

## Interacción entre la presa de relaves y el acuífero de la microcuenca del río Yuracyacu en la Región La Libertad del Perú

**Carlos Alberto Alva Huapaya**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0983-3151>

[caahrhh@yahoo.es](mailto:caahrhh@yahoo.es)

MSc. en Ingeniería de Recursos Hídricos,  
Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

**Guillermo Clemente Aguilar Giraldo**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5543-2618>

[ggc@lamolina.edu.pe](mailto:ggc@lamolina.edu.pe)

Profesor principal del Departamento Académico  
Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola,  
Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

### RESUMEN

La interacción entre una presa de relaves y el acuífero de una microcuenca puede originar una probable ruta de los contaminantes hacia las aguas subterráneas, perjudicando el consumo doméstico y uso en la actividad agropecuaria. Es por ello, el requerimiento de conocer el tiempo del desplazamiento del contaminante en los acuíferos para ser detectados a tiempo y evitar su propagación. El estudio tiene como propósito desarrollar un modelo de simulación del transporte contaminante de un depósito de relaves hacia las aguas subterráneas de la microcuenca Yuracyacu para implementar medidas de prevención y mitigación ambiental. En esta investigación se contempla trabajos de campo y gabinete para obtener información hidráulica y química en la relavera y acuífero, asimismo diseño de modelo conceptual y transporte de contaminante de las aguas subterráneas, el cual se utilizó el software Visual ModFlow 2011.1 que resuelve ecuaciones de diferencias finitas para determinar el flujo del agua en medio poroso. El modelo de la simulación demostró que el transporte contaminante se detectaría en el pozo OBS-1 a los 150 días, en el OBS-2 a los 750 días, y en el OBS-3 llegaría a los 1450 días, por lo que se requiere aplicar medidas preventivas para evitar la ocurrencia y expansión del contaminante, así como también realizar vigilancia de la calidad de agua subterránea y continuar aplicando modelos de simulación de transportes contaminantes en acuíferos.

**Palabras clave:** acuífero; conductividades hidráulicas; diferencias finitas; transporte contaminante; presa de relaves.

## **Interaction between the tailings dam and the aquifer of the Yuracyacu river micro-basin in the La Libertad Region of Peru**

### **ABSTRACT**

The interaction between a tailings dam and the aquifer of a micro-basin can originate a probable route for pollutants to groundwater, damaging domestic consumption and use in agricultural activities. That is why, the requirement to know the time of the displacement of the pollutant in the aquifers to be detected in time and prevent its spread. The purpose of the study is to develop a simulation model of the pollutant transport from a tailings deposit to the groundwater of the Yuracyacu micro-basin to implement environmental prevention and mitigation measures. This research includes field and cabinet work to obtain hydraulic and chemical information in the tailings dam and aquifer, as well as conceptual model design and transport of groundwater pollutant, which was used with Visual ModFlow 2011.1 software that solves difference equations finites to determine the flow of water in a porous medium. The simulation model showed that the contaminant transport would be detected in the OBS-1 well at 150 days, in the OBS-2 at 750 days, and in the OBS-3 it would reach 1,450 days, so it is required apply preventive measures to avoid the occurrence and expansion of the pollutant, as well as monitor the quality of groundwater and continue to apply simulation models of pollutant transport in aquifers.

**Keywords:** aquifer; hydraulic conductivities; finite differences; pollutant transport; Tailings dam.

Artículo recibido: 19 enero 2020  
Aceptado para publicación: 22 febrero  
2020Correspondencia: [caahrhh@yahoo.es](mailto:caahrhh@yahoo.es)  
Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

## **1. 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 (Espinoza, 2009).

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 (Espinoza, 2009).

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 (Aliaga & Urbina, 2015). 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 (Aliaga & Urbina, 2015; Chan & Hale, 2004).

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 (Chávez, 2016). Las propiedades hidrogeológicas del sistema que disminuyen el éxito del bombeo y tratamiento son dos: heterogeneidad del acuífero y la presencia de roca fracturada (Barbecho & Calle, 2012; Chávez, 2016).

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 (Bellino, 2012).

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 (Campo, Rodríguez & Fernández, 2014).

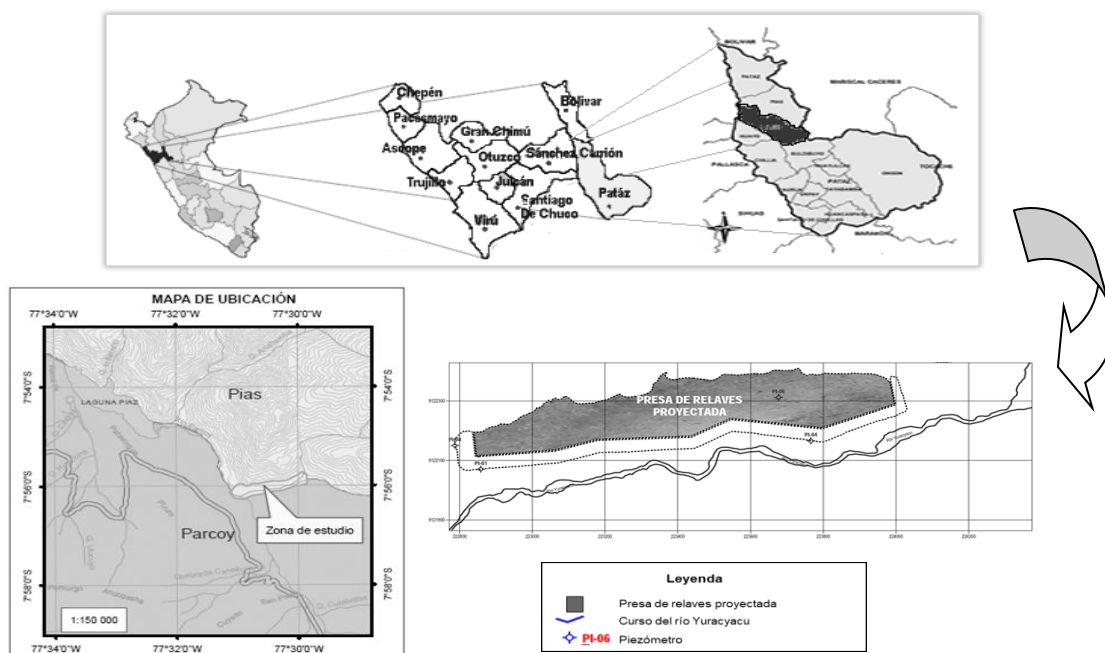
Además, éste estudio tiene como objetivo principal desarrollar un modelo de simulación del transporte de contaminantes de un depósito de relaves hacia las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu para implementar medidas de prevención y mitigación ambiental.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área 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 Pataz, departamento de la Libertad, Perú. 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. El área de estudio se muestra en la

**Figura 1.**



**Figura 1.** Área de estudio. Microcuenca Yuracyacu. (Autores, 2019).

## 2.2 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.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

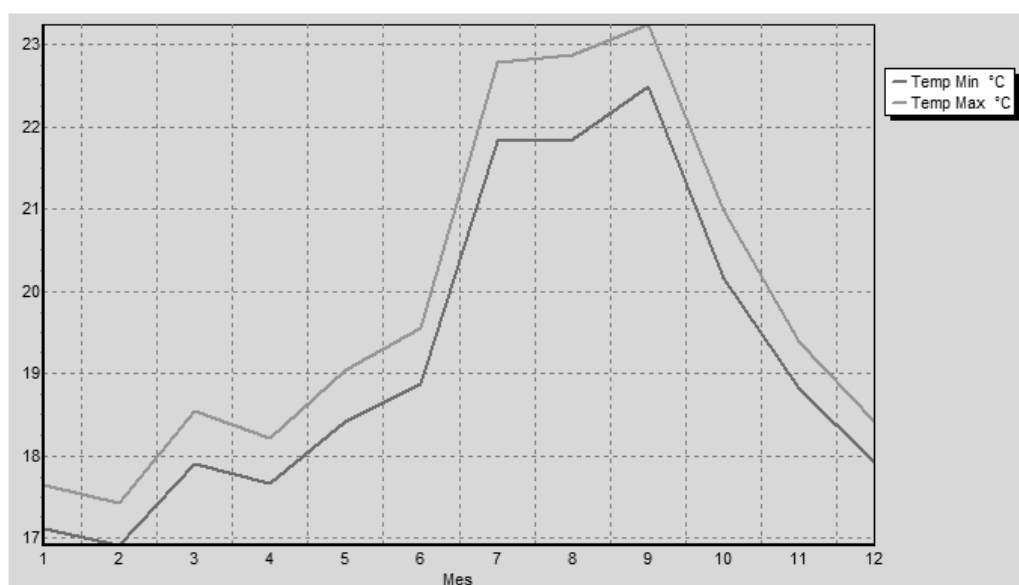
País  Estación

Altitud  m. Latitud  °S Longitud  °W

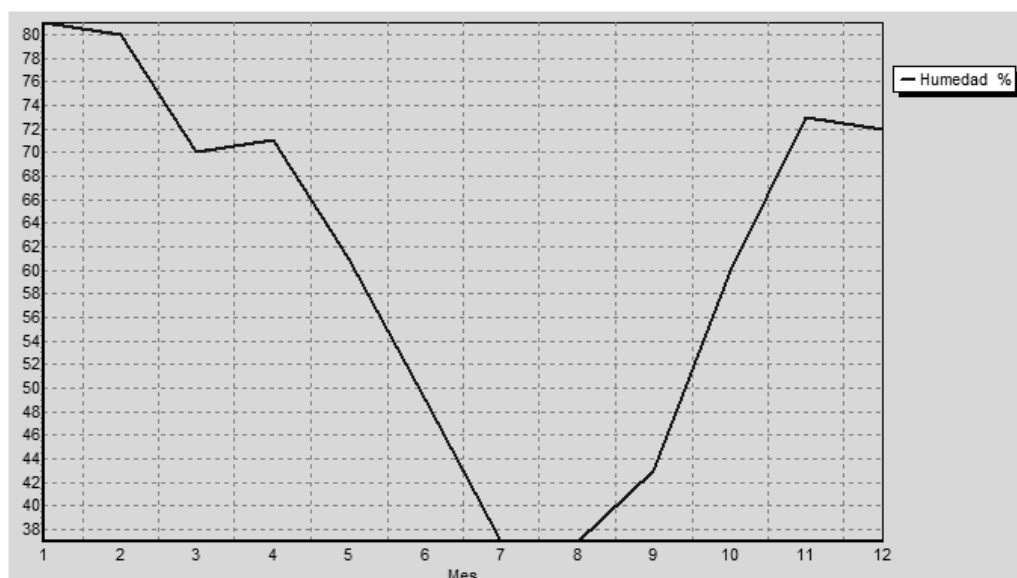
Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	17.1	17.6	81	82	9.4	24.5	4.23
Febrero	16.9	17.4	80	99	9.3	24.5	4.17
Marzo	17.9	18.5	70	101	8.5	22.8	4.13
Abril	17.7	18.2	71	28	9.1	22.2	3.77
Mayo	18.4	19.0	61	110	7.4	18.2	3.45
Junio	18.9	19.6	49	109	6.4	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.

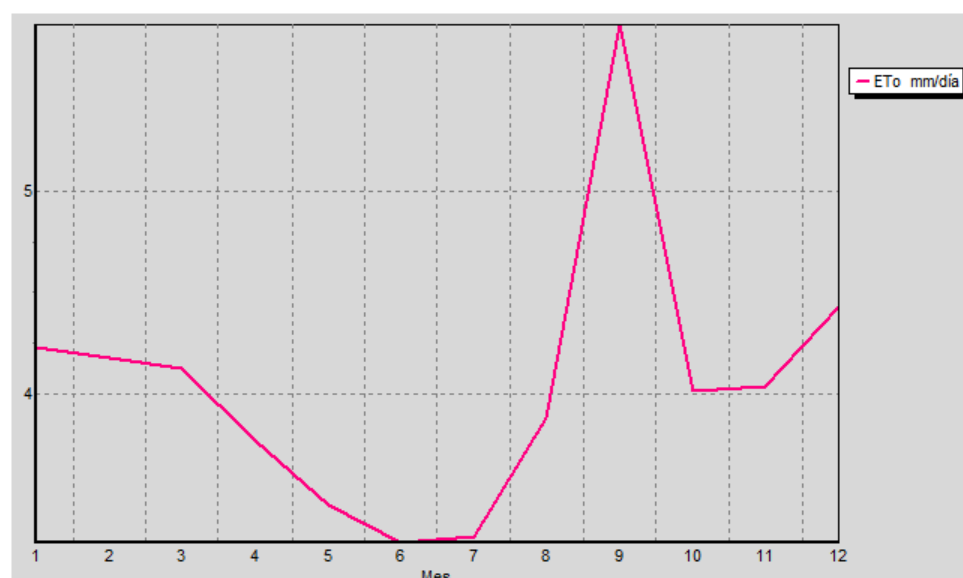
*Fuente de: Autores, 2019.*



**Figura 3.** Temperatura. Fuente de: Autores, 2019.



**Figura 4.** Humedad relativa. Fuente de: Autores, 2019.



**Figura 5.** Evapotranspiración. Fuente de: Autores, 2019.

### 2.3 Caracterización hidrogeológica

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 escorrentía superficial (Collazo & Montaña, 2012; Chen & Chen, 2003).

### 2.3.1 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.

**Tabla 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

**Fuente de:** Autores, 2019

**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)

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 (Daza, 2012).

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 la Tabla 2. 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.

**Tabla 2.** 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

**Fuente de:** Autores, 2019**N.E/pr**= profundidad del nivel estático medido desde el punto de referencia**Pr**= punto de referencia**N.E.** = profundidad del nivel estático

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 la Tabla 3. 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.

**Tabla 3.** 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

**Fuente de:** Autores, 2019**N.E/pr**= profundidad del nivel estático desde el punto de referencia**Pr**= punto de referencia**N.E.** = profundidad del nivel estático**H**= Carga hidráulica (m)**2.3.2 Hidrodinámica**



### ✓ Parámetros hidráulicos del acuífero

Los parámetros hidráulicos del acuífero tales como conductividad hidráulica ( $K$ ), Transmisividad ( $T$ ) y rendimiento específico ( $S_y$ ), fueron obtenidos a partir de las pruebas de acuífero a caudal constante y pruebas como el slug test, el cual consiste en instalar un levellogger a 60 m de profundidad, posteriormente se ingresó una tubería PVC (1" x 6m de longitud) rellena de arena en forma muy rápida, se esperó 5 minutos para que el nivel de agua logre su equilibrio; posteriormente, los datos de descenso fueron interpretados. 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. Las conductividades hidráulicas se hallan comprendidas entre 0.0008 m/día y 0.231 m/día, cuya distribución espacial se muestra en la Tabla 4. 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.

**Tabla 4.** Conductividades hidráulicas estimadas con Slug Test

Piezómetro	Este	Norte	Cota (msnm)	N.E/pr	Profundidad(m)	K(m/d)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	26.42	100.70	0.104
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	24.80	105.20	0.076
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	39.53	95.00	0.00088
PI-08	222787.16	9122149.77	2000.419	25.48	60.20	0.231

**Fuente de:** Autores, 2019

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

**K**= conductividad hidráulica (m/d)

### 2.3.3 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. 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 la Tabla 5, se reporta los valores de conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas.

**Tabla 5.** Conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas

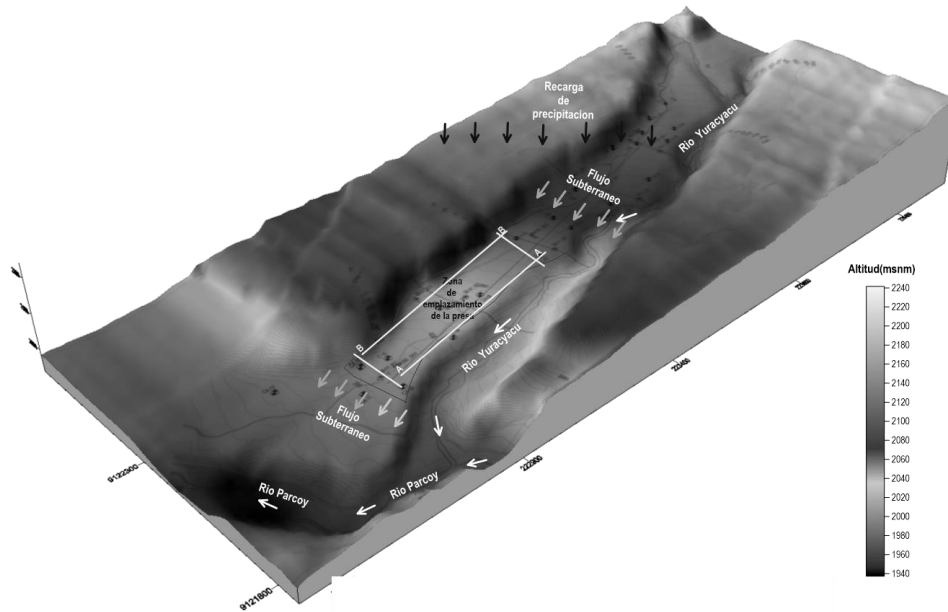
Piezómetro	Este	Norte	Cota (msnm)	pH	C.E.(μS/cm)
PI-01	222858.34	9122070.04	2008.456	7.00	163.6
PI-04	223765.85	9122165.45	2085.704	7.81	132.3
PI-06	223676.99	9122310.95	2086.474	7.26	179.3

Fuente de: Autores, 2019

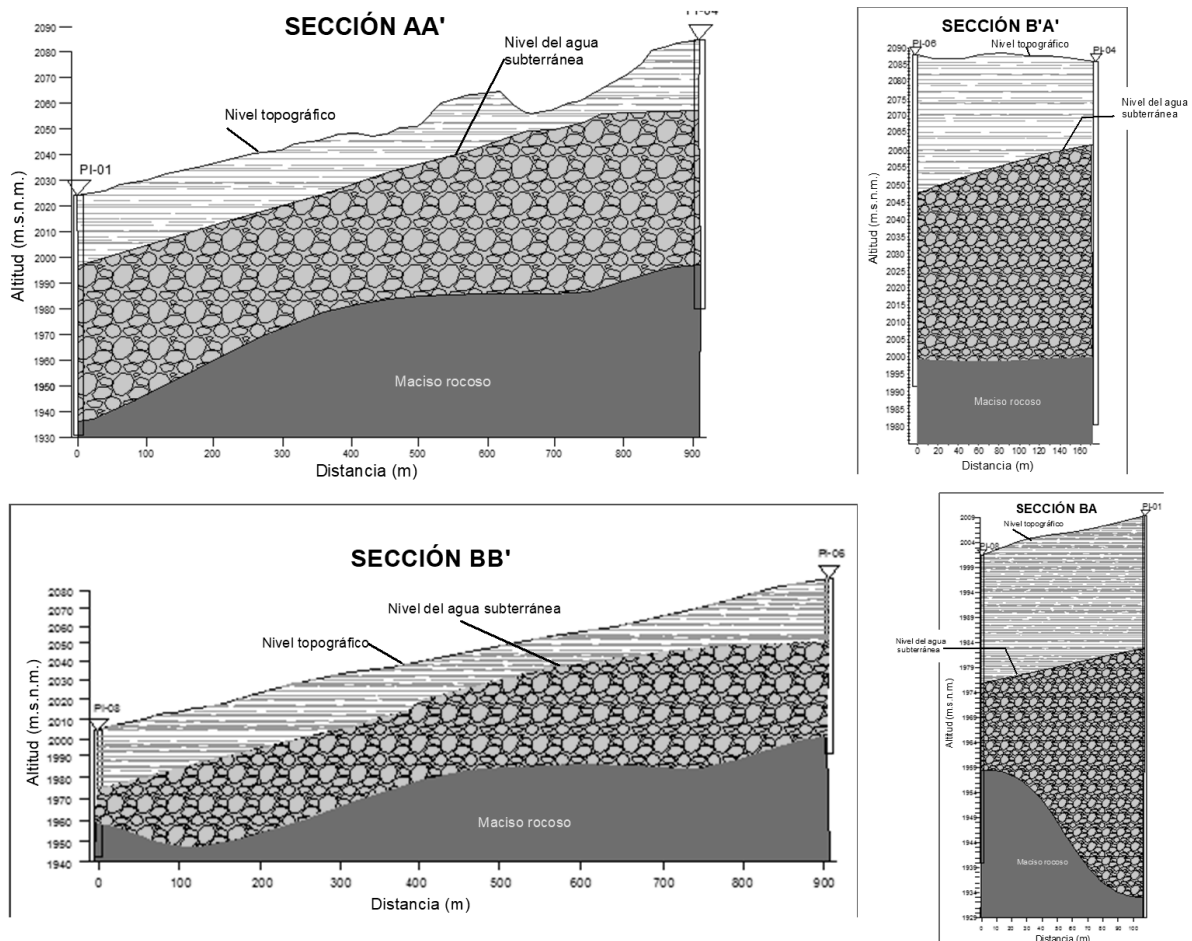
Fecha de medición: 22 de Agosto del 2014. Datum: WGS84 Zona 18 Sur

## 2.4 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 (Vives, Mancino & Scioli, 2012). 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 se ha empleado 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 3 y 4. 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 (Cruces & Martínez, 2007; Espinoza, 2009; Estrada, 2009; Vives, Mancino & Scioli, 2012).



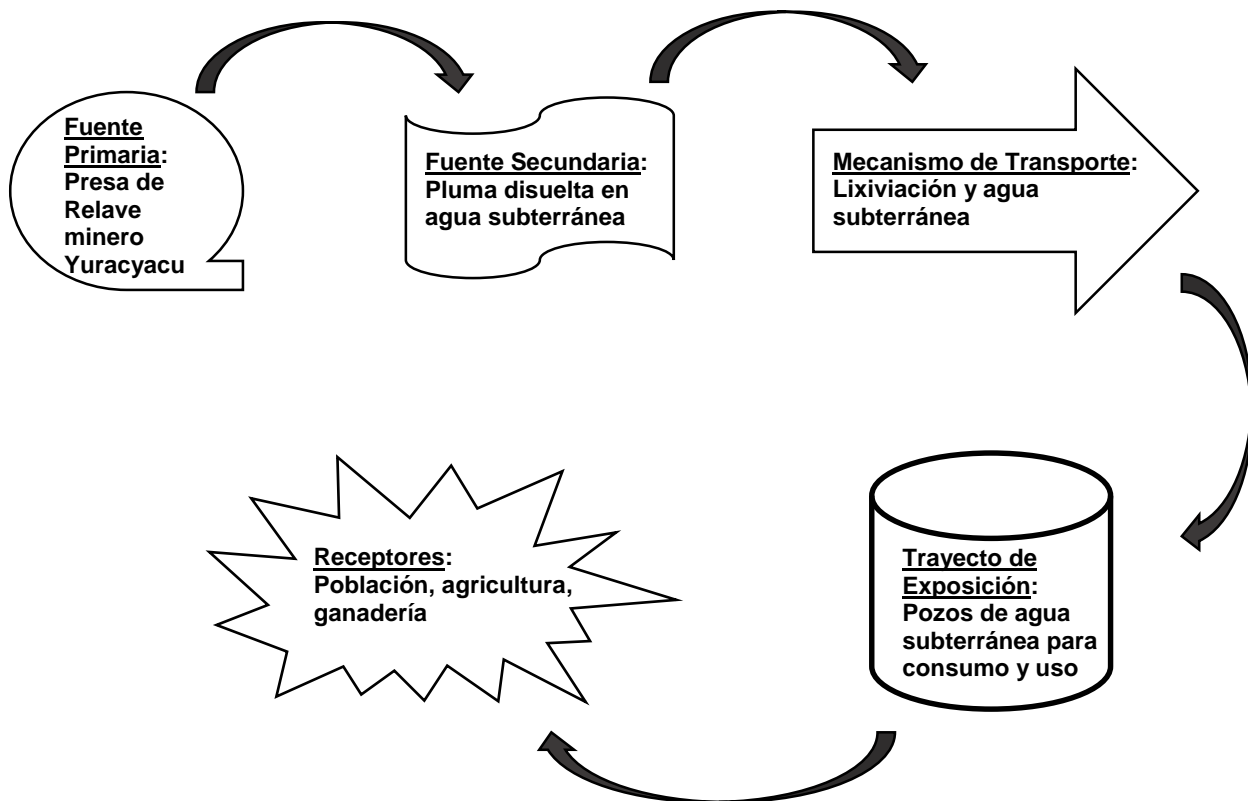
**Figura 3.** Modelo conceptual del sistema acuífero. Fuente de: Autores, 2019.



**Figura 4.** Cortes hidrogeológicos del sistema acuífero. Fuente de: Autores, 2019.

## **2.5 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. 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. 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 5 se puede observar el modelo conceptual del transporte contaminante en las aguas subterráneas de la microcuenca del río Yuracyacu.



**Figura 5.** Modelo conceptual del transporte contaminante en el sistema acuífero. Fuente de: Autor, 2019.

### 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 fue 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 fueron 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 (Oyarzún, 2007). Este modelamiento resuelve la siguiente ecuación diferencial parcial para describir el flujo de agua subterránea bajo condiciones de tiempo variables en un acuífero heterogéneo y anisotrópico:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

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 (1), 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 (1) puede resolverse analíticamente definiendo  $h(x, y, z, t)$ , y sustituyendo las derivadas de  $h$  con respecto al espacio y el tiempo.

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

$$\frac{dC}{dt} = -v * \frac{dC}{dx} + \frac{d}{dx} \left( D * \frac{dC}{dx} \right) + r \quad (\text{Ecuación 2})$$

La ecuación (2) se reescribe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x}$$

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:



$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} * \left( \operatorname{erfc} \left[ \frac{(x-vt)}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}} \right] + \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{(x+vt)}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}} \right] \right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

**D:** coeficiente de dispersión hidrodinámica.

**erfc:** función del error complementario.

**v:** velocidad lineal del agua subterránea.

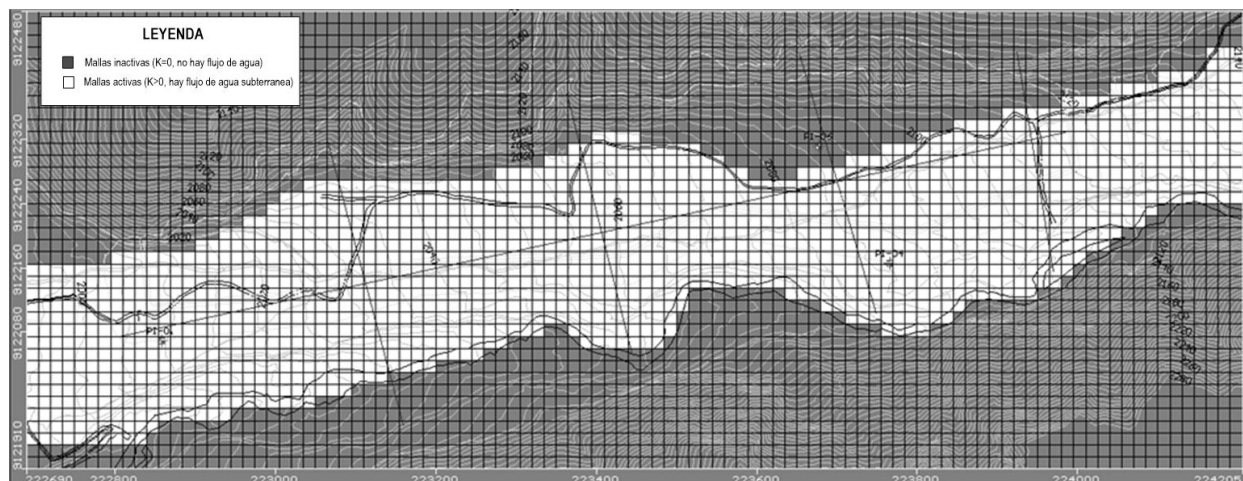
Dado que en la ecuación (3), en su segundo término, suele carecer de importancia para muchas situaciones prácticas, pero si se considera que  $D = \alpha x v$  (al ignorar el efecto de la difusión en la dispersión hidrodinámica), la ecuación (3) puede reescribirse de la siguiente manera:

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

## 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 6.



**Figura 6.** Discretización del sistema acuífero. Fuente de: Autor, 2019.

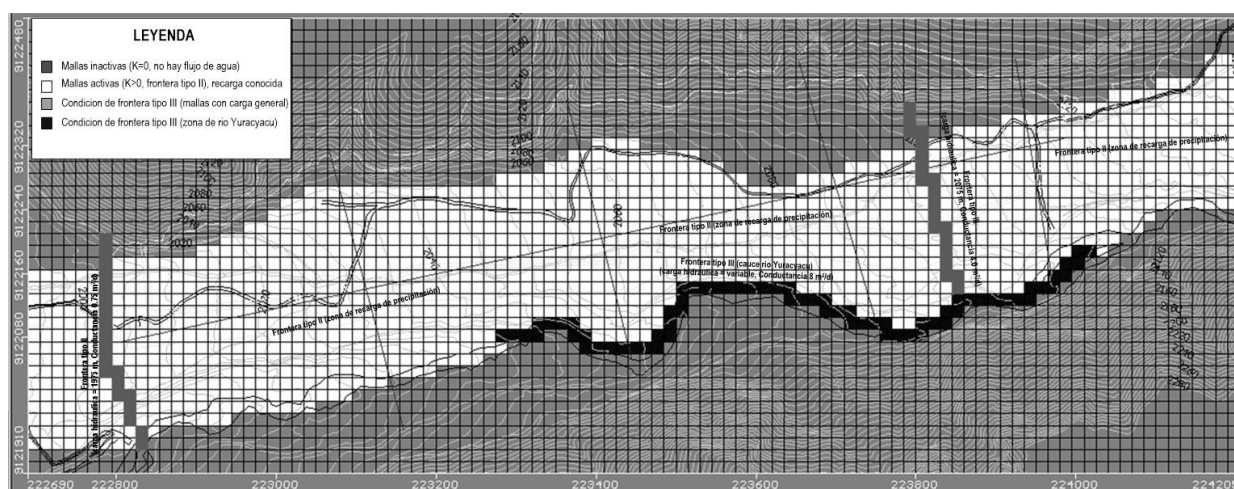
### b. Número de capas y tipo de acuífero

El modelo de flujo del agua subterránea 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.

### c. 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 m<sup>2</sup>/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 m<sup>2</sup>/d de conductancia hidráulica mientras que al Este del área, las mallas tienen una carga hidráulica igual a 2065 m y la 4.0 m<sup>2</sup>/d de conductancia hidráulica, tal como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Condiciones de frontera del modelo. Fuente de: Autor, 2019.

### d. Parámetros de entrada del modelo

#### ✓ 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 Tabla 6 y Figura 8.



**Tabla 6.** 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

Fuente de: Autores, 2019

K= conductividad hidráulica (m/d)

✓ **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 Tabla 7 y Figura 9.

**Tabla 7.** 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

Fuente de: Autores, 2019

Sy = rendimiento específico

✓ **Puntos de observación de los niveles de agua subterránea**

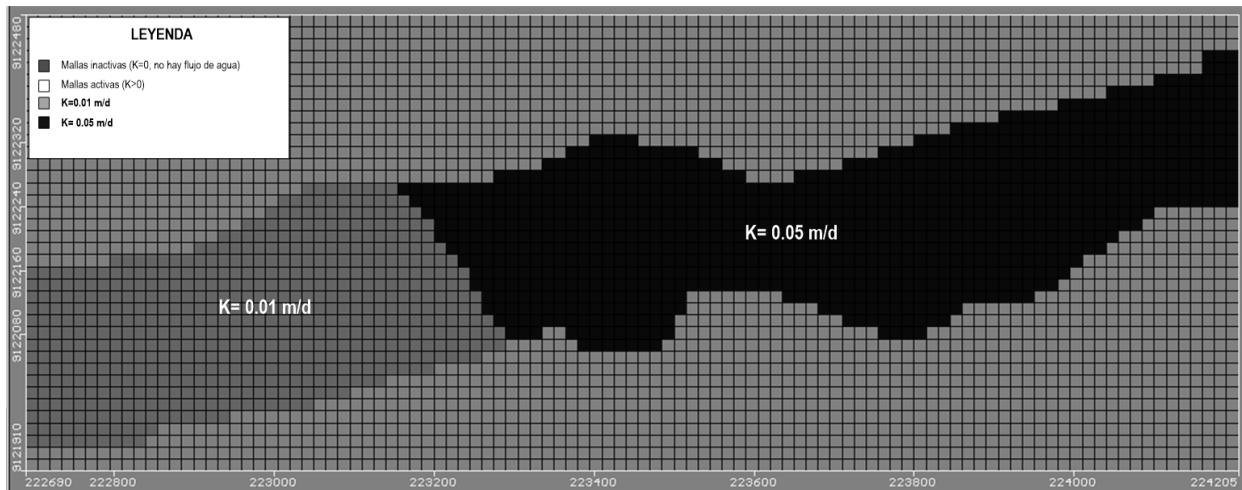
Los puntos de observación de los niveles de agua subterránea fueron constituidos por 04 piezómetros, las observaciones de los niveles de agua corresponden a Agosto del 2014, cuyas cargas hidráulicas se reportan en el Tabla 8.

**Tabla 8.** Puntos de observación de niveles de agua subterránea

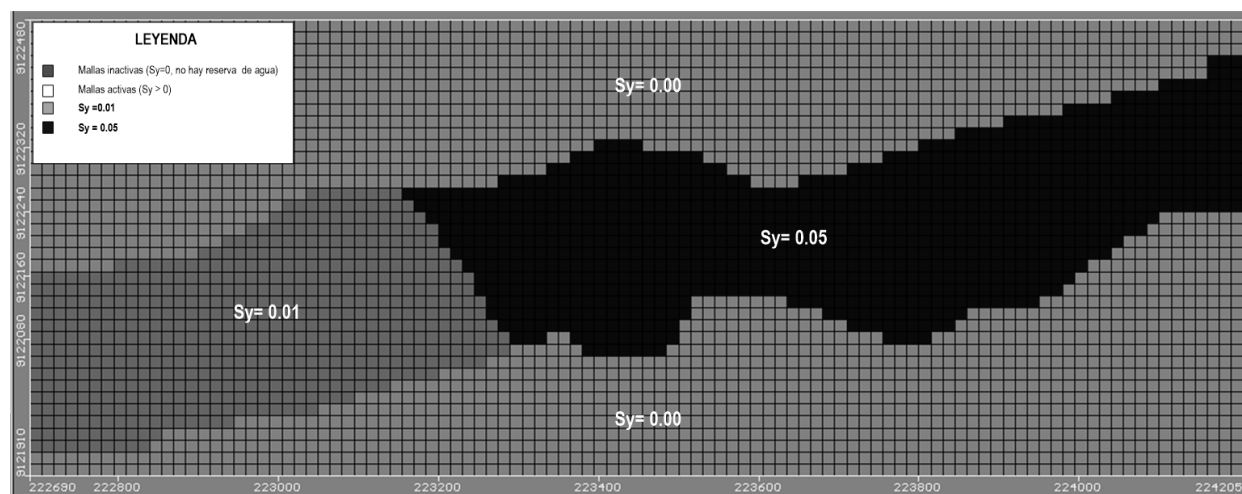
Piezómetro	Este	Norte	scID	scElev	ObsTime	H(m)
PI-01	222858.34	9122070.04	1	1968.46	31	1982.86
PI-04	223765.85	9122165.45	1	2045.70	31	2061.58
PI-06	223676.99	9122310.95	1	2046.47	31	2047.67
PI-08	222787.16	9122149.77	1	1960.42	31	1975.66

**Fuente de:** Autores, 2019

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).

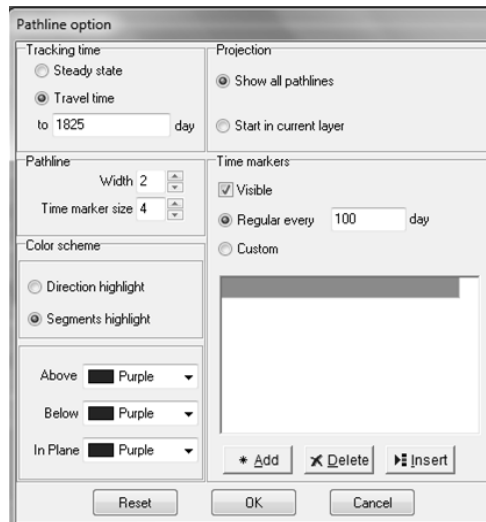


**Figura 8.** Distribución en el acuífero de las conductividades hidráulicas. Fuente de: Autor, 2019.



**Figura 9.** Distribución en el acuífero de los rendimientos específicos. Fuente de: Autor, 2019.

Con el modelo de flujo del agua subterránea calibrado y los datos ingresados de la Tabla 6, 7 y 8, 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, tal como se verifica en la Figura 10.



**Figura 10.** Ingreso de datos para la simulación de 1825 días. Fuente de: Autor, 2019.

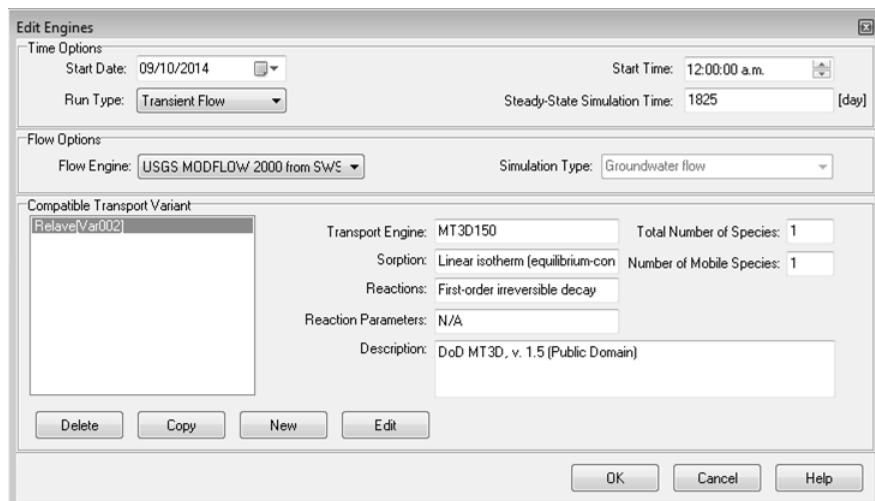
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 11, se muestra la variación espacial y temporal de la ruta del contaminante de dispersión, en caso sucediera fuga de algún contaminante. 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.



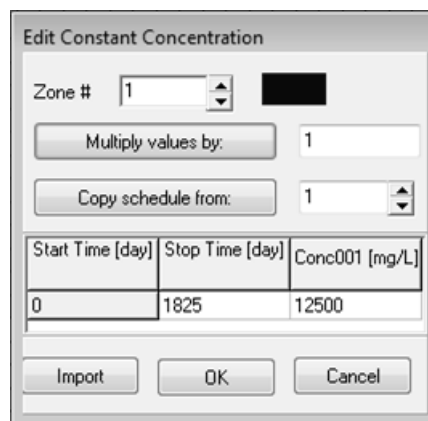
**Figura 11.** Variación temporal y espacial de la ruta de contaminantes. Fuente de: Autor, 2019.

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, tal como se verifica en la Figura 12.



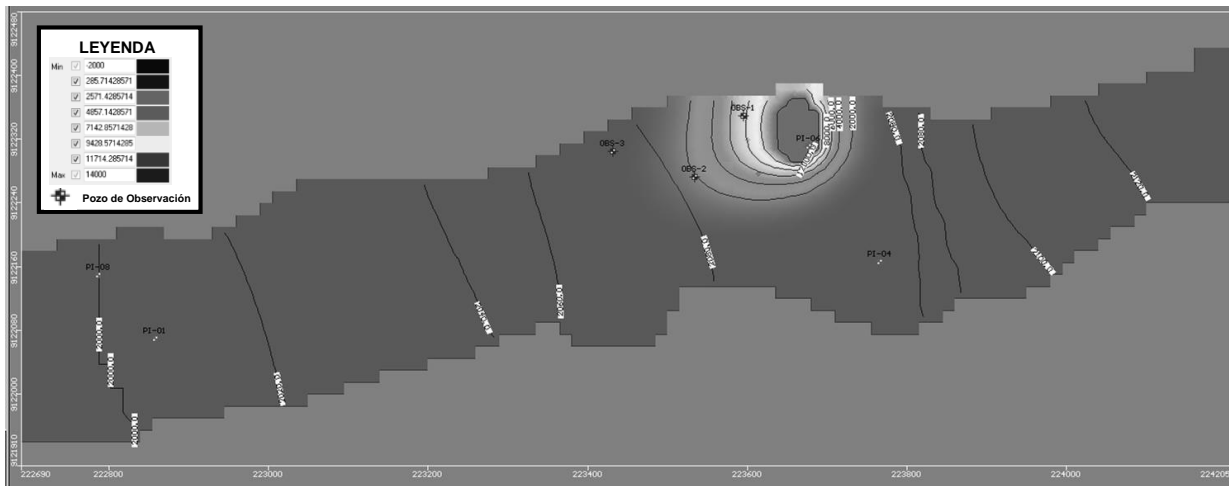
**Figura 12.** Ingreso de datos para la simulación de 1825 días. Fuente de: Autor, 2019.

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, tal como se verifica en la Figura 13.



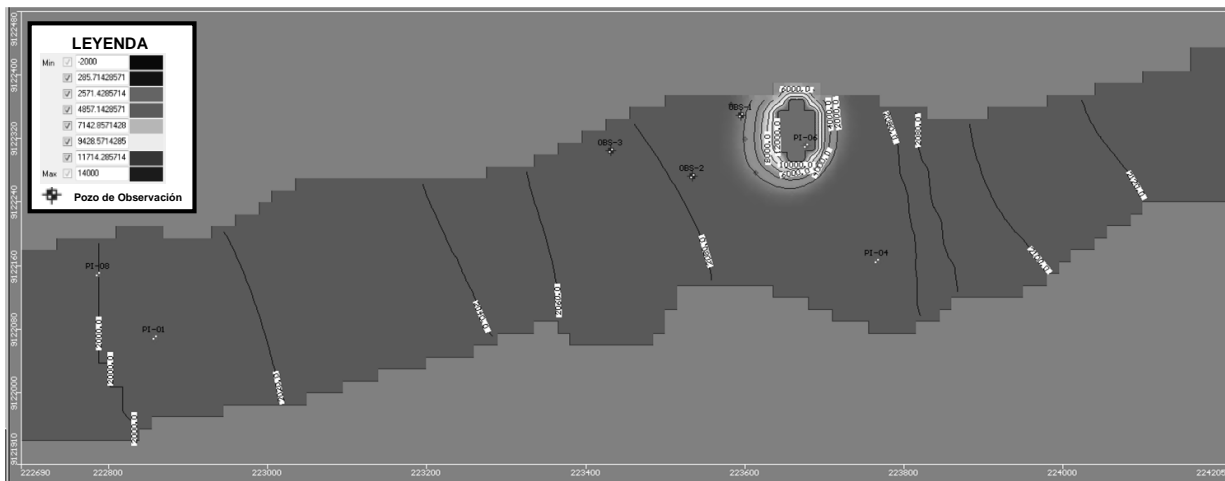
**Figura 13.** Ingreso de datos de concentración constante. Fuente de: Autor, 2019.

En la Figura 14, 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 serian detectados por el pozo de observación OBS-1, siendo este pozo de vital importancia para el monitoreo de la calidad y el nivel de las aguas subterráneas.

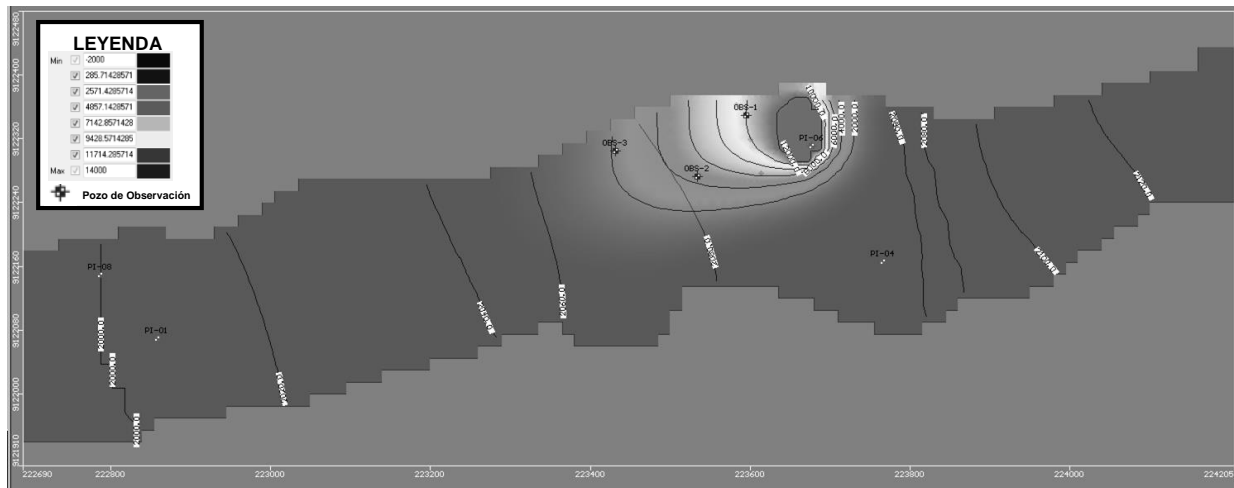


**Figura 14.** Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 150 días. Fuente de: Autor, 2019.

En la Figura 15, 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.

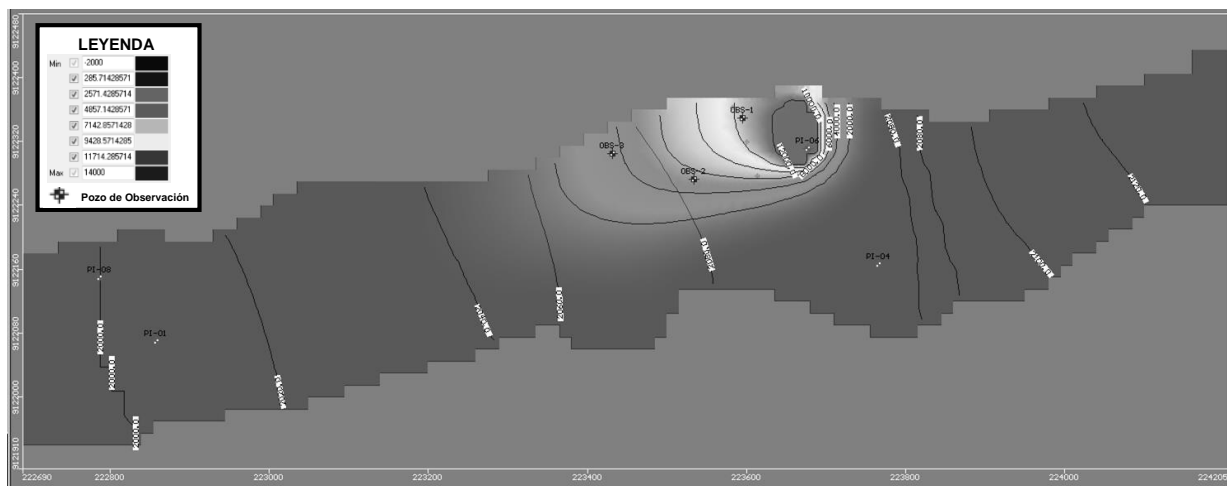


**Figura 15.** Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 750 días. Fuente de: Autor, 2019.



**Figura 16.** Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1450 días. Fuente de: Autor, 2019.

En la Figura 16, se describe el transporte contaminante que llega aproximadamente a los 1450 días en el pozo de observación OBS-3. Asimismo, en la Figura 17, se muestra la variación espacial y temporal del transporte contaminante en la microcuenca del río Yuracyacu a los 1825 días.

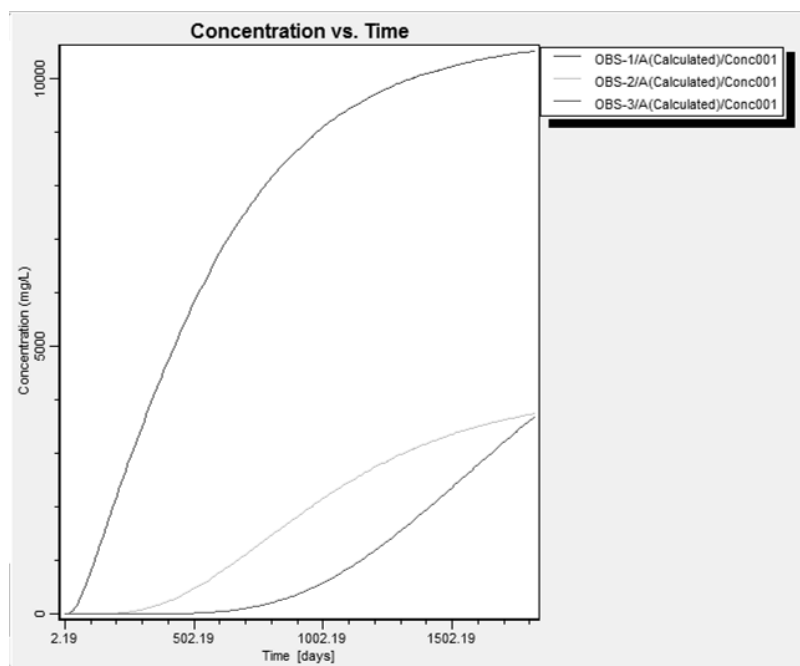


**Figura 17.** Variación temporal y espacial del transporte contaminante para 1825 días. Fuente de: Autor, 2019.

En la Figura 18, se visualiza el gráfico 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 18.** Gráfico Concentración versus Tiempo. Fuente de: Autor, 2019.

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 (Gallo, 2011; Hodgson, Lindsay & Trierweiller, 1966; Raskin, Kumar, Dushenkov & Salt, 1994).

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 fue desplazado, 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 fue drenada a través de tres quenas las cuales conducen la solución recuperada hasta las pozas colectoras mediante una tubería de diámetro de 14" (Almerco, 2014; Maturano, 2012; Olson, 2003). Asimismo, en esta etapa se añadieron a este sistema dos quenas que se encuentran ubicadas aguas arriba del depósito de relaves (Wagner, 1993; Youd & Idriss, 2001). 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.

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 (Abhilash, Pandey & Srivastva, 2009; Allaway, 1968; Alloway, 1995; Callirgos, 2014).

#### 4. CONCLUSIONES



El acuífero sobre el cual se emplaza 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.

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 neutra a ligeramente básicas. Acorde con el balance hídrico subterráneo para las condiciones de flujo estacionario, la recarga subterránea total fue 625.77 m<sup>3</sup>/d, 249.96 m<sup>3</sup>/d corresponde a la recarga del acuífero producto de la precipitación y 375.81 m<sup>3</sup>/d, corresponde a flujo lateral subterráneo. Para las condiciones en régimen transitorio se prevé una reducción de la recarga superficial estimado en 104.07 m<sup>3</sup>/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.

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. Se recomienda 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.

Se recomienda 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.

## 5.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abhilash, PC; Pandey VC; Srivastva P; Rakesh PS; Chandran, S; Singh N; Thomas, AP . (2009). Phytofiltration of cadmium from water by *Limncharis flava* (L.) Buchenau grown in free-floating culture system. J. Haz. Mat. 170:791–797.
- 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.
- 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.
- Allaway. (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.
- 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.
- Bellino, N. (2012). Aguas subterráneas: conocimiento y evaluación. (en línea). Buenos Aires, AR. Universidad de Buenos Aires. Consultado 15 jun. 2016. Recuperado de <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.
- 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., Montañó, J. (2012). Manual de agua subterránea. Montevideo, UY. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de Desarrollo Rural. 121 p.
- Cruces, J., Martínez, L. (2007). Modelos matemáticos en hidrogeología: módulo I contaminación ambiental. (en línea). Lima, PE. SGS. Consultado 10 may. 2016. Recuperado de <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.
- Espinoza, C. (2009). Movimiento del agua subterránea. (en línea). Santiago, CL. Universidad de Chile. Consultado 25 ago. 2016. Recuperado de [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/CI51J/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/CI51J/1/material_docente/).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Maturano, M. (2012). Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito. Recuperado de [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720\\_1.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720_1.PDF).
- Olson, S. (2003). Strength ratio-based liquefaction analysis of sloping ground. Recuperado de <http://www.learningace.com/doc/2542766/57f1a4284d737c5bde0e670f2b9c362c/olson-stark-yield-strength-ratio-and-liquefaction-analysis-of-slopesand-embankments>.
- Oyarzún, R. (2007). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. (en línea). Coquimbo, Cl. Consultado 15 jun. 2016. Recuperado de <http://www.aulados.net/>.
- 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.
- 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*.
- 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.
- Wagner, GJ. (1993). Accumulation of heavy metals in crop plants and its consequence to human health. *Adv. Agron.* 51, 173-177.
- YI, F. (2010). Procedure to evaluate liquefaction-induced lateral spreading based on shear wave velocity. Recuperado de <http://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2711&context=icrageesd>
- Youd, L., Idriss, I. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 and 1997 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Recuperado de <https://www.ce.memphis.edu/7137/pdfs/Reference2/Youd%20ad%20Idriss.pdf>.