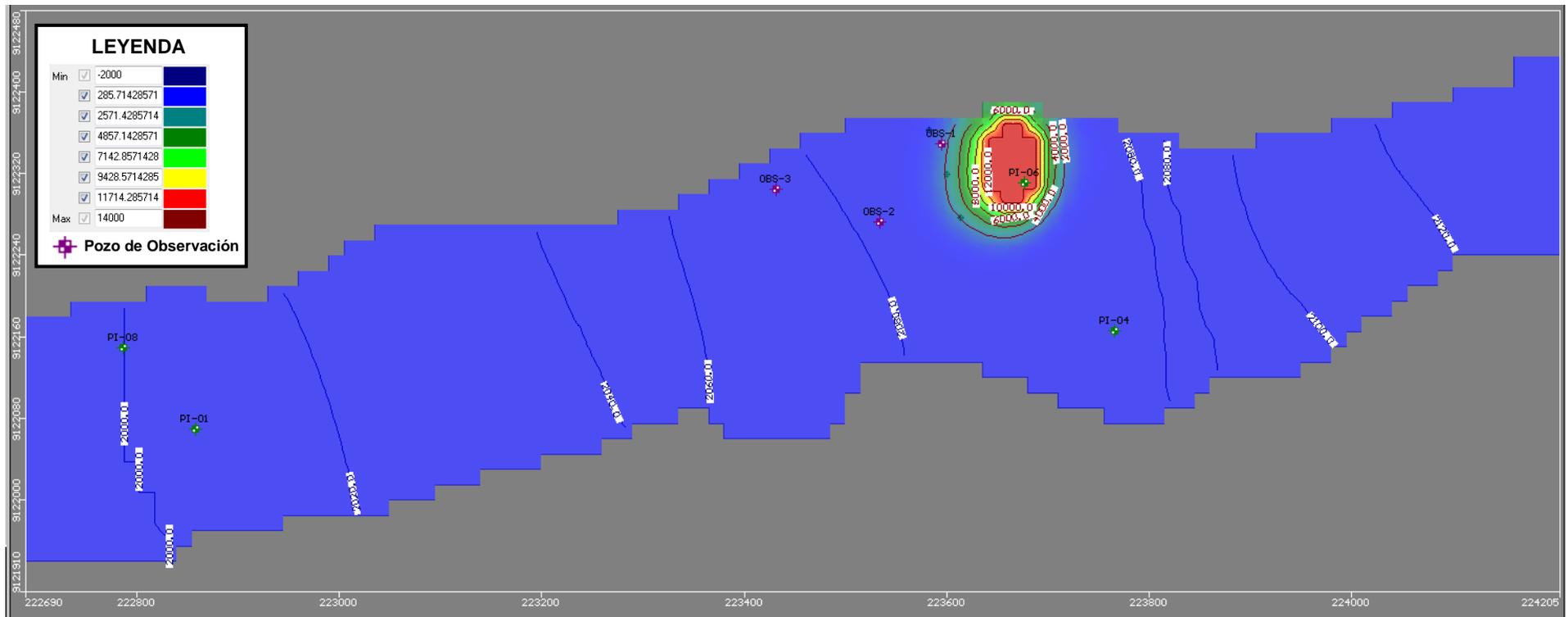


Figura 31: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 150 días

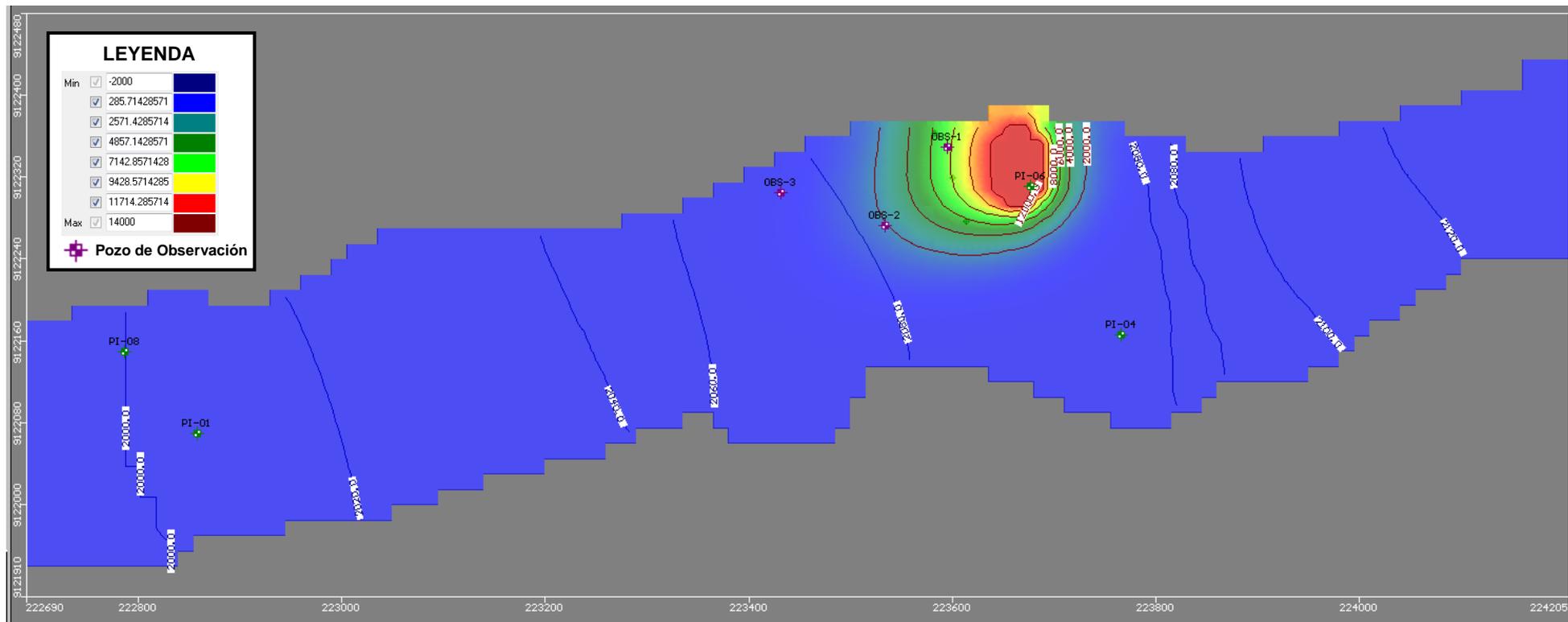


Figura 32: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 750 días

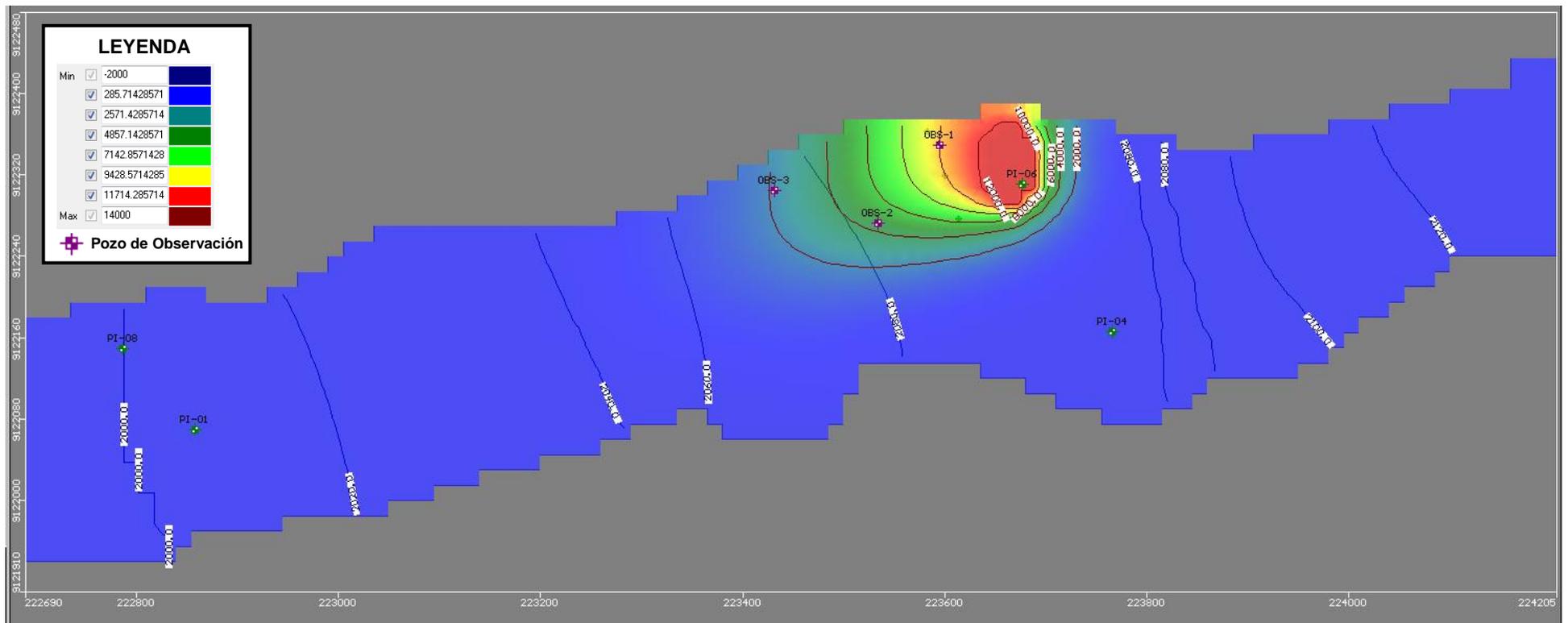


Figura 33: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1450 días

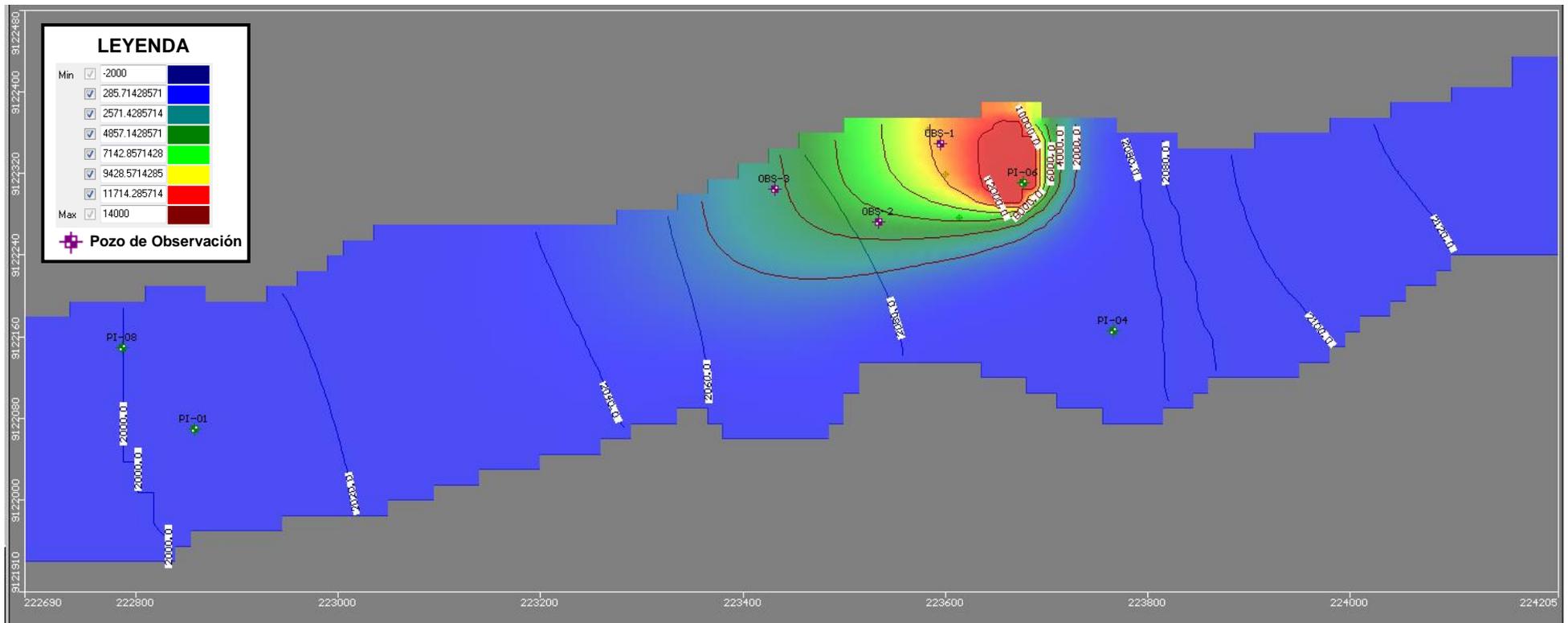


Figura 34: Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1825 días

En la Figura 35, se visualiza el grafico concentración versus tiempo, como resultado de la simulación del transporte contaminante, en la cual se puede verificar que en el pozo de observación OBS-1, una vez de haber sido impactado por el contaminante, conforme pasa los días se va incrementando la concentración del contaminante, es decir que la concentración viene a ser directamente proporcional al tiempo, es así que a los 150 días la concentración será de 1500 mg/L, a los 750 días llegaría a una concentración de 7800 mg/L, a los 1450 días una concentración de 10200 mg/L y, a los 1825 días el pozo OBS-1 llegaría a una concentración de 10800 mg/L.

Respecto con el pozo de observación OBS-2, de igual manera, una vez que haya sido impactado por el transporte de contaminante, su concentración se va incrementando conforme pasan los días, es así que a los 750 días estaría llegando una concentración de 1100 mg/L, a los 1450 días una concentración de 3200 mg/L y a los 1825 días el pozo OBS-2 tendría una concentración de 3800 mg/L.

De igual modo, para el pozo de observación OBS-3, a los 750 días tendría una concentración de 200 mg/L, a los 1450 días una concentración de 2100 mg/L y a los 1825 días estaría juntándose una concentración de 3800 mg/L.

En ese sentido, se verifica que en el pozo de observación OBS-1 que es el más cercano a la fuga del contaminante de la presa relavera sería el más afectado por la acumulación de su concentración en la cual alteraría la calidad de las aguas subterráneas en ese sector. Asimismo, continuaría la afectación de la calidad de las aguas subterráneas en el sector donde se ubica el pozo OBS-2 pero con menos del 50% de concentraciones respecto al pozo OBS-1. De igual manera se encontraría el pozo de observación OBS-3.

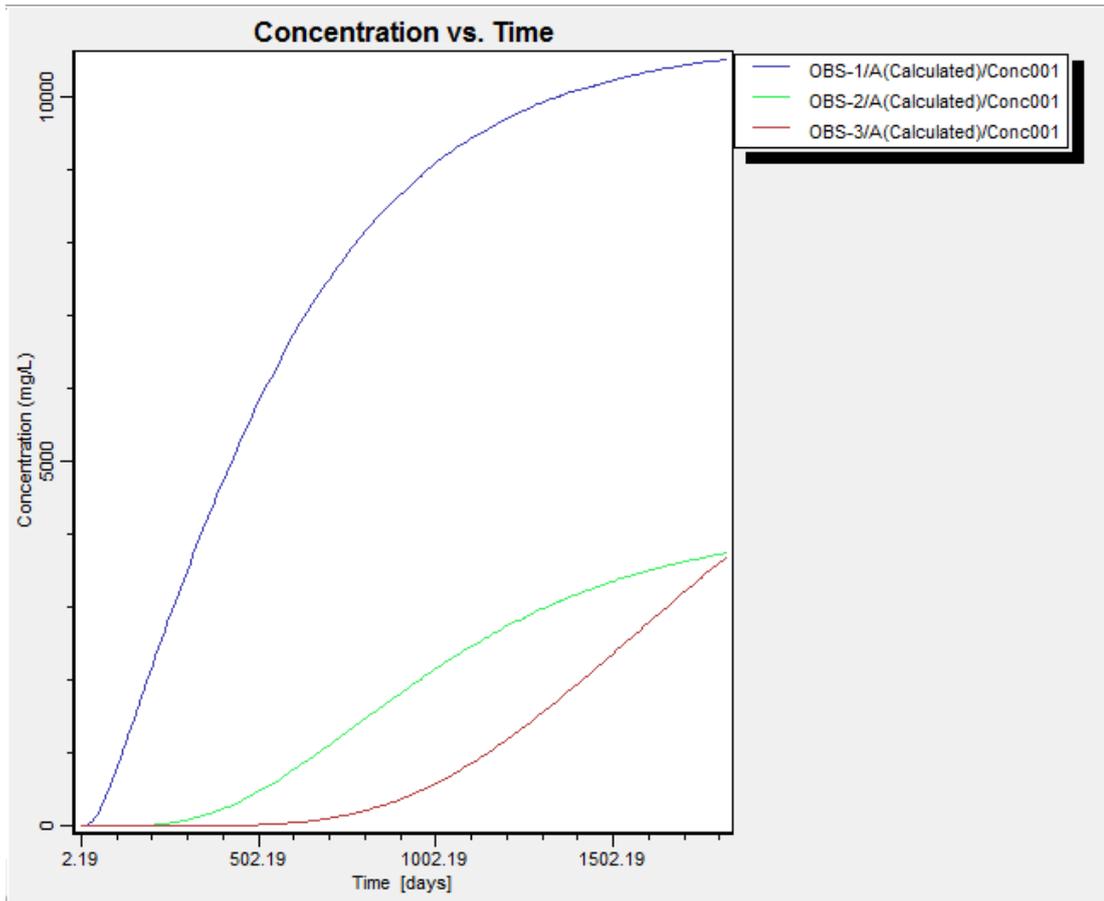


Figura 35: Grafico Concentración versus Tiempo

4.5 INTERACCIÓN DE LA PRESA RELAVERA YURACYACU CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la actualidad se tiene cinco eventos que pueden conducir a una falla catastrófica de la presa de relaves: (1) el desbordamiento de la presa por una ola de inundación debido a la insuficiente capacidad del vertedero, (2) movimiento dentro de las bases rocosas o estribos en planos de debilidad geológica, (3) el desarrollo de grandes presiones de levantamiento en la base de la presa, (4) tuberías en la punta de la presa, y (5) fallas de pendiente en la cara corriente arriba o corriente debajo de la presa. Los primeros tres de estos mecanismos de falla pueden ocurrir tanto en presas de concreto como de tierra; los dos últimos están limitados a presas de tierra y de relleno rocoso.

Por supuesto, las fugas siempre tienen lugar hasta cierto punto a través de las rocas de cimentación debajo de una presa, y en las presas de tierra, siempre hay

alguna pérdida a través de la presa misma. Estas pérdidas inesperadas se producen con mayor frecuencia a través de las rocas contiguas o desde el reservorio en algún punto distante de la presa. Incluso hay algunos casos en donde una fuga es tan excesiva en las presas, que son efectivamente incapaces de contener el agua, en la cual se infiltraría hacia la napa freática.

El material que utilizaron en la construcción del depósito de relaves Yuracyacu ha sido de material de grava arcillosa con limo, en tanto que el grado de humedad estuvo óptimo para obtener una compactación del 95%. Para la construcción del dique de arranque realizaron un corte de 7.0m de profundidad como mínimo, teniendo en cuenta las condiciones del suelo según los resultados obtenidos durante su evaluación geotécnica de campo y laboratorio. La mezcla de los materiales para la construcción del dique de arranque se realizó de la siguiente manera: el 30% de material es de arcilla de baja plasticidad y el 70% es de grava bien graduada a pobremente graduada.

Una zona de esta presa de relave que se ubica en la plataforma de la terraza de donde se construyó el depósito de relaves, se presenta materiales finos, de compacidad blanda principalmente. Según la clasificación de suelos en la zona de construcción de esta presa relavera, se tiene los siguientes materiales: arcilla de baja plasticidad, limo de baja plasticidad y limo de alta plasticidad. Asimismo, otra zona ubicada en las laderas de la terraza, se caracteriza por materiales de origen residual y coluvial, en la cual superficialmente se ha encontrado materiales arenosos, y por debajo de esta capa se encuentra material gravoso y anguloso.

Las fallas de las presas de tierra o de roca pueden ser el resultado de fugas excesivas, de tuberías en la punta, o de fallas en las pendientes en la superficie de la presa. Los tres pueden analizarse con la ayuda de redes de flujo de estado estacionario. Para aquellas situaciones raras en las que se construye una presa de tierra sobre una formación impermeable (Figura 36.a), la red de flujo puede ser limitada a la presa misma. Donde los materiales de cimentación también son permeables (Figura 36.b), la red de flujo debe incluir todo el sistema de cimentación de la presa.

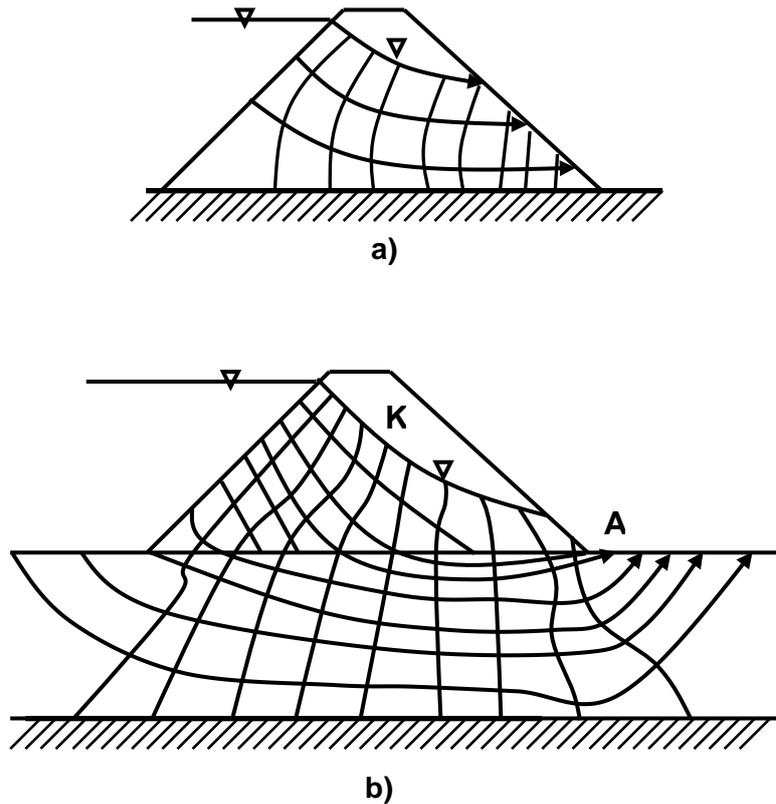


Figura 36: Redes de flujo para una presa de tierra homogénea, isotrópica sobre (a) cimientos impermeables y (b) cimientos permeables.

Si bien se reconoce que la sección transversal de una presa constituye un régimen de flujo saturado-no saturado, no es común en el análisis de ingeniería considerar las porciones no saturadas del sistema. En la Figura 37, se asume que el flujo se concentra en la porción saturada *ABEFA*. Se supone que el nivel freático *BE* sea una línea de flujo. Las cabezas específicas son $h = h_1$ en *AB* y $h = z$ en la cara de filtración *EF*. La posición del punto de salida debe ser determinada por prueba y error. Las redes de flujo de la Figura 36 ejemplifican el tipo de redes de flujo que resultan.

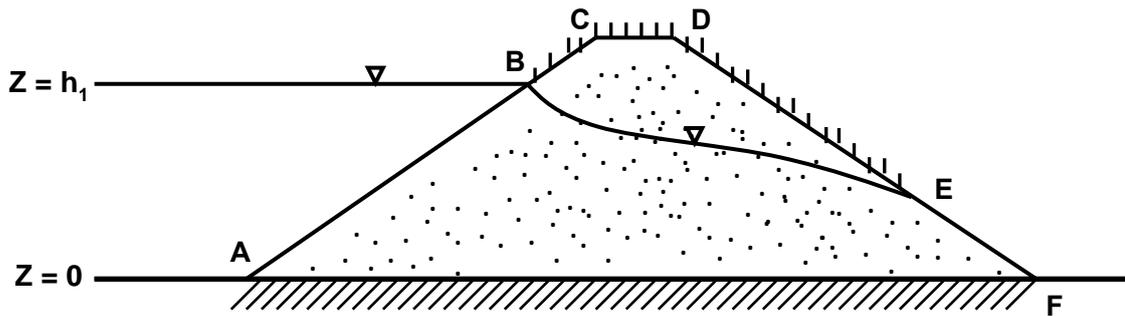


Figura 37: Problema de valor de frontera para el sistema de flujo saturado-no saturado en la presa de tierra.

Consideremos ahora la cuestión de la tubería. El mecanismo de la tubería puede ser explicado en términos de las fuerzas que existen en un grano de suelo individual en un medio poroso durante el flujo. El flujo de agua que pasa por el grano del suelo ocurre en respuesta a un gradiente de energía. Ante ello, debemos recordar que el potencial hidráulico se definió en términos de la energía por unidad de masa del fluido que fluye. Una medida de este gradiente es proporcionada por la diferencia en la carga hidráulica Δh entre las caras frontal y posterior del grano. La fuerza que actúa sobre el grano debido al diferencial de la carga se conoce como la *fuerza de filtración*. Esta se ejerce en la dirección del flujo y puede ser calculada a partir de la expresión:

$$F = \rho g \Delta h A \quad (*)$$

donde A es el área de la sección transversal del grano y ρ es la densidad masa del agua. Si multiplicamos la Ec. (*) por $\Delta z / \Delta z$ y que A se refiera a un área de la sección transversal que abarca muchos granos, tenemos una expresión de la fuerza de filtración durante el flujo vertical a través de un volumen unitario del medio poroso con $V = A \Delta z = 1$. Poniendo la expresión resultante en forma diferencial resulta en:

$$F = \rho g \frac{\partial h}{\partial z}$$

La fuerza de filtración es por lo tanto directamente proporcional al gradiente hidráulico $\partial h/\partial z$. En áreas donde el agua subterránea percola hacia abajo, las fuerzas de filtración actúan en la misma dirección que las fuerzas de gravedad, pero en áreas de agua que fluye hacia arriba, se oponen a las fuerzas de gravedad. Si la fuerza de filtración dirigida hacia arriba en cualquier punto de descarga en un sistema de flujo (por ejemplo, en el punto A en la Figura N° 36.b) excede la fuerza de gravedad dirigida hacia abajo, se producirá el transporte del agua. Los granos de tierra serán arrastrados por la filtración que está descargando y la represa será socavada.

La fuerza de gravedad dirigida hacia abajo se debe al peso flotante del medio poroso saturado. Un suelo con una densidad seca $\rho_s = 2.0 \text{ g/cm}^3$ tiene una densidad de flotación ($\rho_b = \rho_s - \rho$) que es casi exactamente igual a la densidad del agua, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$. Para este valor muy representativo de ρ_s , la fuerza de filtración excederá la fuerza de gravedad para todos los gradientes hidráulicos superiores a 1.0. Una prueba simple para tuberías es, por lo tanto, examinar la red de flujo para un diseño de presa propuesto y calcular los gradientes hidráulicos en todos los puntos de descarga. Si hay gradientes de salida que se aproximan a 1.0, se requiere un diseño mejorado.

El último modo de falla en los casos de tuberías suele ser una falla de pendiente en la cara corriente abajo. Las fallas de pendiente también pueden ocurrir allí si las presiones de poro creadas cerca de la cara por el sistema de flujo interno son demasiado grandes. Los métodos de límite de equilibrio del análisis de estabilidad de pendientes, introducidos en la sección anterior, son tan solo aplicables a las presas de tierra como los son a las pendientes naturales.

Hay otro mecanismo de falla en las presas de tierra que tiene connotaciones transientes, y ese es el desencadenamiento de fallas de pendiente por licuefacción durante los terremotos. Se debe indicar que la máxima seguridad contra la licuefacción es proporcionada por presas con las zonas de saturación más pequeñas en sus caparzones aguas abajo. Además, que todas las presas

deben estar bien drenadas, si no por otra razón que la de mejorar la estabilidad durante los terremotos.

Es preciso indicar que el sistema de conducción y disposición de relaves en el depósito de relaves Yuracyacu es por gravedad a través de tuberías; asimismo, la ubicación de los puntos de vertimiento de relave en pulpa son desplazados, de tal manera que el espejo de agua sobrenadante se encuentra alejado del dique de relaves gruesos. Una vez se haya formado el espejo de agua sobrenadante en el vaso del depósito de relaves, el agua es drenada a través de tres quenas las cuales conducirán la solución recuperada hasta las pozas colectoras mediante una tubería de diámetro de 14". Asimismo, en esta etapa se añadirán a este sistema dos quenas que se encuentran ubicados aguas arriba del depósito de relaves. Este sistema de recuperación del agua sobrenadante permite que en el dique de relaves no se establezca una napa freática, y más aún se genere infiltraciones hacia el acuífero del valle Yuracyacu. Además, la presa de relaves constituye un muro de suelo reforzado con geomallas, los cuales asegurarían que no se generen infiltraciones hacia la napa freática en el valle de la microcuenca del río Yuracyacu; motivo por el cual, los resultados de la evaluación de la calidad del agua subterránea realizada en tres piezómetros resultaron con pH neutras y básicas. La sección transversal de la estructura de la presa de relaves y la napa freática se puede apreciar en las Figuras 38 y 40.

Al respecto, debemos considerar que la profundidad del nivel freático estimado varía entre 11 a 22 m, en donde se verifica que en el primer estrato de la sección transversal del suelo, constituye material de arenas mezclada con material de deposición reciente, no encontrándose saturado; asimismo, en su segundo estrato, se encuentra conformado por material depositado y de arrastre con permeabilidad media, no encontrándose saturado. Sin embargo, en el tercer estrato que varía entre 20.2 a 30.6 m, se encuentra constituido por material de arrastre y conglomerados con permeabilidad media, pero completamente saturado. Estas condiciones hidráulicas de los estratos que presenta el perfil del suelo en el valle Yuracyacu, facilitaría las infiltraciones de un contaminante hacia las aguas subterráneas, ante la ocurrencia de una falla física de la presa relavera. Estos estratos se pueden visualizar en la Figura 39.

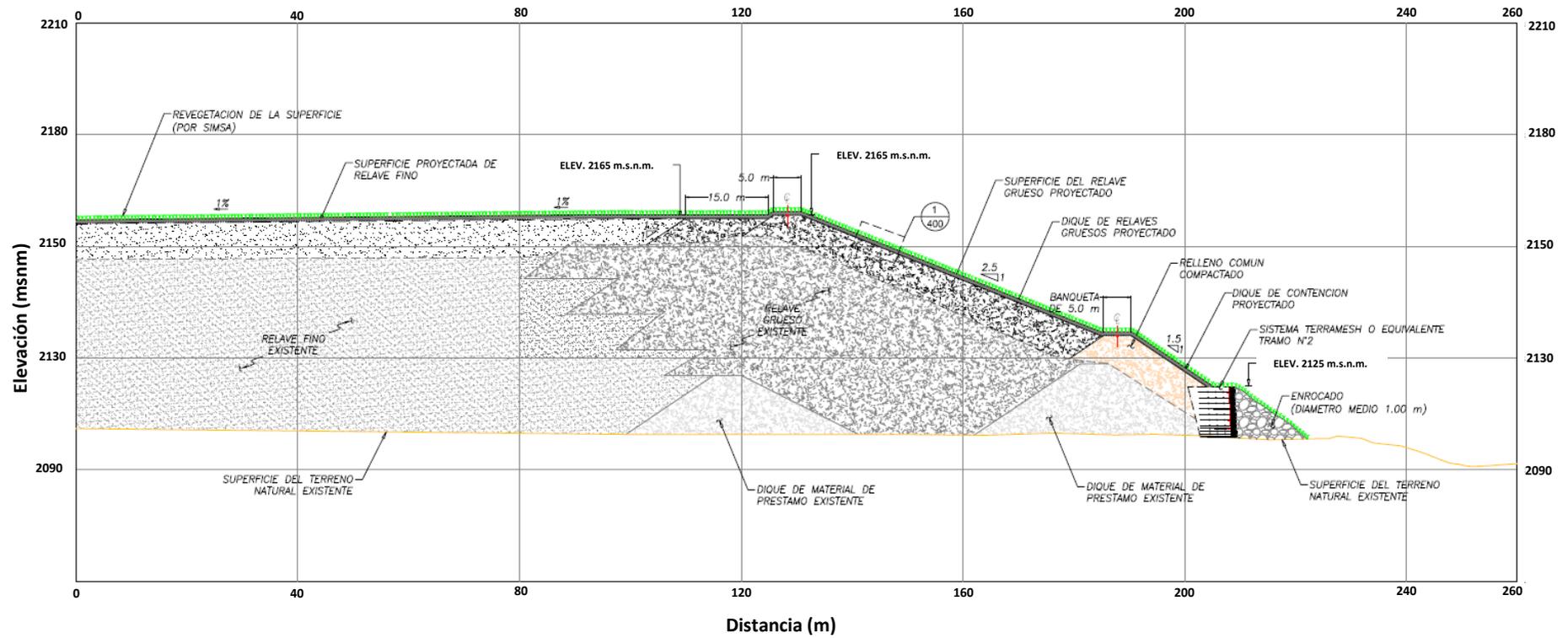


Figura 38: Sección transversal del depósito de relaves Yuracyacu

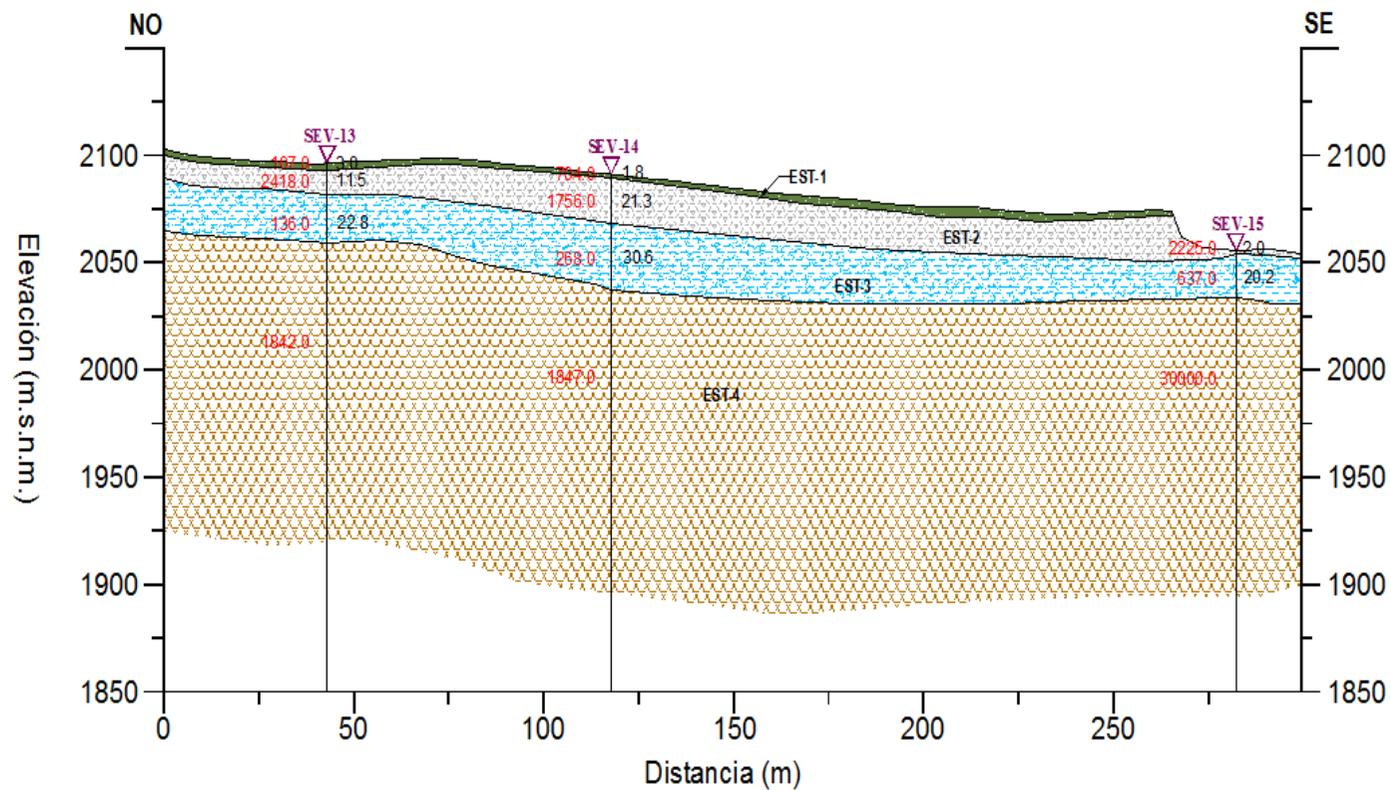


Figura 39: Sección geo-resistiva del nivel freático

Descripción

EST-1: Primer estrato que presenta espesores de 1.8 a 3 m, su material superficial es arena mezclada con material de deposición reciente. Este estrato no se encuentra saturado.

EST-2: Segundo estrato que presenta espesores variables de 2 a 21.3 m, conformado por material depositado y de arrastre. Este estrato no se encuentra saturado.

EST-3: Tercer estrato que presenta espesores de 20.2 a 30.6 m, con materiales de arrastre y conglomerados. Este estrato se encuentra saturado.

EST-4: Cuarto estrato con espesor no determinado, siendo el basamento rocoso.

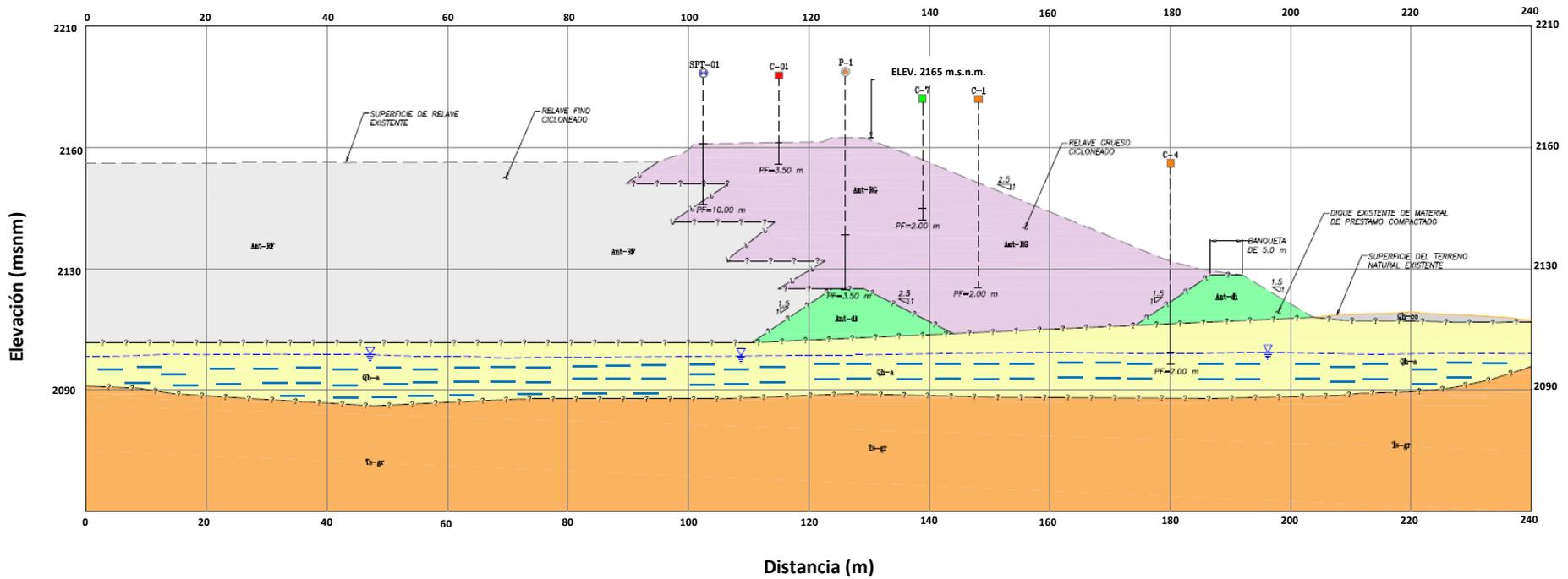


Figura 40: Sección transversal de la presa de relaves Yuracyacu

Qh-co Depósito coluvial: conformado por material fragmentado, transportado y acumulado por acción de la gravedad, se ubica en los taludes de los cerros adyacentes, la naturaleza del suelo coluvial es heterogénea.

Qh-a Depósito aluvial: conformado por material fragmentado, transportado y acumulado por la acción de corrientes fluviales, se ubica rellenando el valle del río Yuracyacu sobre basamento rocoso.

Ts-gr Granito: predominante en el basamento rocoso, moderadamente resistente a muy resistente, moderadamente alterada, poco fracturada, tiene influencia en la zona Oeste de la presa de relave.

Ant-RF Relaves finos: conformado por Limo arenoso de baja plasticidad de color gris claro, húmeda a saturada de consistencia blanda a muy blanda.

Ant-RG Relaves gruesos: este material de relave compactado está conformado por arena limosa de plasticidad nula de color gris claro, poco húmedo, de consideración floja, se encuentra permeable.

Ant-di Dique: acumulaciones de fragmentos polimicticos, angulosos a sub-angulosos, bien gradados, presentan niveles arcillosos y arenosos, se encuentra a los largo del pie del depósito de relaves Yuracyacu.

Nivel freático aproximado.
 Agua subterránea.

Superficie del terreno natural existente.
 Superficie de relave existente.
 Contacto inferido.

4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados que se obtuvieron en la presente investigación se presentan teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados: i) evaluar las condiciones hidrogeológicas del acuífero, ii) evaluar las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas, y iii) proponer las medidas de remediación de las aguas contaminadas así como la estimación de costos.

4.6.1 Condiciones hidrogeológicas del acuífero

La investigación realizada en la margen derecha del río Yuracyacu, situado en el distrito Parcoy, provincia de Pataz, departamento de la Libertad, presenta un acuífero que ha sido formado por depósitos del cuaternario reciente, la cual constituye cantos rodados, arena gruesa y gravas, a su vez presenta intercalaciones de limo y arenisca. Este acuífero es clasificado como libre puesto que el espesor saturado es variable, su base es impermeable y el techo es permeable, siendo su recarga producto de la precipitación (enero – marzo) y escorrentía superficial (áreas de cultivo y canal de tierra). La profundidad de la napa freática en la zona de estudio varían entre 24.12 m y 38.80 m. El sentido de flujo es de NorEste a SurOeste con 9.6% de gradiente hidráulico promedio. Las cargas hidráulicas están comprendidas entre 1982 msnm y 2061 msnm, observándose que el techo de la napa subterránea es uniforme desde la zona media en dirección Oeste, y con cierta anomalía en la zona Este explicado por el efecto de recarga del acuífero proveniente del río Yuracyacu.

Las conductividades hidráulicas se hallan comprendidas entre 0.0008 m/día y 0.231 m/día, en la cual se van incrementando con dirección Este a Oeste. Estas conductividades se encuentran caracterizadas por los estratos limo arcillosos con reacción tardía frente a la recarga del acuífero o frente al proceso de bombeo en caso esto ocurriera.

Según resultados de análisis de la calidad del agua subterránea, se tiene que la conductividad eléctrica varía entre 132.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 179.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondiendo a aguas con salinidad baja así como baja mineralización. En relación a valores de pH, estas varían de 7.00 a 7.81, clasificándose como neutras y aguas básicas. De

otro lado, se ha verificado que los iones predominantes en la zona de estudio son el Calcio (Ca^{++}) entre los cationes y el Bicarbonato (HCO_3^-) entre los aniones, tratándose de aguas bicarbonatadas cálcicas, la cual corresponde a aguas con corto periodo de residencia en el medio poroso, lo que se llegaría a estimar que la fuente de recarga se halla cercana a los piezómetros pudiendo ser el río Yuracyacu y/o las precipitaciones que ocurren durante los meses de altas precipitaciones.

Se elaboró un modelo conceptual para el desarrollo de los modelos de simulación de acuíferos aplicando el principio de simplicidad, a fin de que sea lo más simple posible, manteniendo la suficiente complejidad para la representación adecuada de los elementos físicos del sistema acuífero y reproducir su comportamiento hidráulico y la respuesta frente a escenarios tales como la construcción de la presa de relaves, probables escenarios bombeos de agua subterránea, sequías, y cambios hidrológicos naturales y antrópicos. Cabe indicar que el modelo conceptual del acuífero en estudio ha sido elaborado teniendo en cuenta la información geológica, límites permeables e impermeables, marco hidrológico, sus variaciones naturales, y los factores antropogénicos preponderantes.

Geológicamente, en la zona de estudio se enmarca la formación del cuaternario reciente en donde se encuentra constituida por depósitos coluviales – aluviales que va de 17 m a 60 m aproximadamente en promedio de espesor, sobre los cuales ocurren lluvias que se infiltran y recargan al sistema acuífero, hidráulicamente conectados parcialmente al río Yuracyacu que conduce aguas de escorrentía directa y flujo base en periodos de estiaje. Además, se ha verificado que las formaciones geológicas de importancia que limitan lateralmente y en su base el depósito coluvio – aluvial en la que se emplaza la presa relavera son las formaciones geológicas Tonalita – Granodiorita (C-tn-gd), y la formación Chota (ksp-cho) hacia el Oeste.

El medio permeable del acuífero está constituido por los depósitos aluviales en el lugar del emplazamiento de la presa Yuracyacu, morfológicamente estos han sido acumulados en distintos periodos en cuyos contactos existe material limo,

arcilla, arena, cantos rodados y bolonerías propiciando la formación de acuífero, recargado por las precipitaciones y las aguas de escorrentía. En tanto que su lecho impermeable está constituido por formaciones geológicas Tonalita – Granodiorita (C-tn-gd), y la formación Chota hacia el Oeste; estas formaciones no almacenan ni transmiten agua salvo la presencia de fallas y/o fracturamiento que podrían modificar el comportamiento hidrodinámico o la morfología del agua subterránea.

La quebrada Yuracyacu es una cuenca alargada y de reacción rápida frente a los eventos de precipitación, la cual tiene la capacidad de intercepción y almacenamiento medio. Las descargas se hallan comprendidas entre 0.28 m³/s a 10.18 m³/s con reacciones rápidas frente a un evento de precipitación debido a la morfología de los lechos de río, así como a la pendiente alta.

En el ámbito del área de estudio se encuentran factores antropogénicos que han ocasionado alteraciones en el medio a través de la perforación de piezómetros, construcción de diques de tierra, construcción de caminos, movimiento de tierra superficial, entre otras actividades.

4.6.2 Fuentes de contaminación de las aguas subterráneas

La presa de relave se encuentra situada en la misma quebrada Yuracyacu adyacente a las laderas con pendientes fuertes, la cual está rellena en su totalidad por depósitos fluviales, cubierta con arbustos.

Se realizó el modelamiento del acuífero aplicando el software Visual ModFlow 2011.1, a fin de resolver las ecuaciones de flujo haciendo uso del método numérico en diferencias finitas (ecuación de flujo del agua subterránea).

De acuerdo al proceso de la discretización del sistema acuífero en diferencias finitas, se obtuvo 804 mallas que corresponden al acuífero sobre el cual se emplazará la presa relavera. En esta sección se tiene las mallas activas que representan la existencia del flujo de aguas subterráneas. El modelo de éste flujo ha sido discretizado en dos capas con 30 m de espesor promedio, estando su

estrato constituido por depósito cuaternario y el techo la topografía del terreno, sin embargo la base es impermeable constituida por tonalitas y granodioritas.

En el modelo se tiene establecido que el flujo está constituido por la recarga superficial producto de la precipitación de 45.4 mm/año (marzo y abril), asimismo se tiene también un flujo dependiente de la carga hidráulica que están definidas por cierto tramo del curso del río Yuracyacu la cual dispone de una conductancia hidráulica promedio de 4 m²/d.

Para el modelo se tiene establecido la carga general que ingresa al sistema acuífero, por ello en la zona Oeste las mallas tienen 1975 m de carga hidráulica y 0.75 m²/d de conductancia hidráulica mientras que al Este del área, las mallas tienen una carga hidráulica igual a 2065 m y la conductancia hidráulica 4.0 m²/d.

En la entrada del modelo se utilizó las conductividades hidráulicas aplicando la media geométrica resultando 0.12 m/d y la media armónica 0.11 m/d. Respecto al rendimiento específico, sus valores varían entre 0.001 a 0.05.

Para el caso del modelo en régimen estacionario, se tiene como conductancia hidráulica en la malla Este a 3 m²/d y en la malla Oeste 2 m²/d, siendo la recarga del acuífero producto de la precipitación el valor de 250 mm/año. Ahora, según su balance hídrico subterráneo, se obtuvo como recarga de la precipitación a 249.96 m³/d, en tanto que la recarga subterránea es 375.81 m³/d, haciendo un total de 625.77 m³/d. Ante ello, se genera una descarga de 623.51 m³/d por el flujo subterráneo aguas abajo del área de estudio.

Para el caso del modelo en régimen transitorio, se tiene como rendimientos específicos valores de 0.01 y 0.05 asignadas a dos zonas. El periodo de simulación es de 10 años (3650 días), que inicia en agosto del 2014 y culmina en el mismo mes del 2023. De acuerdo a la variación de las cargas hidráulicas del modelo, se observa que en la zona alta se pronostica un descenso de 0.98 m en el período de simulación, en tanto que en la zona baja la magnitud del descenso será 0.20 m. Ahora, según su balance hídrico subterráneo, se muestra que el

caudal de recarga total es 521.70 m³/d, la cual está constituida por la recarga superficial de 44.99 m³/d y la recarga subterránea de 476.7 m³/d. Ello genera una descarga por el flujo natural subterráneo igual a 526.21 m³/d.

En ese sentido, se obtuvo el modelo de flujo del agua subterránea calibrado por el cual se ha simulado la probable ruta que seguirían los contaminantes en el caso si sucediera algún desprendimiento o fuga de elementos contaminantes de la presa relavera, dándose la simulación para 1825 días (60 meses <> 5 años) con períodos de avance del contaminante de 100 días. La simulación muestra que entre 500 a 700 días aproximadamente serían detectados por los piezómetros PI-08 y PI-01, consecuentemente estos dos piezómetros son de vital importancia para el monitoreo de la calidad y el nivel de las aguas subterráneas.

A partir de la ruta del contaminante se desarrolló la variación temporal y espacial del transporte contaminante en caso sucediera alguna fuga de concentración de contaminante de la presa relavera, basándose en la simulación para 1825 días en flujo de régimen transitorio, con inyectado de concentración constante de contaminante en una zona de la presa de relave un valor de 12500 mg/L con períodos de avance del contaminante de 100 días. La simulación del transporte de contaminante muestra que a los 150 días aproximadamente serían detectados por el pozo de observación OBS-1; después a los 750 días estaría llegando al pozo de observación OBS-2; asimismo a los 1450 días en el pozo de observación OBS-3; en consecuencia, a los 1825 días se estaría expandiendo el contaminante en las aguas subterráneas del valle de la microcuenca del río Yuracyacu ocasionando una alteración en la calidad de sus aguas.

Por otro lado, según el resultado de la simulación del transporte contaminante se genera un gráfico representativo de concentración versus tiempo, en la cual se verifica que el pozo de observación OBS-1 sería el más afectado por la acumulación de su concentración que alteraría la calidad de las aguas subterráneas de ese sector. Sin embargo, la alteración de la calidad de las aguas subterráneas del pozo OBS-2 sería menos del 50% de concentraciones que tendría el pozo OBS-1, de igual modo se encontraría el pozo de observación OBS-3 respecto a los pozos OBS-1 y OBS-2.

4.6.3 Medidas de remediación de las aguas contaminadas

El hecho de ubicarse una presa de relaves mineros en un ámbito geográfico cercano a una quebrada o río, sin la debida protección, involucrará la posible alteración de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales cercanas a ella, lo cual ocasionaría consecuencias lamentables para aquellos que utilizan el recurso vital, tal es el caso de la quebrada Yuracyacu en la que sus habitantes se abastecen de aguas subterráneas para cultivos, bebida de animales y consumo humano.

Debemos precisar que toda remediación aplicado en el ámbito de la actividad minera involucra frecuentemente un alto costo financiero, dado que los depósitos de relaves, sin las debidas medidas de protección e impermeabilización, ocasiona muchas veces contaminación en los suelos, ríos, quebradas, aguas subterráneas, entre otros factores ambientales.

En el caso que ocurriera un suceso de contaminación de las aguas subterráneas por una fuga del lixiviado de la presa relavera, se tendría que tomar las siguientes medidas de remediación:

Realizar la técnica de tratamiento en superficie, en la cual consiste en el aislamiento de las aguas subterráneas contaminadas por el lixiviado de los depósitos de relaves, de tal forma que dicha contaminación se transfiera lateralmente y así de esta manera evitar su expansión en el ámbito de toda la quebrada de Yuracyacu. El agua contaminada extraída se puede tratar utilizando tecnologías existentes tales como el método de la adsorción en carbón o tratamientos biológicos para los compuestos orgánicos y métodos físicos y químicos para los inorgánicos; posteriormente, el agua tratada podría ser reincorporada nuevamente en el acuífero donde fue extraído. Esta técnica es útil en la situación en que la contaminación se encuentra muy localizada.

Para el caso de aislamiento o confinamiento de las aguas subterráneas contaminadas, se puede proceder aplicando la técnica de barreras de lodo, que

consiste en realizar excavaciones en los alrededores del área contaminada y se procede a rellenar con un lodo que impermeabiliza el perímetro a ser aislado. Este lodo debe ser una mezcla del propio suelo con arcillas especiales como sepiolita y bentonita, a fin de proporcionar mayores propiedades de impermeabilización a la barrera. Estas barreras deben tener profundidades máximas de 15 m y hasta 1.2 m de espesor, la cual estarán ancladas en un sustrato de baja permeabilidad.

También se puede proceder el aislamiento aplicando la técnica de la lechada de cemento, que consiste en impermeabilizar el área contaminada mediante la inyección de una capa continua de cemento bajo el perímetro inferior de la contaminación.

Sin embargo, existen casos que el aislamiento y su tratamiento se haga inviable, así también su costo resulta muy excesivo. Para ello, se tiene una técnica de remediación in situ de carácter biológico que puede ser por biorremediación y fitorremediación.

Respecto a la biorremediación, esta técnica involucra a microorganismos como las bacterias para el tratamiento de contaminantes orgánicos, pero para que estas bacterias puedan eliminar las sustancias químicas dañinas, las aguas subterráneas y el suelo deberán tener la temperatura, nutrientes y cantidad de oxígeno apropiado, dado que en estas condiciones se permitirá el desarrollo y reproducción de estas bacterias, asimismo permitirá la asimilación de más sustancias químicas o contaminantes. Pero, si las condiciones no son las adecuadas, entonces las bacterias no podrían desarrollarse e incluso podrían crear sustancias químicas más dañinas, la cual alteraría aún más la calidad del agua subterránea. En el caso que el área afectada no disponga de las condiciones adecuadas, entonces se intenta mejorarlas bombeando aire al interior del suelo, también se puede añadir nutrientes y oxígeno revolviendo la mezcla del suelo. Sin embargo, existen algunas bacterias anaerobias, las cuales a temperatura adecuada y la cantidad de nutrientes necesaria, las bacterias podrían biocorregir las sustancias químicas. Tener en cuenta que las bacterias existen normalmente

en los suelos pero no representan un peligro para las personas que habitan en la quebrada Yuracyacu.

En relación a la fitorremediación, esta técnica biológica comprende el uso de ciertas especies de plantas capaces de remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir sustancias químicas dañinas o compuestos contaminantes contenidos en el suelo, lodos, sedimentos y en las aguas subterráneas. Para ello, se tiene algunas especies de plantas que son utilizadas para la fitorremediación de metales, tales como se describen en el Cuadro 15:

Cuadro 15: Especies de plantas utilizadas en fitorremediación

Especie de Planta	Metal a extraer
Brassica juncea	Plomo, Selenio
Thlapsi caerulescens	Cadmio, Niquel
Silene Vulgaris	Zinc
Brassica oleracea	Zinc
Raphanus sativus	Cadmio
Alyssum lesbiacum	Cobre
Alyssum murale	Plomo
Arabidopsis thaliana	Cromo
Festuca arundinacea Hibiscus cannabis Lotus corniculatus	Boro
Helianthus annus	Uranio
Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty	Hierro, Zinc, Manganeso y Cobre

Para el caso de la quebrada Yuracyacu, si ocurriera una contaminación de suelos y aguas subterráneas por el lixiviado de la presa relavera, sería recomendable utilizar como fitorremediación la especie vegetal Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty, por ser una planta herbácea y perenne que tolera sequía prolongada, inundaciones de precipitación anual que va de los 800 mm a 6000 mm, también

resiste temperaturas extremas desde 14 °C hasta 60 °C, además puede desarrollarse con pH en el suelo que va entre 3 – 11. Esta especie de planta posee alto nivel de tolerancia a la salinidad, sodicidad, acidez y hasta soporta la presencia de Al, As, Cd, Cu, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, Se y Zn presentes en el suelo.

Estimación de costos para la remediación de las aguas contaminadas

El presupuesto referencial que se ha estimado para la ejecución de la remediación con las obras estructurales y no estructurales es de S/. 1 425 790,71 Soles, el cual incluye 34% de gastos generales, 10% de utilidad y el 18% del IGV de acuerdo a Ley.

En el Cuadro 16 se presenta el presupuesto referencial para la ejecución de la remediación de las aguas contaminadas.

Cuadro 16: Presupuesto referencial para remediación de aguas contaminadas

Ítem	Descripción	Parcial (S/.)
01	Obras preliminares	153 086,64
02	Labores en mina	211 214,67
03	Instalaciones para el manejo de residuos	332 929,33
04	Capacitación a población en temas de remediación de pasivos ambientales	31 460,00
05	Programa de manejo ambiental	110 404,64
	Costo Directo	839 095,28
	Gastos Generales (34%)	285 292,4
	Utilidad (10%)	83 909,53
	Sub Total	1 208 297,21
	IGV (18%)	217 493,5
	Total del Presupuesto	1 425 790,71

Nota: Los costos han sido calculados con precios al mes de marzo de 2017 y tomando como referencia estudios ambientales del Sector minería.

V. CONCLUSIONES

1. El acuífero sobre el cual se emplazará la presa de relaves, hidráulicamente es libre. Geológicamente, la base del acuífero está constituida por la formación Chota, sobre el cual se encuentra el depósito aluvial – coluvial. La recarga del medio acuífero son las aguas de lluvia que precipitan durante los meses de Enero a Marzo. El espesor medio saturado del cuaternario varía de 20 m a 60 m en promedio. La profundidad de la napa freática varía entre 24 m y 38 m. El sentido de flujo es de NorEste a SurOeste con 9.6% de gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica del medio poroso es muy heterogéneo con un rango comprendido entre 0.00088 m/d a 0.231 m/d, y los valores del rendimiento específico varían entre 0.001 y 0.05.
2. La conductividad eléctrica del agua subterránea varía entre 132 a 179 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tratándose de aguas con salinidad baja consecuentemente con mineralización baja. La familia química de las aguas es bicarbonatada cálcica, tratándose de aguas muy jóvenes es decir con tiempo de residencia en el acuífero corta. El pH varía entre 7.0 a 7.81, tratándose de agua neutras a ligeramente básicas. Acorde con el balance hídrico subterráneo para las condiciones de flujo estacionario, la recarga subterránea total es 625.77 m³/d, 249.96 m³/d corresponde a la recarga del acuífero producto de la precipitación y 375.81 m³/d, corresponde a flujo lateral subterráneo. Para las condiciones en régimen transitorio se prevé una reducción de la recarga superficial estimado en 104.07 m³/d. En el escenario de ocurrir contaminación alguna de las aguas subterráneas en la zona Relavera, el contaminante lograría alcanzar el piezómetro PI-01 y PI-08 entre 500 días a 700 días, consecuentemente el monitoreo mensual de la calidad del agua y los niveles deberán efectuarse en los dos piezómetros antes mencionados. Asimismo, la variación temporal y espacial del transporte contaminante ante una supuesta fuga de una concentración de 12500 mg/L de la presa relavera, se tendría que a los 750 días llegaría a una concentración de 7800 mg/L en el pozo de observación OBS-1 y 1100 mg/L en el pozo OBS-2, en

tanto que en el pozo OBS-3 se detectaría a los 750 días una concentración de 200 mg/L.

3. Ante la ocurrencia de un suceso de lixiviado de la presa relavera en la quebrada Yuracyacu, se tendría que aplicar la técnica de tratamiento en superficie, en la cual el agua subterránea contaminada sea transferido a un aislamiento o confinamiento para su posterior tratamiento aplicando el método de la adsorción en carbón o tratamiento biológico para los compuestos orgánicos, y métodos físicos – químicos para los inorgánicos. Posteriormente, esta agua tratada podría ser reincorporada nuevamente al acuífero donde fue extraído. También, se aplicaría la técnica de la fitorremediación a través de especies de plantas capaces de remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir sustancias químicas dañinas o compuestos contaminantes contenidos en el suelo, lodos, sedimentos y en las aguas subterráneas. Para el ámbito geográfico de la quebrada Yuracyacu se podría utilizar como fitorremediación la especie vegetal *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty, por ser una planta herbácea y perenne que tolera sequías, inundaciones, temperaturas extremas (14 °C – 60 °C), pH (3 – 11), salinidad, sodicidad, acidez y hasta soporta la presencia de Al, As, Cd, Cu, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, Se y Zn presentes en el suelo. El presupuesto referencial que se ha estimado para la ejecución de la remediación con las obras estructurales y no estructurales es de S/. 1 425 790,71 Soles.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar una vigilancia de la calidad del agua subterránea en los piezómetros y pozos de observación establecidos en el presente estudio de manera trimestral, dada la importancia del uso de este recurso para los seres vivientes de la zona, y para establecer alertas tempranas ante un suceso de lixiviado de la presa relavera.
2. Obtener datos necesarios y requeridos para la realización de estudios hidrogeológicos y sanitarios, que cuantifiquen la disponibilidad de agua presente en el acuífero, así como su posibilidad de aprovechamiento como una fuente alterna de agua apta para consumo humano.
3. Utilizar el software Visual MODFLOW y similares para realizar estudios de simulación de transportes contaminantes con el objetivo de predecir posibles puntos de alteraciones de calidad de aguas subterráneas que podrían contaminarse, en la cual podrían perjudicar su uso para la población de la zona afectada y en consecuencia la salud de las personas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhilash, PC; Pandey VC; Srivastva P; Rakesh PS; Chandran, S; Singh N; Thomas, AP . 2009. Phytofiltration of cadmium from water by *Limnocharis flava* (L.) Buchenau grown in free-floating culture system. *J. Haz. Mat.* 170:791–797.
- Alfaro Mori, P.J. 2004. Evaluación de factores edáficos que determinan la bioacumulación de plomo (Pb) en rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y rye grass perenne (*Lolium perenne* L.).
- Aliaga, A; Urbina, L. 2015. Análisis de licuación dinámica de una presa de relaves recrecida aguas arriba. Tesis de grado. Lima, PE. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 107 p.
- Alloway. 1968. Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements. *Adv. Agron.*, 20: 235-274.
- Alloway, B.1995. Chapter 2: Soil process and the behavior of the heavy metals. In: Alloway, B. (ed.) *Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional, London, 2nd edition.
- Almerco, D. 2014. Construcción de dique con tratamiento del relave, en mina Catalina Huanca – Región Ayacucho. Tesis de grado. Lima, PE. Universidad San Martín de Porres. 146 p.
- Auge, M. 2008. Métodos geoelectrónicos para la prospección de agua subterránea. (en línea). Buenos Aires, AR. Universidad de Buenos Aires. Consultado 12 ago. 2016. Disponible en <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>

- Barbecho, J.; Calle, J. 2012. Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del río Tarqui. Tesis de grado. Cuenca, EC. Universidad de Cuenca. 134 p.
- Bautista, F. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México.
- Bedoya, J. 2007. Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo. Tesis de grado. Bogotá, CO. Universidad de La Salle. 131 p.
- Bellino, N. 2012. Aguas subterráneas: conocimiento y evaluación. (en línea). Buenos Aires, AR. Universidad de Buenos Aires. Consultado 15 jun. 2016. Disponible en <http://www.fi.uba.ar/archivos/aguasubterraneas-2012.pdf>
- Callirgos, C. 2014. Evaluación de la capacidad fitorremediadora de la especie *Chrysopogon zizanioides* mediante la incorporación de enmiendas en relaves mineros. Tesis de grado. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 118 p.
- Campo, E.A. del; Rodríguez, V.; Fernández, L.V. 2014. Impacto ambiental de la minería de carbón en ecosistemas acuáticos. Madrid, ES. Instituto Geológico y Minero de España. 503 p.
- Cárcamo, VE. 2010. Evaluación de la eficacia de diferentes enmiendas en la rehabilitación de suelos ácidos y contaminados con metales y metaloides en el valle del Puchuncavi, Región de Valparaíso, Chile.
- Chan, DY; Hale, BA. 2004. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and a retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*.

- Chávez, C.M. 2016. Caracterización y modelación del transporte de Cromo total en la cuenca alta del río Bogotá tramo – Stock 440 – Puente Hacienda. Tesis de grado. Bogotá, CO. Universidad de los Andes. 61 p.
- Chen, MF; Chen, TY. 2003. Side-chain charge effects and conductance determinants in the pore of CIC-0 chloride channels, *J Gen Physiol* 122: 133-145 / The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil *Chemosphere* 50; 807-811.
- Collazo M.; Montaña, J. 2012. Manual de agua subterránea. Montevideo, UY. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de Desarrollo Rural. 121 p.
- Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales, ES. 2011. Análisis de Herramientas de evaluación de la difusión y comportamiento de agentes químicos en el marco de la normativa de Responsabilidad Medioambiental. Madrid, ES. 90 p.
- Cruces, J.; Martínez, L. 2007. Modelos matemáticos en hidrogeología: módulo I contaminación ambiental. (en línea). Lima, PE. SGS. Consultado 10 may. 2016. Disponible en <https://www.eoi.es/es/file/18397/download?token=AcGUsofQ>
- Daza, F.A. 2012. Métodos geoelectrónicos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales. Tesis de grado. Concepción, CL. Universidad de Concepción. 256 p.
- Defensoría del Pueblo. 2005? Guía ambiental para el manejo de relaves mineros. (en línea). Lima, PE. Defensoría del Pueblo. Consultado 15 may. 2016. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/compendio-manejo.pdf>
- Díaz, B.E. 2004. Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha-Tunjuelo-Canoas. Tesis Mag. Bogotá, CO. Universidad de los Andes. 149 p.

- Diez Lázaro, J. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas, Universidad De Santiago de Compostela Departamento De Edafología y Química Agrícola. Tesis Doctoral.
- Donado, L. 2002. Aplicación de visual MODFLOW para el modelamiento numérico del flujo de agua subterránea en el acuífero Morroa (Sucre – Córdoba). Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia. 13 p.
- ELAW (Alianza Mundial de Derecho Ambiental, USA). 2010. Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros. Eugene, Oregon, US. 132 p.
- Espinoza, C. 2009. Movimiento del agua subterránea. (en línea). Santiago, CL. Universidad de Chile. Consultado 25 ago. 2016. Disponible en https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/CI51J/1/material_docente/
- Espinoza VG. 2000. Tolerancia a la Toxicidad de Zn, Cu y Pb en plantas silvestres asociadas a suelos contaminados por la actividad minera. Tesis.Lima. Perú . Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Estrada, O. 2009. Modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas para la gestión conjunta del recurso hídrico. Tesis Mag. Medellín, CO. Universidad Nacional de Colombia. 83 p.
- Fernández, L.; Fernández, J.A.; López, J.A. eds. 2004. Protección de las aguas subterráneas frente a vertidos directos e indirectos. Madrid, ES. Instituto Geológico y Minero de España. 325 p. (Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, no. 13).
- Gallo, I.A. 2011. Estudio de impacto ambiental en la minera Yanacocha Oeste. Informe final de investigación. Callao, PE. Universidad Nacional del Callao. 44 p.
- González, D; Zapata, O. 2008. Mecanismo de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas, ISSN (Versión impresa): 0366-2128, Boletín de la Sociedad Botánica de México, Sociedad Botánica de México, A. C. México.

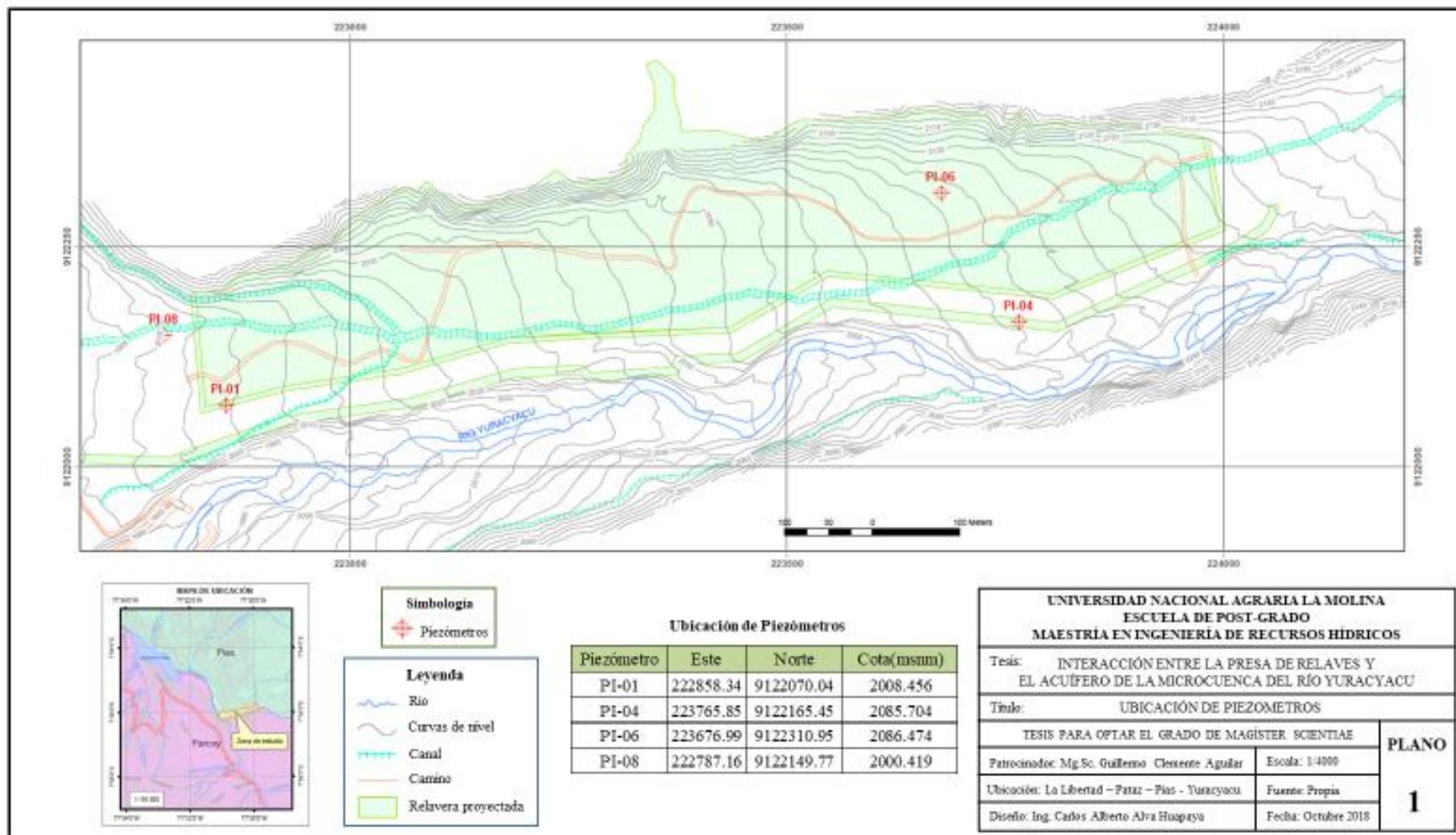
- González, L.; González, A. y Mardones, M. 2003. Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista Geológica de Chile* [online]. 30 (1): 03-22.
- Guzmán, A.; Marta C. 2007. La contaminación de suelos y aguas: su Prevención con nuevas sustancias naturales. Universidad de Sevilla.
- Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, M. 2010. Metodología de la investigación. 5 ed. México, MX. The McGraw-Hill Companies. 656 p.
- Hodgson, JF; Lindsay WL; Trierweiler, J.F. 1966. Micronutrient cation complexing in soils solution: II Complexing of zinc and copper in displaced solution from calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 723-726.
- Juárez, E.; Rico, A. 1974. Mecánica de suelos: Flujo de agua en suelos. México, MX. Limusa. Tomo III, 436 p.
- Juwarkar, AA; Yadav, SK; Thawale, PR; Kumar, GP; Singh, SK; Chakrabarti, T. 2009. Developmental strategies for sustainable ecosystem on mine spoil dumps: a case study. *Environ. Monit. Assess.* (doi:10.1007/ s10661-008-0549-2).
- León, P.; Carignán, M.A.; Lazcano, M.A.; Doherty, K.B. eds. 2015. Participación pública, minería y medio ambiente. Ensenada, B.C., MX. Centro Mexicano para la Defensa del Medio Ambiente A.C., Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). 112 p.
- MMSD (Mining, Minerals and Sustainable Development, GB). 2002. Minería, minerales y desarrollo sustentable. (en línea). Londres, GB. Earthscan Publications. Consultado 25 jun. 2016. Disponible en <http://pubs.iied.org/pdfs/9287IIED.pdf>
- Murillo, J. 2004. Recarga de acuíferos-Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos-Acuífero aluvial del bajo Guadalquivir. Tesis Doctoral. Madrid, ES. Universidad Politécnica de Madrid. 804 p.

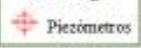
- Navarro, JP; Aguilar, JR; López. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas Departamento de Biología Vegetal. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera.46022, Valencia. ISSN 1697-2473, Vol. 16, N°. 2.
- Núñez, J. 2000? Aplicación de los modelos matemáticos de flujo y transporte de contaminantes para el diseño de sistemas de remediación. (en línea). Madrid, ES. s.n.t. Consultado 13 jul. 2016. Disponible en <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib15/034.pdf>
- Oyarzún, R. 2007. Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. (en línea). Coquimbo, CL. Consultado 15 jun. 2016. Disponible en <http://www.aulados.net/>
- Ramírez, A. s/f. Metodología de la investigación científica. (en línea). Bogotá, CO. Pontificia Universidad Javeriana. Consultado 20 mar. 2016. Disponible en <http://www.postgradoune.edu.pe/documentos/ALBERTORAMIREZMETODOLOGIADELAINVESTIGACIONCIENTIFICA.pdf>
- Raskin, I.; Kumar, N.P.B.A.; Dushenkov, S. & Salt, D.E. 1994. Bioconcentration of heavy metal by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 5: 285-290.
- Rodríguez, R.; Oldecop, L.; Linares, R.; Salvado, V. 2009. Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. 12(24): 07-25.
- Romero, A.; Flores, S.; Medina, R. 2008. Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. 11(22):13-16.
- Romero, A.; Lovera, D. 2005. Aplicación de las diferencias finitas para el flujo de contaminantes en el acuífero de Ayamonte. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*. 8(15):98-109.

- Salas, H. 1984. Criterio para selección de modelos matemáticos. (en línea). Lima, PE. CEPIS/OPS. Consultado 20 jun. 2016. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt021.html>
- Sauquillo, A; Rigol, A; Rauret, G. 2003. Overview of the use of Leaching/Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends in Analytical Chemistry.
- SEA (Servicio de Evaluación Ambiental, CL). 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Santiago, CL. 108 p.
- Vives, L.; Mancino, Ch.; Scioli, C. 2012. Modelo conceptual y numérico del flujo de agua subterránea de la cuenca del río Matanza-Riachuelo. Buenos Aires, AR. Instituto de Hidrología de Llanuras. 227 p.
- Volke, T; Velásco, J. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto nacional de Ecología.
- Wagner, GJ. 1993. Accumulation of heavy metals in crop plants and its consequence to human health. Adv. Agron. 51, 173-177.

ANEXOS:

Plano 1	: Ubicación de piezómetros
Plano 2	: Geología
Plano 3	: Geomorfología
Plano 4	: Ubicación de SEVS
Plano 5	: Isobatas
Plano 6	: Isopacas
Plano 7	: Isoprofundidad del agua subterránea
Plano 8	: Hidroisohipsas
Plano 9	: Secciones hidrogeológicas
Plano 10	: Isoconductividad hidráulica
Plano 11	: Hidrogeoquímica



Símbología
 Piezómetros

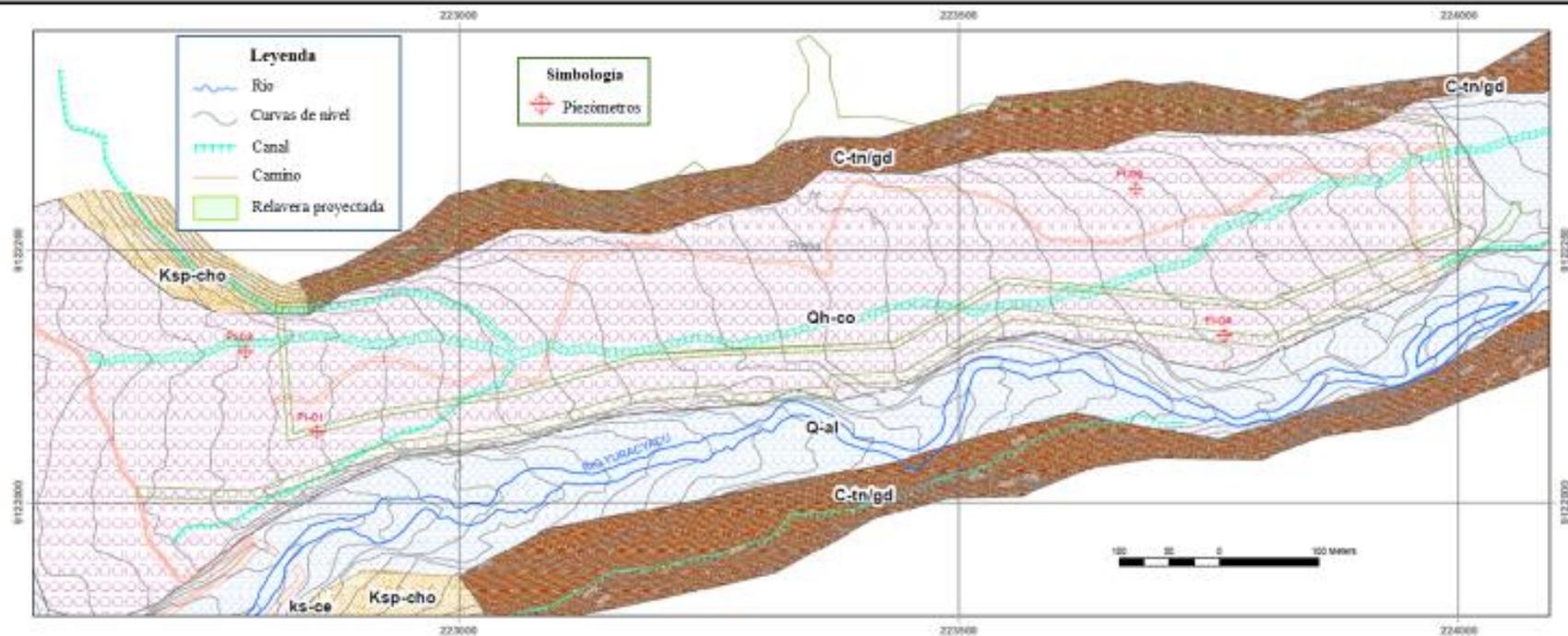
Leyenda

-  Río
-  Curvas de nivel
-  Canal
-  Camino
-  Relavera proyectada

Ubicación de Piezómetros

Piezómetro	Este	Norte	Cota(msnm)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA		PLANO
ESCUELA DE POST-GRADO		
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS		
Tesis: INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU		1
Título: UBICACIÓN DE PIEZOMETROS		
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE		
Patrocinador: Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar	Escola: 14000	1
Ubicación: La Libertad - Pataz - Páez - Yuracacu	Fuente: Propia	
Diseño: Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya	Fecha: Octubre 2018	



ERA/TEMPO	SISTEMA	EPOCA	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	ROCAS INTRUSIVAS	DESCRIPCION
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Q-al		Depósito aluvial
			Qh-co		Depósito coluvial
	CRETÁDICO	SUPERIOR	Ksp-cho		Areniscas de grano fino a medio
			ks-ce		Calizas con intercalaciones de margas y lutitas
PALEOZOICA	CARBONIFERO	MISSISSIPIANO		C-ty/gd	Tonalita - granodiorita
				C-mgr	Monzogranito

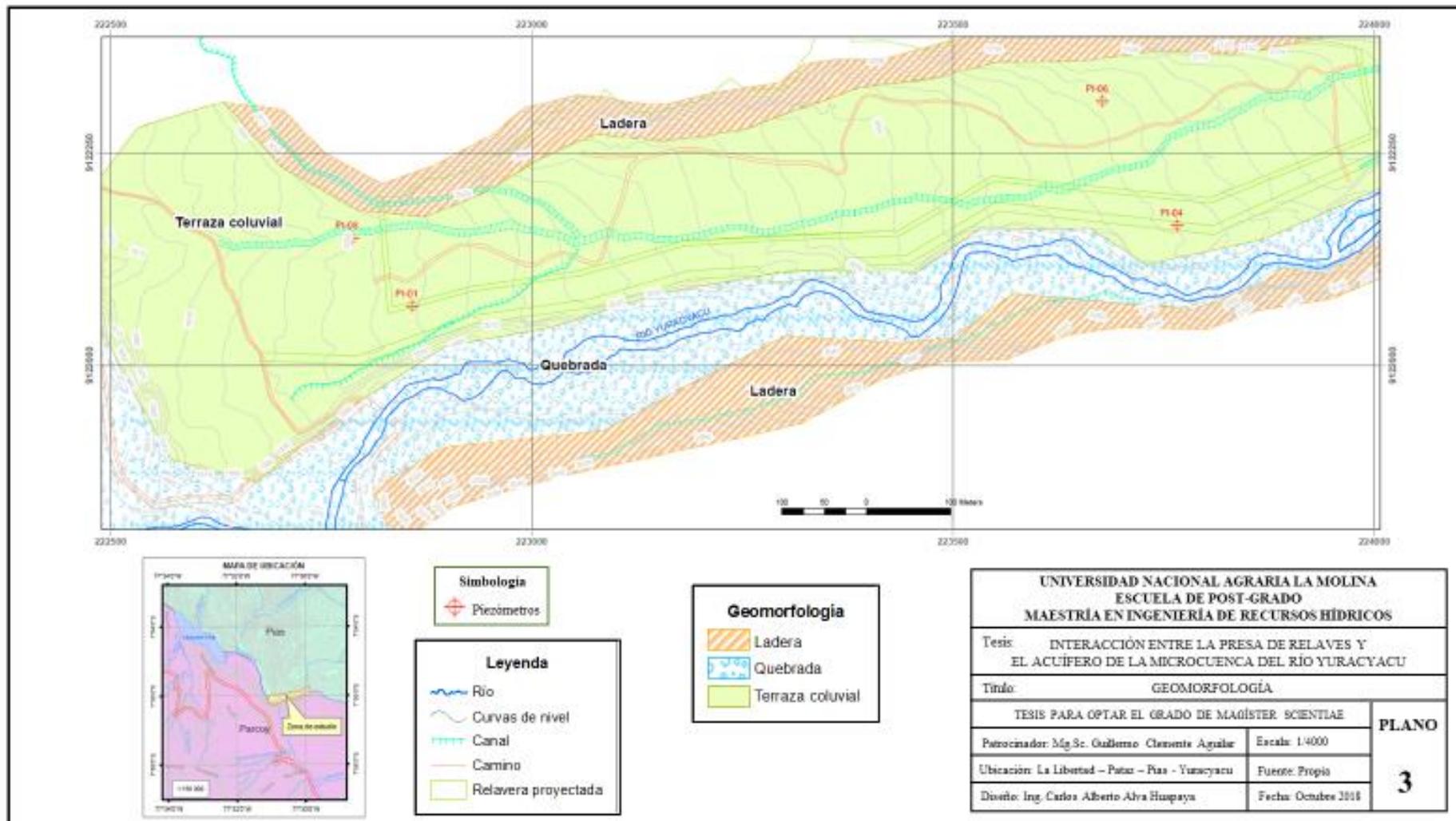
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POST-GRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HIDRICOS

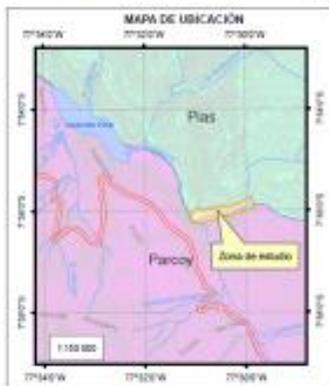
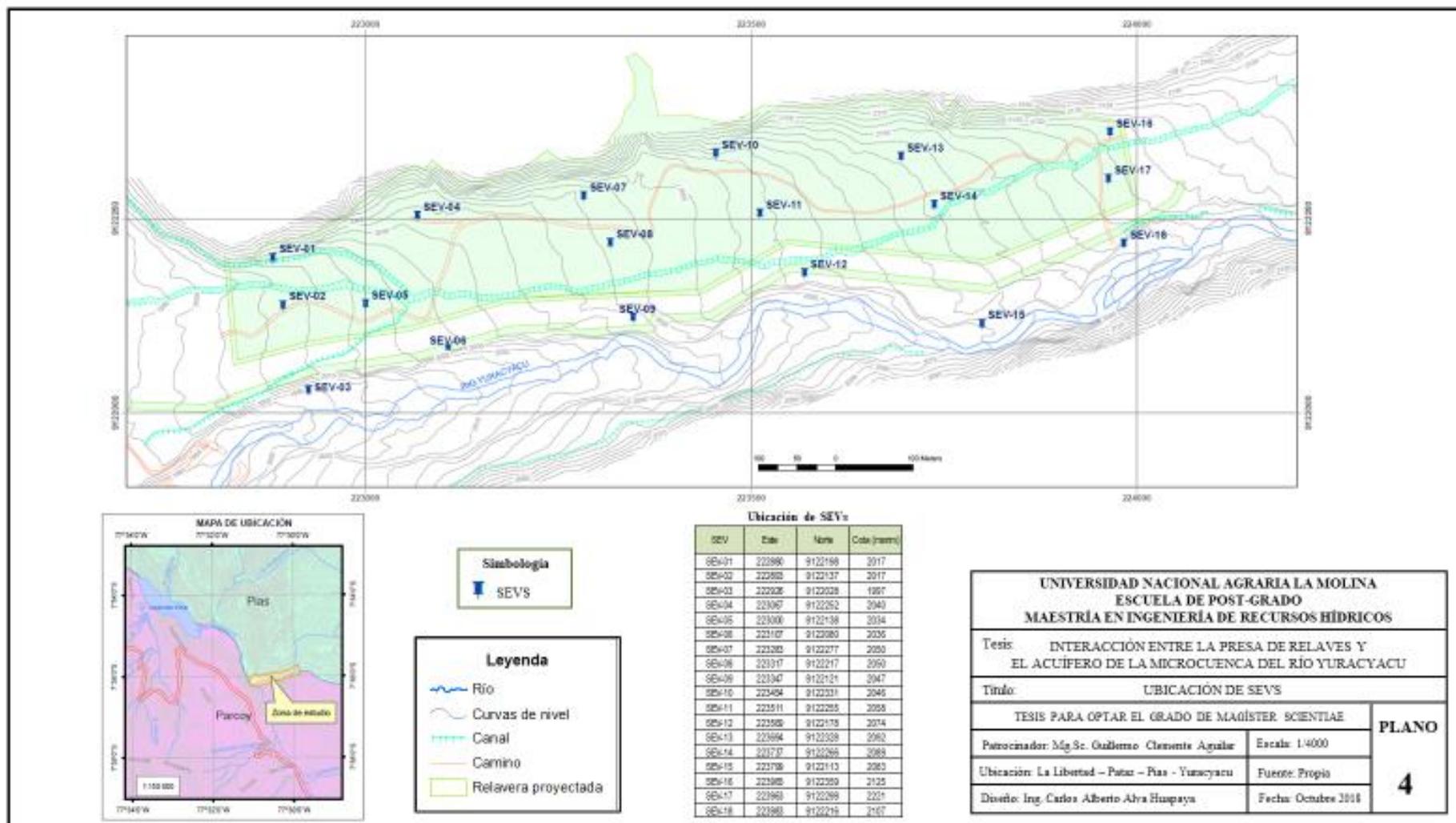
Tesis: **INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU**

Título: **GEOLOGÍA**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRÍA SCIENTIAE

Patrocinador: Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar	Escala: 1:4000	PLANO 2
Ubicación: La Libertad - Patate - Pisco - Yuracyacu	Fuente: Propia	
Diseño: Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya	Fecha: Octubre 2016	





Simbología

SEV's

Leyenda

- Río
- Curvas de nivel
- Canal
- Camino
- Relavera proyectada

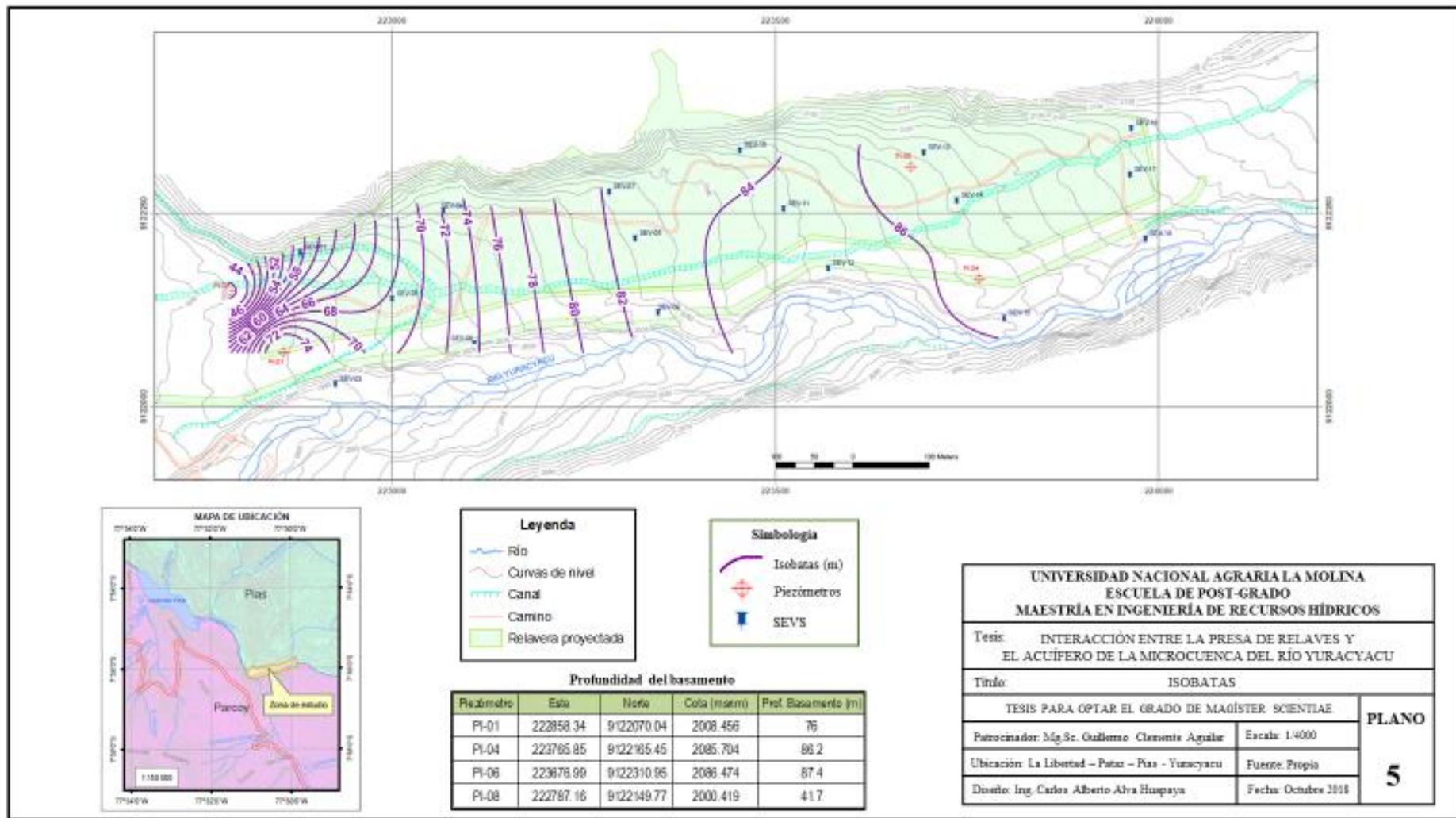
Ubicación de SEV's

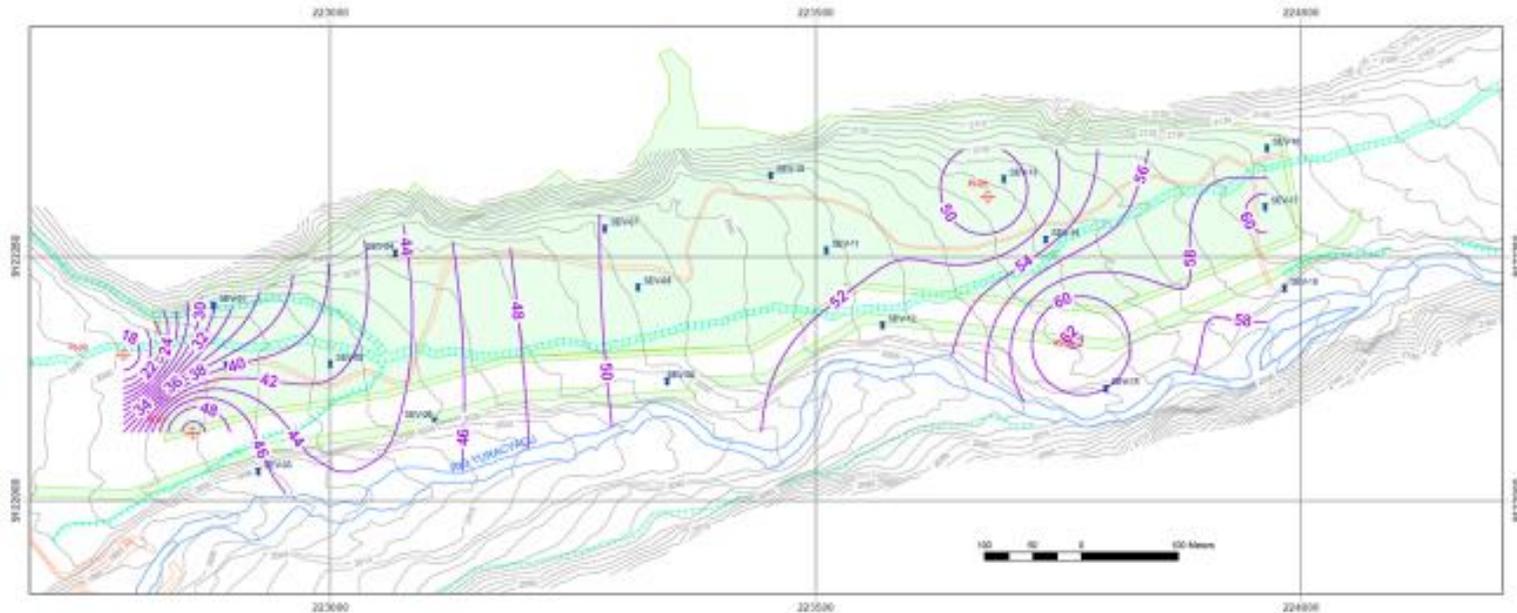
SEV	Elev	Nota	Cota (norm)
SEV-01	222980	9122198	2017
SEV-02	222880	9122137	2017
SEV-03	222028	9122028	1987
SEV-04	223067	9122262	2040
SEV-05	223000	9122138	2034
SEV-06	223107	9122080	2036
SEV-07	223280	9122277	2050
SEV-08	223307	9122217	2050
SEV-09	223347	9122121	2047
SEV-10	223404	9122331	2045
SEV-11	223511	9122285	2058
SEV-12	223588	9122178	2074
SEV-13	223684	9122328	2062
SEV-14	223707	9122366	2068
SEV-15	223758	9122113	2063
SEV-16	223985	9122350	2125
SEV-17	223980	9122288	2021
SEV-18	223880	9122216	2167

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POST-GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS	
Tesis: INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU	
Título: UBICACIÓN DE SEV'S	
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRÍA SCIENTIAE	
Patrocinador: Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar	Escala: 1:4000
Ubicación: La Libertad - Pataz - Pías - Yuracyacu	Fuente: Propia
Diseño: Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya	Fecha: Octubre 2018

PLANO

4

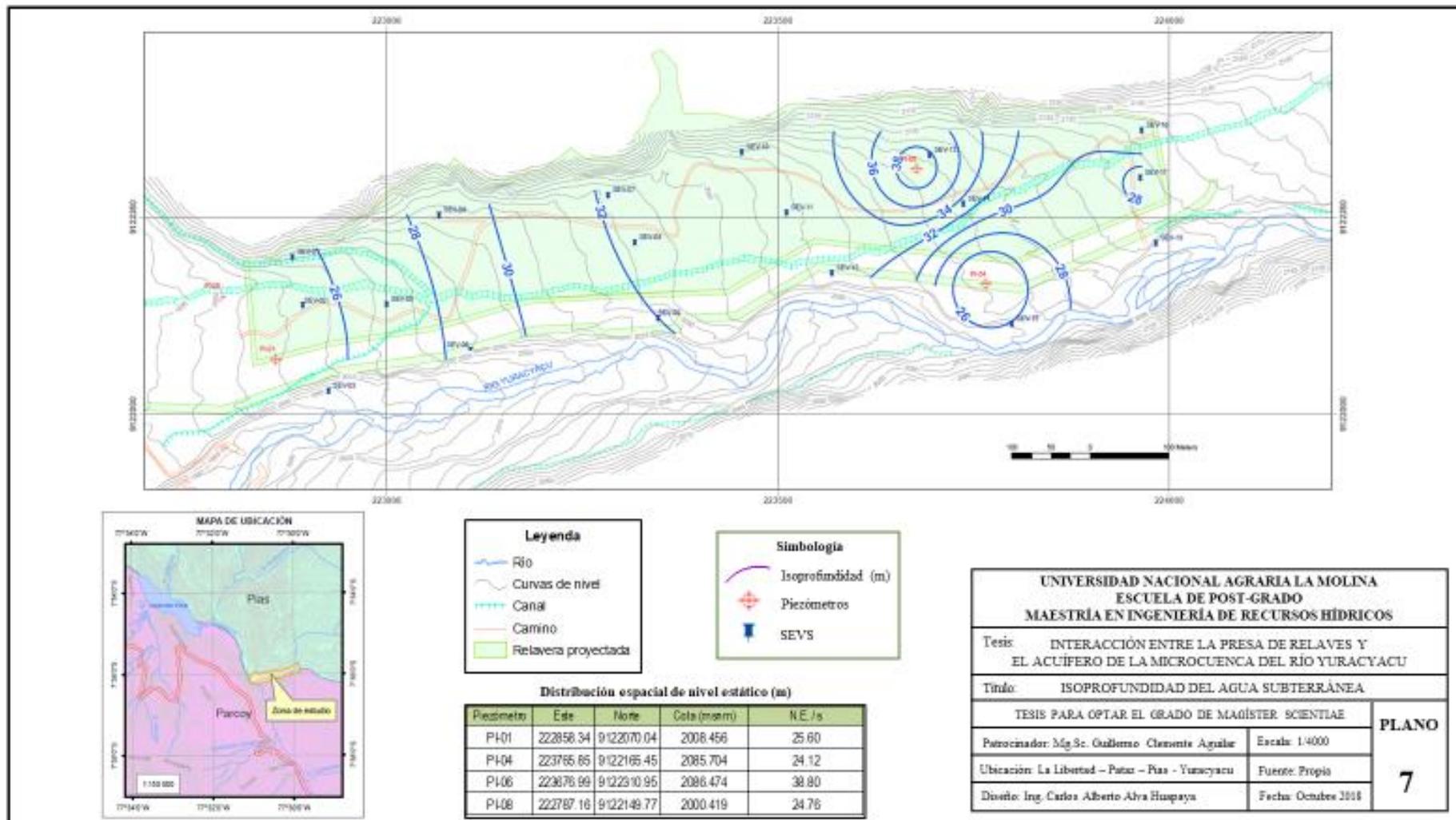


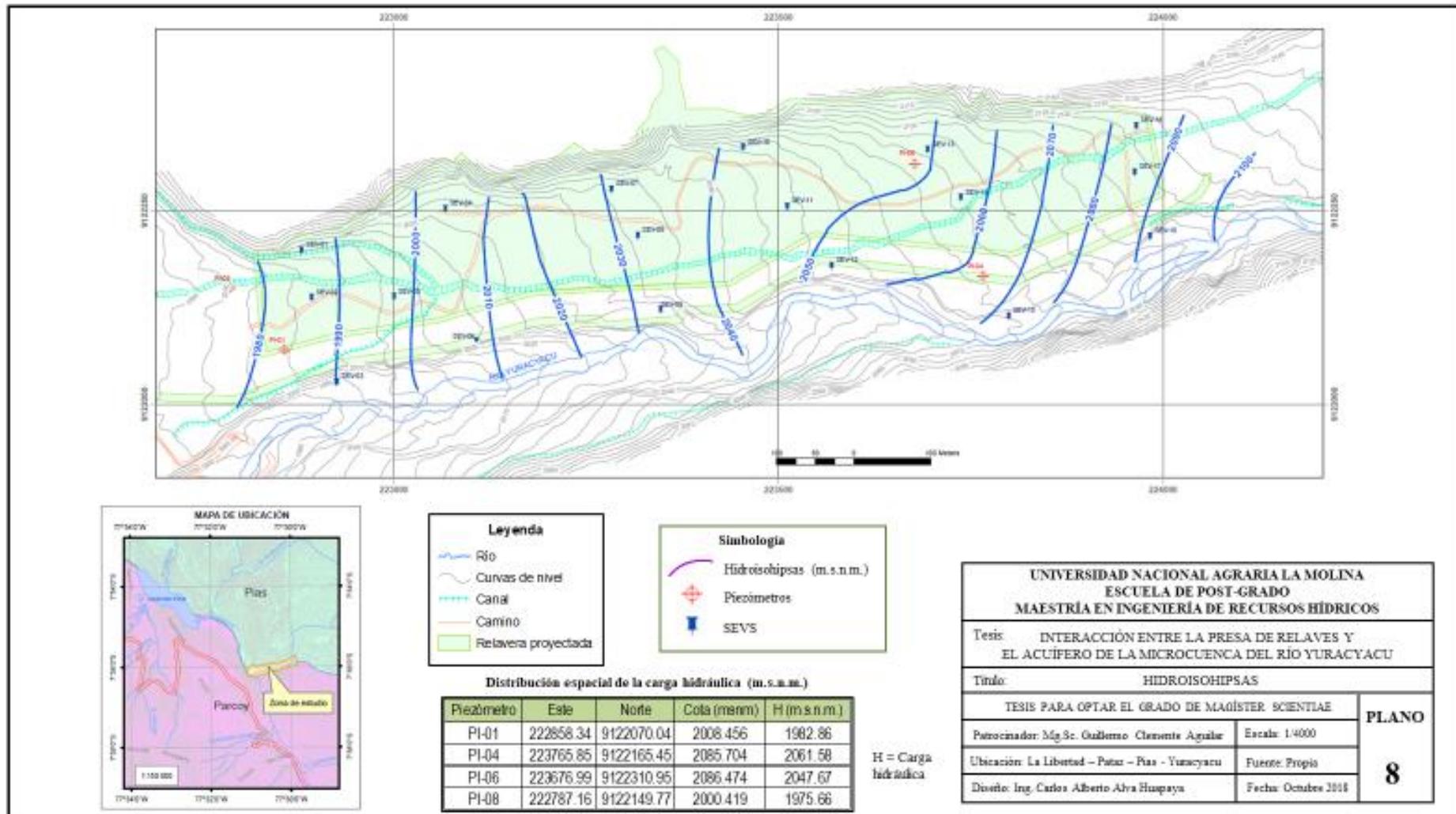


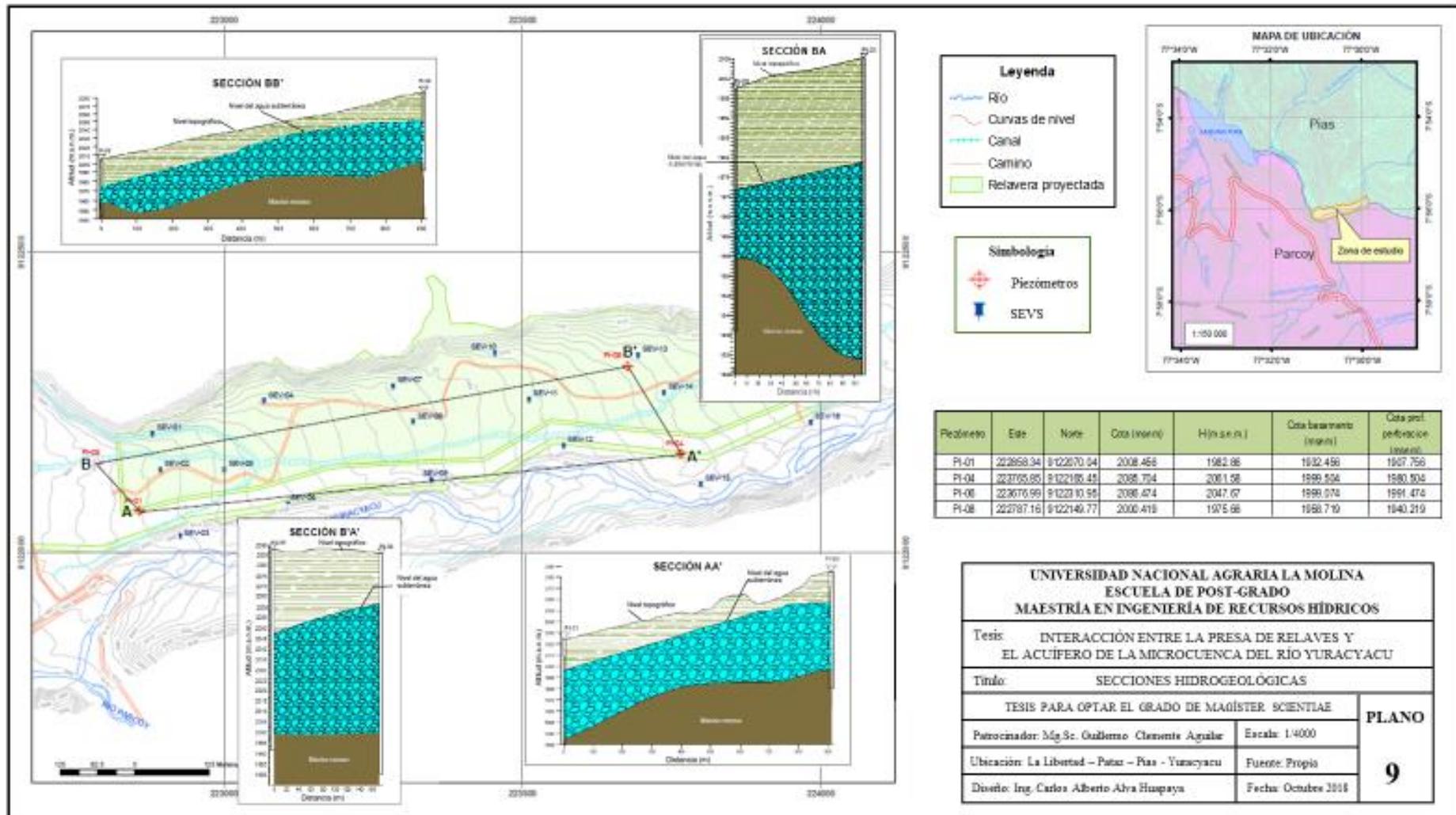
Espeor del acuífero

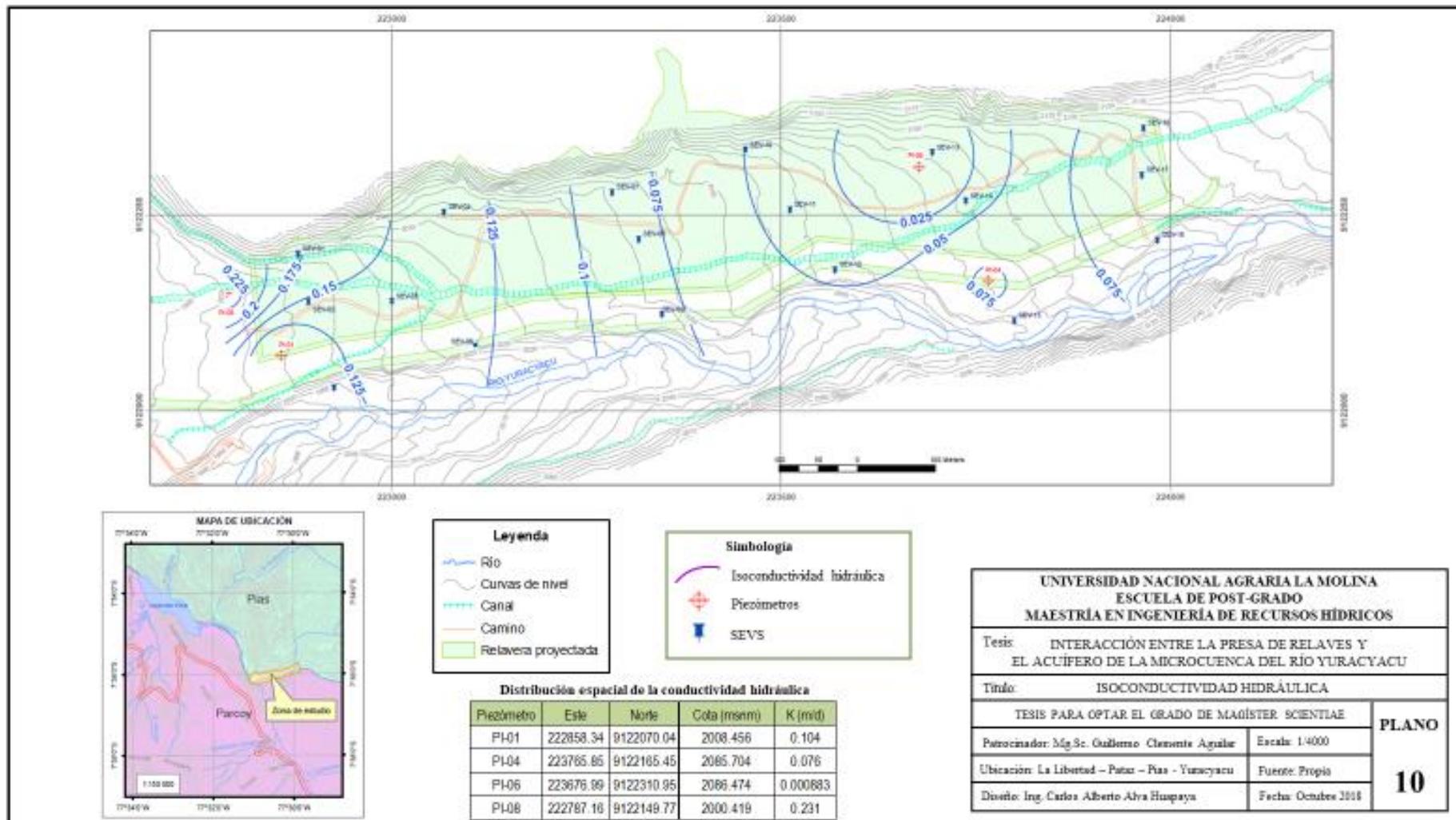
Piezómetro	Este	Norte	Cota (msnm)	Espeor acuífero (m)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	50.4
PI-04	223765.65	9122165.45	2085.704	62.08
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	48.6
PI-08	222767.16	9122149.77	2000.419	16.945

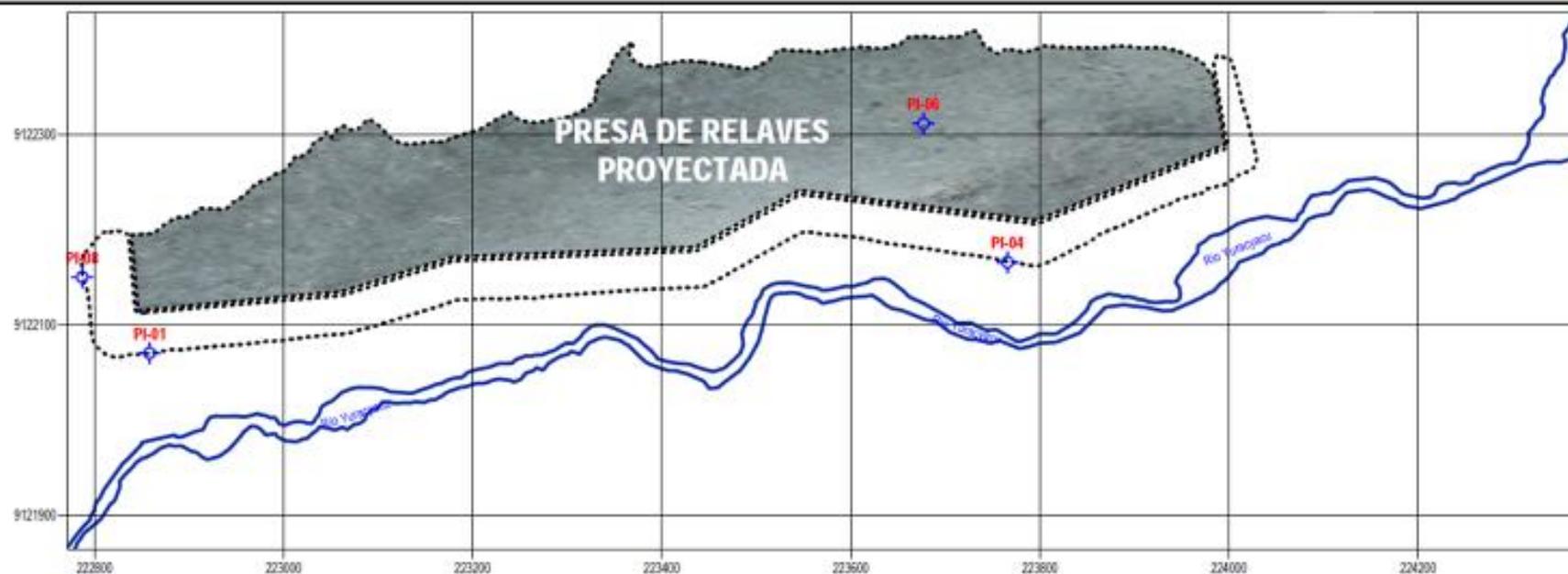
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POST-GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS	
Tesis: INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU	
Título: ISOPACAS	
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRÍA SCIENTIAE	
Patrocinador: Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar	Escala: 1/4000
Ubicación: La Libertad - Pinar - Ptas - Yuracyacu	Fuente: Propia
Diseñó: Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya	Fecha: Octubre 2014
PLANO 6	











Leyenda	
	Presa de relaves proyectada
	Curso del río Yuracyacu
	Piezómetro

Piezómetro	Coordenadas		Cota (msnm)	ph	C.E (µ/cm)
	Este	Norte			
PI-01	222858	9122070	2008	7.00	163.6
PI-04	223766	9122165	2086	7.81	132.3
PI-06	223677	9122311	2086	7.26	179.3

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POST-GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS	
Tesis: INTERACCIÓN ENTRE LA PRESA DE RELAVES Y EL ACUÍFERO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO YURACYACU	
Título: HIDROGEOQUÍMICA	
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER SCIENTIAE	
Patrocinador: Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar	Escala: 1/5000
Ubicación: La Libertad - Patate - Písa - Yuracyacu	Fuente: Propia
Diseño: Ing. Carlos Alberto Alva Huapaya	Fecha: Octubre 2018

PLANO

11