

# Trabajo Fin de Máster

## *ANALISIS Y MEJORAMIENTO DEL MODELO NUMERICO HIDROGEOLOGICO DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO PARA LA EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL AL ACUIFERO POR ACTIVIDADES MINERAS*

**Intensificación:**

**ANALISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HIDRICOS**

**Autor:**

*ATOCCSA GOMEZ ROSSANA BEATRIZ*

**Tutor:**

*DR. JOSE ESTEBAN CAPILLA ROMÁ*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

SETIEMBRE, 2017  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## *Agradecimientos*

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos primeramente al Dr. José E. Capilla Romá por su apoyo y tiempo dedicado con su asesoría durante el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Master (TFM), siendo un gran aporte para su culminación. Así también a los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente que contribuyeron a los conocimientos adquiridos durante mi estancia y cursos realizados en la Universidad Politécnica de Valencia.

Además quiero agradecer de manera especial a mis padres y hermanos por su aliento, ánimo y confianza brindada a lo largo de mi tiempo dedicado en los estudios.

Y por último agradezco el aporte de mis amigos de Perú que desde el inicio de este trabajo contribuyeron a brindarme la información necesaria ya que sin ellos no habría sido posible la ejecución del TFM.

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis y mejoramiento del modelo numérico hidrogeológico de la unidad minera apumayo para la evaluación del impacto ambiental al acuífero por actividades mineras.

**Título del TFM en inglés:** Analysis and improvement of the hydrogeological numerical model of the mining unit apumayo for the evaluation of the environmental impact to the aquifer by mining activities.

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi i millora del model numèric hidrogeològic de la unitat minera apumayo per a l'avaluació de l'impacte ambiental a l'aquífer per activitats mineres.

**Alumno:** Rossana Beatriz Atoccsa Gomez

**Tutor:** Dr. José Esteban Capilla Romá

**Fecha de Lectura:** Setiembre, 2017

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

El presente trabajo denominado "Análisis y mejoramiento del modelo numérico hidrogeológico de la Unidad Minera Apumayo para la evaluación del impacto ambiental al acuífero por actividades mineras" tiene como objetivo predecir con mayor precisión el posible impacto al acuífero por elementos procedentes del proceso de extracción de plata y oro a través de los componentes mineros tales como el pad de lixiviación con cianuro y las escombreras de estériles proveniente de los tajos. La Unidad Minera se ubica en el departamento de Ayacucho de Perú a 4000 msnm, centro sur de los Andes, siendo así, los mencionados componentes mineros se encuentran en la cabecera de microcuencas que son afluentes de cauces superficiales de los cuales se abastecen para uso ganadero y agrario algunas poblaciones ubicadas en el área de influencia indirecta de la Unidad Minera.

Con fines de obtener la certificación ambiental y dar inicio a la actividades de operación minera se ejecutó el modelo numérico hidrogeológico del acuífero en el área del Proyecto, como parte de su Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el cual según los requerimientos de la legislación ambiental, se simuló el flujo y movimiento de partículas. Sin embargo, haciéndose la revisión del modelo numérico se observa que el modelo de flujo del agua subterránea no representa las condiciones reales del acuífero, por lo que a fin de tener una mejor representación de éste se modificó el diseño del modelo numérico a través de la variación de los parámetros hidráulicos y condiciones de contorno; asimismo, se realizó el análisis de sensibilidad y la simulación del flujo en estado transitorio, lo cual no se ejecutó en el modelo del EIA. En cuanto al transporte de contaminantes, se simuló el movimiento de cianuro y cadmio como no conservativos pero considerando su transporte hidrodinámico, utilizando para ello el software MT3DMS, lo cual tampoco se tenía ejecutado en el modelo del EIA.

Las mejoras realizadas en el modelo del flujo numérico, tales como el replanteo de las condiciones de contorno, ajuste de la calibración en régimen estacionario, análisis de sensibilidad y calibración en régimen transitorio, han permitido obtener niveles piezométricos más cercanos a los

observados que en el modelo numérico del Estudio de Impacto Ambiental (2015) de la Unidad Minera Apumayo, pues ya no se presentan problemas de salida del flujo sobre el nivel del terreno que se tenían en dicho modelo no siendo representativo de la realidad, además la calibración de mejor ajuste tuvo una media cuadrática o RMS (Root Mean Square) normalizada de 2.6 % el cual es menor al RMS normalizado de 8% del modelo numérico del 2015.

El posible impacto negativo del agua subterránea ante un evento de infiltraciones en el pad de lixiviación no es altamente significativo a corto plazo, pues en ninguno de los escenarios establecidos se detectó la presencia del contaminante al cabo de 30 años en el piezómetro APU 9 que se ubica a 750 m aguas abajo del componente minero, por lo que se puede decir que el proceso del movimiento de la pluma contaminante es muy lento, teniendo en cuenta que se consideró como un contaminante conservativo.

Así también, según los resultados de la simulación del transporte, el proceso de difusión en este caso es significativo debido a las bajas permeabilidades en gran parte del dominio del modelo, por lo que el movimiento de la pluma es lento generándose en un principio una acumulación en el área de la entrada del contaminante, siendo así este tipo de comportamiento podría generar un riesgo a largo plazo, por ello sería importante realizar una simulación a más de 50 años en el caso de suscitarse algún tipo de evento similar al de los escenarios planteados.

#### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

El present treball denominat "Anàlisi i millora del model numèric hidrogeològic de la Unitat Minera Apumayo per a l'avaluació de l'impacte ambiental a l'aqüífer per activitats mineres" té com a objectiu predir amb més precisió el possible impacte a l'aqüífer per elements procedents del procés d'extracció de plata i or a través dels components miners com ara el pad de lixiviació amb cianur i els runams d'estèrils provinents dels talls. La Unitat Minera se situa en el departament d'Ayacucho del Perú a 4000 msnm, centre sud dels Andes, sent així, els esmentats components miners es troben a la capçalera de microconques que són afluents de lleres superficials dels quals es proveeixen per a ús ramader i agrari algunes poblacions situades a l'àrea d'influència indirecta de la Unitat Minera.

Amb fins d'obtenir la certificació ambiental i donar inici a la activitats d'operació minera es va executar el model numèric hidrogeològic de l'aqüífer a l'àrea del Projecte, com a part del seu Estudi d'Impacte Ambiental (EIA) en el qual segons els requeriments de la legislació ambiental, es va simular el flux i moviment de partícules. No obstant això, fent-se la revisió del model numèric s'observa que el model de flux de l'aigua subterrània no representa les condicions reals de l'aqüífer, de manera que per tal de tenir una millor representació d'aquest es va modificar el disseny del model numèric a través de la variació dels paràmetres hidràulics i condicions de contorn; així mateix, es va realitzar el anàlisis de sensibilitat i la simulació del flux en estat transitori, cosa que no es va executar en el model de l'EIA. Pel que fa al transport de contaminants, es va simular el moviment de cianur i cadmi com no conservatius però considerant el seu transport hidrodinàmic, utilitzant per a això el programari MT3DMS, la qual cosa tampoc es tenia executat en el model de l'EIA.

Les millores realitzades en el model del flux numèric, com ara el replantejament de les condicions de contorn, ajust del calibratge en règim estacionari, anàlisi de sensibilitat i calibratge en règim transitori, han permès obtenir nivells piezomètrics més propers als observats que en el model numèric de l'Estudi

d'Impacte Ambiental (2015) de la Unitat Minera Apumayo, perquè ja no es presenten problemes de sortida del flux sobre el nivell del terreny que es tenien en aquest model no sent representatiu de la realitat, a més el calibratge de millor ajust va tenir una mitjana quadràtica o RMS (Root Mean Square) normalitzada de 2.6% el qual és menor al RMS normalitzat de 8% del model numèric del 2015.

El possible impacte negatiu de l'aigua subterrània davant un esdeveniment d'infiltracions en el pad de lixiviació no és altament significatiu a curt termini, ja que en cap dels escenaris establerts es va detectar la presència del contaminant al cap de 30 anys en el piezòmetre APU 9 que es situa a 750 m aigües avall del component miner, de manera que es pot dir que el procés del moviment de la ploma contaminant és molt lent, tenint en compte que es va considerar com un contaminant conservatiu.

Així també, segons els resultats de la simulació del transport, el procés de difusió en aquest cas és significatiu a causa de les baixes permeabilitats en gran part del domini del model, de manera que el moviment de la ploma és lent generant-se al principi una acumulació en l'àrea de l'entrada del contaminant, sent així aquest tipus de comportament podria generar un risc a llarg termini, per això seria important realitzar una simulació a més de 50 anys en el cas de suscitar algun tipus d'esdeveniment similar al dels escenaris plantejats .

#### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

The present work denominated "Analysis and improvement of the hydrogeological numerical model of the Mining Apumayo Unit for the evaluation of the environmental impact to the aquifer by mining activities" has as objective to predict more accurately the possible impact to the aquifer by elements from the process of extraction of silver and gold through the mining components such as the cyanide leach pad and the sterile tailings from the slits. The Mining Unit is located in the department of Ayacucho of Peru at 4000 masl, south central of the Andes, being thus, the mentioned mining components are in the head of microcuencas that are tributaries of superficial channels of which they are supplied for livestock use and agrarian some towns located in the area of indirect influence of the Mining Unit.

In order to obtain environmental certification and initiate mining operations, the hydrogeological numerical model of the aquifer was executed in the Project area as part of its Environmental Impact Study (EIA) in which, according to the requirements of the legislation environmental, the flow and movement of particles was simulated. However, the revision of the numerical model shows that the groundwater flow model does not represent the actual conditions of the aquifer, so that in order to have a better representation of this, the design of the numerical model was modified through the variation of hydraulic parameters and boundary conditions; Likewise, sensitivity analysis and transit simulation were performed, which was not performed in the EIA model. As for the transport of pollutants, the movement of cyanide and cadmium was simulated as non-conservative but considering its hydrodynamic transport, using the software MT3DMS, which was also not executed in the EIA model.

The improvements made in the numerical flow model, such as the outlining of the boundary conditions, adjustment of the steady-state calibration, sensitivity analysis and transient calibration, have allowed to obtain piezometric levels closer to those observed than in the numerical model of the Environmental Impact Study (2015) of the Apumayo Mining Unit, since there are no problems of flow output above the ground level that were in this model, not being representative of the reality, besides the calibration of better fit had a standard root mean square (RMS) of 2.6% which is lower than the normalized RMS of 8% of the numerical model of 2015.

The potential negative impact of groundwater on an event of infiltration in the leach pad is not highly significant in the short term, because in none of the established scenarios the presence of the contaminant was detected after 30 years in the APU 9 piezometer located at 750 m downstream of the mining component, so it can be said that the process of movement of the pollutant pen is very slow, considering that it was considered as a conservative pollutant.

Also, according to the results of the transport simulation, the diffusion process in this case is significant due to the low permeabilities in a large part of the domain of the model, reason why the movement of the pen is slow generating in the beginning an accumulation in the area of the entrance of the pollutant, so this type of behavior could generate a long-term risk, so it would be important to carry out a simulation for more than 50 years in the event that some type of event is similar to the scenario .

**Palabras clave español (máximo 5):** Modelo, simulación, transporte, hidrogeológico, flujo.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Model, simulació, transport, hidrogeològic, flux.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Model, simulation, transport, hydrogeological, flow.



## INDICE

I.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	
1.1.	Impactos ambientales al agua subterránea ocasionados por la actividad minera.....	1
1.2.	Contaminantes: Cianuro y Metales pesados.....	2
1.3.	Normativa Peruana para regular el impacto en las aguas subterráneas.....	3
1.4.	Objetivos.....	5
II.	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO EN LA UNIDAD MINERA APUMAYO	
2.1.	Ubicación y descripción de la unidad minera Apumayo.....	5
2.2.	Climatología.....	8
2.3.	Hidrología .....	12
2.4.	Geomorfología.....	16
2.5.	Geología .....	16
2.6.	Hidrogeología	
2.6.1.	Hidráulica subterránea.....	22
2.6.2.	Modelo hidrogeológico conceptual (2015).....	26
2.6.3.	Modelo numérico hidrogeológico (2015).....	34
2.7.	Resumen y conclusiones del modelo hidrogeológico del EIA 2015 de la U.M. Apumayo .....	43
III.	DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA HIDROGEOLOGICA	
3.1.	Objetivo del modelo.....	45
3.2.	Código del modelamiento.....	46
3.3.	Diseño del modelo numérico	
3.3.1.	Discretización.....	46
3.3.2.	Condiciones iniciales .....	48
3.3.3.	Condiciones de contorno .....	49
3.3.4.	Parámetros hidráulicos .....	54
3.4.	Calibración del modelo numérico en régimen estacionario.....	58
3.5.	Resultados del modelo calibrado en régimen estacionario.....	61
3.5.1.	Balance hídrico del modelo en régimen estacionario .....	66
3.5.2.	Análisis de sensibilidad del modelo en régimen estacionario.....	67
3.5.3.	Conclusiones de los resultados respecto al modelo del EIA.....	70
3.6.	Calibración del modelo en régimen transitorio.....	71
3.7.	Resultados del modelo calibrado en régimen transitorio.....	74



IV. MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL ACUIFERO

4.1. Simulación y análisis de escenarios de accidentes en el pad de lixiviación con cianuro.....	79
4.2. Simulación y análisis de escenarios en las escombreras de estériles y tajos con metales pesados.....	115
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
VI. BIBLIOGRAFIA.....	125





## I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Impactos ambientales al agua subterránea ocasionados por la actividad minera

Siendo las aguas subterráneas de vital importancia en zonas donde los recursos hídricos son limitados, es importante su investigación y conocimiento ya que es una fuente cada vez más importante como alternativa al uso del agua superficial. Además, las aguas subterráneas son el sostén de diversos ecosistemas tales como bofedales, humedales, lagunas y alimentan muchos cursos de agua y manantiales, viéndose ello en la zona de los andes peruanos.

Sin embargo, actividades antrópicas tales como la minería pueden generar impactos en este recurso en el que su contaminación puede conllevar a una remediación muy difícil y costosa. Es por ello que al ser esta actividad económica una de las más importantes a nivel nacional es imprescindible su realización de manera sostenible, siendo así es necesario conocer el riesgo ambiental mediante la investigación y modelación de escenarios de la posible contaminación para que partir de los resultados se puedan tomar decisiones e implementar medidas de prevención y mitigación.

Entre los potenciales impactos que se pueden generar durante el desarrollo de la actividad minera en el recurso hídrico subterráneo se tienen: el cambio en la cantidad y calidad del agua debido a la intercepción del acuífero por excavación de los tajos en el caso de minería superficial y por las galerías en la minería subterránea, así como posibles infiltraciones de soluciones tóxicas desde los componentes mineros tales las escombreras o botaderos de estériles de mina y galerías o labores subterráneas donde se puedan generar drenaje ácido de mina, otro ejemplo es el pad de lixiviación de oro que se realiza con solución cianurada, por lo que en caso de no implementar las medidas necesarias para su prevención estos elementos tóxicos podrían infiltrar y recargar la zona no saturada y saturada del medio subterráneo; así también se tiene riesgo de posibles derrames desde las áreas de operación que forman parte de las instalaciones, como la planta de procesamiento del mineral y áreas de mantenimiento y abastecimiento de combustible para la maquinaria utilizada.

## 1.2. Contaminantes: cianuro y cadmio

El cianuro es ampliamente empleado en actividades mineras de extracción de oro, el cual se obtiene mediante la aplicación del método de lixiviación con cianuro; a finales de la década de 1990 los métodos de lixiviación con cianuro se habían generalizado llegando a aplicarse en un 90 % de la producción mundial de oro (Yarar, 2001). El cianuro se encuentra en gran parte en los medios acuosos en forma de cianuro libre el cual está compuesto por CN<sup>-</sup> y HCN; la toxicidad del cianuro libre es muy alta para las especies acuáticas (Gensemer et al, 2006). En la operación de lixiviación del oro, el cianuro se gestiona de acuerdo a los reglamentos establecidos para el transporte, uso y eliminación, sin embargo pueden ocurrir derrames accidentales de solución de cianuro generando una infiltración a las zonas saturadas o insaturadas, es por ello la importancia de evaluar el comportamiento del cianuro en el medio saturado. El cianuro está expuesto a diferentes mecanismos que generan su atenuación en el medio ambiente tales como la volatilización, complejación, adsorción, difusión, precipitación, transformación biológica, entre otros; la adsorción de las diferentes formas de cianuro se da por parte de los constituyentes comunes del suelo y sedimentos. (Craig, J. 2015). Así también, existen estudios de la difusión molecular del cianuro en el medio poroso ya que en el caso de distancias cortas entre los materiales sólidos, la velocidad de transporte se regirá por difusión, siendo así el coeficiente de difusión en el suelo se deriva del coeficiente de difusión molecular en solución libre después de la corrección por la tortuosidad, teniendo así un valor aproximado de 0.000108 m<sup>2</sup>/día (Meeussen et al., 1995).

Respecto a la concentración máxima del cianuro en el agua para que ésta sea catalogada de buena calidad, según los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua de la legislación peruana, se disponen los valores mostrados en la siguiente tabla.

**Parámetros establecidos por los Estándares de Calidad de Agua**

<b>Categoría de parámetros</b>	<b>Parámetro (mg/l)</b>
Categoría 1, clase 2: Agua para uso poblacional y recreacional que puede ser potabilizada con tratamiento convencional	Cianuro Libre: 0.022
	Cianuro Wad: 0.08
Categoría 3: Parámetro para riego de vegetales tallo bajo y alto y para bebida de animales	Cianuro wad: 0.1

El cadmio es un metal pesado muy estudiado ya que es considerado uno de los más peligrosos para la salud humana y además en un medio mineralizado es probable su presencia en concentraciones relativamente altas (Duriez, 2005). Asimismo, la EPA (US Environmental Protection Agency) incluye al cadmio en la lista de los trece contaminantes prioritarios por encontrarse como los más tóxicos y disponibles. El cadmio como contaminante en el suelo y sedimentos se pueden encontrar de formas diferentes: como partículas, disueltos en el agua intersticial de los poros, como películas líquidas, adsorbidos o como fase sólida (Galán E., Romero A., 2008). El valor del coeficiente de difusión del cadmio en medio poroso que se determina en el trabajo realizado por Papelis et al. (1995) se encuentra en un rango de  $1.3 \times 10^{-11}$  y  $6.3 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

Respecto a la concentración máxima del cadmio en el agua para que ésta sea catalogada de buena calidad, según los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua de la legislación peruana, se disponen los valores mostrados en la siguiente tabla.

**Parámetros establecidos por los Estándares de Calidad de Agua**

<b>Categoría de parámetros</b>	<b>Parámetro (mg/l)</b>
Categoría 1, clase 2: Agua para uso poblacional y recreacional que puede ser potabilizada con tratamiento convencional	Cadmio: 0.003
Categoría 3: Parámetro para riego de vegetales tallo bajo y alto y para bebida de animales	Cadmio: 0.01

### **1.3. Normativa Peruana para regular el impacto en las aguas subterráneas por actividades mineras**

La normativa peruana regula el control ambiental de las aguas subterráneas en el sector minero mediante la evaluación de Estudios de Impacto Ambiental de Proyectos Mineros en base a los Términos de Referencia Comunes en los cuales se especifica las medidas que deberán considerarse antes, durante y después del desarrollo de la actividad. Entre dichas medidas se mencionan las siguientes:



- En cuanto al estudio hidrogeológico en la zona de estudio se debe contener como mínimo: red de piezómetros, dirección de flujo, hidroisohipsas, parámetros hidrogeológicos del acuífero, modelo hidrogeológico de transporte de contaminantes para escenarios de corto, mediano y largo plazo y la determinación de los radios de influencia de la extracción de agua subterránea. Para la determinación de los parámetros hidrogeológicos del acuífero se efectuará una o más pruebas de acuífero. Se deberán presentar los gráficos de descenso y recuperación de la prueba de acuífero. Indicando la fecha de la prueba, nivel estático, nivel dinámico al final de la prueba, duración total de bombeo, tiempo de recuperación nivel de recuperación al término del registro, así como la correspondiente interpretación con el método que corresponde. Además el modelo hidrogeológico deberá ser reajustado permanentemente durante la operación.
- Así también, respecto a la calidad de agua subterránea se especifica que el estudio hidrogeológico deberá comprender la línea base de calidad de las aguas subterráneas que determinará el grado de mineralización de las aguas almacenadas en el acuífero, fenómenos de intrusión salina (en caso corresponda), probable tipo de rocas a través de las cuales circula y comprobar probables procesos de contaminación del agua subterránea por fuentes antropogénicas para lo cual la duración de la línea base debe ser tal que permita registrar los cambios estacionales a lo largo del año.

En una primera etapa se deberá evaluar la mineralización de las aguas, las características físico químicas y la calidad de las aguas subterráneas, mediante las mediciones de campo (conductividad eléctrica, pH, y sólidos totales disueltos y otros de ser necesario) a todos los pozos inventariados, posteriormente se seleccionará los pozos representativos para la toma de muestras de agua para su análisis físico químico y bacteriológico. El número de muestras a recabar se hará de acuerdo al tamaño del área a investigar.

En la selección de los pozos para la toma de muestras se debe considerar también las fuentes de contaminación identificadas (estructuras de manejo de aguas residuales, áreas de disposición de, residuos sólidos o semisólidos, áreas de almacenamiento de sustancias

tóxicas, áreas de reuso de aguas residuales tratadas, entre otros). Los parámetros de análisis abarcan los principales iones y aniones (Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, HCO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>), dureza, metales pesados, boro, fluoruros y en función de los actuales y potenciales futuras fuentes de contaminación, nitratos, nitritos, plaguicidas, coliformes termotolerantes, DQO, carbono orgánico total e hidrocarburos totales, parámetros microbiológicos (indicados) y otros parámetros asociados a la actividad, que podrían ejercer alguna influencia en el ambiente.

Para el monitoreo de la calidad de agua se menciona que se debe considerar estaciones de monitoreo gradiente arriba y abajo o en los alrededores de los componentes del proyecto (depósito de relaves, desmonteras, pad de lixiviación, pozas de solución, tajo, entre otros) con potencial de infiltración de efluentes hacia el agua subterránea.

#### 1.4. Objetivos

En el presente trabajo se tiene como objetivos:

- Mejoramiento del modelo numérico del flujo subterráneo en el área de emplazamiento de la Unidad Minera Apumayo.
- Evaluación del impacto al recurso hídrico por actividades mineras mediante la simulación del transporte de contaminantes en el acuífero.

## II. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO EN EL PROYECTO MINERO APUMAYO

### 2.1. Ubicación y descripción de la unidad minera Apumayo

La zona de estudio en la cual se encuentran los componentes mineros políticamente se localiza en la jurisdicción de los distritos de Chaviña y Sancos, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho, Perú. Esta área de estudio se ubica además en el Centro Sur de los Andes Peruanos a 4000 msnm y se emplaza en parte de las microcuencas: Cuchuhuasi, Parapacancha, Auropata, Calicanto, Jispicahua, Jallpasca y Jellocasa. (Ver figura 1)

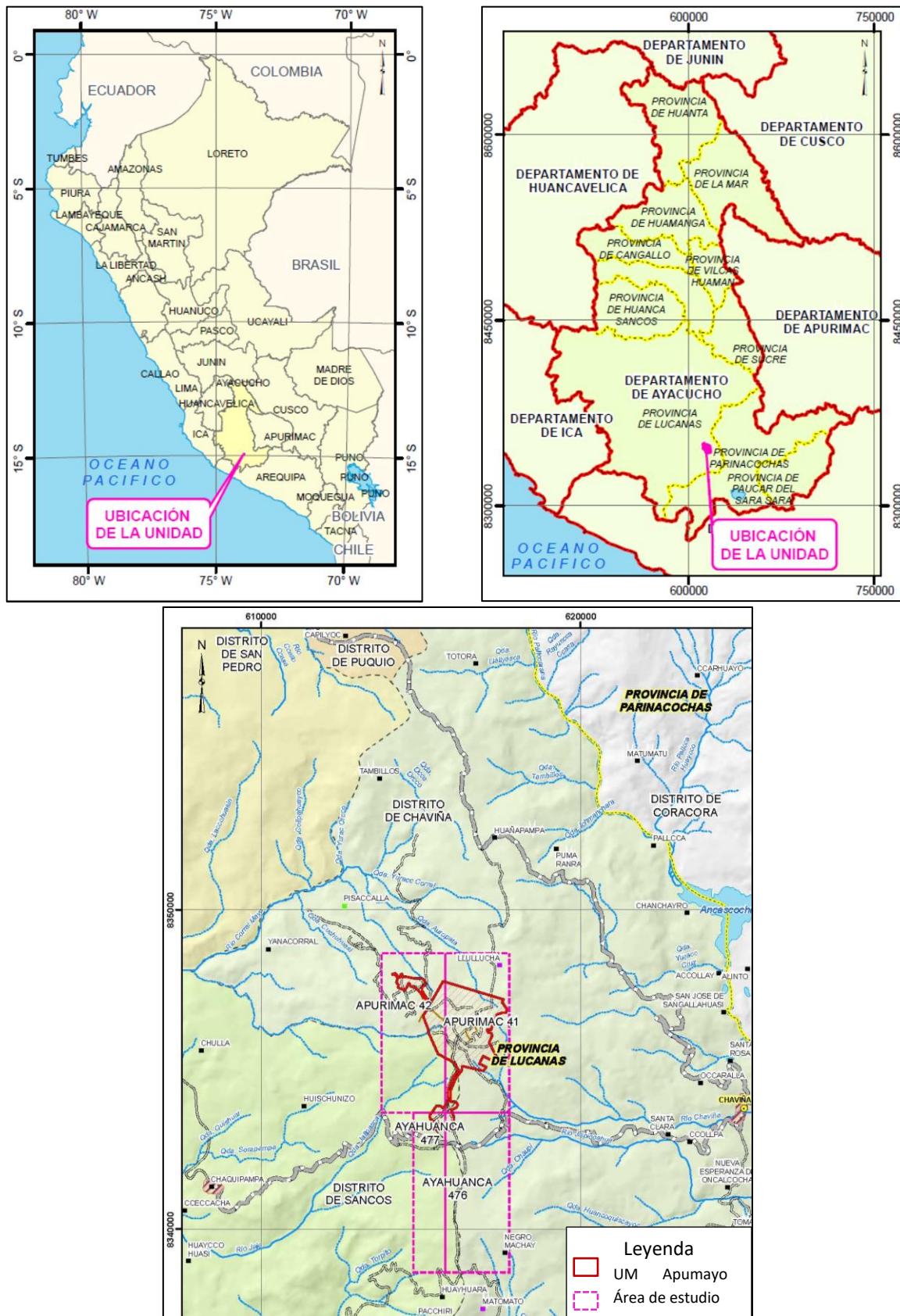


Figura 1. Ubicación de la Unidad Minera Apumayo

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015



En la unidad minera Apumayo se realizan actividades para el proceso de extracción de plata y oro, teniéndose para ello entre sus componentes mineros al pad de lixiviación con cianuro y a las escombreras de estériles (o botaderos de desmonte) proveniente de los tajos. Siendo así, los mencionados componentes mineros se ubican entre las cabeceras de las microcuencas que son afluentes de cauces superficiales (ver figura 8), de los cuales se abastecen para uso ganadero y agrario algunas poblaciones ubicadas en el área de influencia indirecta de la unidad minera.

El primer modelo hidrogeológico conceptual y numérico del acuífero de la unidad minera Apumayo fue realizada en el año 2010, con fines de obtener la certificación ambiental y dar inicio a las actividades de construcción y operación minera; posteriormente en el año 2015 (en el cual se concluyó con la explotación de los tajos) se planteó la extensión del área de actividad minera para la explotación de un nuevo tajo y construcción de una nueva escombrera de estériles (en la denominada zona Ayahuanca, ver figura 8), por lo que en este año 2015, con información actualizada de la zona de ampliación, se rediseñó el modelo hidrogeológico conceptual y numérico con el cual se simuló el flujo subterráneo y movimiento de partículas en el acuífero, por parte de la consultora HGS Perú, según los requerimientos de la legislación ambiental.

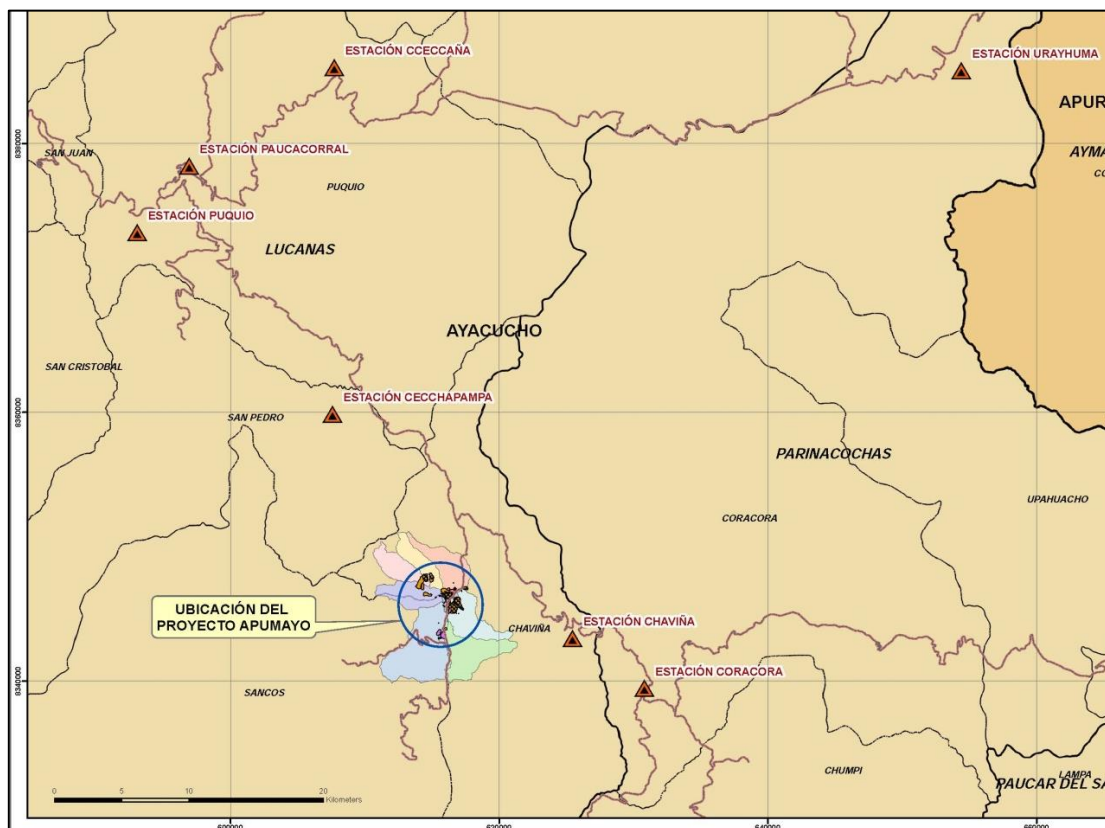
A continuación se presenta una síntesis de la información base de la zona de estudio para llevar a cabo el presente trabajo. Esta información corresponde a la documentación referente a la hidrología, geomorfología, geología e hidrogeología cuya fuente principal es el estudio local desarrollado por la consultoras Walsh Perú S.A., Geoestudios Ambientales S.A.C., HGS Perú S.A. y la empresa MDH S.A.C, además de los estudios regionales de Ingemmet y Senamhi, plasmados en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Apumayo y sus posteriores modificaciones.

## 2.2. Climatología

Según el EIA de la Unidad Minera Apumayo, la interpretación hidrológica se basó en el registro histórico de las estaciones meteorológicas operadas por Senamhi (ver tabla 1) aledañas al área de la Unidad Minera en cuanto a su altitud y comportamiento climático.

**Tabla 1. Descripción de las estaciones meteorológicas. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo**

Estación	Dpto	Provincia	Distrito	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud	Precipitación media anual (mm)
Coracora	Ayacucho	Parinacochas	Coracora	3172	15°01'	73°46'	422.37
Chaviña	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	3310	14°59'	73°49'	561.24
Cceccaña	Ayacucho	Lucanas	Puquio	4100	14°36'	74°00'	894.36
Urayhuma	Ayacucho	Parinacochas	Coracora	4170	14°36'	73°33'	962.70
Cecchapampa	Ayacucho	Lucanas	San Pedro	3900	14°50'	73°59'	664.64
Paucacorrall	Ayacucho	Lucanas	Puquio	4060	14°40'	74°05'	502.38



**Figura 2. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

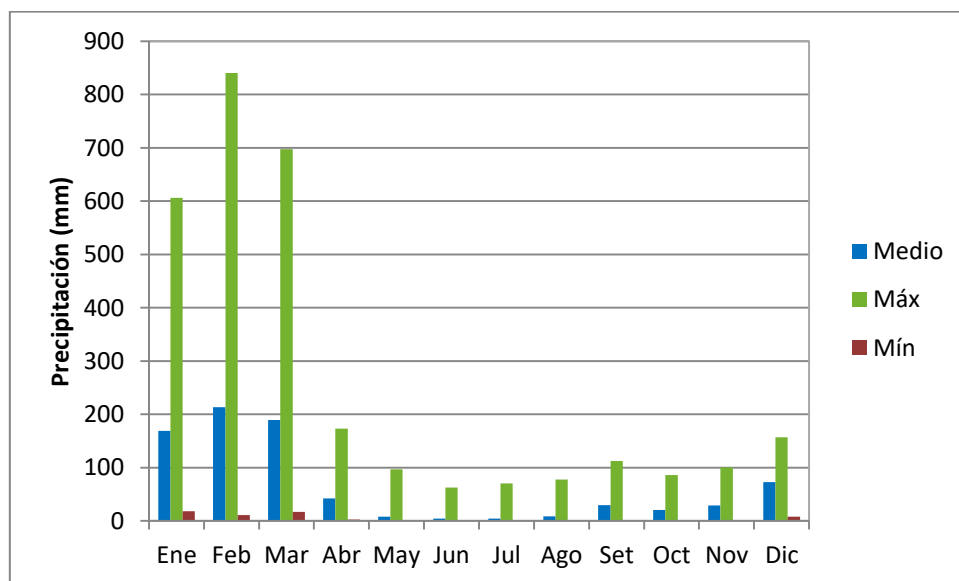


Siendo así, estimaron el régimen pluviométrico en el área de estudio empleando la información de dichas estaciones y mediante el modelo de regresión lineal que relaciona la variación de la precipitación media anual con la altitud, obteniéndose una precipitación promedio anual de 790.3 mm con una altura media de 4100 msnm de la Unidad Minera, oscilando entre 168.8 y 213.1 mm/mes en los meses de verano (ene a marzo) y entre 4.5 y 20.3 en los meses de invierno (junio a septiembre), así también se muestran los valores en los años de máxima y mínima precipitación, tal como se observa en la tabla 2 y figura 3.

**Tabla 2. Precipitación total mensual en el área de estudio en mm (1964-2014)**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
Medio	168.8	213.1	189.1	42.1	7.8	4.5	4.4	8.6	29.5	20.3	29.1	73	790.3
Máx	606.0	840.5	697.4	173.0	96.9	62.5	70.6	77.9	112.3	86.0	100.5	156.7	840.5
Mín	18.1	10.9	17.2	2.7	0	0	0	0	0	0	0	8.2	57.1



**Figura 3. Precipitación total mensual en el área de estudio (1964-2014)**

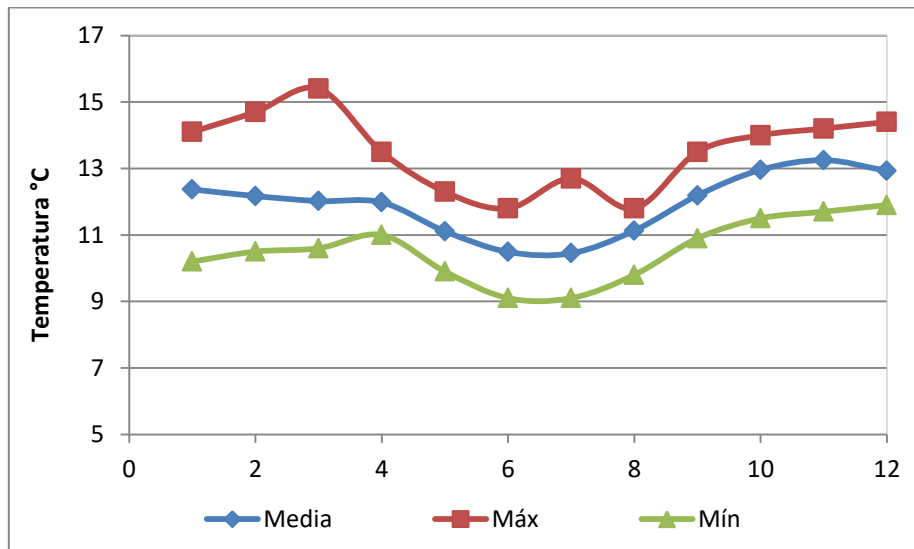
**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

En cuanto a la temperatura, según los datos registrados en la estación Coracora, se observa un valor promedio mensual de 11.92 °C, teniéndose los valores más bajos en los meses de invierno (junio a agosto) oscilando entre 10.49 °C y 11.13 °C, asimismo se observa los valores de temperatura mínima y máxima en promedio mensual.

**Tabla 3. Temperatura media mensual °C (1991-2014)**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
Media	12.37	12.17	12.02	11.98	11.11	10.49	10.45	11.13	12.19	12.96	13.25	12.93	11.92
Máx	14.1	14.7	15.4	13.5	12.3	11.8	12.7	11.8	13.5	14.0	14.2	14.4	13.53
Mín	10.2	10.5	10.6	11.0	9.9	9.1	9.1	9.8	10.9	11.5	11.7	11.9	10.52



**Figura 4. Temperatura media mensual (1991-2014)**

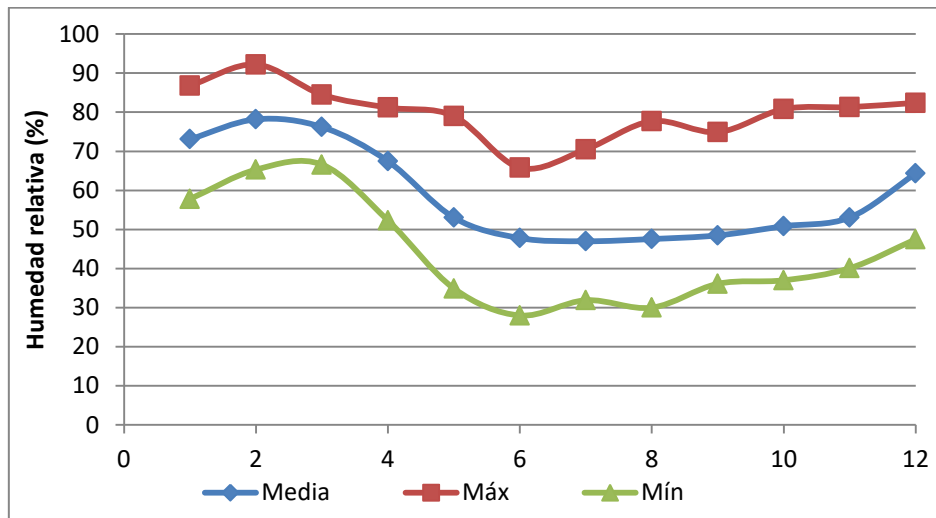
Fuente: Elaboración propia con datos de Senamhi

Respecto a la humedad relativa, se consideró la data de la estación Coracora en el cual se presenta una humedad relativa promedio mensual de 58.9 %, oscilando en verano entre 78.18% y 73.09 % y en los meses de invierno entre 47.8% y 46.99%, además se observa una humedad máxima media mensual de 79.7 % y una mínima de 43.9%, cuya variación se muestra en la tabla 4 y figura 5.

**Tabla 4. Humedad relativa media mensual en % (1991-2014)**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
Media	73.09	78.18	76.2	67.47	53.03	47.8	46.99	47.56	48.49	50.83	53.07	64.32	58.92
Máx	86.80	92.2	84.5	81.2	79.0	65.8	70.5	77.7	74.9	80.8	81.3	82.4	79.76
Mín	57.8	65.3	66.6	52.3	34.9	28.0	31.9	30.0	36.1	37.0	40.1	47.5	43.96



**Figura 5. Humedad relativa media mensual en % (1991-2014)**

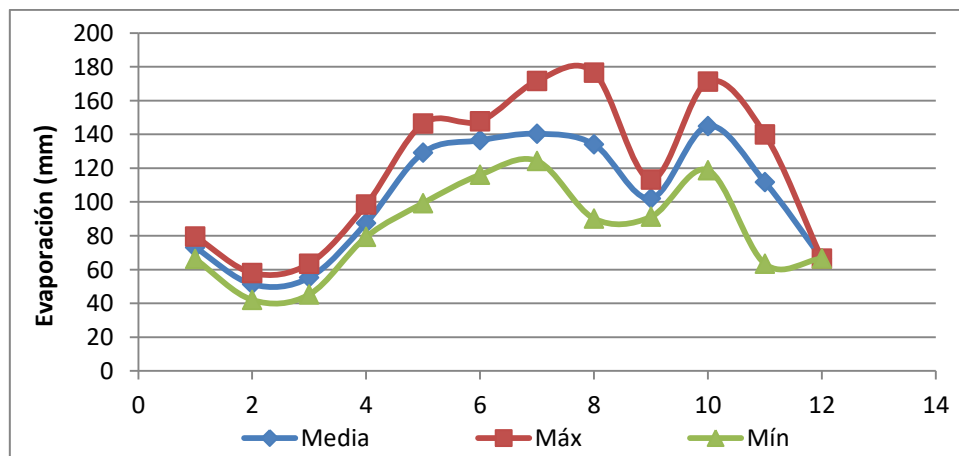
Fuente: Elaboración propia con datos de Senamhi

La evaporación registrada en la estación Coracora presenta un valor promedio mensual de 102.7 mm, oscilando en los meses de verano entre 51.3 mm y 73 mm y en los meses de invierno entre 134.1 mm y 140.4 mm, además se observa una humedad máxima media mensual de 119.4 mm y una mínima de 83.5 mm, cuya variación se muestra en la tabla 5 y figura 6.

**Tabla 5. Evaporación media mensual en mm (1991-2014)**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
Media	73.0	51.3	55.2	87.5	129.2	136.5	140.4	134.1	102.1	145.0	111.7	66.5	102.7
Máx	79.6	58.0	63.5	98.4	146.4	147.8	171.7	176.6	113.3	171.2	140.0	66.5	119.4
Mín	66.2	42.0	45.2	79.3	99.3	116.1	124.3	90.2	91.2	118.8	63.4	66.5	83.5



**Figura 6. Evaporación media mensual en mm (1991-2014)**

Fuente: Elaboración propia con datos de Senamhi

La evapotranspiración potencial mensual se determinó por el método de Thornthwaite, con la serie de datos de la temperatura mensual de la estación Coracora.

**Tabla 6. Evapotranspiración media mensual en mm (1991-2014)**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Temp (°C)	12.37	12.17	12.02	11.98	11.11	10.49	10.45	11.13	12.19	12.96	13.25	12.93
ETo	54.18	53.13	52.35	52.14	47.62	44.45	44.24	47.73	53.24	57.30	58.85	57.14

El clima en el área de estudio, en base al mapa de clasificación climática del Perú elaborado por el SENAMHI mediante el método de Thornthwaite, es de tipo Lluvioso Semi-frío presentando como características climáticas en una zona comprendida entre los 3800 a 4500 msnm, la presencia de lluvias abundantes entre los meses de húmedos que superan los 700 mm/año, con una humedad relativa calificada como Semi-húmeda (EIA de la U.M. Apumayo 2015).

### 2.3. Hidrología

La Unidad Minera Apumayo se ubica en la parte alta de la cuenca del río Yauca, el cual pertenece a la vertiente del Pacífico, a su vez Apumayo se encuentra en las subcuencas de los ríos Paralmayoc y Chaviña; y más específicamente en la cabecera de las microcuencas Jallpasca, Jispicahua, Chaviña, Humanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata, (ver figuras 7 y 8) que tienen influencia directa de la Unidad Minera y que es donde nace la red hídrica que tiene incidencia en el área de estudio, teniendo como principal fuente de alimentación la precipitación en forma de lluvia y granizo.

La cuenca Yauca tiene un área de drenaje total de 4.3 Km<sup>2</sup> y nace en la denominada cuenca seca, con el nombre de quebrada Antapallca, durante su recorrido viene recibiendo diferentes denominaciones según el lugar por donde discurre, asimismo va recibiendo el aporte de numerosos afluentes, los cuales son el escurrimiento del aporte pluvial, posteriormente, adopta sucesivamente los nombres de río Pallccarona, río Sangarara y río Lampalla, conociéndose como río Yauca a partir de su confluencia con la quebrada de Languirre, el cual conserva hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

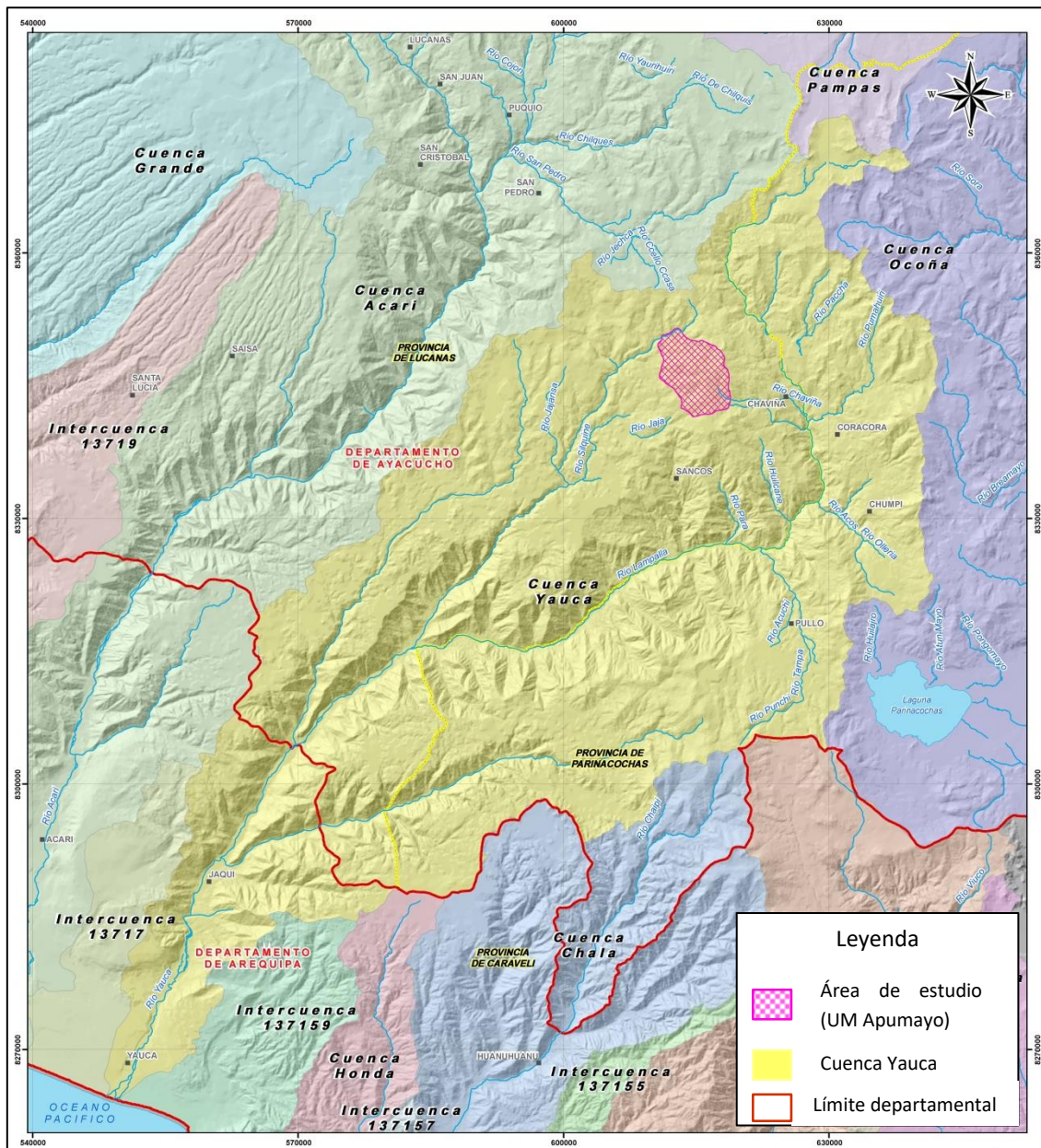
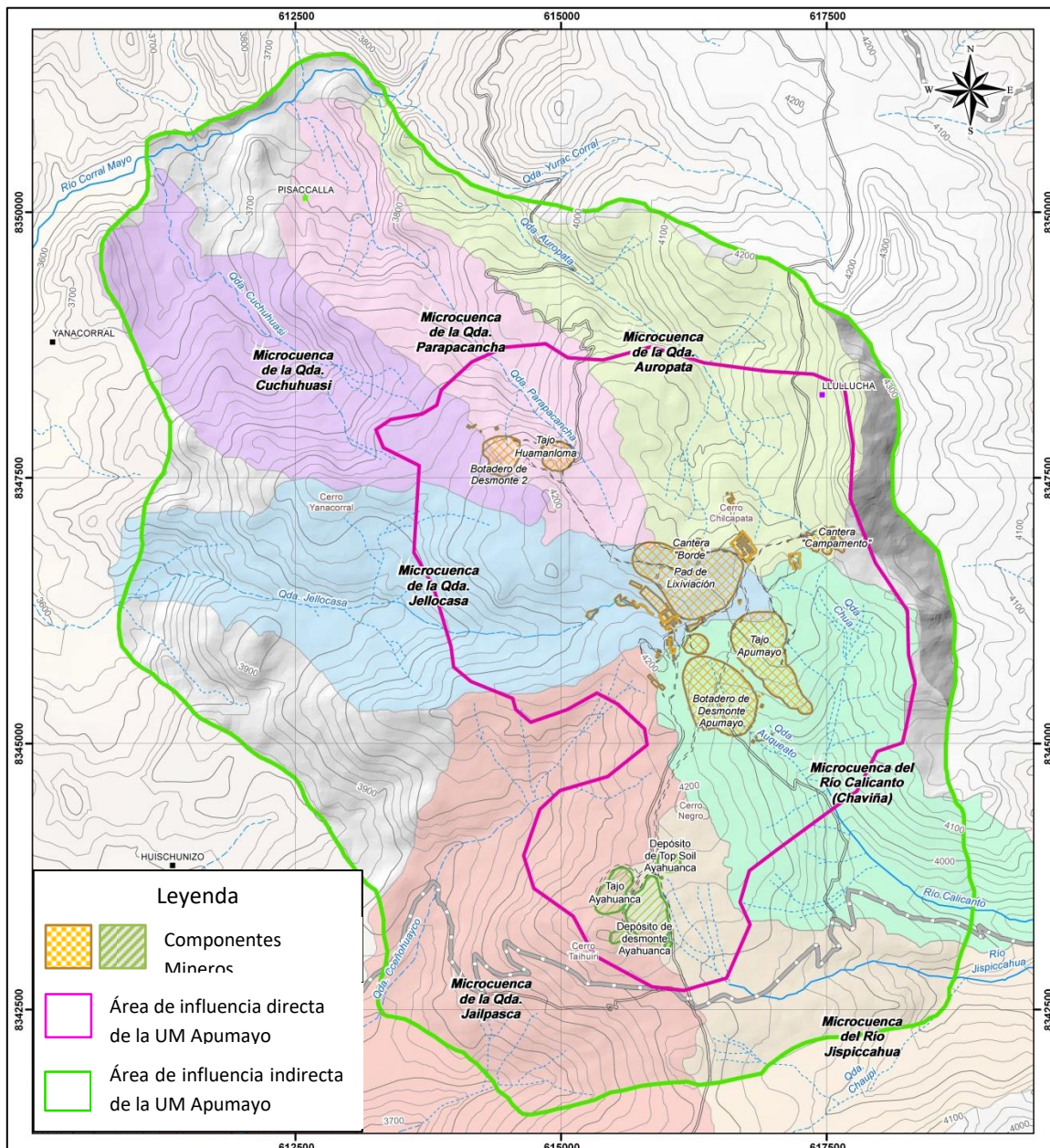


Figura 7. Mapa hidrográfico del área de estudio

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015



**Figura 8. Mapa hidrológico y de microcuencas del área de estudio**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

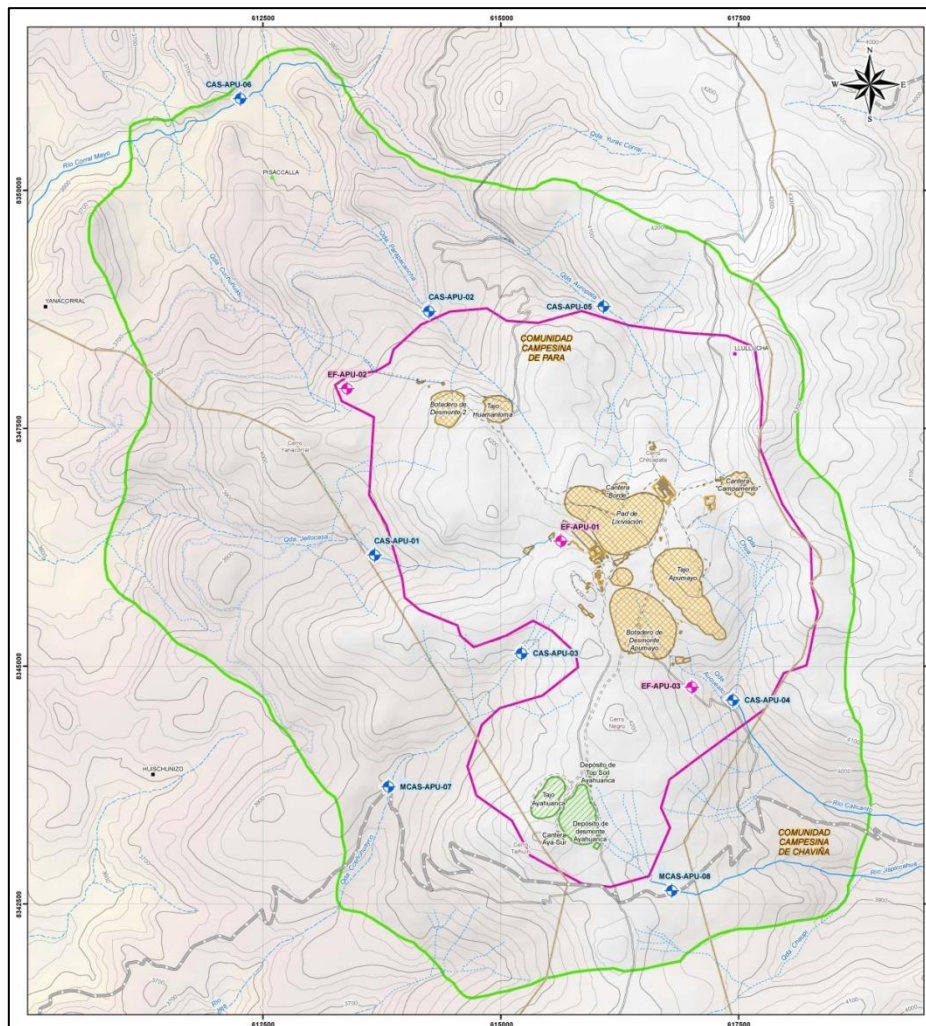
En las microcuencas no existe información histórica de registro de caudales controlados y registradas por estaciones hidrométricas, sólo se tiene valores de aforos puntuales que se han realizado en diferentes épocas del año como parte de los monitoreos ambientales trimestrales realizados desde el año 2012 en los puntos de monitoreo señalados en la figura 9, estos caudales registrados se muestran en la tabla 7 y donde se puede ver que los mayores valores registrados son de 1810.5 l/s aguas abajo de la microcuenca Parapacancha

y de 294.84 l/s en la microcuenca del río Calicanto durante épocas húmedas del año, además los caudales más bajos registrados son de 0.75 l/s y 1.27 l/s en la microcuenca Jallpasca.

**Tabla 7. Caudales en los puntos de aforo del área de estudio**

**Fuente: Elaboración propia con datos de informes de monitoreo ambiental Apumayo**

Trimestre	CAS-APU-01	CAS-APU-02	CAS-APU-03	CAS-APU-04	CAS-APU-05	CAS-APU-06
IV Trim (nov) 2012	3.5	10.28	2.98	2.31	23.2	27.56
I Trim (feb) 2013	52.38	44.88	36.92	294.84	173.52	1810.5
II Trim (may) 2013	70	41.79	46.8	58.12	69.6	195
III Trim (set) 2013	58.28	1.88	-	12.52	21.45	87.75
IV Trim (dic) 2013	7.5	4.08	-	2.79	13.28	78.62
I Trim (feb) 2014	3.75	2.95	0.75	1.82	11.31	107.63
II Trim (may) 2014	2.5	4.37	7.39	5.64	30.56	48.73
III Trim (ago) 2014	4.5	4.5	1.27	5.69	27.49	43.03
I Trim (mar) 2015	8.9	2.9	1.25	10.44	4.39	118.4



**Figura 9. Mapa de ubicación de puntos de aforo. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

## 2.4. Geomorfología

Desde el punto de vista de la geomorfología el área de la Unidad Minera Apumayo se encuentra en el piso superior de la Cordillera Occidental de los Andes, específicamente en la cadena volcánica del sur del Perú, entre los 4 000 a 4 300 msnm.

Las dos quebradas principales en el área de estudio son: por el Sureste la quebrada Auqueato y por el Oeste la quebrada Jelloccasa. Por estas quebradas discurren riachuelos de escaso caudal la mayor parte del año, salvo en los meses de lluvias. Los suelos presentan superficies con escasa cobertura vegetal.

El área de estudio se encuentra circunscrita en su mayor parte en la unidad geomorfológica denominada zona de altiplanicies, llamada también “Superficie Puna”, representada por una superficie subhorizontal de relieve suave, cotas comprendidas entre los 4 300 y 4 000 msnm; y un pequeño porcentaje del área estudiada se encuentra en la región geomorfológica denominada valle interandino, que corresponde al área de las mesetas disectadas, los valles muestran en sus partes altas perfiles transversales amplios y abiertos correspondientes a la etapa valle ubicada entre los 4 000 y 3 000 m, en este estadio se incluyen también las cabeceras de drenaje secundario que recoge la esorrentía de la mayor parte de la zona alta de la cuenca.

## 2.5. Geología

La unidad minera Apumayo es un depósito de tipo epitermal de alta sulfuración, cuyas características geológicas se describen a continuación:

### *Litología*

El depósito mineral está conformado por brechas que afloran en los cerros Huaman Loma y Auqueato, las cuales se hospedan en un conjunto de rocas volcánicas conformadas por el



Grupo Barroso y el Grupo Tacaza; y sobreyacen en discordancia depósitos cuaternarios constituidos por material aluvial y coluvial.

- Grupo Tacaza (PN-ta): Es de edad Mioceno inferior a medio y se le estima un grosor entre 1 600 y 1 800 m. Se ha diferenciado al grupo Tacaza, en dos unidades caracterizadas por sus diferencias litológicas: volcánico-sedimentario como unidad inferior, que consiste de una alternancia de areniscas de grano medio a grueso, con matriz tufácea y color gris con tonalidades verdosas, que intercalan con capas delgadas de lutitas de tonalidades rojizas a violáceas y capas de aglomerados y brechas con elementos poligénicos y heterométricos menores de 10 cm; y como unidad superior a la volcánica, representada litológicamente por derrames mayormente andesíticos y riolíticos de color gris a gris violáceo y beige oscuro, en los que se intercalan brechas y conglomerados volcánicos con matriz tobácea; las andesitas son de textura porfirítica con fenos de plagioclasas alteradas, tienen baja porosidad y buena cohesión; las rocas tobáceas son de naturaleza porosa, presentan plagioclasas sericitizadas, partículas de limolitas y algunos fragmentos líticos de color gris verdoso a blanco pálido.
- *Grupo Barroso (Qpl-ya/an)*: Consta de un conjunto de rocas volcánicas de naturaleza mayormente lávica. Se le asigna una edad Pleistoceno. Se ha diferenciado al grupo Barroso en dos unidades por sus diferencias litológicas: Volcánico Barroso inferior, constituido por una alternancia de derrames y piroclásticos, los primeros corresponden a andesitas y traquiandesitas y los segundos a brechas y aglomerados volcánicos, se puede observar en la zona de estudio superficies peneplanizadas en donde los derrames lávicos se encuentran en posición subhorizontal, pero en los flancos de los centros volcánicos, las capas lávicas periclinales se han consolidado con pendientes que varían entre 35°, 10° y 15°; la unidad Volcánico Barroso superior, litológicamente está representado por una secuencia de rocas piroclásticas cuya sección inferior está constituida por intercalaciones de bancos gruesos de tobas soldadas de aspecto masivo y cavidades vacuolares con pómez, la roca presenta coloración gris violácea en superficie fresca, variando a gris claro por intemperismo, los niveles superiores están compuestos por tobas brechoides de color



blanco salmón, cuya masa contiene fenocristales de plagioclasas de 1 a 2 mm y engloba elementos líticos finos angulosos a subredondeados mayormente lávicos.

En resumen, la litología de esta zona, basada además en logueos de taladros, presenta:

- Andesita Fresca.- De grano fino a medio y grueso, es la roca de mayor exposición, presenta fracturamiento especialmente en su zona más superficial. Esta roca volcánica se encuentra aflorando en las partes altas y cortes en el área del proyecto minero Apumayo.
- Andesitas Porfíricas, Sericitizadas, Argilitizadas.- Con un fracturamiento que varía desde débil a fuerte, en profundidad aproximadamente a 100 m de la superficie se observa piritas finamente diseminadas y en vetillas.
- Tufo de Cristales.- Se caracteriza por alto contenido de plagioclasas y biotita. Aflora fuera de la zona mineralizada, en la ampliación de Apumayo.
- Brechas Hidrotermales.- Se caracterizan por cortar a otros tipos de rocas y por lo general estar mineralizadas.
- Brechas Freatomagmáticas.- Afloran en forma sub-vertical en el sector sur del tajo proyectado, en contacto en ocasiones con dacitas.
- Intrusivo Dacítico Sub-vertical.- Se ubica al norte del tajo proyectado, aprovecha los sistemas de fallas para ascender y está relacionado con la mineralización en este sector.

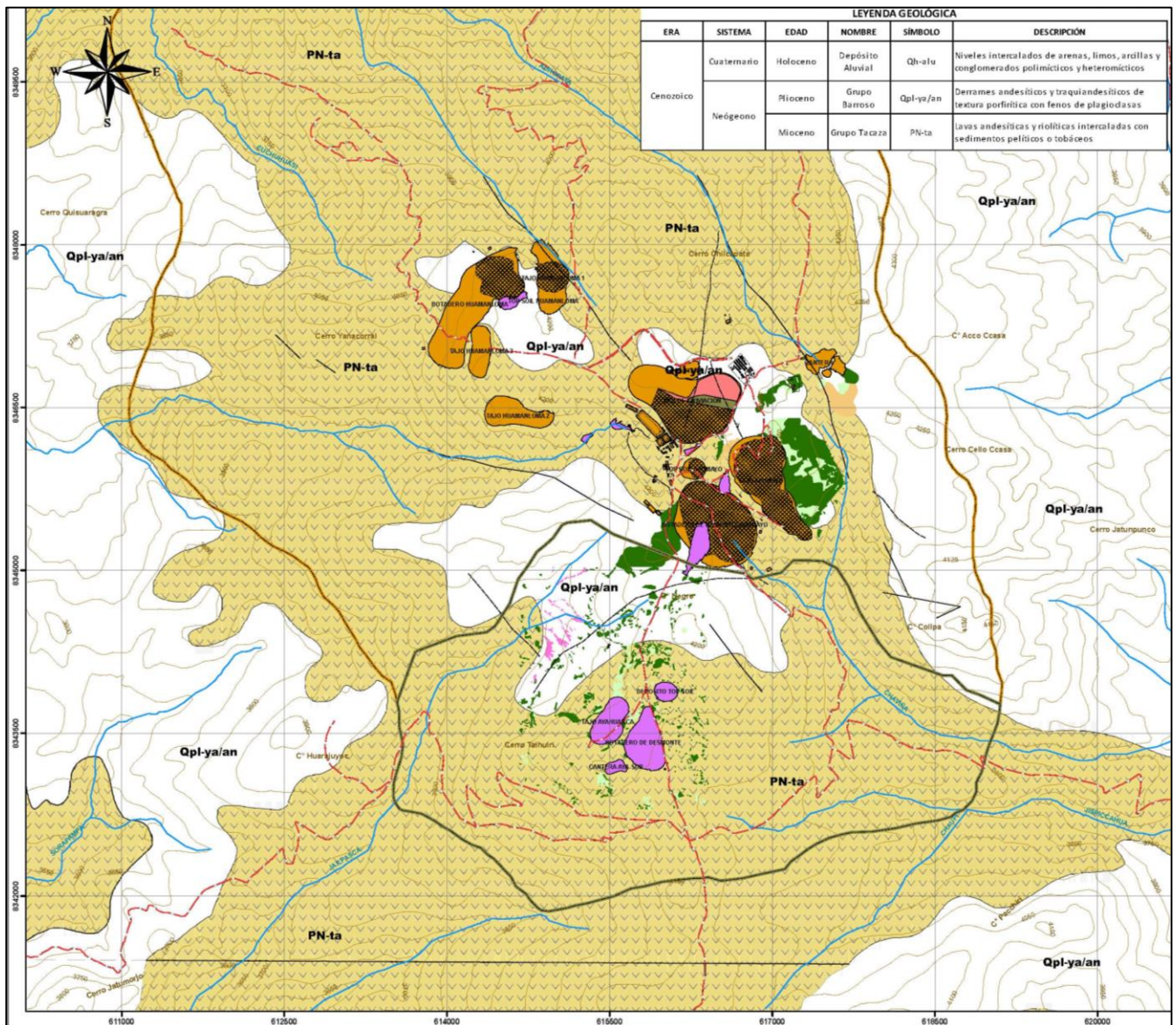


Figura 10. Mapa Geológico de la zona de estudio. Fuente: INGEMMET

### Geología estructural

La geología estructural del área está relacionada principalmente con los movimientos tectónicos del ciclo andino. Se han dividido las estructuras regionalmente de oeste a este en varias zonas con características estructurales propias, así tenemos la zona de fallamiento en bloques, zona de emplazamiento de batolito, zona plegada y zona poco deformada. A nivel local la zona que corresponde al área de estudio es la poco deformada, la cual en su mayor parte está compuesta por las rocas volcánicas Cenozoicas, especialmente la cubierta del grupo Barroso, que exhibe una posición horizontal a sub-horizontal, pero que muchas veces



alcanza inclinaciones de 15° debido solamente a la posición inicial del paleorelieve cubierto por estos volcánicos. Se tienen también sistemas de fallas y/o lineamientos estructurales de rumbo andino NO-SE, constituyendo estas estructuras un control importante de la mineralización. Las fallas y lineamientos N-S y E-O son de menor dimensión y exposición local.

### *Geofísica*

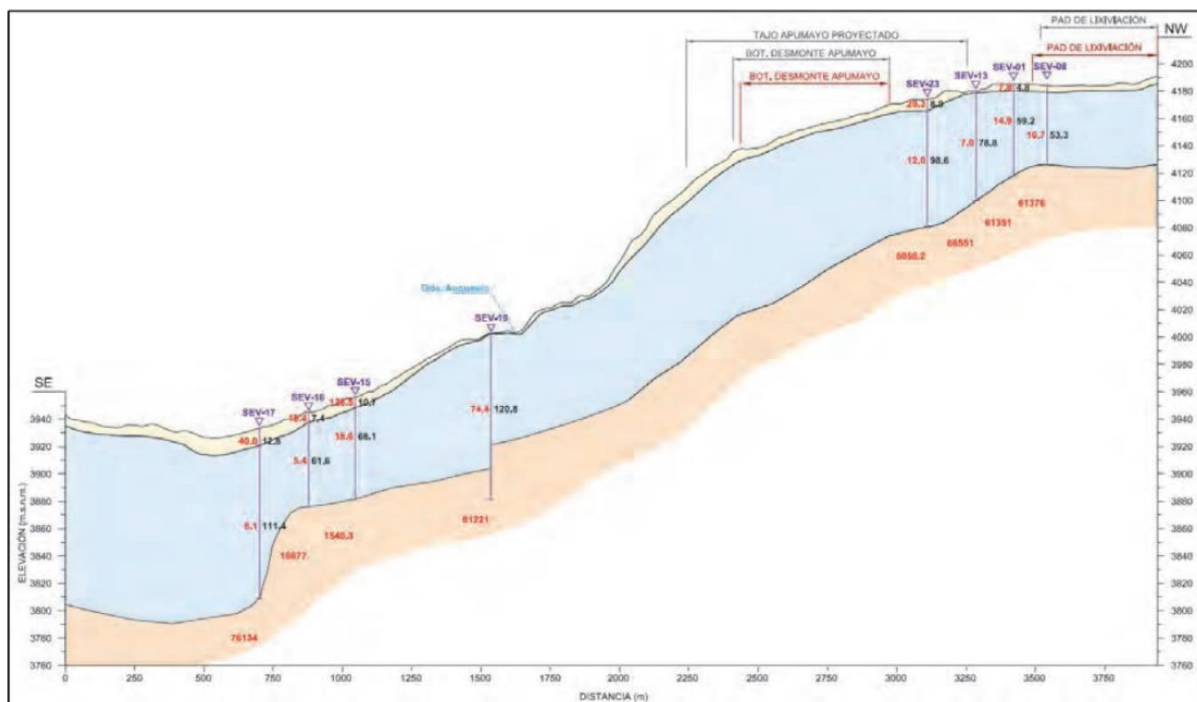
El estudio geofísico complementó a la información geológica con fines hidrogeológicos y así obtener las secciones hidrogeológicas que permitió comprender el funcionamiento del sistema acuífero y construir el modelo hidrogeológico conceptual y numérico en la zona de estudio.

Respecto al estudio geofísico, se realizó la medición de resistividad mediante método eléctrico en toda la zona de estudio, en especial las zonas de los componentes mineros existentes y proyectados, además en las quebradas tales como Huaman Loma y Chaviña. Se realizaron un total de 47 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y de Polarización Inducida, en dos etapas de campo, en el año 2010, fueron 27 sondajes eléctricos verticales, y, en el año 2015, 20 sondajes más. Los sondajes fueron realizados para determinar la geometría, límites, tanto horizontal como vertical del acuífero, así como investigar el espesor, nivel del agua subterránea, profundidad del basamento rocoso y la respectiva correlación con los taladros diamantinos realizados en la zona de estudio.

Se construyeron un total de siete (07) secciones georesistivas en las cuales se distinguen tres (03) estratos. La distribución de resistividades para la zona de estudio tiende a ser variable, esto se debe a que en su mayoría está conformado de materiales de deposición cuaternario. Todas las secciones presentan anomalías de alta resistividad en el segundo estrato causadas por zonas de mayor alteración o por tratarse de una zona más mineralizada que la roca que la envuelve. A continuación se describe dos (02) de las secciones georesistivas que fueron determinadas:

*Sección Georesistiva A-A'.*- La presente sección se muestra en la figura 11 cuya orientación es SE a NW, con una longitud de 4 000 m, fue elaborada con los SEV-01, SEV-08, SEV-13, SEV-15, SEV-16, SEV-17, SEV-19 y SEV-23; y con los piezómetros PZAP-01 y PZAP-04.

- Primer estrato: Este estrato posee resistividades variables que van de de 5.7 a 128.5  $\Omega$  presentando espesores de 0.7 a 128.5 m estos valores de resistividad corresponden a zonas de cobertura y resistencia alta donde el suelo se encuentra seco.
- Segundo estrato: Este estrato posee resistividades de 5.4 a 74.4  $\Omega$  m presentando espesores variables que van desde 53.3 a 120.8 metros.
- Tercer estrato: Este tercer estrato georesistivo se encuentra formado por el estrato impermeable, se caracteriza por sus valores mayores de 1540.3  $\Omega$ -metros.



**Figura 11. Sección Georesistiva A-A'.** Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

*Sección Georesistiva E-E'.*- La presente sección se muestra en la figura 12 cuya orientación es SO-NE, con una longitud de 3600 m, está elaborada con los SEV-09, SEV-13, SEV-14 y SEV-16.

- Primer estrato: Este estrato posee resistividades variables que van de 211 a 1206  $\Omega$  m presentando espesores de 0.0 a 1.5 m estos valores de resistividad corresponden a materiales de cobertura, son zonas de resistencia alta donde el suelo se encuentra seco.
- Segundo estrato: Este estrato posee resistividades de 39.1 a 74.20  $\Omega$  m presentando espesores variables que van desde 18.3 a 131.2 metros, estos valores de resistividades corresponden a materiales con resistencias bajas.
- Tercer estrato: Este tercer estrato georesistivo se encuentra formado por el estrato impermeable. Se caracteriza por sus valores mayores de 6800  $\Omega$ -metros, los espesores no han sido cuantificados, lo que posiblemente correspondería a una roca volcánica andesítica compacta.

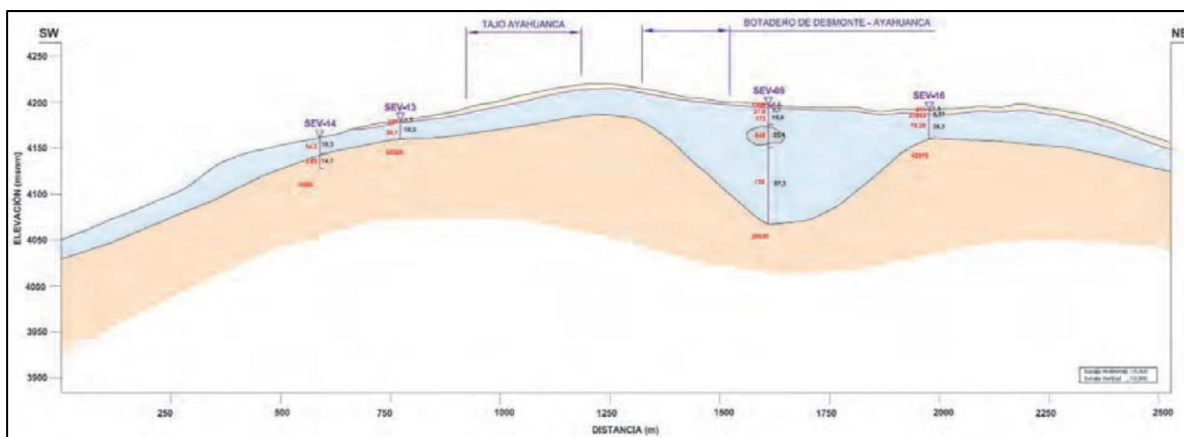


Figura 12. Sección Georesistiva E-E'. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

## 2.6. Hidrogeología

Como parte de la modificación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de la unidad minera Apumayo se tiene como anexo el Estudio Hidrológico e Hidrogeológico en cuyo informe se describe a los modelos hidrogeológicos conceptual y numérico desarrollados en el año 2010 y actualizados en el año 2015, de los cuales a continuación se realiza una síntesis, puesto que la configuración de la modelación del presente trabajo partirá de dichos modelos.

### 2.6.1. Hidráulica subterránea

La evaluación de la hidráulica subterránea como parte del estudio del funcionamiento del acuífero y el movimiento del agua en un medio poroso o fracturado como en este caso,

para cuantificar la capacidad de almacenar y transmitir agua, se ha determinado las características hidráulicas del acuífero, empleando la técnica de evaluación mediante ensayos de bombeo y pruebas de inyección de agua de Lugeon y Lefranc a carga constante y a carga variable.

En el año 2010 se realizaron cuatro (04) pruebas de bombeo en la zona del proyecto, mediante la metodología de caudal constante, variable y medida de recuperación en los piezómetros instalados.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos como parámetros hidráulicos del acuífero con el método Theis y Jacob y el método Cooper y Jacob.

**Tabla 8. Parámetros hidráulicos de los piezómetros según las pruebas de bombeo. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

Código	Ubicación	Método Theis y Jacob Correction			Método Cooper y Jacob Recta Lineal		
		K (m/d)	T (m <sup>2</sup> /d)	S	K (m/d)	T (m <sup>2</sup> /d)	S
AY SUB 01	Próximo al río Calicanto	4.53 x 10 <sup>-2</sup>	2.08 x 10 <sup>-1</sup>	5.00 x 10 <sup>-1</sup>	5.28 x 10 <sup>-1</sup>	2.42 x 10 <sup>-1</sup>	7.85 x 10 <sup>-8</sup>
PZAP 03	100 m bajo el Botadero Ayahuanca	3.05 x 10 <sup>-2</sup>	2.85 x 10 <sup>-1</sup>	5.00 x 10 <sup>-1</sup>	3.05 x 10 <sup>-1</sup>	2.86 x 10 <sup>-1</sup>	4.70 x 10 <sup>-9</sup>
APU SUB 07	Quebrada Jelloccasa	1.94 x 10 <sup>-1</sup>	2.18 x 10 <sup>-1</sup>	5.00 x 10 <sup>-1</sup>	1.91 x 10 <sup>-1</sup>	2.14	2.85 x 10 <sup>-9</sup>
APU SUB 10	HuamanLoma	1.07 x 10 <sup>-1</sup>	1.48 x 10 <sup>-1</sup>	5.00 x 10 <sup>-1</sup>	1.09 x 10 <sup>-1</sup>	1.51	4.45 x 10 <sup>-7</sup>

Así también para la determinación de la permeabilidad, en el año 2010 se realizó además pruebas con adición de agua a los piezómetros, aplicando la metodología de Lugeon “prueba de packer” y Lefranc que son pruebas a carga constante y carga variable, estas pruebas fueron realizadas en junio del 2010 por la empresa MDH S.A.C. bajo la supervisión de WALSH DEL PERÚ S.A., dichas pruebas se han realizado a los ocho (08) piezómetros instalados en la

unidad minera. Por último en el año 2015 se realizó pruebas de adición de agua a los nuevos piezómetros instalados en la zona de Ayahuanca AY-SUB-02 (P-01), AY-ASUB-03 (PZ-02).

En la tabla 9 se resumen los resultados de la interpretación de los parámetros hidráulicos a diferentes profundidades, correlacionando los datos litológicos obtenidos mediante los logueos de las muestras recuperadas de los piezómetros perforados en la zona de estudio, así como la definición de formaciones correspondientes.

**Tabla 9. Permeabilidad calculada según las pruebas de Lugeon y Lefranc. Litología de las formaciones en los piezómetros. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015.**

Código	Ubicación	Formación	Litología	Permeabilidad según Lugeon y Lefranc K (cm/s)
AY SUB 01	Costado del río Calicanto	Cuaternario	0-19 m. material de cobertura: grava limosa mezclada con arena, suelo residual	$1.27 \times 10^{-4}$
		Grupo Barroso	19-60 m. Roca fracturada	$6.24 \times 10^{-4}$
APU SUB 02	200 metros abajo del Tajo	Cuaternario	0-11 m. Material de cobertura y suelo residual: arena limosa con presencia de grava	$1.28 \times 10^{-4}$
		Grupo Barroso	11-124 m. Roca fracturada	$6.31 \times 10^{-4}$
PZAP 03	100 metros abajo del Botadero	Cuaternario	0-5 m. Material de cobertura y suelo residual	-
		Grupo Barroso	5-21 m. Roca fracturada	$2.56 \times 10^{-3}$
			21-50 m. Roca levemente fracturada	$9.74 \times 10^{-4}$
APU SUB 03	Entorno del Tajo	Cuaternario	0-9 m. material de cobertura: Arcilla limosa	-
		Grupo Barroso	9-80 m. Roca fracturada	$2.68 \times 10^{-4}$
			80-150m. Roca levemente fracturada	$6.77 \times 10^{-5}$
APU SUB 11	200 metros abajo del Botadero 2	Cuaternario	0-30 m. Material de cobertura y suelo residual: Limos, grava limosa	$2.33 \times 10^{-3}$
		Grupo Barroso	30-80 m. Roca fracturada	$6.92 \times 10^{-4}$



APU SUB 12	300 metros abajo del PIT 3	Cuaternario	0-60 m. Material de cobertura y suelo residual: arcillas limos y arenas	$3.45 \times 10^{-3}$
APU SUB 07	Quebrada Jelloccasa	Cuaternario	0-3 m. Material de cobertura y suelo residual	-
		Grupo Barroso	3-34 m. Roca fracturada	$5.45 \times 10^{-4}$
			34-50 m. Roca levemente fracturada	$7.06 \times 10^{-4}$
APU SUB 10	Huamanloma	Cuaternario	0-4 m. Material de cobertura y suelo residual	-
		Grupo Barroso	19-113 m. Roca fracturada	$3.66 \times 10^{-4}$
			113-150 m. Roca levemente fracturada	$1.03 \times 10^{-6}$
AY-SUB-02	Zona Ayahuanca		18.00 A 25.80 m Andesita fracturada	$1.87 \times 10^{-3}$
			31.50-57.80 m Andesita fracturada	$3.86 \times 10^{-5}$
			127.00-150.80 m Andesita fracturada	$1.58 \times 10^{-5}$
			57.80-75.80 m Andesita	$1.82 \times 10^{-6}$
			76.00-101.40 m Andesita	$2.47 \times 10^{-6}$
			100.00-126.80 m Andesita	$2.11 \times 10^{-5}$
			126.80-150.80 m Andesita	$1.17 \times 10^{-5}$
			154.00-175.40 m Andesita moderadamente fracturada	$1.43 \times 10^{-5}$
			185.00-200.00 m Andesita moderadamente fracturada	$2.08 \times 10^{-6}$
AY-SUB-03	Zona Ayahuanca		10.00-25.90 m Andesita moderadamente fracturada	$1.72 \times 10^{-4}$
			40.00-60.00 m Andesita moderadamente fracturada	$2.72 \times 10^{-5}$

## 2.6.2. Modelo hidrogeológico conceptual (EIA 2015 de la U.M. Apumayo)

2.6.2.1. Objetivo del modelo conceptual: De acuerdo a la revisión del informe realizado por HGS Perú S.A. el desarrollo del modelo conceptual del sistema tiene como propósito identificar las unidades hidroestratigráficas, las fronteras del sistema y la definición del sistema de flujo.

La definición de las características hidrogeológicas y del acuífero en la zona de estudio, lo realizaron en base a la información geológica, los registros litológicos de las perforaciones para los piezómetros, las campañas de prospección geofísica eléctrica y los parámetros hidráulicos obtenidos en los piezómetros instalados, así como los niveles freáticos medidos en cada uno de ellos.

Por lo que determinaron que el acuífero en la zona de estudio es un medio fisurado y detrítico, y, se encuentra dividido en dos (02) zonas: el subsuperficial (bofedales y material cuaternario) y el profundo formado por una zona fracturada de roca andesita y brechas andesíticas.

2.6.2.2. Geometría del reservorio acuífero: De esto se menciona que el acuífero está limitado verticalmente en su cota más baja por la roca sana (no fracturada) del grupo geológico Tacaza que también aparece en algunas áreas en superficie, pero que en otras áreas se encuentra por debajo del grupo geológico Barroso (ambos grupos formados mayoritariamente por andesitas). Se puede decir que el acuífero está delimitado en la base por la roca andesítica intacta y superficialmente por los materiales del cuaternario que tienen un espesor de 5 a 10 m. El factor que domina la morfología del reservorio acuífero lateralmente es la presencia de dichos materiales, los cuales afloran ampliamente en el área de estudio y en sus proximidades. Por lo que se trata de un acuífero de gran continuidad lateral, es decir que ocupa una gran superficie del terreno.

2.6.2.3. Superficie piezométrica y red de flujo: Con el objeto de conocer la forma de la superficie piezométrica del manto estudiado, según lo mencionado en el informe, se

medió la profundidad del nivel estático del agua en los piezómetros (julio 2010, nov-dic 2014 y feb 2015) mostradas en la tabla 10, cuyo análisis unido al resto de investigaciones les permitió calcular la altura de la superficie piezométrica en metros sobre el nivel del mar, así como determinar el gradiente hidráulico, trazar las líneas de corriente y determinar la dirección y sentido del movimiento del agua subterránea. Además, se indica que en toda el área de estudio el nivel piezométrico se encuentra en equilibrio con la presión atmosférica dando lugar a un acuífero de tipo libre.

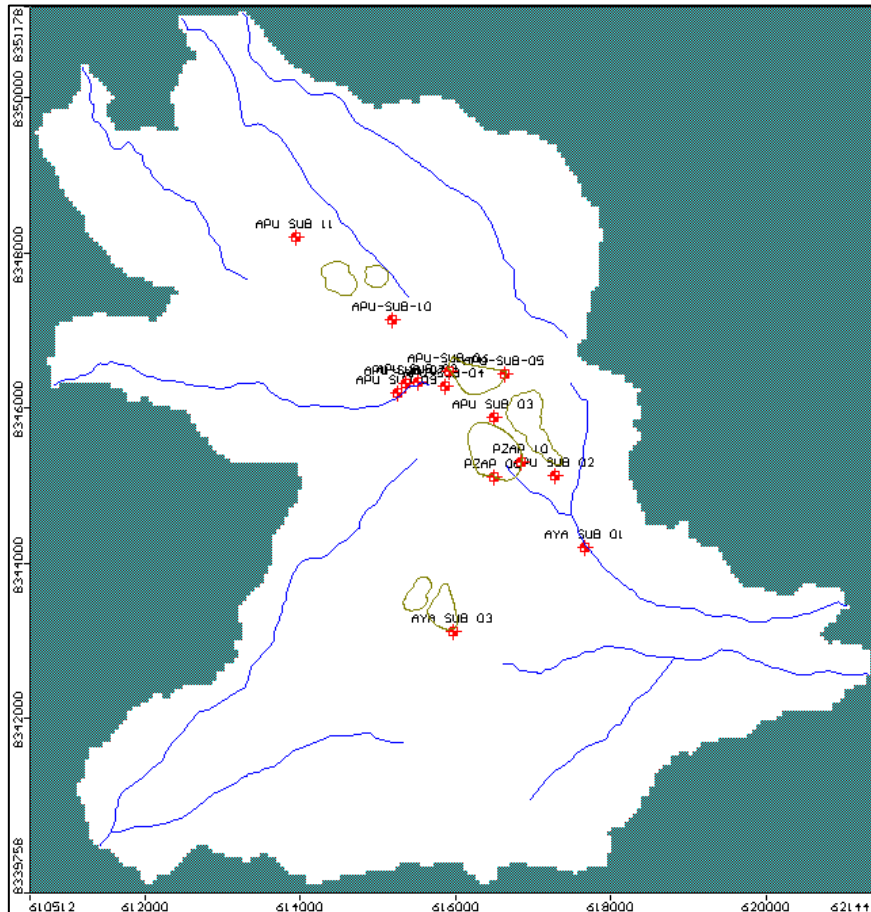
**Tabla 10. Ubicación de piezómetros y mediciones del nivel freático.**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

Código	Coordenadas WGS 84			Julio 2010		Nov-Dic 2014		Feb 2015	
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)	Prof. Nivel Freático (m)	Altitud (msnm)	Prof. Nivel Freático (m)	Altitud (msnm)	Prof. Nivel Freático (m)	Altitud msnm
APU-SUB-02	617273	8345130	4107	35.1	4071.9	6.0	4094.1	5.5	4101.5
APU-SUB-03	616486	8345885	4128	13.8	4114.1	25.6	4102.4	25.2	4102.8
APU-SUB-04	615856	8346272	4164	ND	ND	12.5	4151.5	12.2	4151.8
APU-SUB-05	616639	8346429	4239	ND	ND	9.3	4229.7	4.6	4234.4
APU-SUB-06	615909	8346480	4178	ND	ND	15.7	4162.3	15.4	4162.6
APU-SUB-07	615367	8346318	4125	ND	ND	16.1	4108.9	15.2	4109.7
APU-SUB-08	615518	8346333	4162	ND	ND	8.13	4153.9	8.1	4153.9
APU-SUB-09	615256	8346185	4119.42	ND	ND	13.42	ND	12.25	ND
APU-SUB-10	615183	8347132	4160	6.4	4155.6	7.1	4152.8	4.8	4155.2
APU-SUB-11	613936	8348194	4025	44.2	3984.8	42.5	3982.5	36.45	3982.1
AY-SUB-01	617666	8344194	3950	5.52	3 958	5.9	3 944.1	4.9	3945.1
AY-SUB-03	615968	8343124	4136	ND	ND	ND	ND	ND	ND

PZAP 09	616494	8345119	4140.84	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PZAP 10	616841	8345309	4143.32	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No hay data



**Figura 13. Mapa de ubicación de piezómetros**

**Fuente: Elaboración propia con datos del EIA de la U.M. Apumayo 2015**

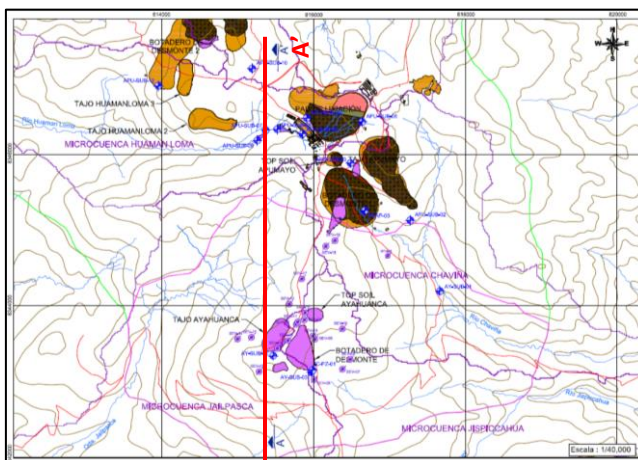
2.6.2.4. Zonas de recarga y descarga: Respecto a esta sección se menciona que la recarga se produce principalmente en la zona Este del área de estudio, ya que presenta una topografía más elevada y es donde ocurren las mayores precipitaciones del área, el relieve topográfico juega un papel importante en la recarga del acuífero, pues las zonas más elevadas del área de estudio son las que reciben un mayor aporte de lluvias, lo que produce la alimentación al sistema acuífero mediante la infiltración del agua a través de los materiales del cuaternario, que a su vez pasan a formar parte del acuífero fracturado de roca andesítica; aunque es deficitario durante los meses de estiaje, es debido a este proceso de recarga natural, que existe una napa freática que en general

fluctúa cuando se satura el acuífero. Las zonas de descarga del acuífero en la zona de estudio son las mismas quebradas existentes en la zona, tal y como se observa en el modelo conceptual construido, el cual se mostrará más adelante.

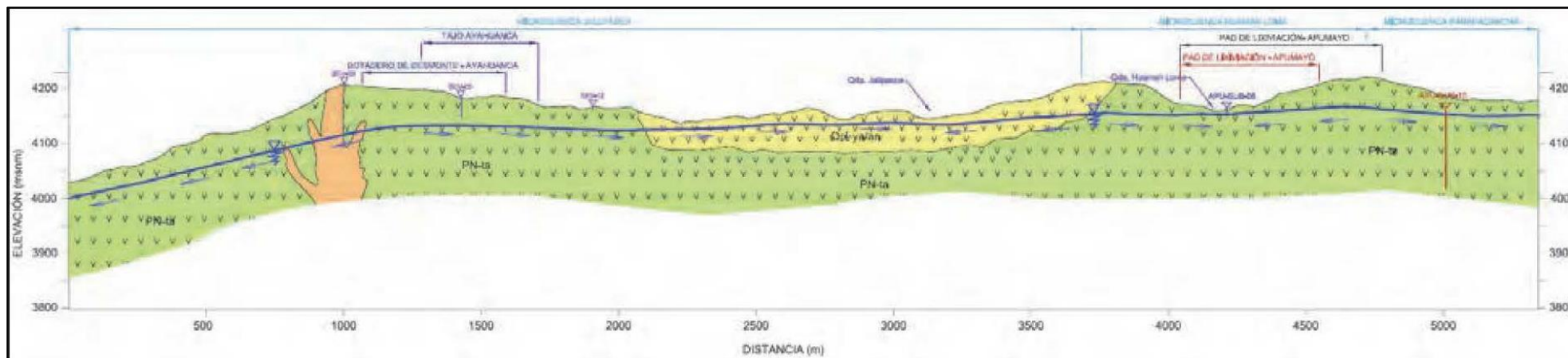
- 2.6.2.5. Dirección del flujo subterráneo: Según se indica en el informe realizado por HGS Perú, el movimiento del agua es complejo pero siempre es por la red de grietas interconectadas y a favor de diferencias de carga hidráulica o presión piezométrica y depende mucho de la orientación de la red de fisuras y de la inclinación relativa de unos sistemas con respecto a otros. Las direcciones de flujo subterráneo en la zona de estudio van, en general, de la parte alta de las microcuencas hacia su parte más deprimida o quebradas que discurren por la zona, que son las que producen la descarga de manera superficial. El flujo está controlado por la divisoria de cuencas sobre la que se emplaza el proyecto minero, así las cuencas situadas al norte tienen una dirección de flujo que va hacia el norte (microcuencas Auropata, Parapacancha y Cuchuhuasi). A su vez en las microcuencas ubicadas hacia el este (Chaviña y Jispicahua) la dirección de flujo va hacia la misma dirección. Por último en las microcuencas Huamanloma y Jallpasca, el flujo subterráneo discurre con dirección Este-Oeste.
- 2.6.2.6. Secciones hidrogeológicas del modelo conceptual: En la figura 15 se muestra la sección A-A', generada por HGS Perú, que presenta una orientación Sur-Norte, con una longitud de 5342 m y en ella aparecen los piezómetros APU-SUB-08, APU-SUB-10 y los sondajes eléctricos verticales SEV-03, SEV-05 y SEV-12. De la sección A-A', en el informe se describe lo siguiente: se observan las formaciones Tacaza y Barroso conformadas por andesíticas con intrusiones de brechas freatomagmáticas e hidrotermales, lo que indica la presencia de rocas de origen ígneo, en donde el flujo del agua se realiza fundamentalmente a través de fracturas y fallas menores, la sección atraviesa en la zona Norte a la microcuenca Parapacancha y a medida que se va hacia el Sur aparecen las microcuencas Huaman Loma y Jallpasca, además se intersecta el tajo Ayahuanca y también se proyecta el botadero de desmonte y el pad de lixiviación. Además, se menciona que las líneas de flujo se dirigen hacia las quebradas de la zona



de estudio y la cota más baja de nivel piezométrico se observa en la zona Sur de la sección puesto que es la zona de menor topografía situada a 4000 msnm, mientras que en la cota máxima se alcanza los 4167 msnm, en la divisoria entre las microcuencas Parapacancha y Huamanloma.



**Figura 14. Plano de vista en planta de la zona de estudio**  
**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**



**Figura 15. Sección Hidrogeológica Conceptual AA'. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**



En la figura 16 se presenta el modelo hidrogeológico conceptual generado por HGS Perú, en el cual se muestra las fronteras del modelo, las unidades hidroestratigráficas y el sistema de flujo en el área de estudio, observándose el resultado de las definiciones que se han descrito a lo largo de esta sección, donde el emplazamiento de la unidad minera se encuentra sobre las unidades geológicas Tacaza y Barroso obtenidos del mapa geológico regional, la recarga al sistema se da por la infiltración de la precipitación, la descarga a través de las quebradas, y, la delimitación de las microcuencas a partir de las cuales se obtendrán las fronteras del modelo.



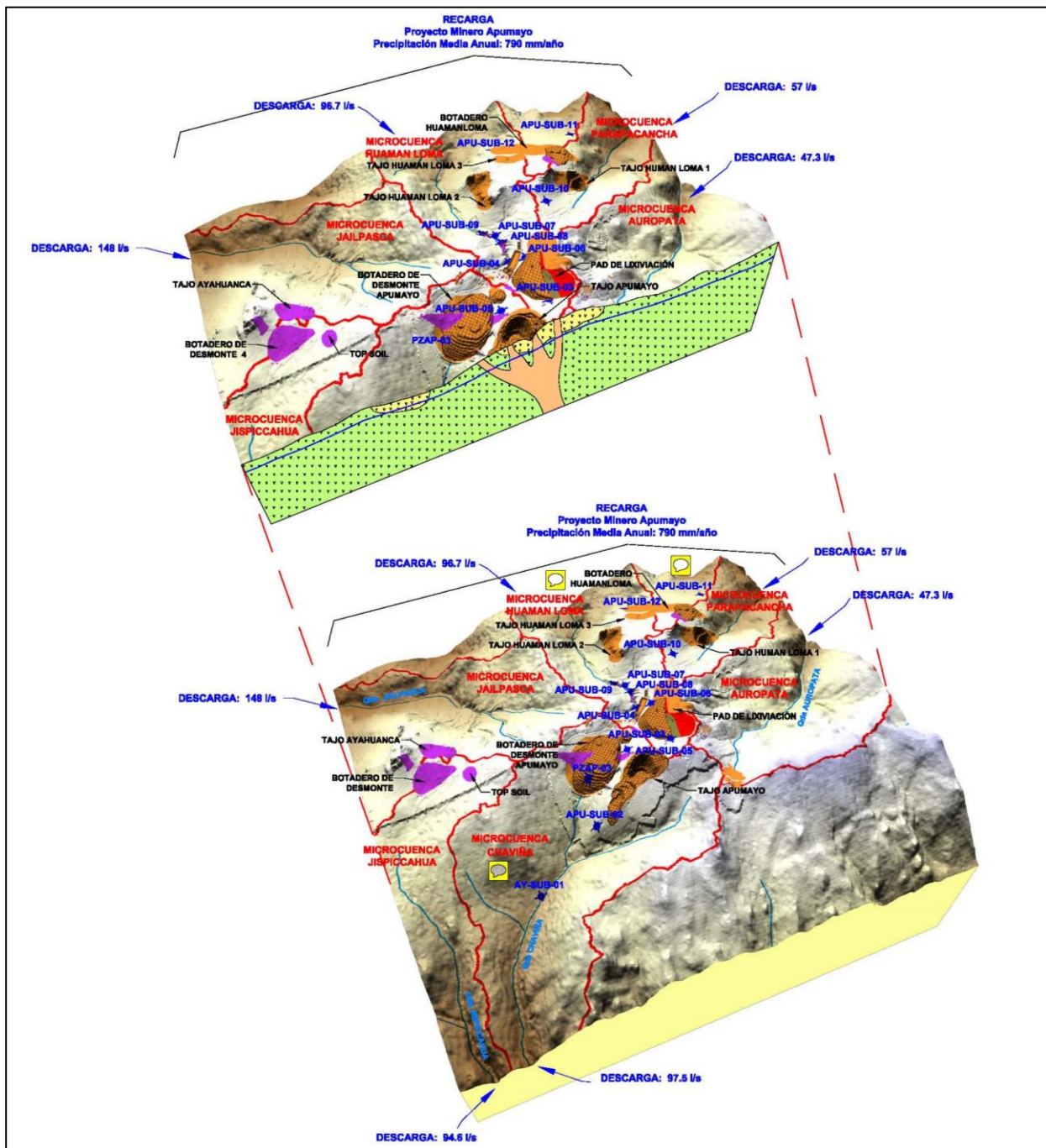


Figura 16. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

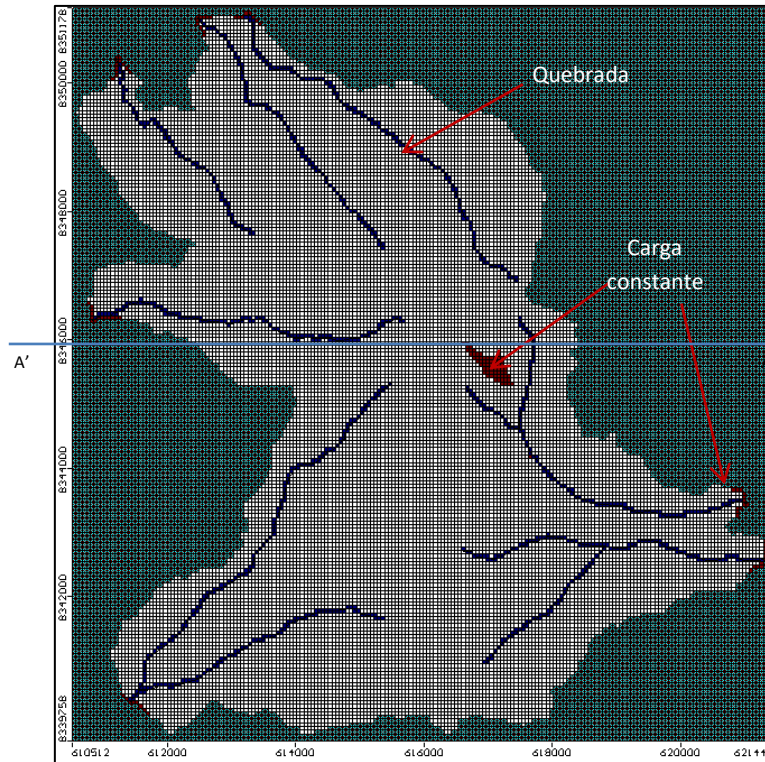
### 2.6.3. Modelo Numérico Hidrogeológico (EIA 2015 de la U.M. Apumayo)

Según la revisión realizada al informe hidrogeológico, el cual es parte del EIA, el modelo numérico fue ejecutado con el objetivo de conocer la dirección y flujo del agua subterránea durante las operaciones de mina para evaluar el impacto al acuífero por las actividades mineras. A continuación se hace un resumen de la construcción y los resultados obtenidos de dicho modelo realizado por la consultora HGS Perú S.A. que en adelante se hará referencia como el modelo inicial.

#### 2.6.3.1. Diseño del modelo numérico:

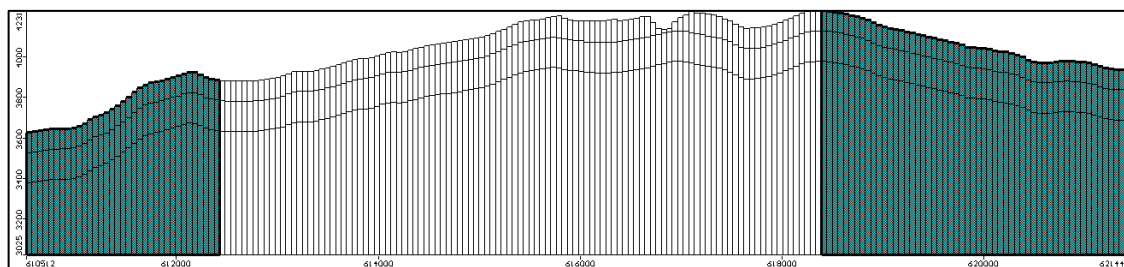
- Discretización.- La discretización horizontal del modelo numérico la realizaron mediante una malla de 200 filas y 200 columnas cubriendo una superficie total de 125.4 Km<sup>2</sup>, en cuanto a su discretización vertical definieron tres (03) capas, siendo el espesor de la primera capa 100 m en promedio, la segunda capa 150 m y la tercera capa, al ser la que representó el macizo rocoso, tuvo el mayor espesor (desde las cotas más bajas de la segunda capa hasta límite inferior del modelo) como se observa en la figura 17.
- Condiciones iniciales y de contorno: Sobre las condiciones iniciales, en el informe no se menciona como es que fueron determinadas y respecto a las condiciones de contorno se describe lo siguiente:
  - Condiciones de carga constante: Establecieron cargas piezométricas constantes en las celdas que se encontraban en las cotas más bajas de las quebradas y por tanto también en los límites del modelo. Además, se observa que plantearon celdas de nivel constante en el área del tajo Apumayo, las cuales no se representarían lo que se interpreta del modelo hidrogeológico conceptual.
  - Elementos de tipo río: Como condición de contorno de este tipo, según el informe, se puede ver que se representaron a las quebradas Jallpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata, sin embargo respecto a las

propiedades hidráulicas de los ríos, no se especifican los valores considerados, por lo que se deduce que fueron valores bibliográficos.



**Figura 17. Condiciones de contorno del modelo**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

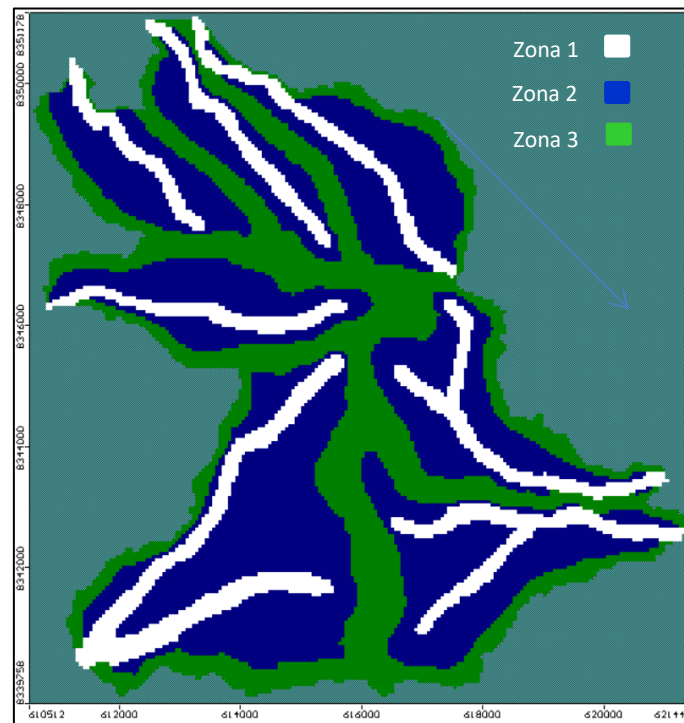


**Figura 18. Discretización vertical sección A'-A'**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

- Sistema de recarga: Lo definieron como recarga al acuífero únicamente por infiltración de la precipitación, para lo cual zonificaron la capa 1 en tres (03) áreas, cuya distribución se realizó en función de la altitud y delimitación de las microcuencas: zona 3 (parte más alta o divisoria de microcuencas) con 180 mm/año, zona 2 (parte intermedia) con 160 mm/año y zona 1 (quebradas o descarga de agua) con 0 mm/año. Según el informe estos valores los estimaron en base a un porcentaje de la

precipitación durante la calibración, luego se verificó en el modelo que se calibró con una recarga basada en un 20% de la precipitación en promedio.



**Figura 19. Mapa de recarga por infiltración de la precipitación del modelo**

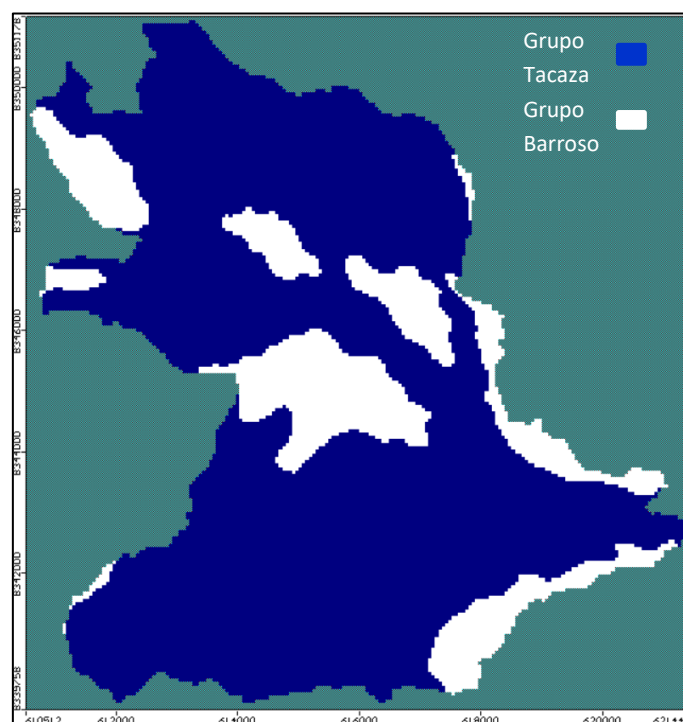
**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

- Propiedades hidráulicas
  - Conductividad hidráulica: Se observó que se establecieron dos (02) zonas homogéneas de la conductividad hidráulica en función de las unidades geológicas, además se menciona que se varió sus valores durante la calibración del modelo, los cuales se muestran a continuación. La zonificación de esta propiedad tiene la misma delimitación de las unidades geológicas que se presenta en el mapa geológico regional del estudio hidrogeológico del EIA que tiene como fuente a INGEMMET.

**Tabla 11. Conductividades hidráulicas del modelo numérico de HGS Peru S.A.**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

	Formación	Kxx	Kvv	Kzz
		(m/día)	(m/día)	(m/día)
Capa 1	Grupo Barroso	0.01	0.01	0.001
	Grupo Tacaza	0.05	0.05	0.005
Capa 2	Grupo Barroso	0.01	0.01	0.001
	Grupo Tacaza	0.05	0.05	0.005
Capa 3	Impermeable	0.0005	0.0005	$1 \times 10^{-5}$



**Figura 20. Mapa de conductividades hidráulicas del modelo (capa 1)**

Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

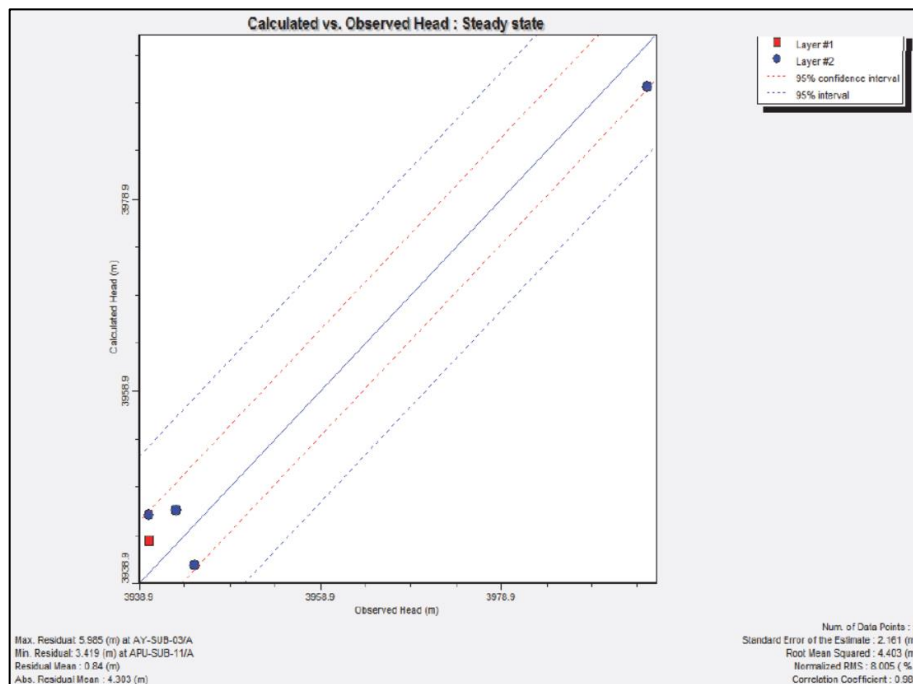
- Porosidad efectiva: A cada capa le asignaron una porosidad efectiva de acuerdo a su densidad de fracturamiento y la presencia de rellenos en las fracturas. Se menciona que es un parámetro que no se ha calibrado ya que sólo se ha realizado simulaciones en régimen estacionario, el cual no requiere su utilización.

**Tabla 12. Porosidad efectiva planteado por HGS Peru S.A.**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

	Formación	Zona	Porosidad efectiva
Capa 1	Grupo Barroso	Moderadamente fracturado	0.3
	Grupo Tacaza	Moderadamente fracturado	0.2
Capa 2	Grupo Barroso	Moderadamente fracturado	0.2
	Grupo Tacaza	Moderadamente fracturado	0.2
Capa 3	Grupo Tacaza	Ligeramente fracturado	0.1

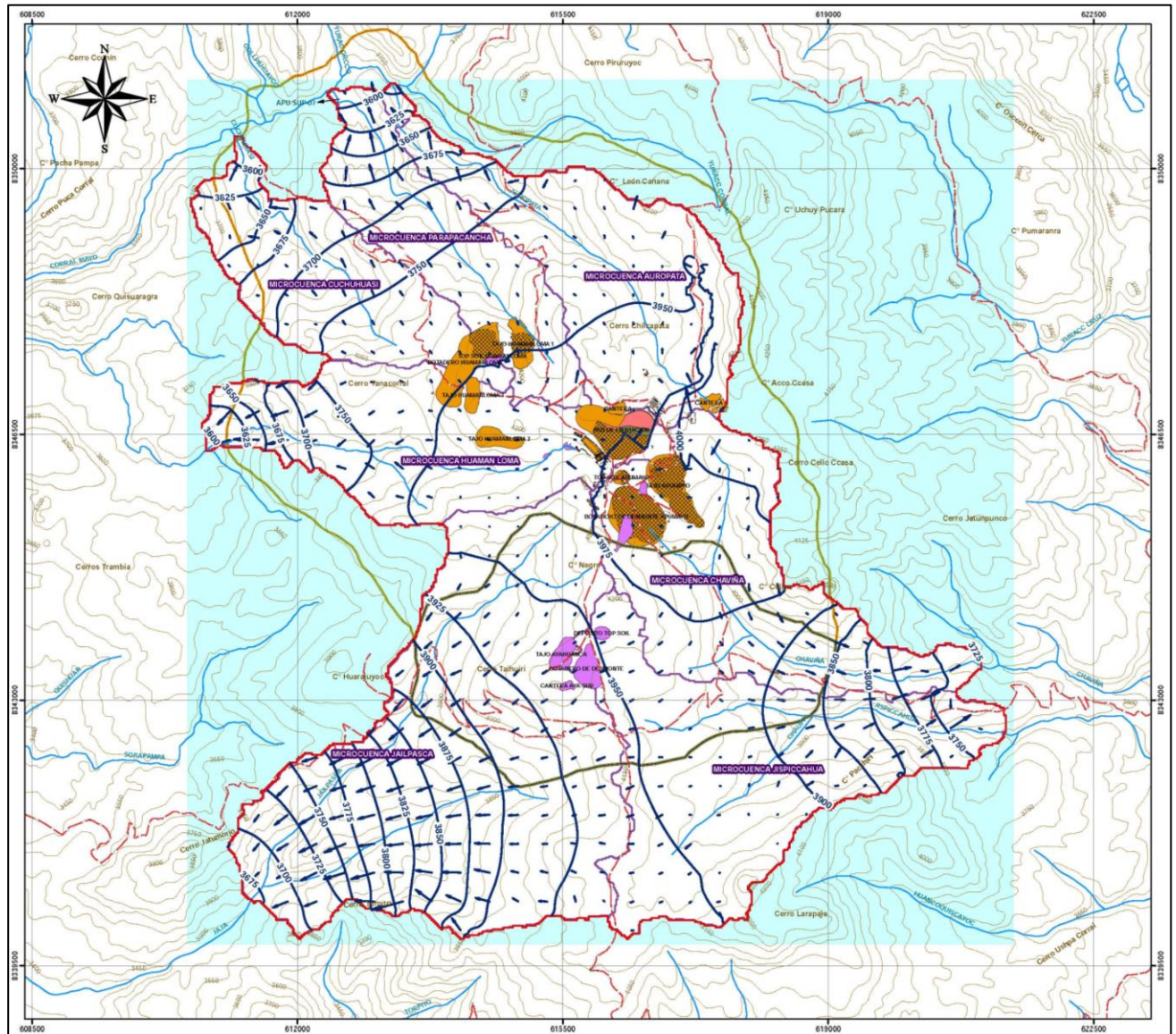
2.6.3.2. Calibración en régimen estacionario: Según lo mencionado en el informe de HGS Perú S.A. el proceso de calibración del modelo consistió en variar progresivamente los valores de conductividad hidráulica y recarga del acuífero hasta reducir la desviación entre el nivel piezométrico calculado y observado. En la gráfica de los resultados de la calibración se presenta el ajuste final con la raíz media cuadrática (RMS) normalizada de 8.005 % con datos de los cinco (05) piezómetros de observación que utilizaron para ello, tal como se observa en la siguiente figura. Para este modelo no realizaron la calibración en régimen transitorio.



**Figura 21. Gráfico de calibración de datos calculados vs observados. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**



2.6.3.3. Simulación del flujo subterráneo: Los resultados de la simulación del flujo en régimen estacionario realizado por HGS Perú S.A. que corresponde con la situación de los niveles piezométricos en febrero de 2015, se muestra en el mapa piezométrico de la figura 22. Las direcciones de flujo subterráneo van en general, desde la parte alta de las microcuencas hacia la zona más deprimida, es decir desde las partes altas de la unidad minera hacia las quebradas que discurren por la zona, que son las que producen la descarga de manera superficial. Al tratar el acuífero a escala de cuenca existen diversas direcciones las cuales están enfocadas hacia las descargas en los cauces principales, como son las quebradas Chaviña, Jispicahua, Jallpasca, Huaman Loma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata.



**Figura 22. Mapa de hidroisohipsas y líneas de flujo**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

En el informe de HGS Perú se presentan las secciones hidrogeológicas numéricas AA' y BB', las cuales tienen dirección Oeste-Este, en ellas se muestra el comportamiento del flujo en las zonas de los tajos, escombreras de estériles de mina y pad de lixiviación, describiéndose que dichos componentes mineros no interactúan con el nivel de flujo subterráneo.



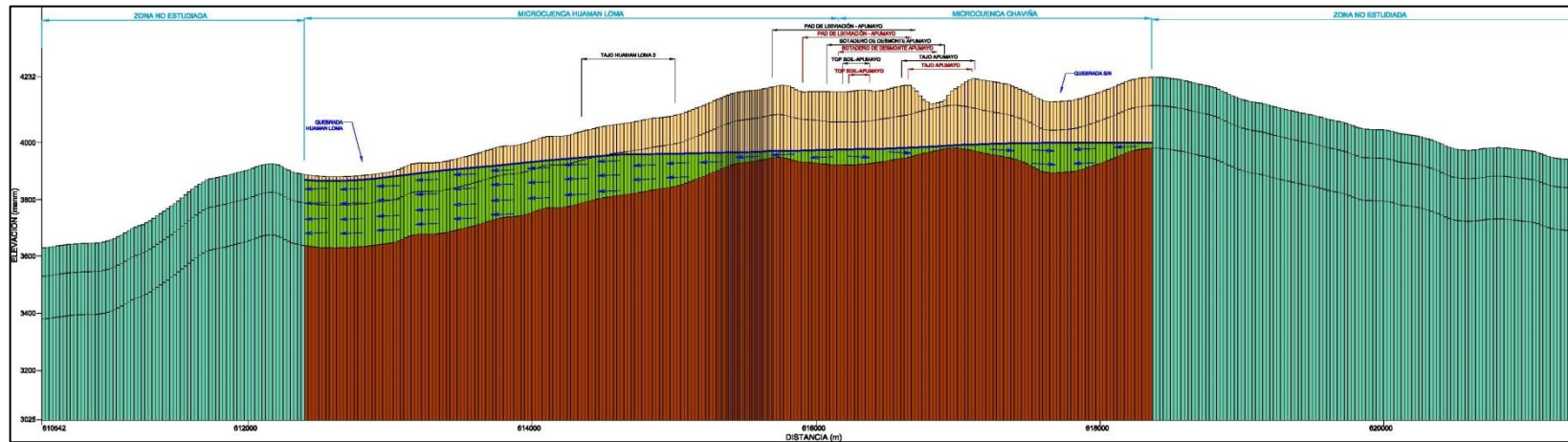


Figura 23. Sección Hidrogeológica Numérica AA. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

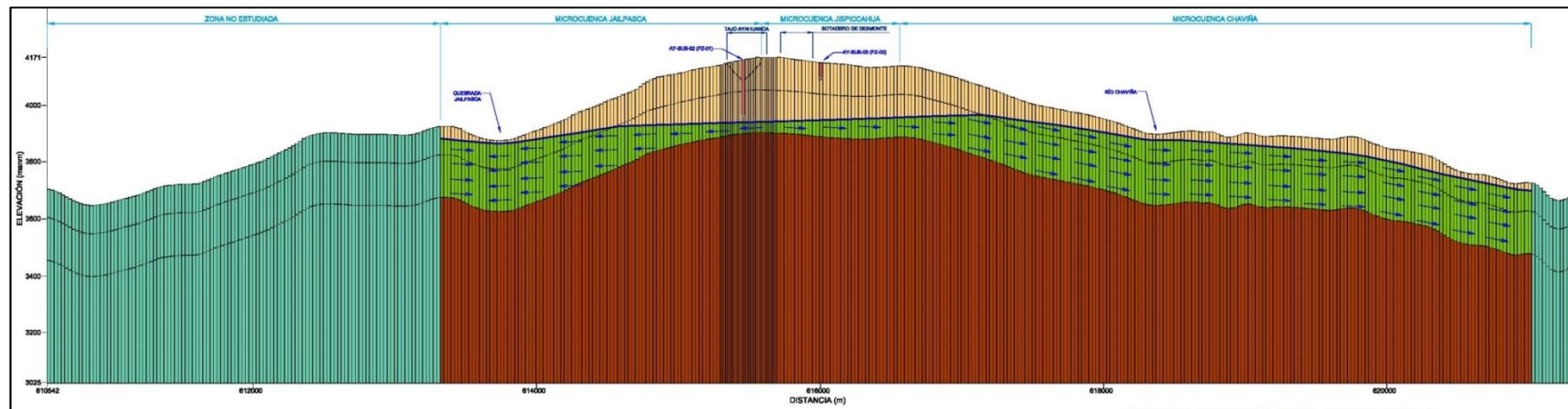


Figura 24. Sección Hidrogeológica Numérica BB. Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015

2.6.3.4. Balance del masa: En el modelo se han incluido las entradas y salidas al sistema donde las primeras corresponden a la infiltración proveniente de la precipitación sobre las microcuencas Jallpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata que están conectados con el acuífero; mientras que las salidas se producen por descarga en las quebradas hacia la parte baja del acuífero.

**Tabla 13. Balance de masa del modelo numérico de HGS Peru S.A.**

**Fuente: EIA de la U.M. Apumayo 2015**

Elemento	Situación Actual	
	Entradas (m3/s)	Salidas (m3/s)
Ríos	0	-0.3676
Recarga	0,3675	0
Total	0,3675	-0.3676
Error	0.0099 %	

2.6.3.5. Simulación del transporte de contaminantes: Se ha realizado la modelación del movimiento de partículas utilizando MODPATH, que considera sólo el transporte advectivo, es decir las partículas de masa se mueven en el campo del flujo siguiendo las líneas de corriente. Como resultado sólo se menciona que las partículas contaminantes seguirían las líneas de flujo subterráneo y que en todos los casos las partículas van hacia los cauces de agua superficial como se puede observar en la figura 25, además en el caso de que se produjese algún vertido desde los componentes mineros los tiempos de viaje son largos y se requeriría una gran cantidad de tiempo hasta alcanzar los cauces debido a la baja conductividad hidráulica, sólo algunas partículas escaparían del área de influencia de los componentes mineros, para lo cual, se implementarán piezómetros que permitirán monitorear y mitigar dicha filtración.



que la distribución espacial de las propiedades hidráulicas del acuífero principalmente la conductividad hidráulica se basó en información de escala regional tal como se especifica en la sección 2.3.5.1 con el mapa de geología regional, por lo que para conseguir una aproximación conceptual más precisa en cuanto a las propiedades hidráulicas sería importante plantear un modelo conceptual y numérico basado en la caracterización de geología local que considere la información litológica de los taladros y adicionando información más detallada para la delimitación de las unidades o grupos geológicas, así también como el sistema de fallas y fracturas, para de esta manera establecer las unidades hidrogeológicas y una zonificación incluso distribuida de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero en cuanto a su heterogeneidad y anisotropía.

- En cuanto al diseño del modelo: la discretización espacial del modelo y las condiciones iniciales consideradas, no permiten alcanzar una convergencia del modelo, además se observan condiciones de contorno que no representan la realidad.
- Se realizó la calibración en régimen estacionario utilizándose mediciones de cinco (05) piezómetros de observación teniéndose un ajuste de la Raíz Cuadrática Media normalizado (RMS) de 8.005 %.
- No se ejecutó la calibración ni simulación en régimen transitorio.
- No se tiene un análisis de sensibilidad del modelo que permita conocer la robustez del mismo.
- No se especifica los parámetros considerados para las condiciones de contorno tipo "Río".
- La simulación del transporte de contaminantes se realizó con el método de trayectorias aleatorias de partículas (PMPATH), es decir considerando sólo el transporte advectivo.

Siendo así, el proceso de mejoramiento del modelo para la evaluación del impacto al recurso hídrico se detallará en el siguiente capítulo, pero a modo de resumen se puntualiza en las siguientes modificaciones y mejoras:

- Obtención de una solución correcta de la simulación mediante su convergencia y con el menor tiempo requerido para alcanzar dicha solución, modificando el diseño del modelo en cuanto a su discretización vertical simplificando el número de capas y estableciendo las condiciones iniciales más óptimas.
- Replanteo de las condiciones de contorno de tal manera que sean más representativos a la realidad, tanto en las condiciones de nivel constante consideradas, como en los parámetros característicos de las quebradas representadas en el modelo como “Ríos”.
- Mejora de la calibración en régimen estacionario considerando todos los piezómetros de observación de donde se tienen las mediciones del nivel freático y variando tanto las conductividades como la recarga, de tal forma que los niveles piezométricos calculados reproduzcan lo mejor posible a los niveles medidos en todos los piezómetros.
- Calibración en régimen transitorio, variando la recarga por infiltración, con el fin de disminuir la incertidumbre del modelo.
- Realización del análisis de sensibilidad del modelo para verificar su robustez y conocer la incertidumbre de los resultados.
- Inclusión de la modelación del transporte considerando además del proceso de advección, el transporte por dispersión hidrodinámica del soluto.

### III. DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA HIDROGEOLOGICA

Para la ejecución y mejoramiento del modelo numérico en el presente trabajo se ha tomado como base el modelo conceptual elaborado por HGS Perú S.A., así también luego de la revisión y análisis de dicho modelo numérico inicial, en el presente trabajo se ha procedido a su rediseño modificando diversos aspectos e incluyendo algunos cálculos y análisis para su mejoramiento tal como se describe en este capítulo.

#### 3.1. Objetivo del modelo

Tener un conocimiento más preciso de la dirección y el flujo del agua subterránea durante las operaciones de mina para posteriormente simular el transporte de contaminantes.

### 3.2. Código del modelamiento

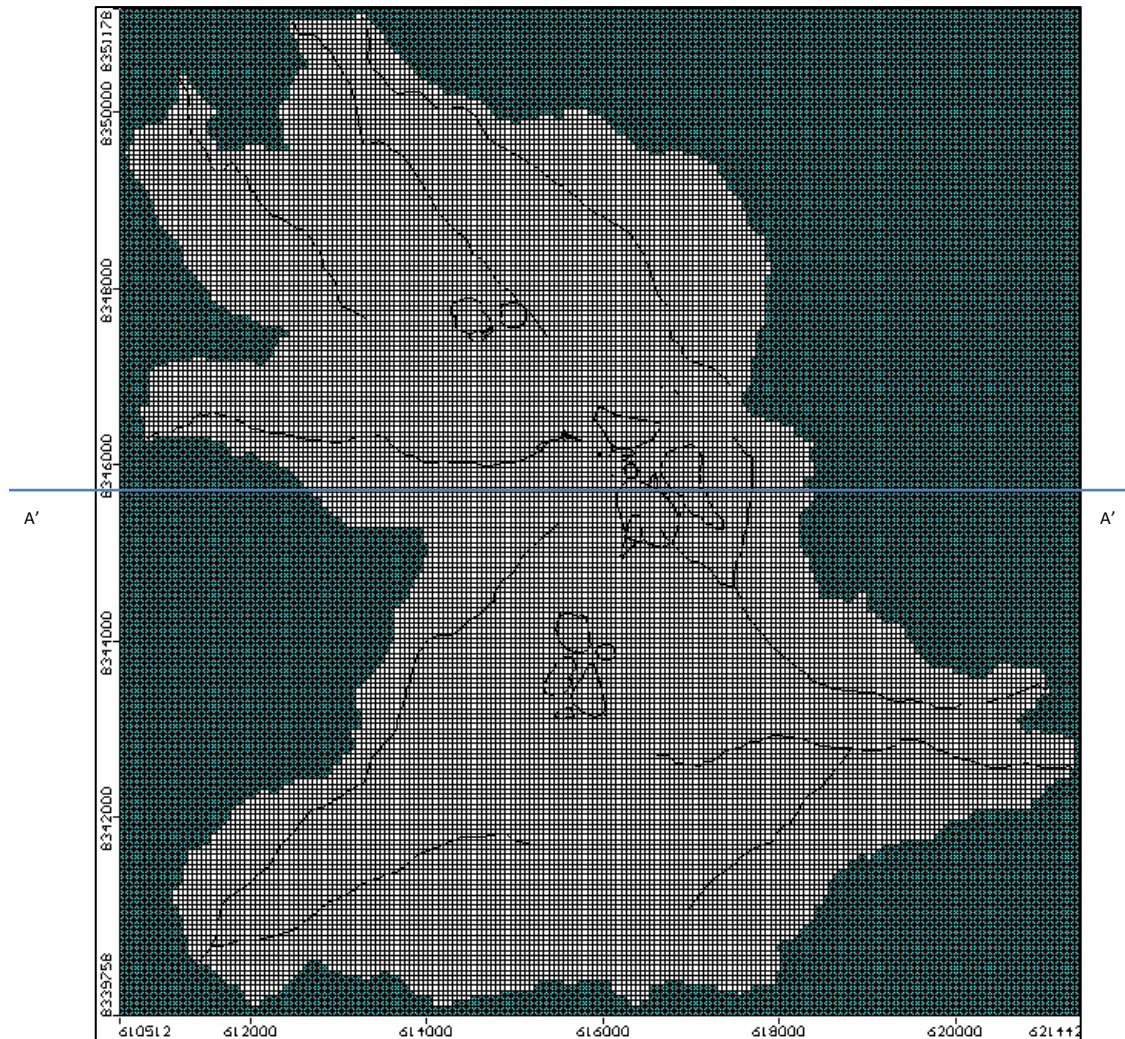
El código de modelamiento que se utilizó fue MODFLOW 2005, el cual es un programa modular escrito en Fortran 90 que utiliza el método de diferencias finitas, fue desarrollado por la U.S. Geological Survey (USGS) entre 1981 y 1983 (McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh and McDonald, 1996). Este código es el que también utilizó la consultora HGS Perú S.A. para el modelo inicial. El macizo fracturado presente en el emplazamiento de Apumayo, se ha aproximado a un medio poroso continuo fundamentado en el concepto del medio poroso equivalente al fracturado (Anderson & Woessner, 1990) siendo el modelo Modflow un buen ejemplo de dicha implementación. La elaboración del modelo numérico hidrogeológico y su ejecución con Modflow se realizó con el apoyo de la interfaz desarrollada por Waterloo Hydrogeologic Inc, Visual Modflow, la cual es muy cómoda e intuitiva para el usuario en cuanto a la introducción de las características y propiedades del modelo, así como también para observar los resultados obtenidos.

### 3.3. Diseño del modelo numérico

La construcción del modelo numérico se da mediante la interpretación y transformación del modelo conceptual a su forma matemática.

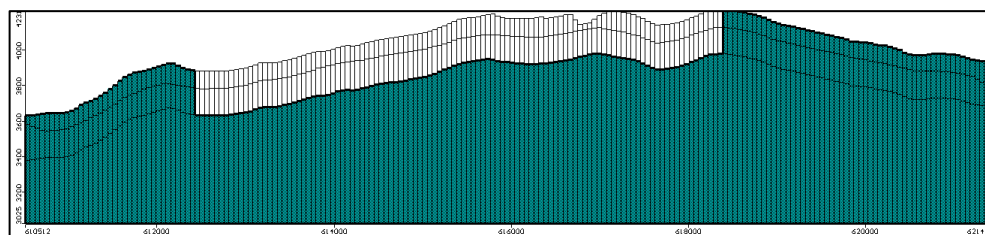
**3.3.1. Discretización.-** Al igual que el modelo numérico inicial se conformó con una malla tridimensional cuya geometría se representa mediante 200 filas, 200 columnas y 2 capas, donde cada celda tiene dimensiones de 55 m x 57 m en el plano horizontal, teniéndose un área total de 125.4 Km<sup>2</sup> entre celdas activas e inactivas, además el espesor de la primera capa es de 100 m en promedio y el de la segunda capa de 150 m, por lo que es importante recalcar que en cuanto a la discretización vertical, se ha reducido el número de capas a dos (02) respecto del modelo inicial, puesto que según el modelo conceptual y el estudio geofísico la tercera capa se interpreta como muy impermeable o parte del macizo rocoso, por esa razón ya no se consideró necesario que esta capa forme parte del sistema acuífero, para de esta manera simplificar el modelo y facilitar o disminuir el tiempo de simulación para su convergencia.

Debido a la falta de información sobre la continuidad del sistema acuífero, se consideró como sus límites los mismos que se establecieron en el modelo inicial, los cuales están en función de la delimitación de las microcuencas en las que se ubica la Unidad Minera, como se observa en la figura 26.



**Figura 26. Discretización horizontal de la malla del modelo numérico (capa 1)**

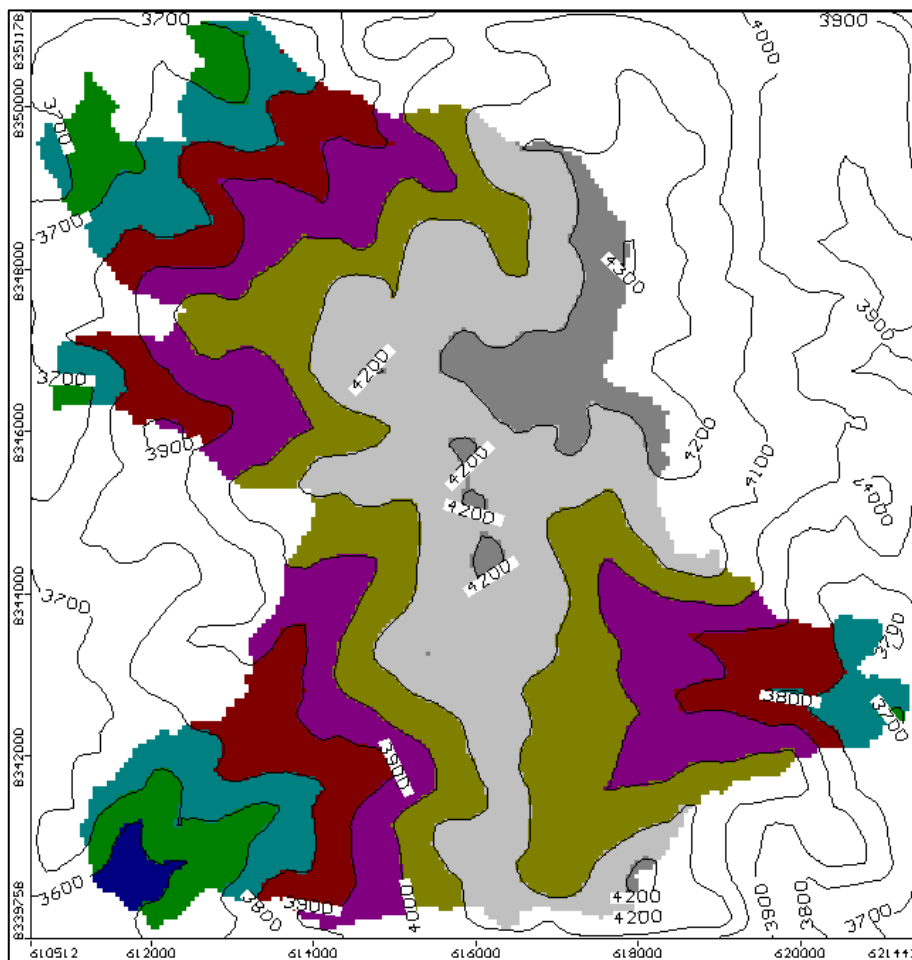
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 27. Discretización vertical de la malla del modelo numérico corte A'-A'**

**Fuente: Elaboración propia**

**3.3.2. Condiciones iniciales.-** Para que MODFLOW pueda resolver la simulación del flujo subterráneo del modelo numérico llegando a una convergencia, se debe establecer como solución inicial al cálculo iterativo un supuesto nivel piezométrico en cada celda activa. Siendo así, después de realizar varias pruebas de simulación del modelo numérico en régimen estacionario, se obtuvo la convergencia del modelo en un menor tiempo al establecer un potencial hidráulico inicial superior a 8 m respecto al nivel del terreno en cada celda. El procedimiento para ello se inició importando al modelo las cotas de la superficie del terreno aumentadas en 8 m y seguidamente se interpoló con el método *Natural Neighbours* mediante la herramienta de *Opciones de Interpolación* del Visual Modflow generándose el mapa de zonificación de las condiciones iniciales tal como se muestra en la figura 28.



**Figura 28. Mapa de condiciones iniciales para el modelo numérico (capa 1 y 2)**

**Fuente: Elaboración propia**



En la simulación en régimen transitorio, como sabemos los niveles piezométricos iniciales permiten alcanzar la solución final de los cálculos iterativos en cada período de tiempo, por lo que para el primer período (stress period 1) esta solución inicial correspondió a la solución obtenida en la simulación realizada en régimen estacionario.

**3.3.3.** Condiciones de contorno.- Pueden ubicarse en los límites del modelo como condiciones de frontera, al interior como condiciones de tipo río que es el que se presenta en nuestro modelo y en la capa superior como la recarga por infiltración (entrada al sistema) y la evapotranspiración (salida del sistema), cuyos planteamientos en el modelo se describen a continuación:

- Condiciones de carga constante: Se mantuvieron las celdas de carga constante establecidas en el modelo inicial, ubicadas en las cotas más bajas de las quebradas y por tanto también en los límites del modelo, teniéndose un grupo de celdas de carga constante en cada quebrada, siendo un total de ocho (08) grupos, ver tabla 14. Estas celdas de nivel constante simularían el efecto de un acuífero subálveo o zona acuífera que rodea el fondo la quebrada y que representa la continuidad del flujo del cauce hacia el acuífero, actuando como zona de descarga del sistema, por lo que según la carga hidráulica asignada para ello se encontrarán en la capa superior o inferior del modelo. Los valores de carga hidráulica de dichas celdas que se muestran en la tabla 14 fueron ajustadas ligeramente respecto al modelo inicial, durante el proceso de calibración.

Es importante mencionar la modificación realizada respecto al modelo inicial, en el cual asignaron celdas de nivel constante en la zona del tajo Apumayo con valores de carga inferiores a la superficie piezométrica, generando un descenso del nivel piezométrico en dicha zona y la equivalencia a una laguna; siendo así, en el presente trabajo no se consideró el planteamiento de estas celdas ya que no representan la realidad y tampoco corresponden con la conceptualización del modelo.

**Tabla 14. Valores de carga constante establecidas en el modelo numérico.**

**Fuente: Elaboración propia**

Nº Grupo	Carga constante (m)	Carga constante establecida por HGS Perú (m)
Grupo 1	3682	3700
Grupo 2	3650	3650
Grupo 3	3650	3650
Grupo 4	3600	3600
Grupo 5	3600	3600
Grupo 6	3642	3650
Grupo 7	3500	3500

- Elementos de tipo “Río”: Como se mencionó en la sección 2.3.5.1 en el modelo inicial se representaron a las quebradas Jallpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata como condiciones de contorno tipo “Río”, sin embargo no se especifican las propiedades hidráulicas consideradas, por lo que para el presente modelo se han estimado estos valores a partir de registros de campo y vistas fotográficas de cada quebrada, ya que no se tienen estudios específicos que determinen los parámetros hidráulicos de dichos cauces.

Para el cálculo de las conductancias, la conductividad hidráulica de los lechos se estimó considerando que éstos están compuestos por materiales de granos gruesos de tipo GP (gravas pobremente graduadas, mezclas de grava y arena, poco o ningún fino) y GC (gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla) según la clasificación de suelos SUCS, teniendo como referencia el registro litológico de la perforación del piezómetro AYA SUB 01 adyacente a la quebrada Chaviña.

Para el ingreso de datos de entrada de esta condición de contorno (tipo “Río”) se utilizó la herramienta “Asignar Línea” con la opción de “Gradiente lineal” del paquete “Río” por lo que la interfaz gráfica solicita valores en el punto inicial y final de cada quebrada siendo insertados como se especifica en la tabla 15, dichos valores como ya se mencionó se estimaron en base a registros de campo y vistas fotográficas disponibles, estimándose así el nivel superior de la lámina de agua respecto al nivel del

terreno, así como su espesor o calado, la conductividad hidráulica vertical y espesor del lecho, y, por último el ancho promedio del cauce; con estos tres (03) últimos datos es que la interfaz calculó las conductancias para cada celda asignada con esta condición de contorno mediante la siguiente fórmula:

$$COND = \frac{(RCHLNG \times RBWITDH \times K)}{RBTHICK} \times UCTOCOND$$

COND: Conductancia del lecho del río

RCHLNG: Longitud de alcance del río en cada celda de cuadrícula

RBWITDH: Anchura del lecho del río en cada celda de la rejilla

K: Conductividad hidráulica vertical del lecho del río

RBTHICK: Espesor del lecho del río en cada celda de la rejilla

UCTOCOND: Factor de conversión de unidades

**Tabla 15. Propiedades hidráulicas consideradas para los elementos tipo "Río"**  
Fuente: Elaboración propia

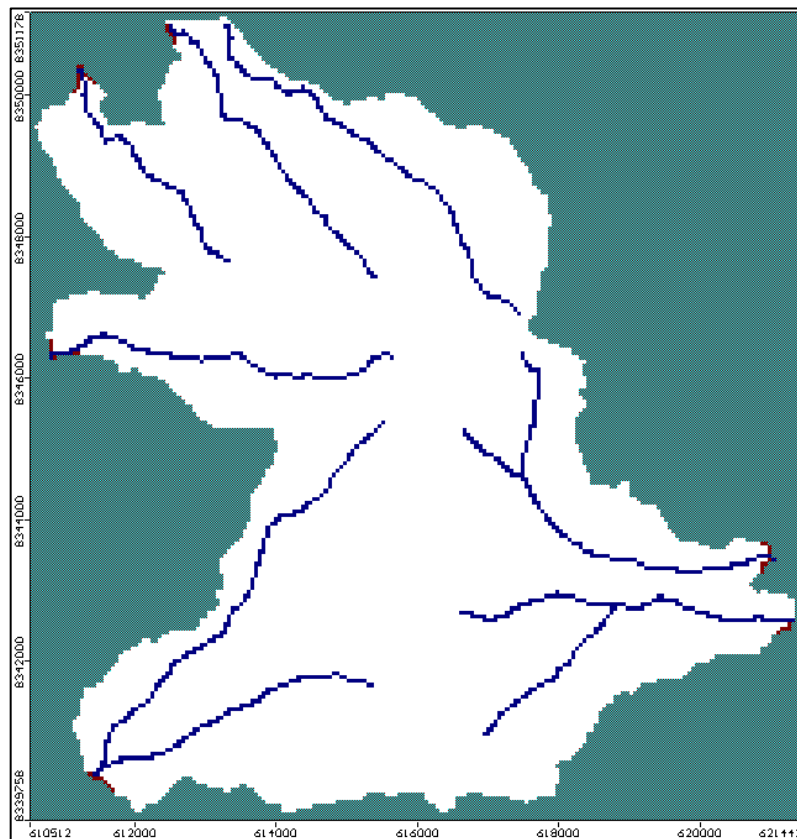
Quebrada	Ubicación en la quebrada	Cota superior de lámina de agua (River stage)	Cota inferior del lecho (Riverbed bottom)	Conductividad hidráulica vertical (Kz)	Ancho promedio (River Widht)
Autopata	Punto alto	Z-2	Z-2.65	1	1.5
	Punto bajo	Z-1.5	Z-2.7	0.5	1.5
Jallpasca Norte	Punto alto	Z-1.2	Z-1.85	1	1
	Punto bajo	Z-1	Z-2.3	0.5	1.5
Jallpasca Sur	Punto alto	Z-2	Z-2.6	1	1.5
	Punto bajo	Z-1.2	Z-2.4	0.5	2
Parapacancha	Punto alto	Z-1.5	Z-2.15	1	1
	Punto bajo	Z-1.3	Z-2.6	0.5	2
Cuchuhuasi	Punto alto	Z-1	Z-1.65	1	1
	Punto bajo	Z-0.5	Z-1.8	0.5	1.5
Jispicahua	Punto alto	Z-2	Z-2.6	1	1.5
	Punto bajo	Z-1.2	Z-2.7	0.5	2.5
Chaviña	Punto alto (lado del botadero)	Z-2	Z-2.6	1	1.5
	Punto alto	Z-2	Z-2.6	8	1

	(lado del tajo)				
	Punto bajo	Z-1.2	Z-2.4	4	2
Huamanloma	Punto alto	Z-2	Z-2.65	2	1
	Punto bajo	Z-1.5	Z-2.8	1	2

Z: Cota del techo de la celda asignada como "Río".

Punto alto: punto inicial de la línea (quebrada).

Punto bajo: punto final de la línea (quebrada).



**Figura 29. Mapa de condiciones de contorno del modelo (capa 1) Fuente: elaboración propia**

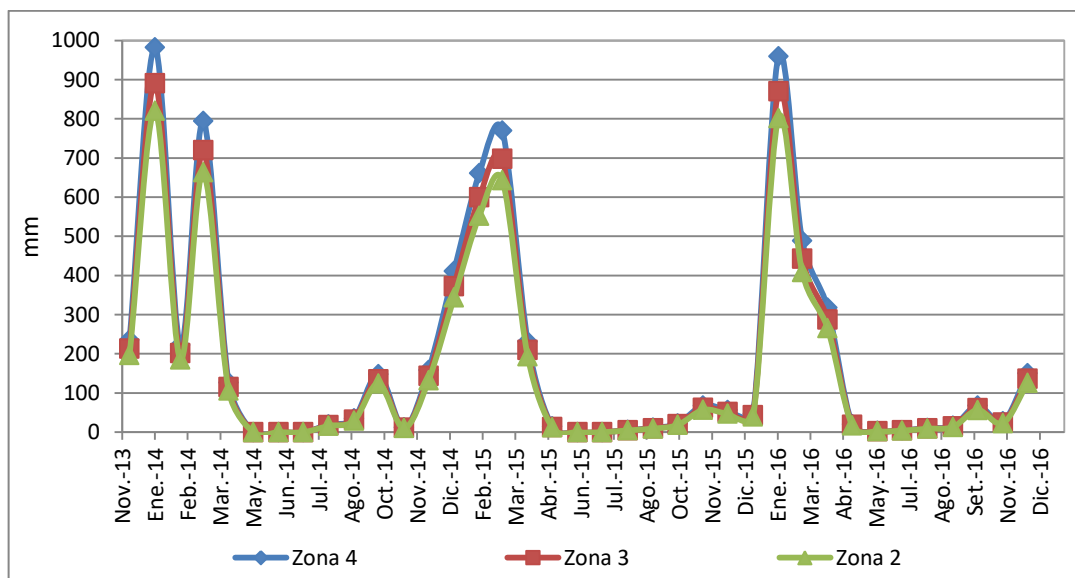
- Sistema de recarga: La recarga al acuífero por infiltración de la precipitación según el modelo inicial fue zonificada en tres áreas en función de la altitud, sin embargo durante la calibración de la presente modelación se adicionó una zona de mayor recarga en la parte más alta de la superficie del modelo, teniéndose en total 4 zonas: zona 1 con 0 mm/año (quebradas o descarga de agua), zona 2 (intermedia), zona 3 (área de divisoria de microcuenca) y zona 4 (parte más alta de la superficie).

Para la simulación en régimen estacionario la recarga se ajustó durante la calibración llegándose a determinar valores de entre el 18% a 23% de la precipitación, dependiendo de la zona de recarga. Ver tabla 16.

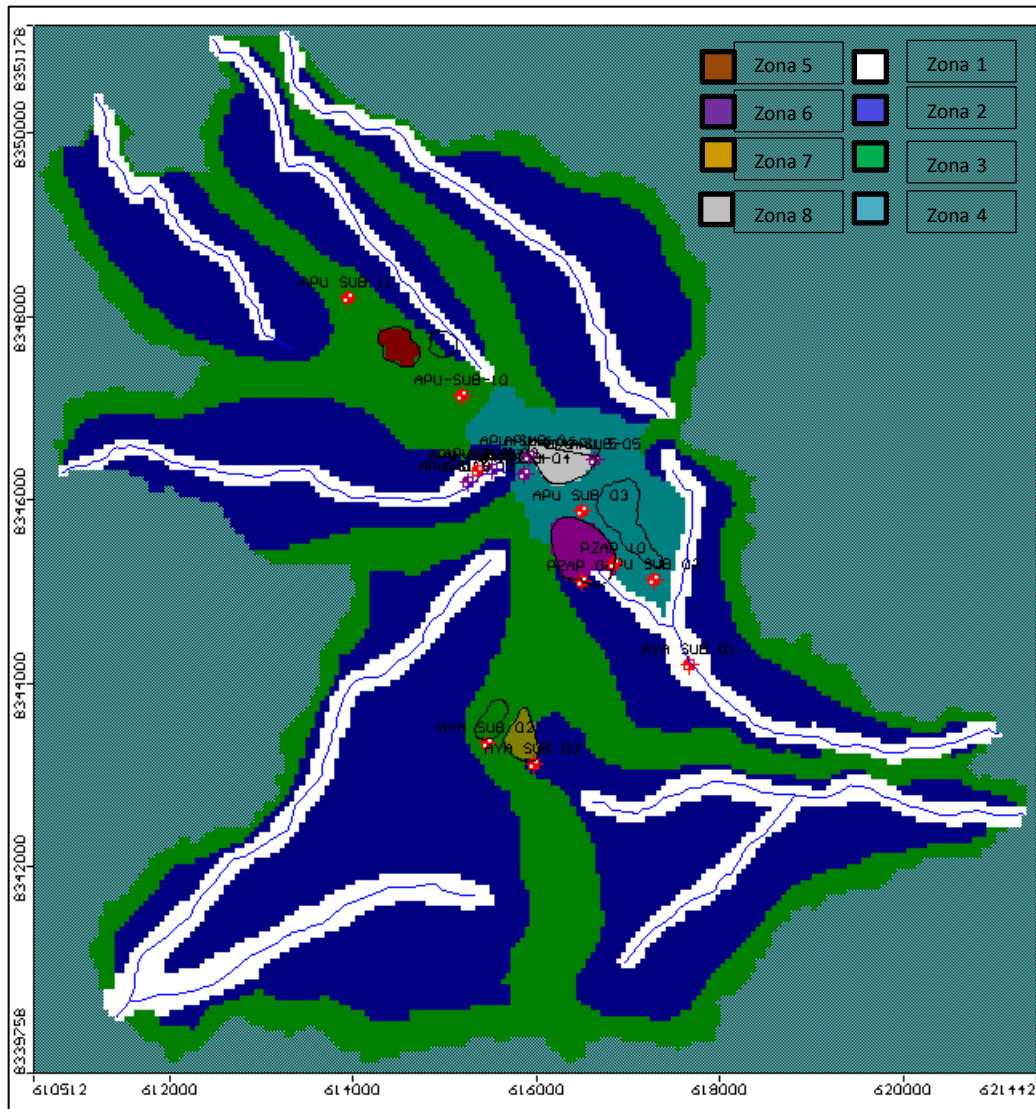
Mientras que para la simulación en régimen transitorio, partiéndose (como tiempo inicial) de la recarga asignada en el régimen estacionario, se varió la recarga mensualmente basándose en la precipitación mensual registrada en la estación meteorológica del área de estudio desde diciembre 2013 hasta diciembre 2016.

**Tabla 16. Valores de recarga asignados al modelo en régimen estacionario**  
Fuente: Elaboración propia

Zona	Recarga (mm/año)	Recarga estimada por HGS Perú (mm/año)
1	0	0
2	196	160
3	213	180
4	235	-
5	144	
6	133	
7	205.7	
8	0	



**Figura 30. Valores de recarga asignados al modelo en régimen transitorio**  
Fuente: Elaboración propia con data de la estación Apumayo



**Figura 31. Mapa de zonificación de recarga por infiltración de la precipitación**  
Fuente: Elaboración propia

- Evapotranspiración: Se estableció un valor de 320 mm/año el cual se determinó durante la calibración partiendo de la evapotranspiración potencial indicada en el EIA que fue calculada por HGS Perú mediante el método de Thornthwaite con la serie de datos de temperatura mensual de la estación Coracora.

### 3.3.4. Propiedades hidráulicas.-

- Conductividad hidráulica: Se establecieron 6 zonas homogéneas e isotrópicas de la conductividad hidráulica en la capa superior y 5 zonas en la capa inferior del modelo,

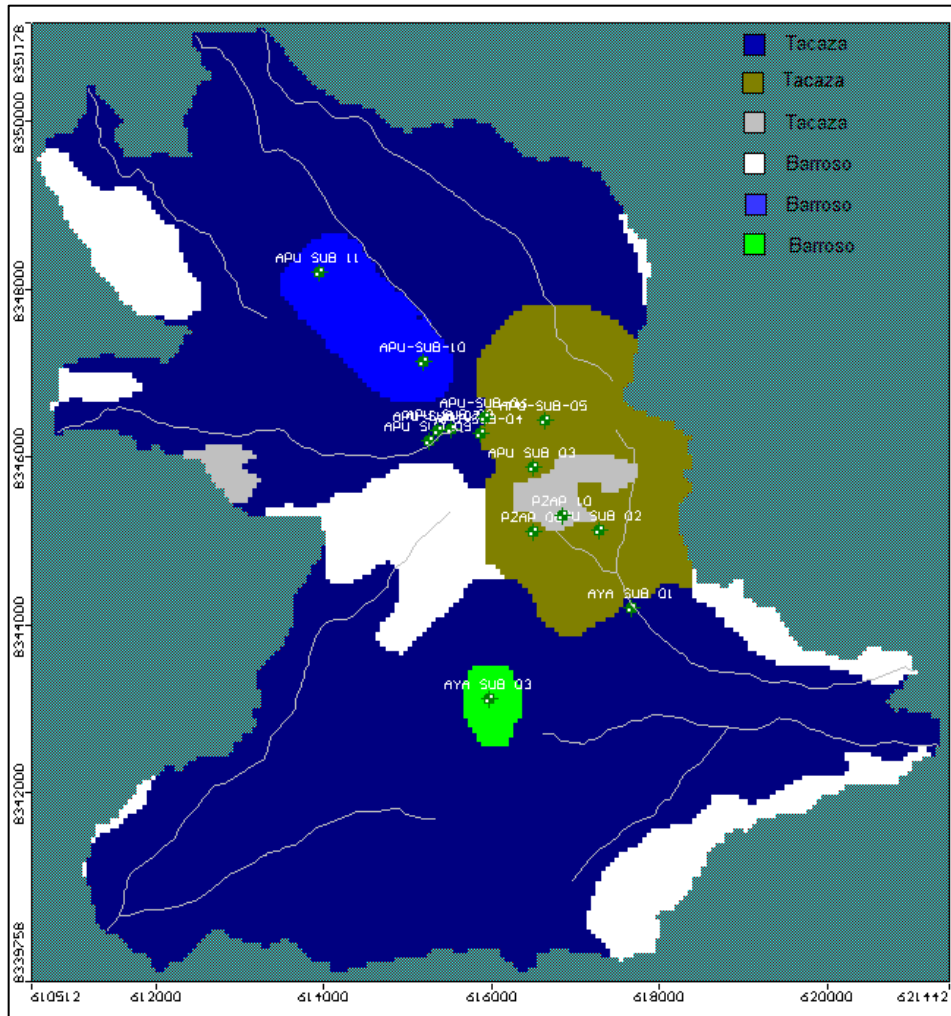
partiéndose del mapa de unidades geológicas el cual al ser un mapa de información regional y no estar basado en la litología local, tal como se explicó en el capítulo anterior, durante la calibración se diferenciaron los valores de conductividad hidráulica dentro de cada unidad geológica y se modificaron algunos de sus límites en función de los niveles piezométricos observados, obteniéndose los mapas que se muestran en las figuras 32 y 33 donde además se muestra la ubicación de los piezómetros.

La determinación de los valores de este parámetro en las distintas zonas tuvo como referencia inicial los obtenidos en los ensayos de Lugeon y Lefranc realizados en cada punto de los piezómetros y los rangos de valores bibliográficos planteados en el estudio de propiedades hidrogeológicas de rocas volcánicas (Grupo Barroso y Tacaza) realizado por Peña & Sulca (2009) INGEMMET, por lo que finalmente en el presente trabajo se planteó las conductividades hidráulicas mostradas en la tabla 17.

**Tabla 17. Valores de conductividad hidráulica asignados al modelo**

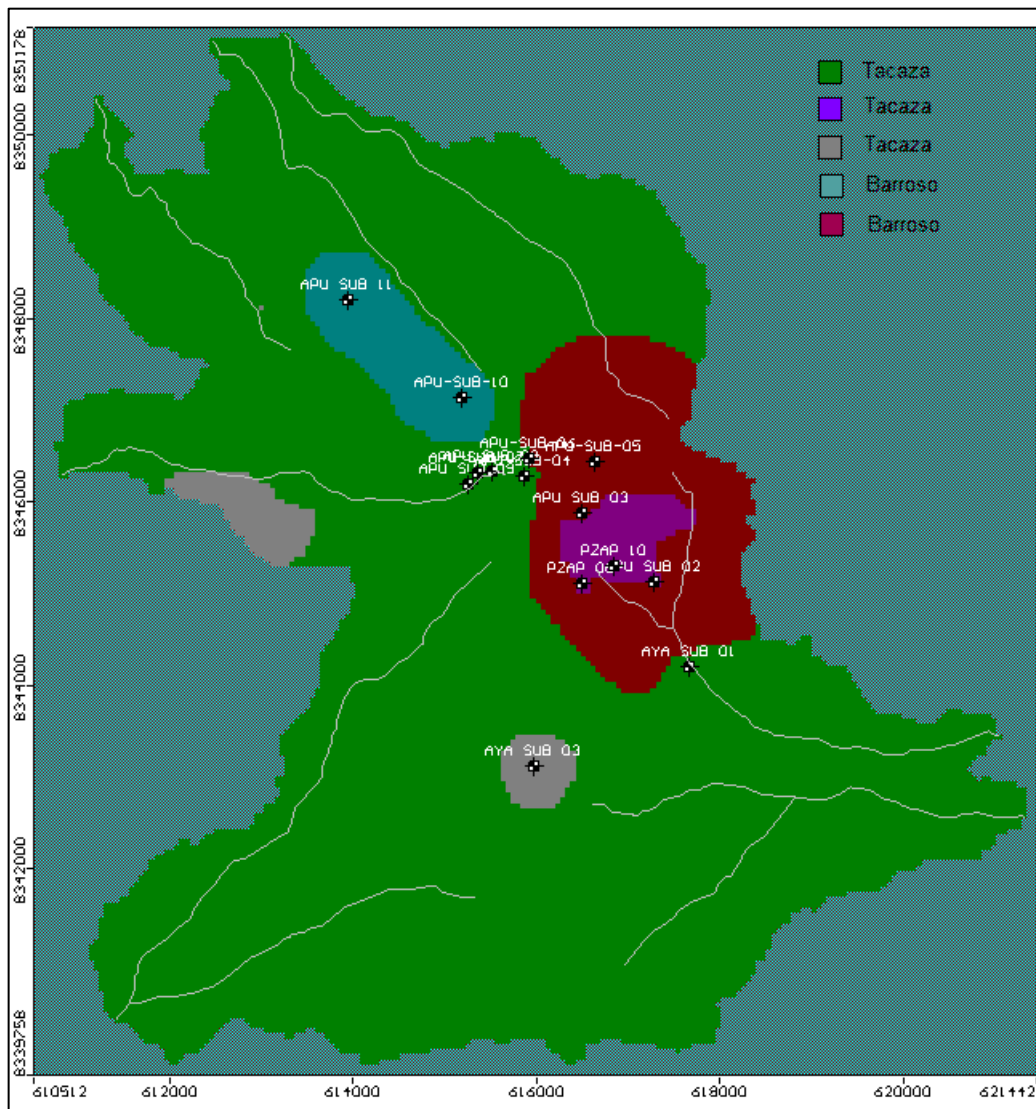
Fuente: Elaboración propia

	Formación	Kxx	Kvv	Kzz
		(m/día)	(m/día)	(m/día)
Capa 1	Grupo Tacaza	0.07	0.07	0.06
	Grupo Tacaza	2.7	2.7	0.9
	Grupo Tacaza	1.3	1.3	0.2
	Grupo Barroso	0.07	0.07	0.04
	Grupo Barroso	0.018	0.018	0.001
	Grupo Barroso	0.024	0.024	0.007
Capa 2	Grupo Tacaza	0.008	0.008	0.007
	Grupo Tacaza	0.02	0.02	0.006
	Grupo Tacaza	0.08	0.08	0.008
	Grupo Barroso	0.00037	0.00037	0.0002
	Grupo Barroso	0.0002	0.0002	0.00006



**Figura 32. Mapa de zonificación de conductividades hidráulicas (capa 1)**  
Fuente: elaboración propia





**Figura 33. Mapa de zonificación de conductividades hidráulicas (capa 2)**

Fuente: elaboración propia

- Almacenamiento específico, rendimiento específico y porosidad: Los valores asignados para estas propiedades hidráulicas partieron de datos bibliográficos siendo luego variados durante la calibración.

**Tabla 18. Valores asignados de almacenamiento específico, rendimiento específico y porosidad. Fuente: elaboración propia.**

Almacenamiento específico (Ss)	Porosidad eficaz de drenaje	Porosidad eficaz de flujo	Porosidad total
0.008	0.065	0.15	0.3



### 3.4. Calibración del modelo numérico en régimen estacionario

Como sabemos la calibración de un modelo numérico consiste en la variación sistemática de sus parámetros con el objetivo de que reproduzca las variables observadas o medidas en campo. El método de calibración que se aplicó en el presente trabajo fue el de prueba y error con el cual se varió progresivamente los parámetros del modelo hasta reducir lo más posible la diferencia entre las variables simuladas y las observadas, que en este caso fueron las alturas hidráulicas medidas en los piezómetros.

La calibración en régimen estacionario fue realizada con el fin de simular el estado no perturbado del sistema de agua subterránea, es decir antes del inicio de la construcción del pad de lixiviación, escombreras de estériles y demás componentes de mina, así como de las operaciones del tajo.

Durante el proceso de calibración se consideraron como sus parámetros principales a los valores de la conductividad hidráulica y la recarga por infiltración de la precipitación, además, este proceso permitió ajustar mejor otros datos de entrada del modelo como las condiciones de contorno, modificándose la distribución espacial de la recarga, los valores de carga de nivel constante y de la evapotranspiración, además de la variación espacial de la conductividad hidráulica cuya zonificación se basó en las áreas de las unidades geológicas consideradas en el modelo conceptual y numérico realizado por HGS Perú S.A.; estas modificaciones se debieron también a que en la evaluación previa a la calibración se concluyó que en el modelo inicial se tuvieron algunas consideraciones que no correspondían a una correcta conceptualización o que estaban basados en información bibliográfica muy general como la delimitación de las unidades geológicas del mapa de geología regional que utilizaron para la zonificación de la conductividad hidráulica, por lo que se consideró hacer ajustes para tener un mejor resultado en la calibración.

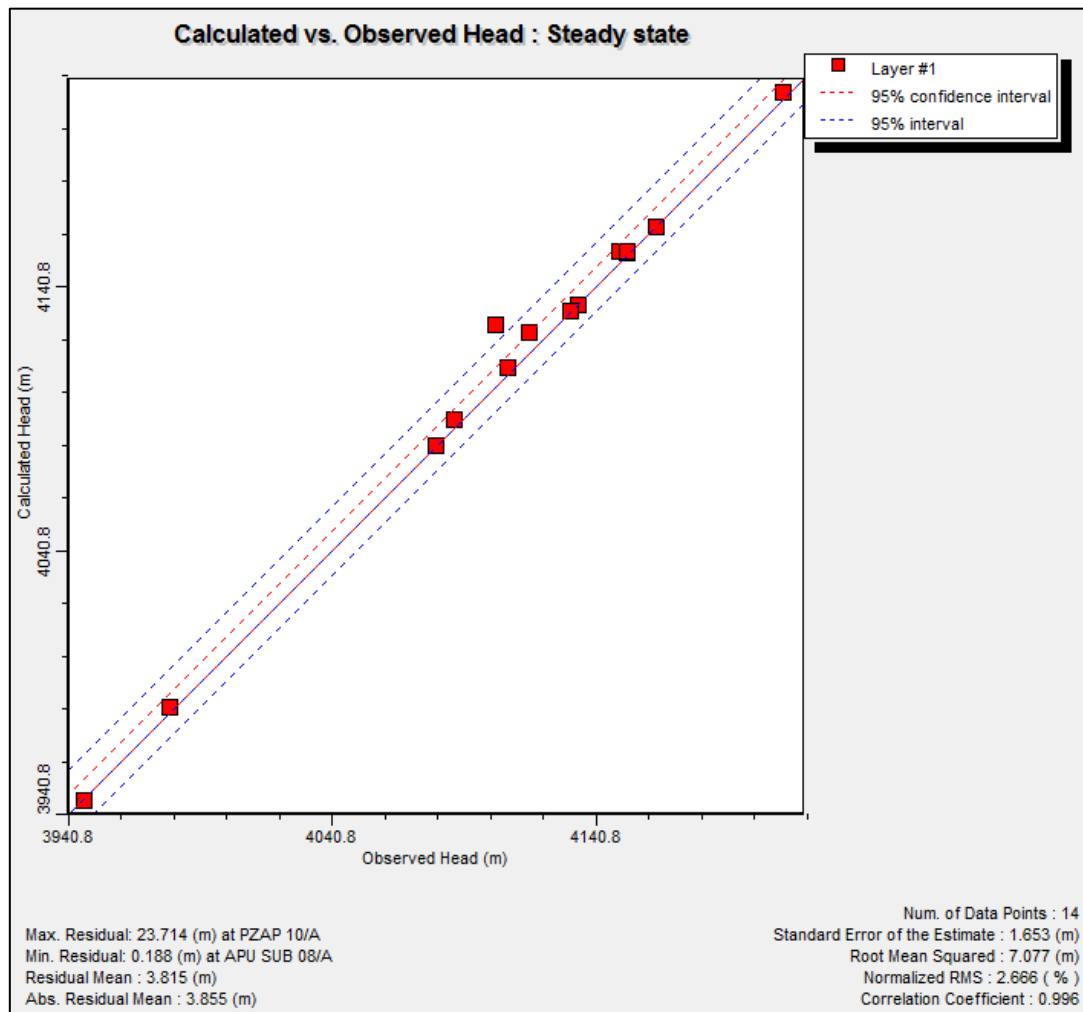
Siendo así, se varió progresivamente los parámetros considerados verificándose luego de cada corrida del modelo el buen ajuste o similitud entre las alturas hidráulicas calculadas y observadas en los piezómetros, para ello se utilizaron las mediciones de los 14 piezómetros

ubicados en el área de la modelación cuyas características se detallaron en la tabla 10 y se pueden observar en las figuras 13 y 32.

En la figura 34 se presentan los estadísticos de la calibración, observándose que se obtuvo una Raíz Cuadrada Media (RMS) normalizada de 2.66 %, por lo que se puede decir que el modelo proporciona un buen ajuste entre los valores calculados y observados. El máximo residual es de 23.71 m que corresponde al piezómetro PZAP 10, este error alto se puede deber a que el modelo no reproduce lo que ocurre en la realidad debido a que la altura hidráulica en este punto puede estar influenciado por la desviación del flujo subterráneo que genera el sistema de subdrenaje instalado en el emplazamiento de la escombrera de estériles. Asimismo, vemos que este valor residual se encuentra fuera del intervalo de confianza del 95% el cual nos permite conocer la incertidumbre del resultado y su aceptación para un valor observado dado.

Además se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.996 el cual se acerca al valor de 1 teniéndose una correlación positiva, pues como sabemos los coeficientes de correlación varían en valor de -1.0 a 1.0 determinando una perfecta relación lineal positiva para  $r=1$  y negativa para  $r=-1$ .

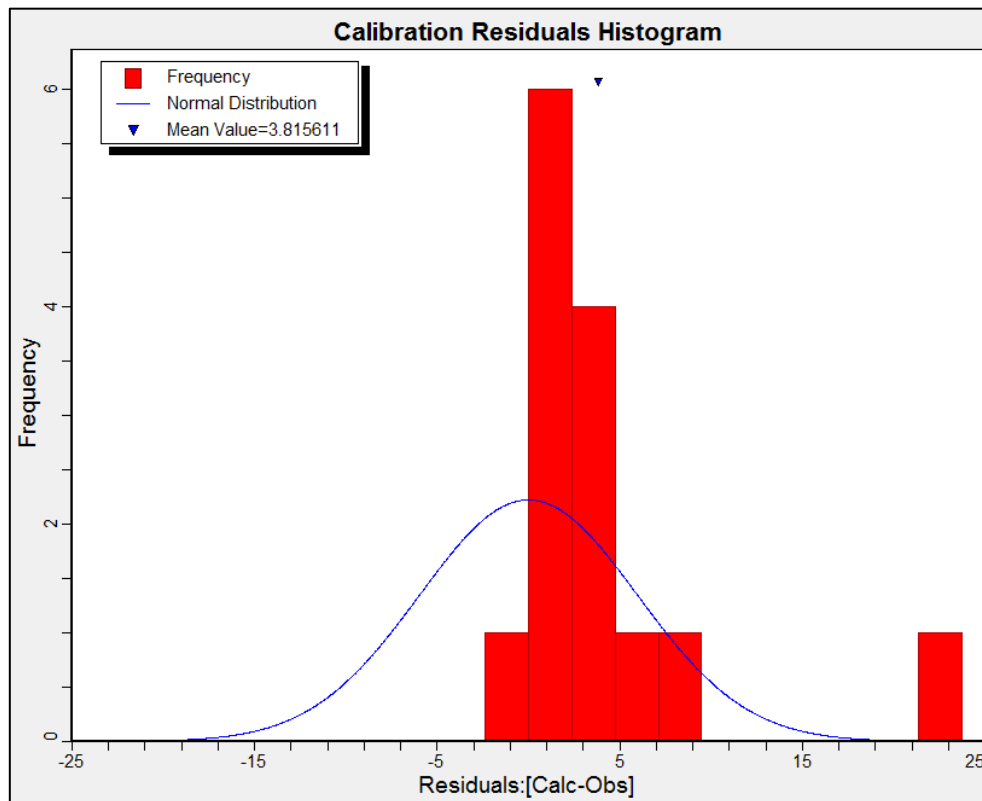
El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenido es de 0.989 por lo que dicho estadístico indica una buena capacidad de reproducción del modelo a los valores observados. Y el error estándar de la estimación (SEE) es una medida de la variabilidad del residuo alrededor del valor residual esperado, del cual se obtuvo 1.65 m para nuestros resultados.



**Figura 34. Gráfico de dispersión de cargas hidráulicas calculadas vs observadas**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 35 el histograma de distribución residual proporciona una comparación cualitativa de la distribución de los valores residuales normalizados de calibración con la curva de distribución Normal, observándose que para la poca cantidad de datos de observación que tenemos se muestra poca tendencia de similitud entre la distribución de estos valores residuales y la curva de distribución Normal, además aunque se tienen residuos tanto menores como mayores al valor de cero, éstos se ubican en su mayor parte a la derecha de cero.



**Figura 35. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen estacionario**  
**Fuente: Elaboración propia**

### 3.5. Resultados del modelo calibrado en régimen estacionario

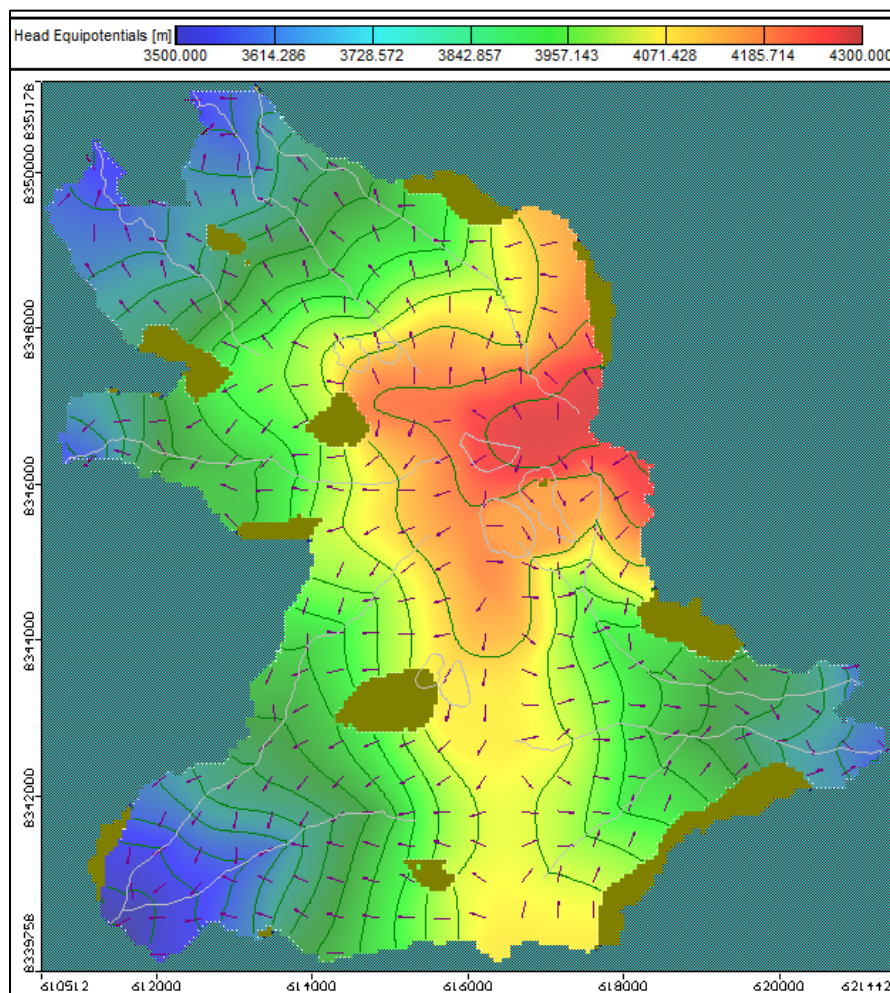
Al ejecutar la simulación del modelo en régimen estacionario se obtuvo el mapa de niveles piezométricos en cada capa, mostrados en la figura 38, con el fin de analizar el comportamiento del sistema en condiciones naturales y de obtener las alturas hidráulicas como cargas iniciales para la simulación en régimen transitorio.

En la capa 1 se puede ver que se tienen áreas de celdas inactivas ya que en éstas el nivel piezométrico se encuentra por debajo de la cota del nivel inferior de dicha capa. Las alturas hidráulicas oscilan entre 4200 msnm y 3550 msnm, la superficie equipotencial de la capa 1 es muy similar a la capa 2, en los niveles piezométricos y en dirección del flujo, teniéndose en la capa 1 mayor influencia de la topografía del terreno superficial. Asimismo, las áreas de mayor nivel piezométrico (zonas de color rojo y naranja) corresponden en gran parte a las áreas de mayor cota de la superficie del terreno y las áreas de menor altura piezométrica

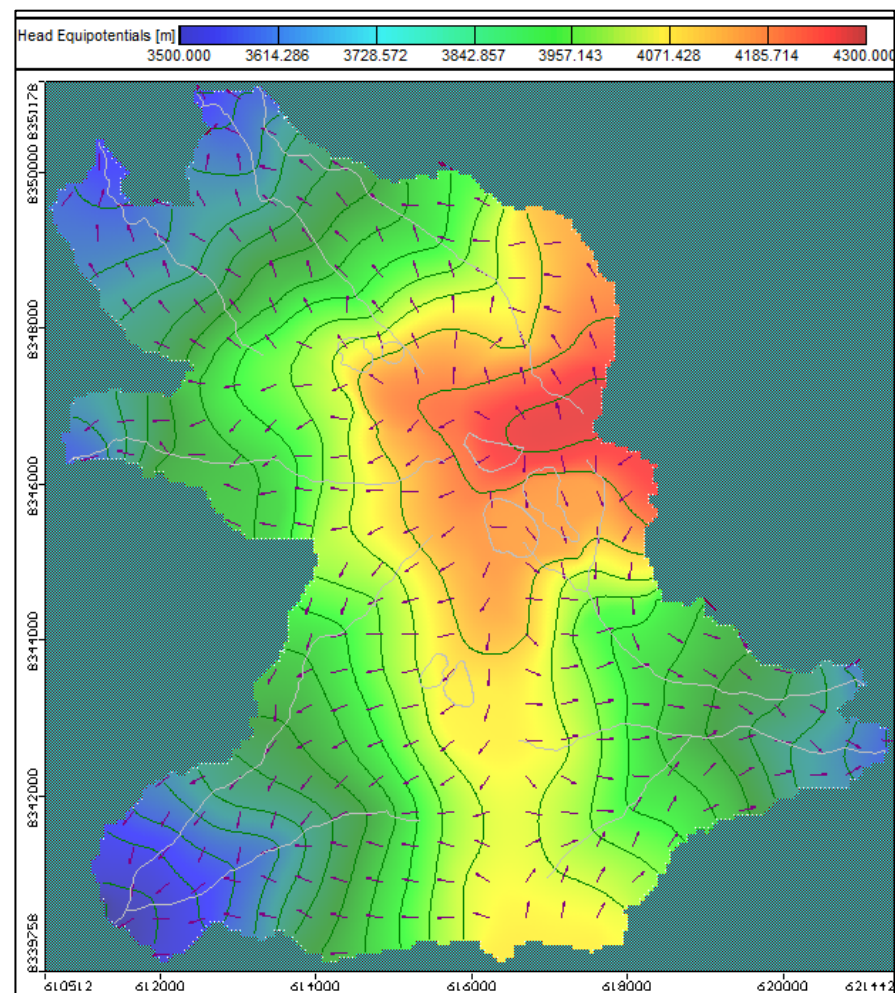


(zonas de color azul) coinciden con las cotas más bajas de las quebradas plasmadas en el modelo. Ver figura 38.

Se observa que la dirección del flujo subterráneo corresponde a lo planteado en el modelo conceptual, ya que el flujo parte de las zonas altas de la superficie del modelo (establecida como zona de mayor recarga) y descarga en las quebradas de cursos de agua superficial. Teniéndose diferentes direcciones del flujo, desde las partes más altas hacia el Nor Oeste, Sur Oeste y Este. Siendo así, la divisoria de aguas superficiales coincide con la divisoria de aguas subterráneas del acuífero.



**(Capa 1)**



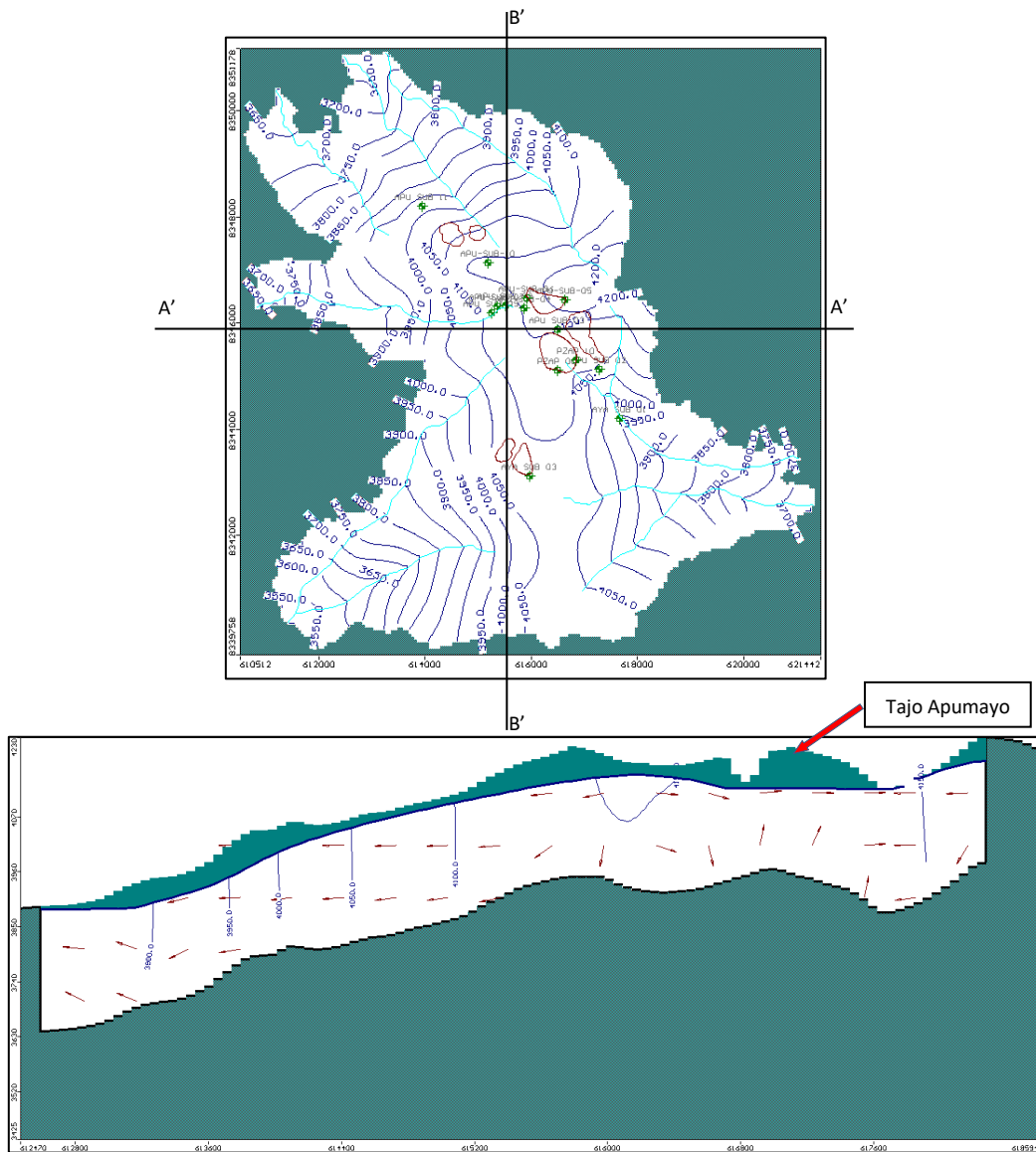
**Capa 2**

**Figura 36. Mapa de niveles piezométricos resultantes de la simulación en régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia.**

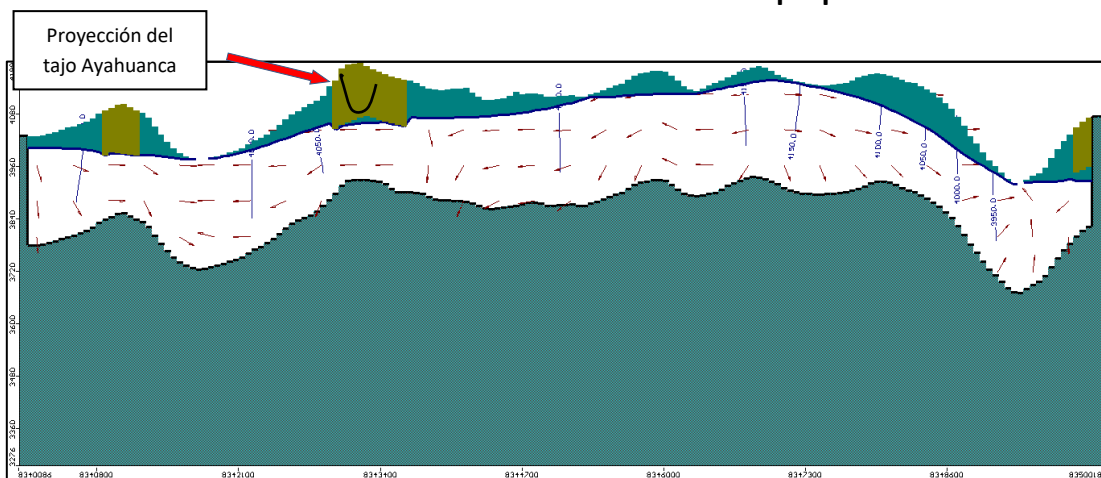


Tal como se observa en la sección AA', fila 94 del dominio del modelo y con una exageración vertical de 3 a 1, el tajo Apumayo no alcanza el nivel freático teniéndose una distancia de 15 m entre la cota más baja del tajo y el nivel freático. Asimismo, en la sección BB', columna 91 del modelo en el que se estableció una exageración vertical de 4 a 1, en el área del tajo Ayahuanca se observa que éste tampoco alcanzará el nivel freático ya que la cota más baja proyectada del tajo será de 4088 m según el EIA, estando 25 m por encima del flujo subterráneo, el cual en esta zona se encuentra a 4060 msnm en promedio. Así también en dichas secciones se muestra la dirección del flujo corroborándose que su descarga se da en las quebradas.





**Figura 37. Sección AA' (Fila 94) del mapa de niveles piezométricos del régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 38. Sección BB' (Columna 91) del mapa de niveles piezométricos del régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia**

### 3.5.1. Balance hídrico en régimen estacionario

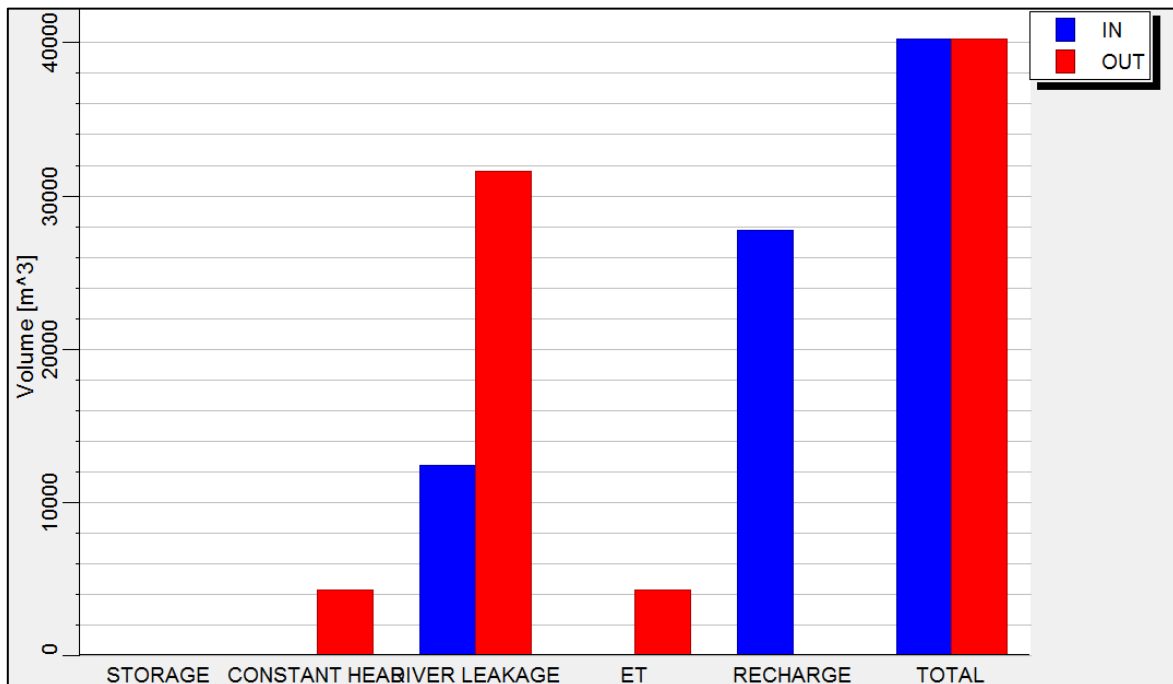
A partir de los resultados de niveles piezométricos obtenidos de la simulación en régimen estacionario se presenta el balance de masa del sistema acuífero, el cual nos sirve como indicador para el éxito de la simulación, puesto que una vez calibrado el modelo si se obtiene un error del balance de masa mayor al 2% los resultados de la simulación podrían ser inestables y no confiables, teniéndose algunas incoherencias en la solución calculada.

Siendo así, en la tabla 24 se puede observar los flujos de entrada y salida por cada condición de contorno y para todo el sistema acuífero. De ello se evidencia que las quebradas con curso de agua superficial representan los drenajes de agua con mayor salida del sistema en comparación a la evapotranspiración y los elementos de carga hidráulica constante, así también la recarga por infiltración es la condición de contorno que genera el principal flujo de entrada al sistema acuífero y en una pequeña proporción el flujo de agua superficial de las quebradas. Finalmente, el porcentaje de error o discrepancia para la simulación en régimen estacionario es de 0.001% ya que los flujos totales de entrada y salida del sistema acuífero tienen una diferencia muy pequeña.

**Tabla 24. Balance hídrico de la simulación en régimen estacionario**

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de contorno	Entradas		Salidas		Discrepancia (%)
	(m <sup>3</sup> /día)	(hm <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /día)	(hm <sup>3</sup> /año)	
Recarga por infiltración	27782.45	10.1406	0	0	10.1406
Carga hidráulica constante	1.3428	0.00049	4308.365	1.57	-1.5695
Evapotranspiración	0	0	4305.593	1.57	-1.57
Quebradas ("Ríos")	12444.64	4.54	31612.48	11.54	-7.0
<b>Total</b>	<b>40228.43</b>	<b>14.6834</b>	<b>40226.44</b>	<b>14.6827</b>	<b>0.001 %</b>



**Figura 39. Balance hídrico de la simulación en régimen estacionario**

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2. Análisis de sensibilidad del modelo numérico en régimen estacionario

El análisis de sensibilidad se realizó para medir cuanto se afectan los resultados del modelo al variar sus parámetros y así definir cuanto influye cada parámetro en el modelo calculando así su sensibilidad. En este caso su evaluación se realizó mediante el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) cuyo valor óptimo es 1, pues así indicaría que el parámetro evaluado no tiene influencia en los resultados del modelo, por el contrario, con valores cercanos a cero se interpretaría que el modelo es sensible al parámetro en mención. El análisis consistió en ejecutar el modelo variando el valor de un solo parámetro mientras que los demás se mantienen fijos.

En el presente trabajo se realizó el análisis de sensibilidad al modelo calibrado en régimen estacionario. Los parámetros considerados para ello fueron la conductividad hidráulica, la recarga, la evapotranspiración y la conductancia de lecho del río, con el fin de ejecutar el modelo modificando los valores de estos parámetros en un rango

en el que podrían variar en la realidad y de esta manera analizar los resultados para conocer la robustez del modelo.

Se inició reduciendo e incrementando en un 25% los valores calibrados de la conductividad hidráulica en todo el dominio del modelo, tal como se observa en la tabla 20 los índices de NSE son de 0.968 y 0.99, entonces se puede decir que el sistema es muy poco sensible a las variaciones de este parámetro, aunque se observa que al reducir la conductividad hidráulica el índice es ligeramente menor que al incrementarlo, por lo que con la reducción de este parámetro el modelo tendería a ser más sensible.

**Tabla 20. Resultados del análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica**  
Fuente: Elaboración propia

Piezómetro de observación	Nivel Piezométrico (msnm)		
	Estacionario Calibrado	Reducción 25%	Incremento 25%
Apu Sub 02	4090.54	4092.81	4088.9
Apu Sub 03	4154.48	4164.88	4150.17
Apu Sub 04	4153.42	4162.06	4149.91
Apu Sub 05	4214.46	4249.98	4207.27
Apu Sub 06	4163.81	4175.46	4159.01
Apu Sub 08	4133.99	4134.21	4133.86
Apu Sub 10	4154.43	4164.19	4149.31
Apu Sub 11	3981.49	3994.68	3972.24
Aya Sub 01	3946.17	3946.58	3945.52
Aya Sub 03	4080.86	4094.49	4060.63
Pzap 09	4131.61	4136	4127.99
<b>Índice de Eficiencia de Nash y Sutcliffe</b>		<b>0.968</b>	<b>0.99</b>

En cuanto a la recarga por infiltración de la precipitación como se muestra en la tabla 21, al reducir e incrementar en un 20% sus valores calibrados se tienen índices NSE de 0.9904 y 0.9964 respectivamente, por lo que también se puede decir que el sistema es muy poco sensible a la recarga.

**Tabla 21. Resultados del análisis de sensibilidad de la recarga**

Fuente: Elaboración propia

Piezómetro de observación	Nivel Piezométrico (msnm)		
	Estacionario Calibrado	Reducción 20%	Incremento 20%
Apu Sub 02	4090.54	4088.67	4092.27
Apu Sub 03	4154.48	4150.07	4157.9
Apu Sub 04	4153.42	4149.95	4156.33
Apu Sub 05	4214.46	4207.19	4220.56
Apu Sub 06	4163.81	4159	4167.99
Apu Sub 08	4133.99	4133.86	4134.1
Apu Sub 10	4154.43	4149.41	4157.45
Apu Sub 11	3981.49	3972.65	3989.31
Aya Sub 01	3946.17	3945.47	3946.49
Aya Sub 03	4080.86	4061.04	4089.48
Pzap 09	4131.61	4127.82	4134.66
<b>Índice de Eficiencia de Nash y Sutcliffe</b>		<b>0.9904</b>	<b>0.9964</b>

Respecto a las conductancias del lecho de los cauces de agua superficial que en los inputs del modelo se representaron como condiciones de contorno de tipo "Río", éstos se redujeron e incrementaron en un 50% obteniéndose índices de 0.99 determinándose que el resultado del modelo tampoco es sensible a este parámetro.

**Tabla 22. Resultados del análisis de sensibilidad de la conductancia de lecho de cauces de agua superficial. Fuente: Elaboración propia**

Piezómetro de observación	Nivel Piezométrico (msnm)		
	Estacionario Calibrado	Reducción 50%	Incremento 300%
Apu Sub 02	4090.54	4091.12	4089.99
Apu Sub 03	4154.48	4154.93	4154.09
Apu Sub 04	4153.42	4153.33	4153.48
Apu Sub 05	4214.46	4214.42	4214.46
Apu Sub 06	4163.81	4163.77	4163.88
Apu Sub 08	4133.99	4134	4133.98
Apu Sub 10	4154.43	4154.38	4155.55
Apu Sub 11	3981.49	3980.19	3983.13
Aya Sub 01	3946.17	3946.3	3946.07
Aya Sub 03	4080.86	4079.9	4081.21
Pzap 09	4131.61	4132.26	4131.05
<b>Índice de Eficiencia de Nash y Sutcliffe</b>		<b>0.9999</b>	<b>0.9999</b>

Y por último se varió los valores de la evapotranspiración disminuyendo e incrementando en un 90% ya que con este parámetro se tiene una mayor incertidumbre en su determinación puesto que la información utilizada se obtuvo de una estación meteorológica que se encuentra fuera del área de influencia de la Unidad Minera. Sin embargo, el índice NSE obtenido de 0.99 para ambas variaciones del parámetro, nos define que éste no influye en los resultados del modelo.

**Tabla 23. Resultados del análisis de sensibilidad de la evapotranspiración**  
Fuente: Elaboración propia

Piezómetro de observación	Nivel Piezométrico (msnm)		
	Estacionario Calibrado	Reducción 90%	Incremento 90%
Apu Sub 02	4090.54	4091.39	4089.71
Apu Sub 03	4154.48	4155.77	4153.38
Apu Sub 04	4153.42	4155.05	4151.34
Apu Sub 05	4214.46	4217.69	4209.03
Apu Sub 06	4163.81	4165.88	4161.06
Apu Sub 08	4133.99	4134.02	4133.95
Apu Sub 10	4154.43	4155.74	4155.67
Apu Sub 11	3981.49	3981.78	3981.18
Aya Sub 01	3946.17	3946.27	3946.09
Aya Sub 03	4080.86	4081.28	4080.58
Pzap 09	4131.61	4132.21	4130.9
<b>Índice de Eficiencia de Nash y Sutcliffe</b>		<b>0.9996</b>	<b>0.9993</b>

En resumen, se determina que el modelo es muy poco sensible a la variación de los parámetros evaluados, por lo que esto nos indica que se tiene la suficiente robustez del modelo.

### 3.5.3. Conclusiones de los resultados respecto al modelo del EIA

- En el mapa de niveles piezométricos resultante de la simulación, no se presenta estos niveles por encima del terreno que se observaban en el anterior modelo del EIA Apumayo (2015), al contrario de ello con las nuevas condiciones de los parámetros se han generado algunas celdas secas en zonas donde el flujo sólo se encuentra en la capa 1 del modelo.

- Los cambios y acciones realizadas en cuanto a los parámetros y calibración del modelo numérico han permitido que los niveles piezométricos calculados se ajusten más a los niveles observados obteniéndose así una media cuadrática o RMS (Root Mean Square) de 2.66%, el cual es menor al RMS normalizado 8% que presenta el modelo numérico del Estudio de Impacto Ambiental realizado en el 2015.
- El modelo del flujo numérico aún podría ser mejorado ya que todavía se tiene incertidumbre respecto a la conductividad hidráulica y su zonificación, puesto que ello se ha basado en información geológica a escala regional.

### 3.6. Calibración del modelo en régimen transitorio

Dado que el modelo tiene un grado de incertidumbre debido a la falta de información principalmente geológica para una delimitación más precisa de las unidades hidrogeológicas así como para la zonificación de la conductividad hidráulica, se realizó la calibración en régimen transitorio con el objetivo de reducir la incertidumbre de los resultados de la simulación en régimen estacionario, así también para mejorar la robustez del modelo y conocer el comportamiento del sistema a lo largo del año variando mensualmente la recarga (por infiltración de la precipitación) con los datos mostrados en la figura 30; por tanto, con esta calibración se busca reproducir las alturas hidráulicas que se midieron mensualmente en los piezómetros desde diciembre 2013 hasta diciembre 2016.

No se han planteado escenarios en los que se evalúen las variaciones temporales del flujo subterráneo por influencia de la actividad minera ya que por los trabajos de excavación de tajos que se han realizado hasta la actualidad, se conoce que su profundidad no ha alcanzado el nivel freático del flujo subterráneo.

Los parámetros a calibrar en este régimen fueron el almacenamiento específico, el rendimiento específico (especificados en la tabla 18) habiendo sido determinados con el método de calibración de prueba y error partiéndose de los valores calculados en las

pruebas de bombeo y con valores bibliográficos planteados en el estudio de propiedades hidrogeológicas de rocas volcánicas (Grupo Barroso y Tacaza) realizado por Peña & Sulca (2009) INGEMMET, por tanto se variaron progresivamente dichos parámetros de calibración hasta reducir lo más posible la diferencia entre las variables simuladas y las observadas, que en este caso son las alturas hidráulicas, durante un período de simulación de 1110 días (desde diciembre 2013 a diciembre 2016) con períodos de tiempo de 30 días ya que la recarga se varió con este intervalo, generándose 37 stress period y donde cada uno fue dividido en 10 pasos de tiempo y un incremento temporal del 20% entre paso y paso, tal como se muestra en la tabla 24.

**Tabla 24. Discretización temporal del modelo en régimen transitorio**

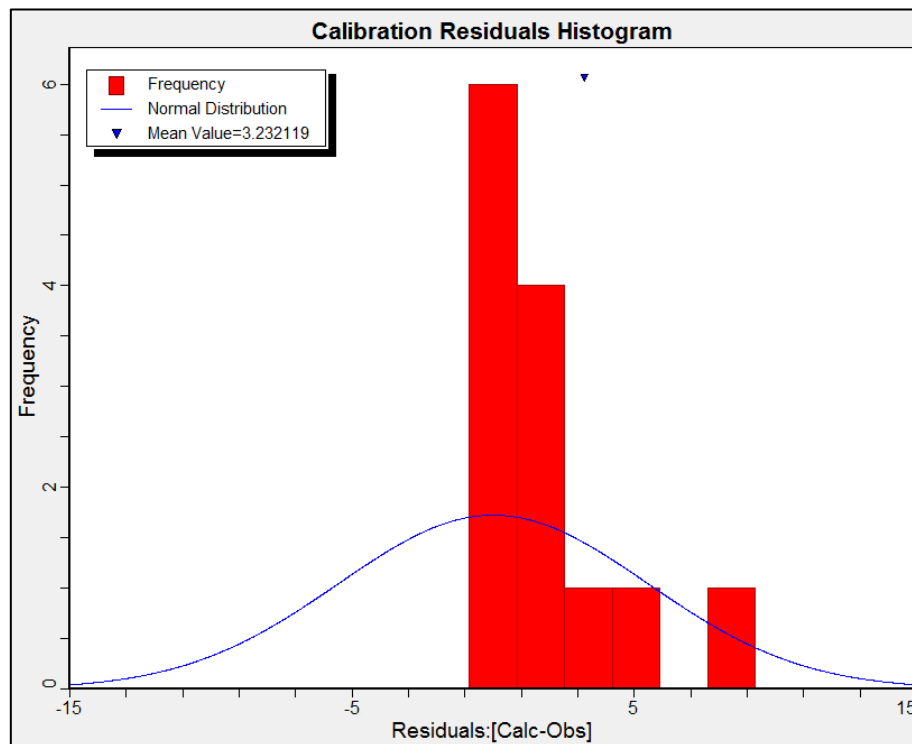
Fuente: Elaboración propia

Stress Period	Intervalo de tiempo		Time Steps	Factor Multiplicador
	Inicio (días)	Final (días)		
1	0	30	10	1.2
2	30	60	10	1.2
3	60	90	10	1.2
4	90	120	10	1.2
5	120	150	10	1.2
6	150	180	10	1.2
7	180	210	10	1.2
8	210	240	10	1.2
9	240	270	10	1.2
10	270	300	10	1.2
11	300	330	10	1.2
12	330	360	10	1.2
13	360	390	10	1.2
14	390	420	10	1.2
15	420	450	10	1.2
16	450	480	10	1.2
17	480	510	10	1.2
18	510	540	10	1.2
19	540	570	10	1.2
20	570	600	10	1.2
21	600	630	10	1.2
22	630	660	10	1.2
23	660	690	10	1.2
24	690	720	10	1.2
25	720	750	10	1.2
26	750	780	10	1.2



27	780	810	10	1.2
28	810	840	10	1.2
29	840	870	10	1.2
30	870	900	10	1.2
31	900	930	10	1.2
32	930	960	10	1.2
33	960	990	10	1.2
34	990	1020	10	1.2
35	1020	1050	10	1.2
36	1050	1080	10	1.2
37	1080	1110	10	1.2

Los estadísticos del conjunto de residuos de alturas hidráulicas observadas y calculadas como criterios de calibración del modelo en régimen transitorio para el stress period 6 (paso de tiempo 150) fueron tales como el RMS normalizado con 2.694 % por lo que presenta un buen ajuste, el máximo residual con un valor obtenido de 25.124 m que corresponde al piezómetro PZAP 10, un coeficiente de correlación de 0.995 teniéndose una correlación positiva y el error estándar de la estimación es de 1.82 m. Respecto al histograma de distribución residual se observa que éste no sigue una distribución normal, pues gran parte de sus valores son mayores a cero, tal como se observa en la figura 37.



**Figura 40. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen transitorio**

**Fuente: Elaboración propia**

### 3.7. Resultados del modelo calibrado en régimen transitorio

A continuación se presenta los resultados de la calibración en la figura 36, donde se tienen las variaciones temporales de la altura hidráulica calculada por el modelo y las observaciones en los piezómetros durante el período de simulación, en cuyas gráficas se puede ver una alineación aceptable entre los valores de estas dos variables, no obstante en los piezómetros APU SUB 7, APU SUB 9 y PZAP 10 la altura hidráulica a lo largo del período no se ajusta debidamente a los valores observados. En el caso de los piezómetros APU SUB 7 y APU SUB 9, este error se puede deber a la influencia de dos embalses ubicados aguas arriba de dichos piezómetros, ya que se deduce que el nivel freático se ve disminuido en estos puntos por la presencia de dichos embalses donde el agua es retenida, por tanto el modelo no reproducirá los valores observados en esta zona porque éstos serán menores a la altura hidráulica calculada.

Igualmente, durante el proceso de calibración estacionaria y transitoria, el nivel piezométrico calculado del PZAP 10 siempre resultó más alto que el observado con una diferencia promedio de 20 m, lo cual se puede deber a que la altura hidráulica en este punto es reducido por la captación de flujo del sistema de subdrenaje de una escombrera de estériles que podría estar modificando la dirección del flujo subterráneo en dicha zona.

Así también se puede observar en las gráficas que el modelo simula el comportamiento casi constante del acuífero ya que las oscilaciones son sólo por efecto de los cambios estacionales en la recarga por precipitación, viéndose que en la mayoría de piezómetros se tiene el nivel freático más alto entre los meses de febrero a junio. Además, se evidencia la heterogeneidad del acuífero con la variación de los niveles piezométricos observados, los cuales no se pueden reproducir con el modelo en algunos puntos por la falta de información geológica local.

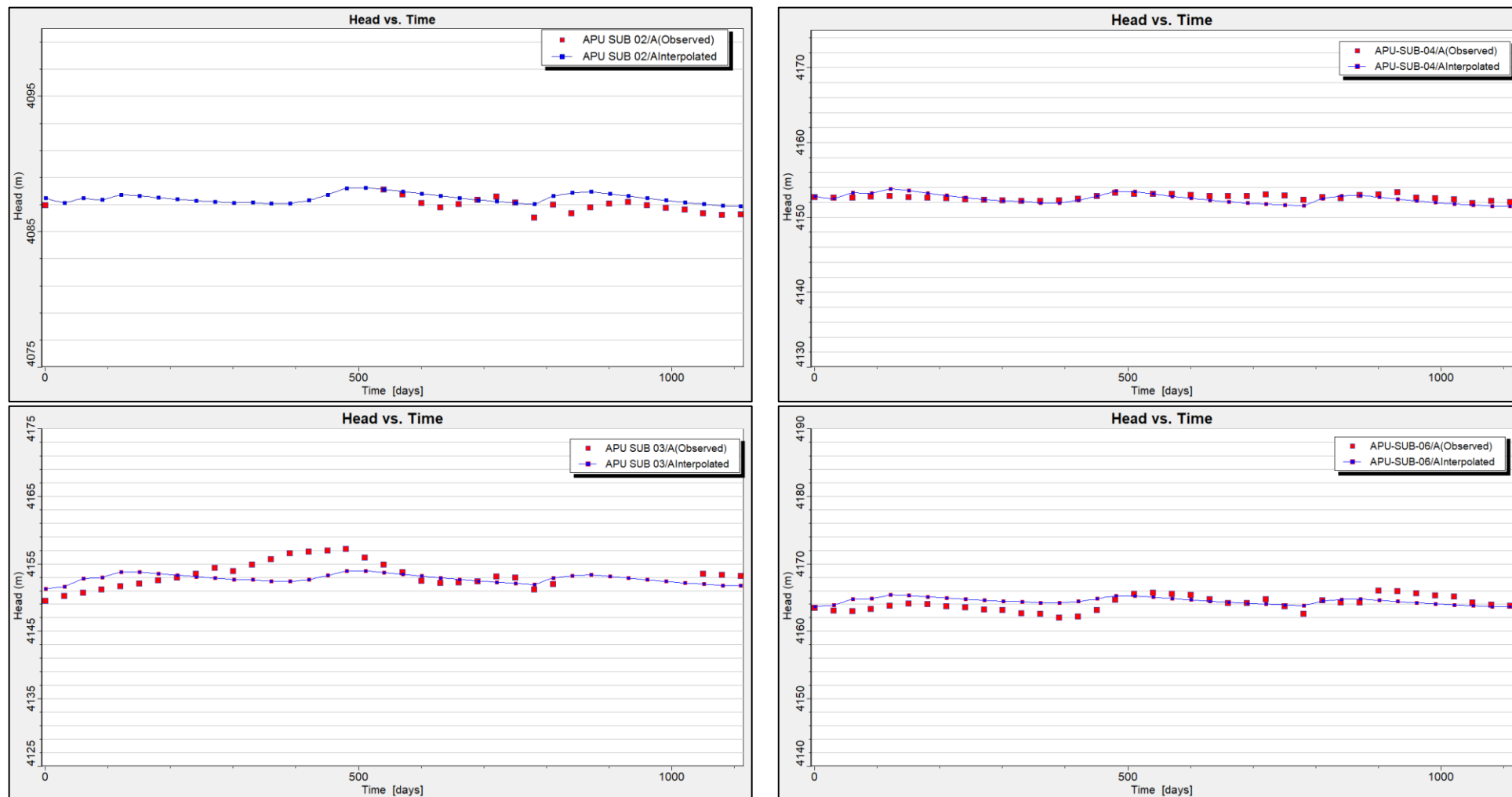


Figura 41. Calibración del modelo en régimen transitorio con los piezómetros de observación.

Fuente: Elaboración propia

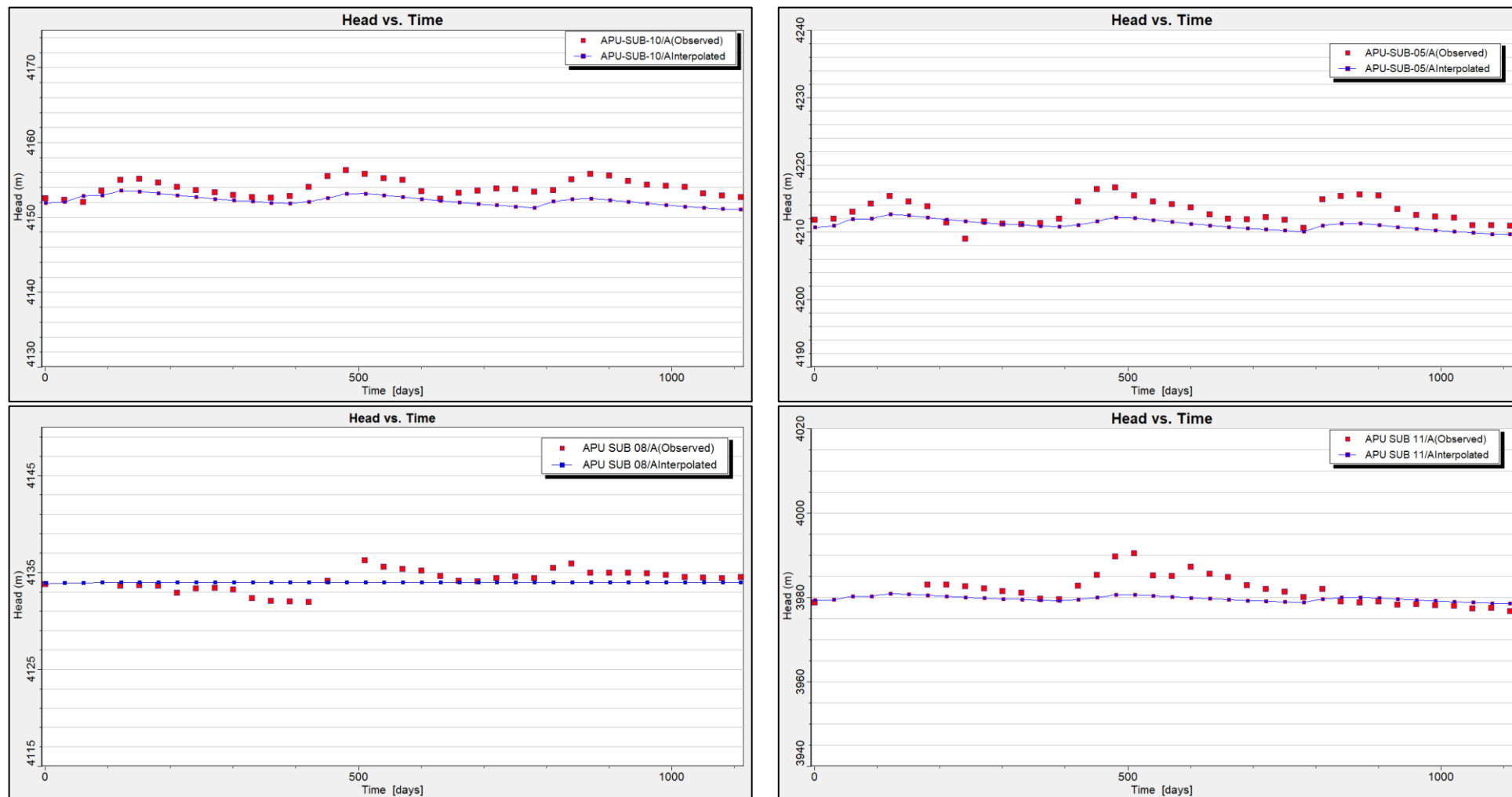


Figura 42. Calibración del modelo en régimen transitorio con los piezómetros de observación. Fuente: Elaboración propia

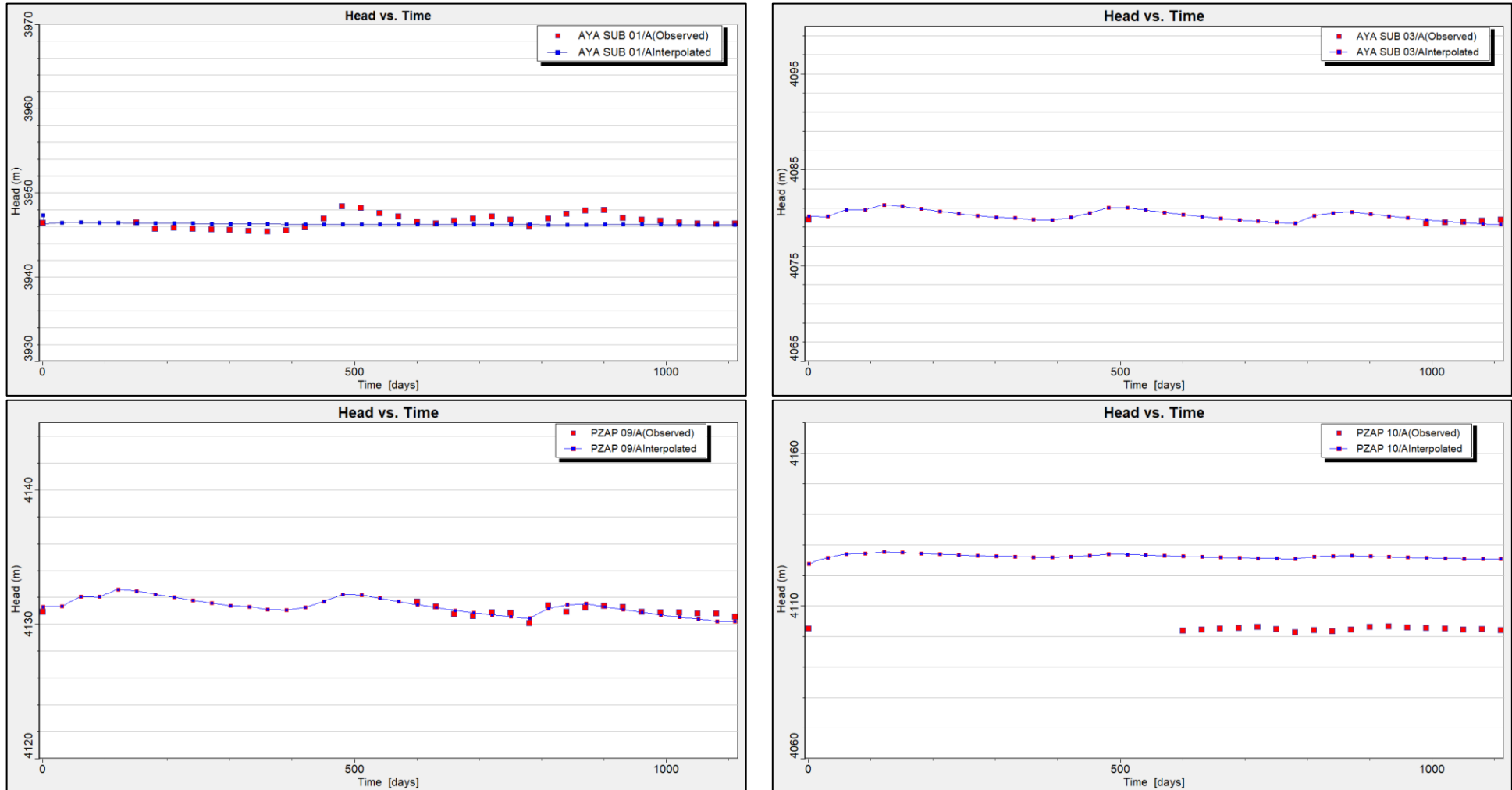


Figura 43. Calibración del modelo en régimen transitorio con los piezómetros de observación. Fuente: Elaboración propia

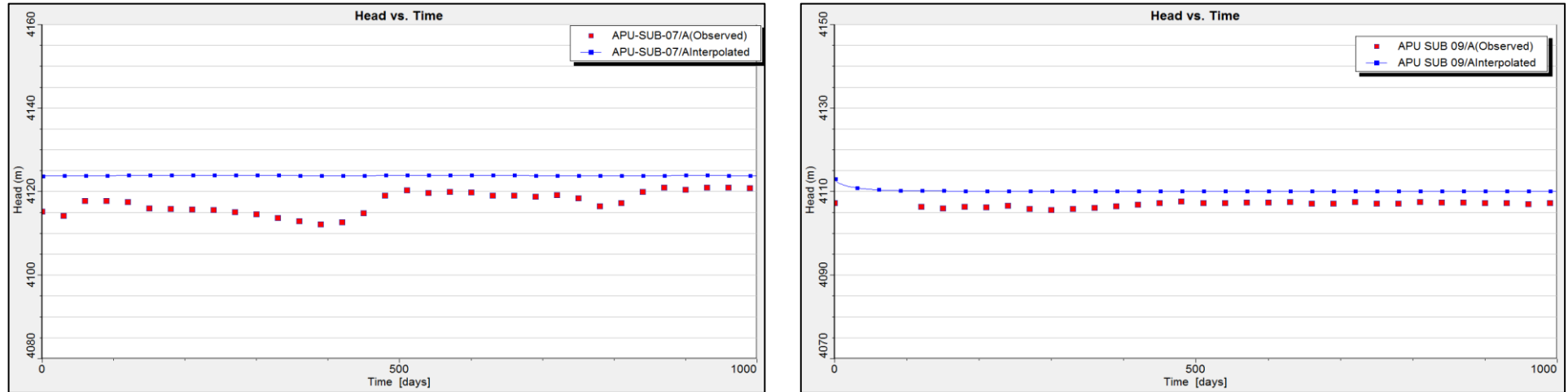


Figura 44. Calibración del modelo en régimen transitorio con los piezómetros de observación.

Fuente: Elaboración propia

#### IV. MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL ACUIFERO

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones del transporte de contaminantes en el medio acuífero, tales como el cianuro desde el pad de lixiviación y el cadmio (metal pesado) desde las escombreras de estériles ya que este componente minero tiene mayor probabilidad de presentar drenaje ácido e infiltrarse al medio subterráneo. Una vez conocido el comportamiento del flujo del medio subterráneo se procedió a evaluar diferentes escenarios del movimiento de solutos procedentes de una fuga del pad de lixiviación en el cual se realiza la lixiviación del metal a extraer (oro) con solución de cianuro, así también se consideró al cadmio en la simulación por ser uno de los metales más tóxicos y de mayor concentración detectado en las muestras de agua de subdrenaje de la escombrera de estériles.

Para ello utilizaremos el programa MT3D, un modelo para simular advección, dispersión y reacciones químicas de contaminantes en sistemas de flujo 3D. Este modelo fue diseñado para usarse en conjunto con un modelo de flujo de diferencias finitas en una malla centrada como MODFLOW. En este caso se realizará la simulación del transporte de los contaminantes a densidad constante y no se considerará sus reacciones y retardo en el medio (conservativos).

##### 4.1. Simulación y análisis de escenarios en el pad de lixiviación con cianuro

Para la simulación de la ocurrencia de la infiltración de cianuro en el área del pad de lixiviación de oro que se realiza con solución cianurada, se plantearon siete escenarios en las que se simula la entrada del contaminante mediante pozos de inyección y una recarga en el área de dicho componente minero, que actualmente se encuentra impermeabilizada con una geomembrana, sin embargo se va a suponer una rotura o falla de dicha impermeabilización, por lo tanto se estableció la presencia la recarga natural (por precipitación) en diferentes porcentajes y de pozos de inyección con un caudal determinado.

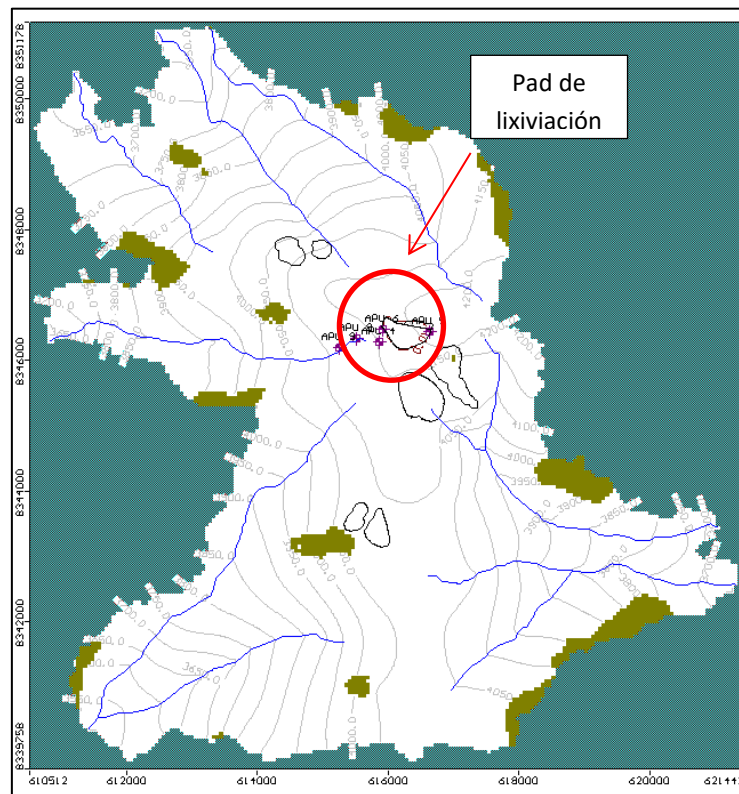
Dicha recarga y caudales de bombeo tendrán una concentración de 50 mg/l de cianuro en todos los escenarios, este valor se consideró en función de la cantidad y forma de cianuro que se utiliza en las operaciones mineras tomándose como referencia el estudio de Craig A. Johnson (2015). Además se estableció un coeficiente de difusión molecular de 0.000108 m<sup>2</sup>/día.

A lo largo de la descripción de los resultados de concentraciones en las plumas se ha tenido como referencia el valor límite de concentración establecido en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de la normativa peruana, el cual es de 0.02 mg/l para el caso del cianuro, siendo representado mediante una isolínea de concentración.

**Tabla 25. Escenarios planteados para la simulación del transporte de cianuro**

Escenario	Tipo de entrada del contaminante	Cantidad de entrada de agua	Concentración (mg/l)	Tiempo de entrada del contaminante	Tiempo de simulación
Escenario 1	Recarga	50% recarga por precipitación	50	30 años	30 años
Escenario 2	Recarga	50% recarga por precipitación	50	3 años	30 años
Escenario 3	Recarga	25% recarga por precipitación	50	3 años	30 años
Escenario 4	1 pozo de inyección	25% recarga por precipitación	50	30 años	30 años
Escenario 5	1 pozo de inyección	25% recarga por precipitación	50	3 años	30 años
Escenario 6	2 pozos de inyección	50% recarga por precipitación	50	30 años	30 años
Escenario 7	2 pozos de inyección	50% recarga por precipitación	50	3 años	30 años





**Figura 45. Ubicación del Pad de lixiviación**

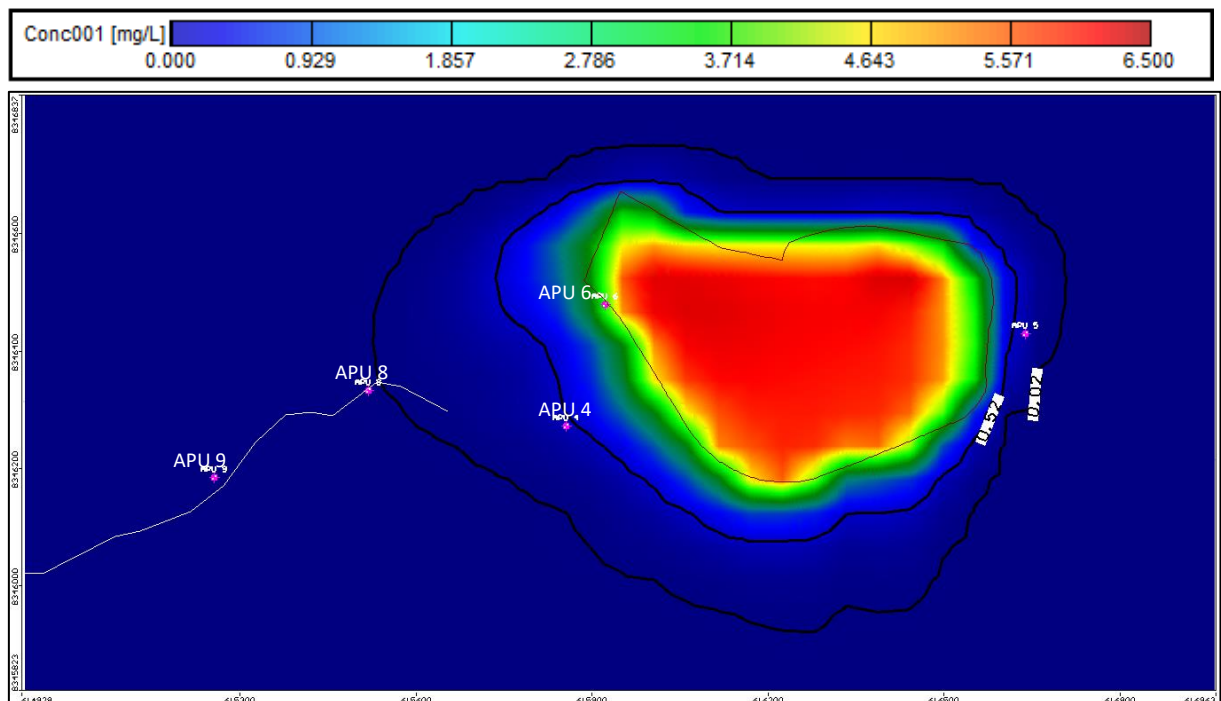
### **Escenario 1**

En este escenario se plantea la simulación de infiltración de cianuro mediante una recarga en el pad de lixiviación por falla de su impermeabilización, por lo que se estableció la entrada del cianuro con un 50% de la recarga por precipitación en el área de dicho componente minero, siendo de 112.81 mm/año. Dicha entrada se dará de forma continua por 30 años.

### **Resultados:**

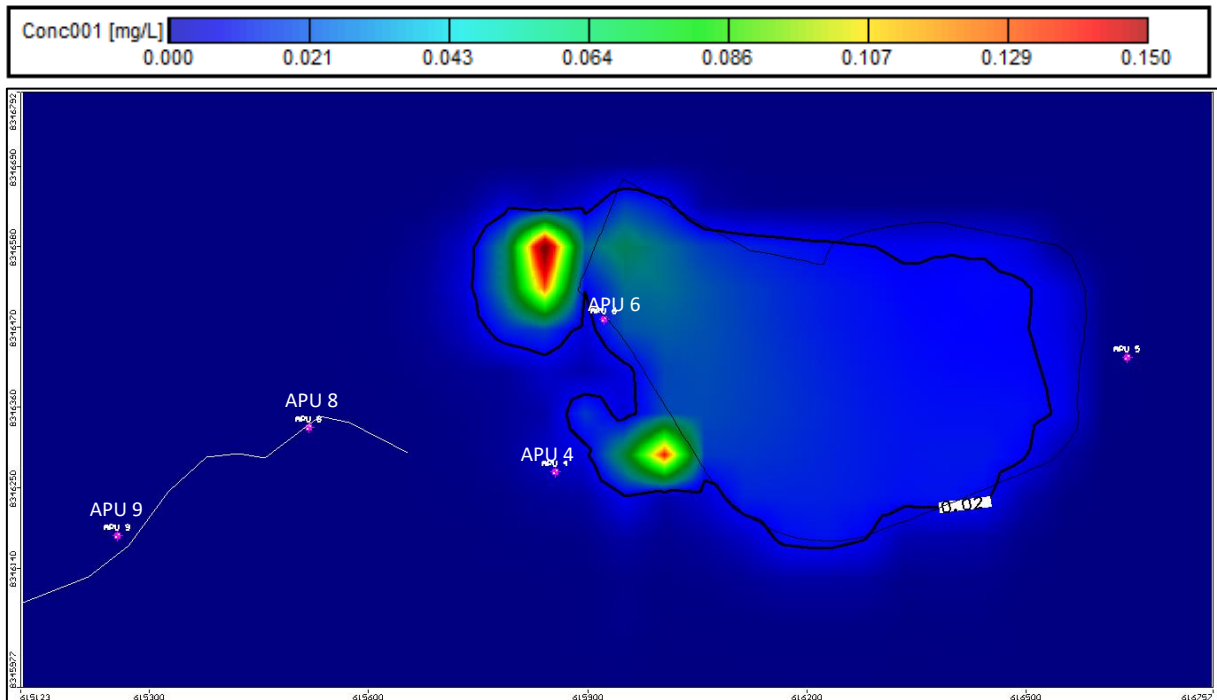
De los resultados de la simulación del transporte de la pluma del contaminante que se muestran en la figura 48 a diferentes incrementos de tiempo, se observa que el desplazamiento de la pluma se da en la dirección del flujo subterráneo tanto en la capa 1 como en la capa 2 del modelo, acercándose así hacia la quebrada que da inicio a un curso de agua superficial que se encuentra aproximadamente a 350 m aguas abajo del pad de lixiviación. La isolínea de concentración (negro) de 0.02 mg/l que se ve en las siguientes

figuras representa parte de la pluma contaminante que significaría un riesgo de toxicidad por ser el valor límite establecido en los Estándares de Calidad de Agua (ECA), por lo que se ha evaluado el movimiento de la pluma principalmente en función a dicha concentración. Siendo así, para este escenario el contaminante con dicha concentración en la capa 1 llega a la quebrada en 20 años, por lo que se puede decir que su desplazamiento es muy lento, teniéndose así a los 30 años una concentración máxima en el área de recarga de hasta casi 6 mg/l como se puede observar en la figura 46.



**Figura 46. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 1 para el escenario 1. Fuente: elaboración propia**

Así también, se puede ver en la figura 47, que se ha tenido un desplazamiento del contaminante hacia la capa 2 por las concentraciones menores que se presentan, cuya pluma se ha dirigido también hacia la quebrada, teniéndose a los 30 años de simulación un máximo de 0.15 mg/l en el área de extensión de la pluma. Asimismo se observa que el contaminante se desplaza preferentemente por las zonas de mayor permeabilidad que se tiene en esta área por el cambio de valores que se dan por su zonificación.



**Figura 47. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 2 para el escenario 1. Fuente: elaboración propia**

En la figura 48 se puede ver la evolución del movimiento de la pluma a 4 incrementos de tiempo (60 días, 3 años, 15 años y 30 años), como se puede ver al parecer el movimiento advectivo no es tan importante puesto que hasta los 30 años sólo la isolínea de concentración de 0.02 mg/l se ha trasladado hasta el inicio de la quebrada, mientras que las concentraciones más altas se han acumulado en gran parte en la zona de recarga.

Respecto a la masa acumulada del contaminante en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación de este escenario se tiene un total de 41198 Kg.

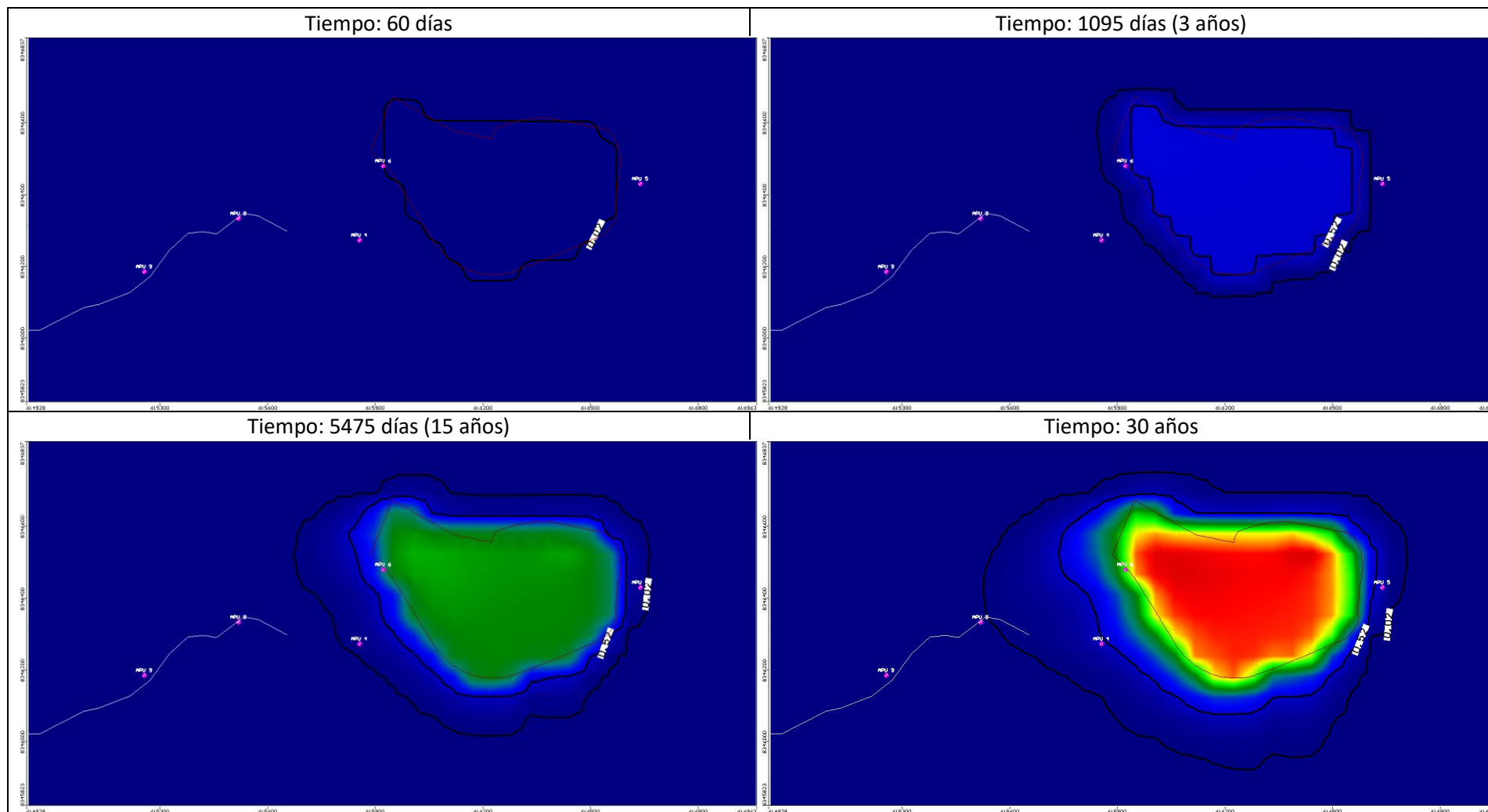
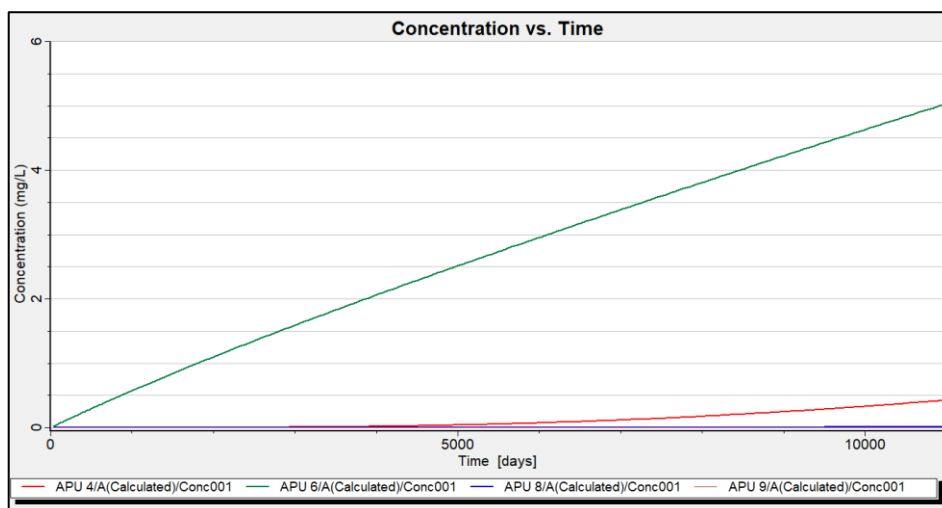


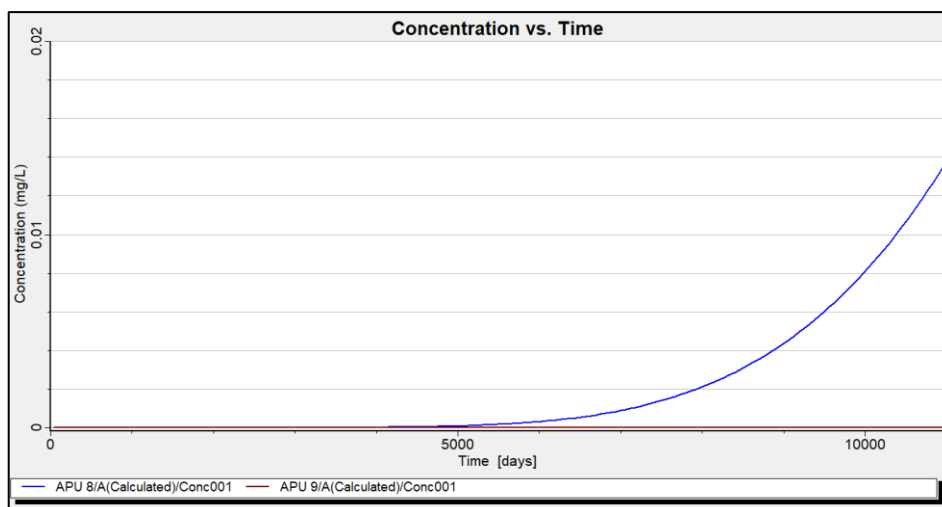
Figura 48. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 1.

Fuente: elaboración propia

A continuación se presenta la variación de la concentración del cianuro en cuatro piezómetros instalados cerca del pad de lixiviación y de la quebrada, que se usan para el monitoreo de la calidad del agua subterránea, en la figura 49 se puede ver que luego de 30 años de recarga continua, en el piezómetro APU 6 (colindante al pad de lixiviación) la concentración va aumentando de manera gradual hasta 5 mg/l y en el piezómetro APU 4 (ubicado a unos 200 m del área del vertido) hasta 0.45 mg/l. Así también, en el piezómetro APU 8, ubicado adyacente al inicio de la quebrada, la concentración aún no llega a 0.02 mg/l (valor máximo permitido por los ECA) en casi 30 años de vertido del contaminante.



**Figura 49. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 50. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

## **Escenario 2**

En este escenario, al igual que en el primero, se simula la infiltración de cianuro desde el pad de lixiviación por falla de su impermeabilización estableciendo la entrada del cianuro mediante un 50% de la recarga por precipitación en el área de dicho componente minero, siendo de 112.81 mm/año. Pero en este caso la entrada se dará sólo durante 3 años, continuándose la simulación hasta por 30 años luego de que se detiene el vertido.

### **Resultados:**

En la figura 54 se observa que la evolución de la pluma del contaminante es igual al anterior escenario a los 60 días, lo cual continúa así hasta el tercer año que es cuando se tiene la máxima concentración (0.8 mg/l en el área de extensión de la pluma), ver figura 51, ya que luego de esto empieza una atenuación de las concentraciones, debido a que la entrada del contaminante se detuvo a los 3 años. También se observa que parte de la pluma de concentraciones mayores a 0.02 mg/l (límite establecido por los ECA) llega a la quebrada poco después de los 30 años a diferencia del escenario 1, ver figura 52. Entonces como se observa en la figura 54, el desplazamiento de la pluma hasta los 30 años es poco menor al del escenario 1, teniéndose una mayor atenuación en su concentración en toda el área de extensión de la pluma.

En la figura 53 se muestra la pluma que se ha trasladado verticalmente hacia la capa 2 hasta los 30 años de simulación observándose una concentración máxima de 0.035 mg/l, acercándose también hacia la quebrada, como se puede ver se tiene concentraciones mucho menores que en la capa 1, siendo gran parte de la pluma con menos de 0.02 mg/l (ECA).

Respecto a la masa acumulada del contaminante para este escenario en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación se tiene un total de 4060.4 Kg.

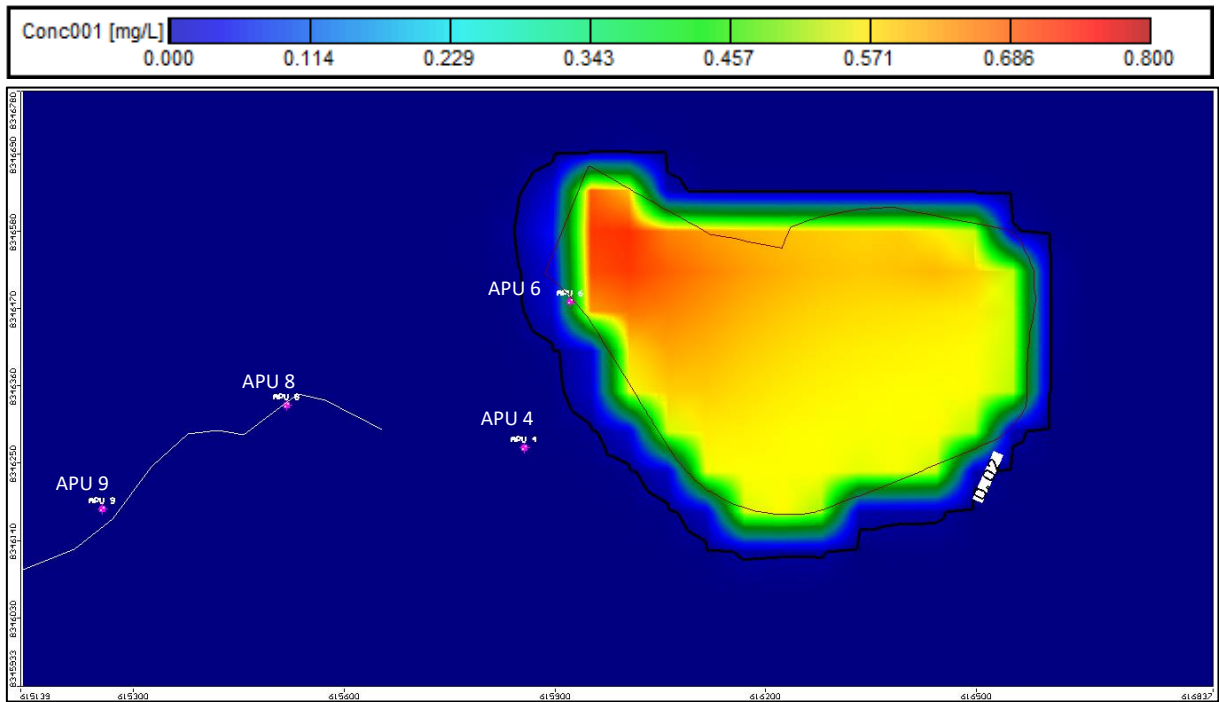


Figura 51. Modelación del transporte de cianuro después de 3 años en la capa 1 para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia

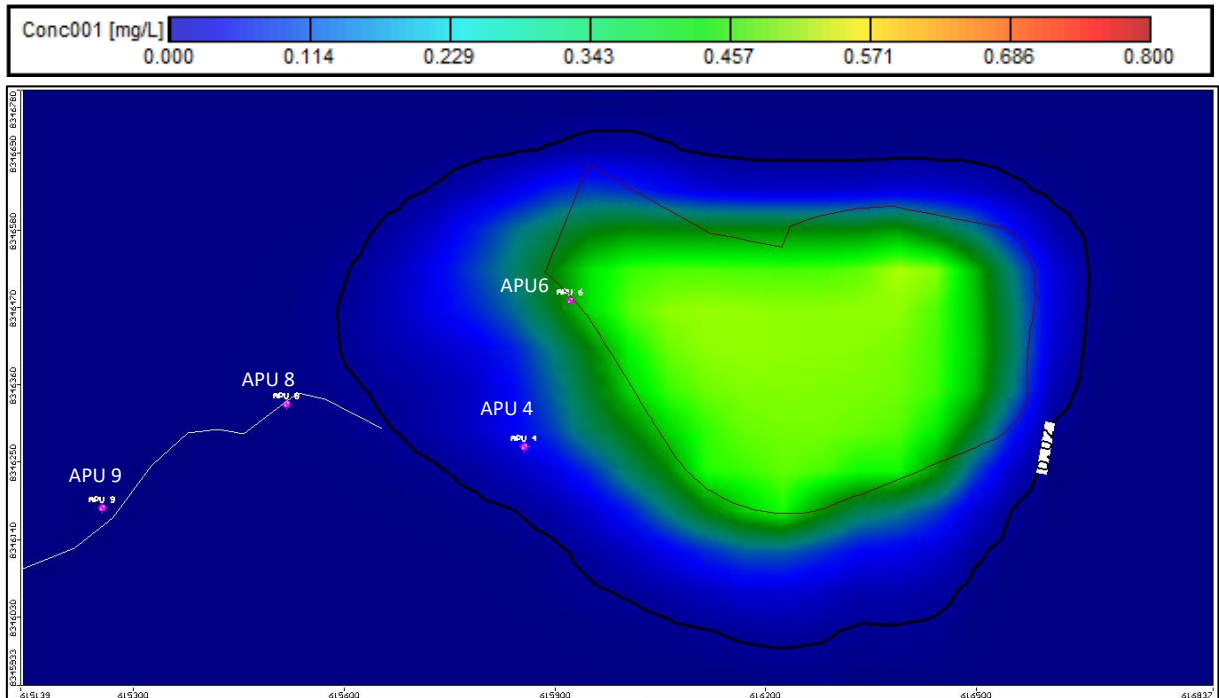
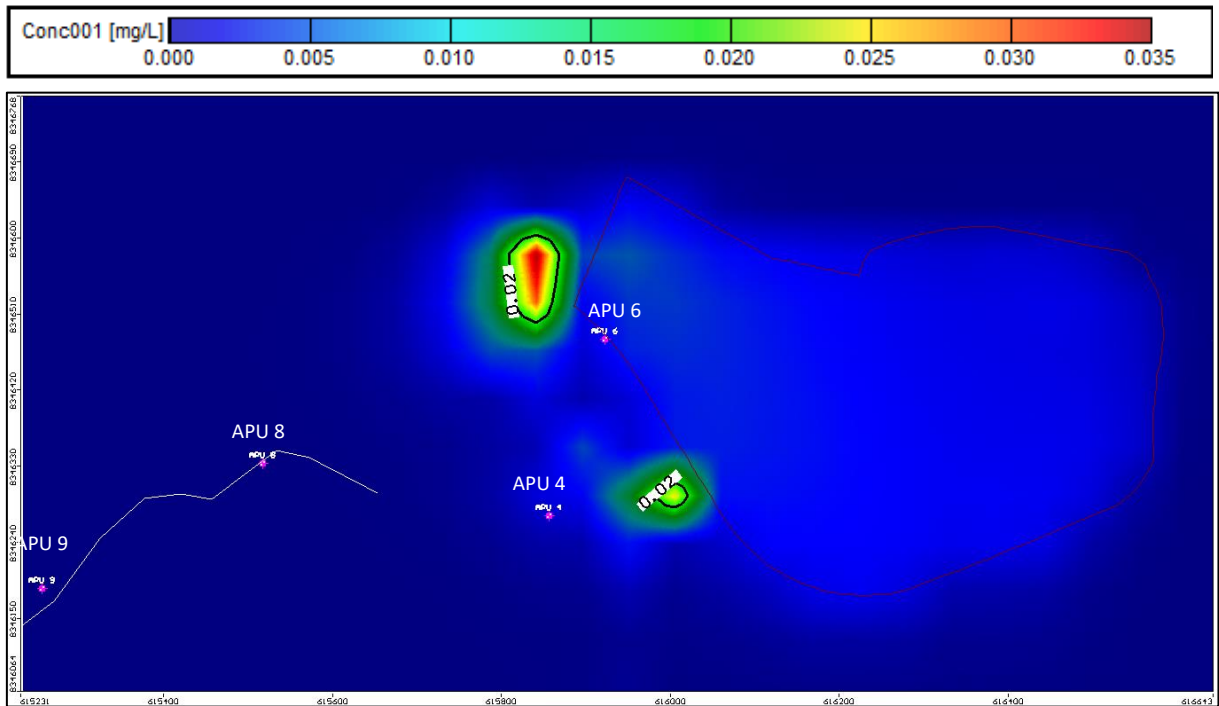


Figura 52. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 1 para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia



**Figura 53. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 2 para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia**



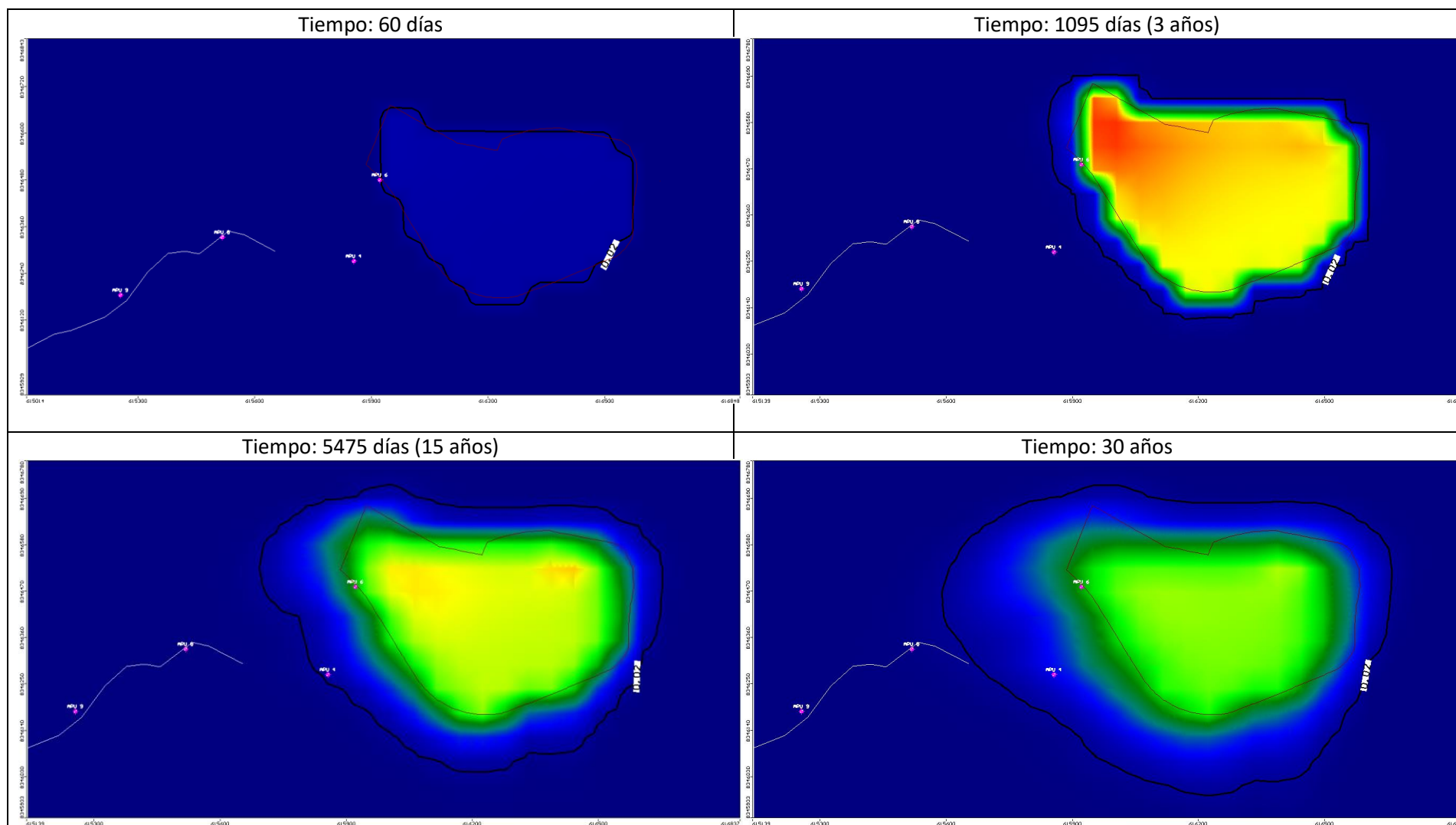
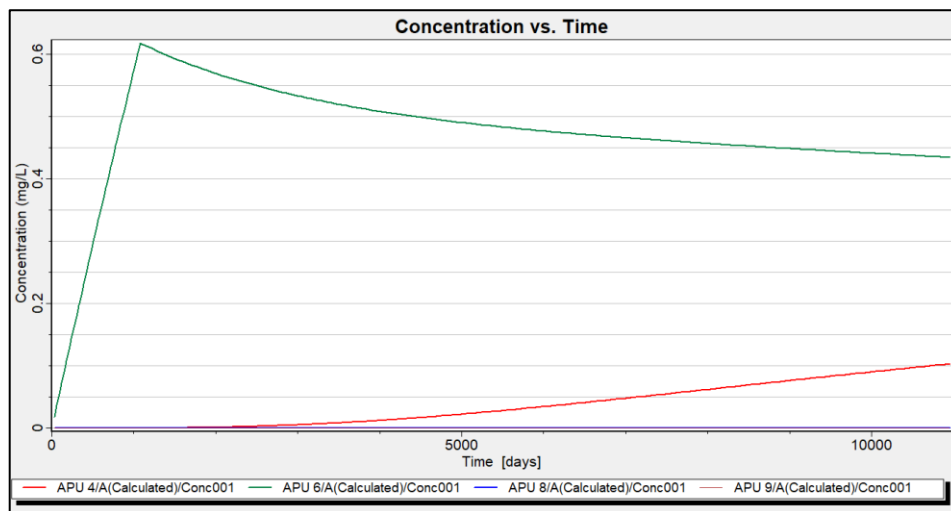
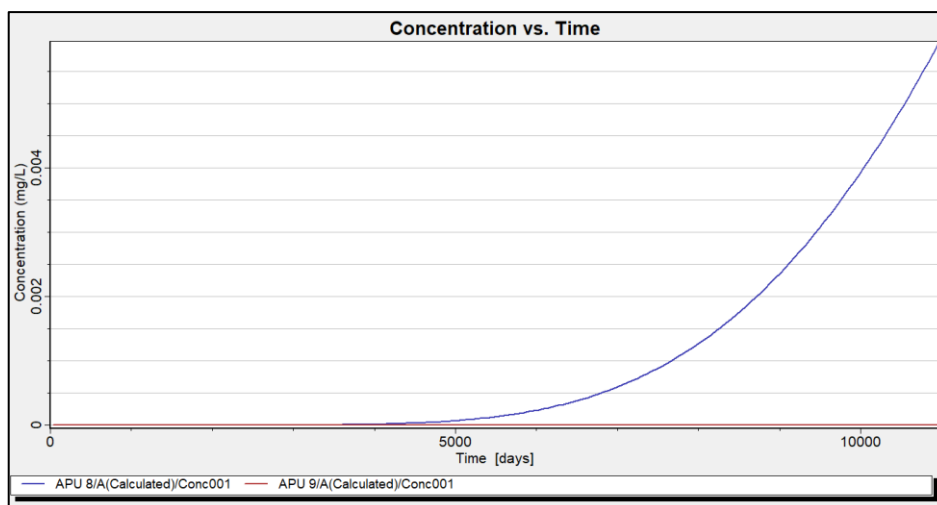


Figura 54. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 2.

En las siguientes figuras se puede ver que la concentración máxima del contaminante en el piezómetro APU 6 adyacente al área de vertido se da al cabo de 1300 días (dos años y medio) con 0.62 mg/l, mientras que en el piezómetro APU 4 que está a 200 m del pad de lixiviación se puede ver que no se alcanza la máxima concentración hasta los 30 años debido al lento movimiento del pluma, aunque la concentración límite permisible según los ECA (0.02 mg/l) se presenta en dicho piezómetro después de 12 años. En cuanto a los piezómetros APU 8 y APU 9 que se encuentran adyacentes a la quebrada, la pluma no llega a dichos puntos en una concentración importante durante el período de la simulación.



**Figura 55. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 56. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

### **Escenario 3**

Este escenario plantea la simulación de infiltración de cianuro mediante una recarga en el pad de lixiviación por falla de su impermeabilización, estableciendo la entrada del cianuro con un 25% de la recarga por precipitación en el área de dicho componente minero, siendo de 60.16 mm/año, el cual es la mitad del porcentaje de recarga establecido en los escenarios anteriores. Dicha entrada se dará sólo durante 3 años, el mismo tiempo que en el segundo escenario.

### **Resultados:**

Los resultados de la simulación para este escenario muestran en la figura 60 que el área de extensión del contaminante es un poco menor al del escenario anterior, ya que como se puede ver en la figura 58, a los 30 años la isolínea de concentración de 0.02 mg/l (ECA) aún no llegó a la quebrada, teniéndose hasta un máximo de 0.31 mg/l en el área de extensión de la pluma. Asimismo, la concentración máxima que se da a los 1110 días, luego de detener el vertido, es de 0.4 mg/l. Por lo que se puede decir que las concentraciones son menores durante todo el período de simulación (ver figura 60) por haberse establecido la entrada del contaminante con una menor recarga que los escenarios anteriores.

En la figura 59 se observa la pluma del contaminante que se desplazó hacia la capa 2, siendo sus concentraciones mucho menores que en la capa 1, no llegando a sobrepasar el límite permitido por el ECA (0.02 mg/l) a los 30 años de simulación.

Respecto a la masa acumulada del contaminante para este escenario en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación se tiene un total de 2225.7 Kg

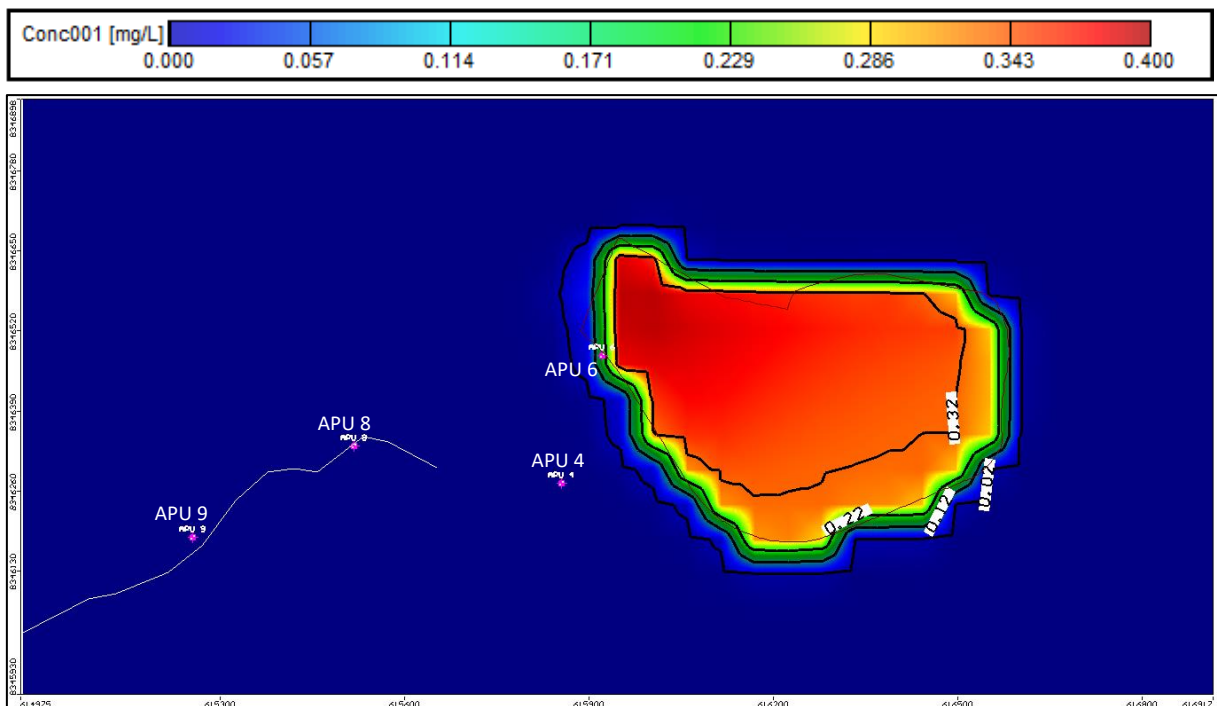


Figura 57. Modelación del transporte de cianuro después de 1110 días en la capa 1 para el escenario 3. Fuente: elaboración propia

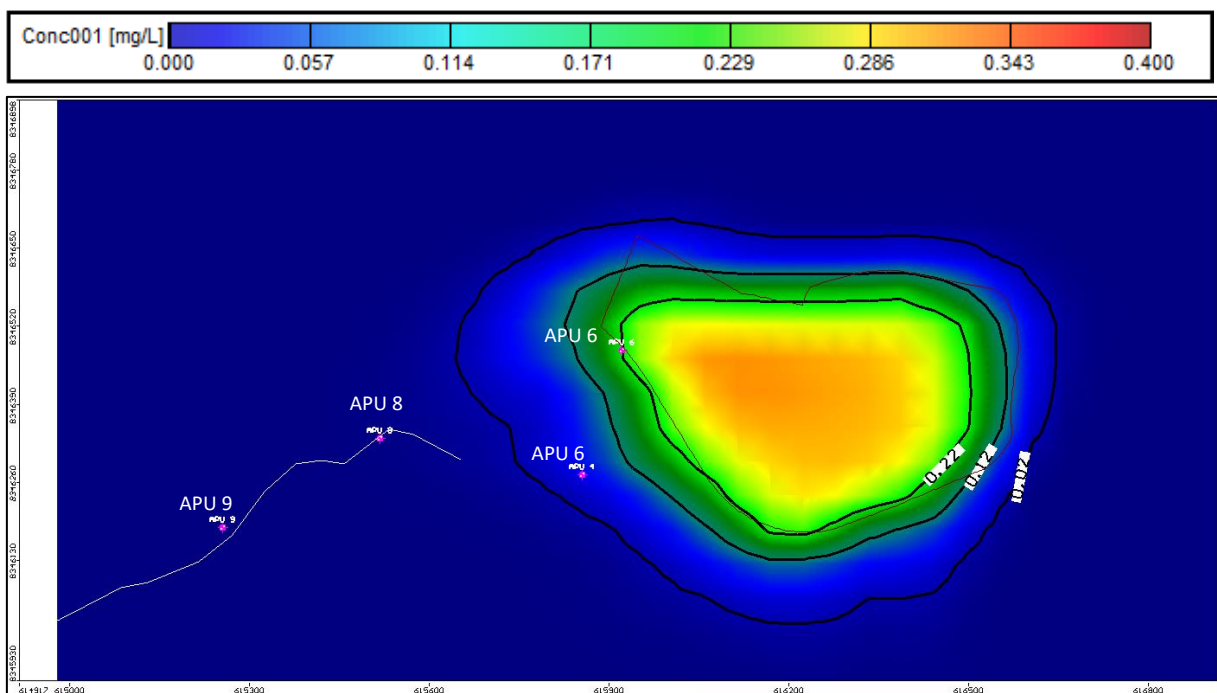
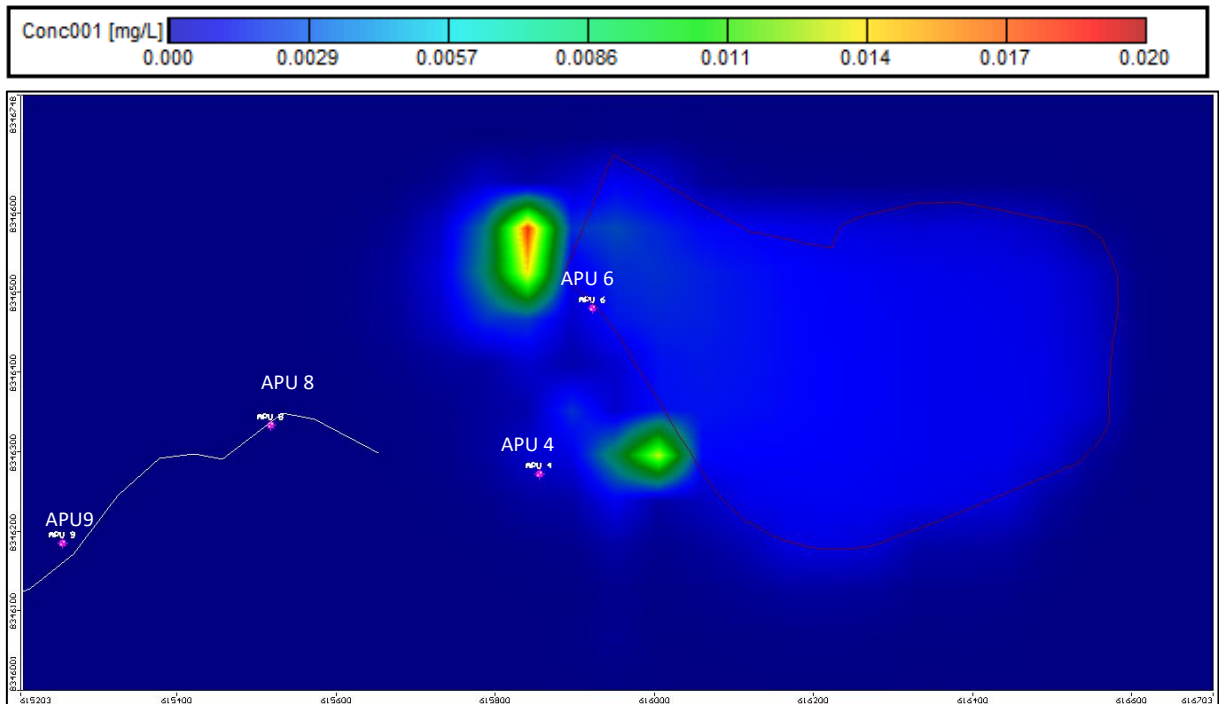
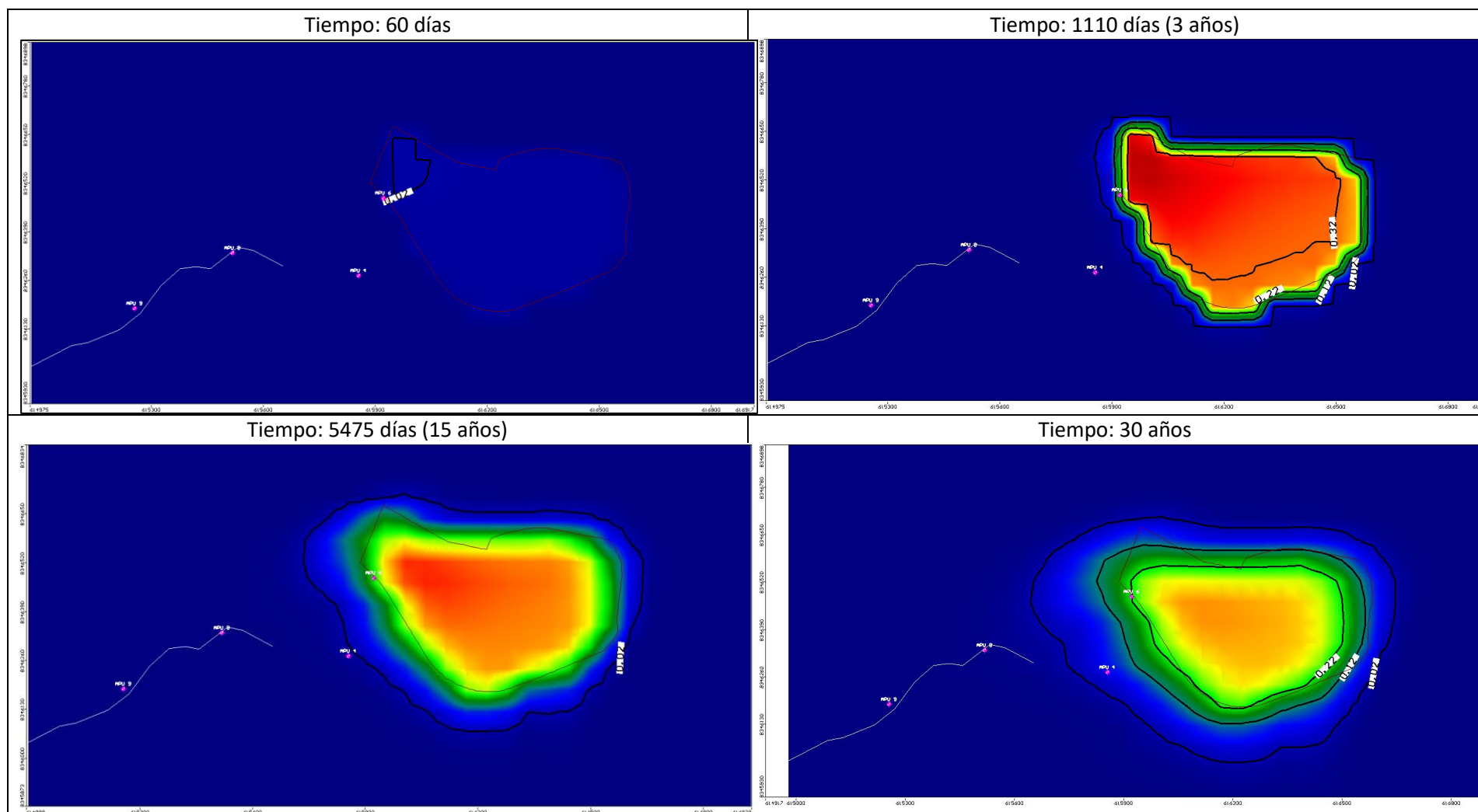


Figura 58. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 1 del escenario 3. Fuente: elaboración propia



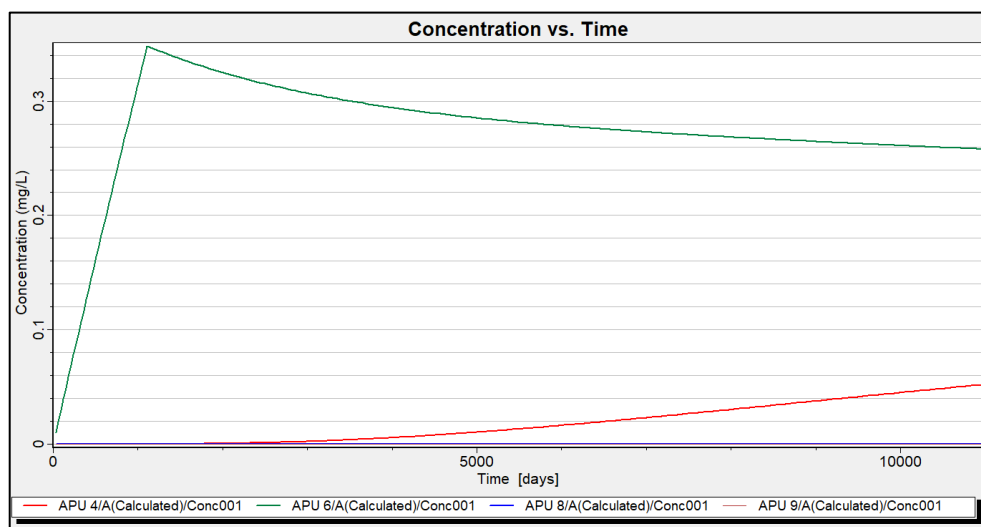
**Figura 59. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 2 para el escenario 3. Fuente: elaboración propia**



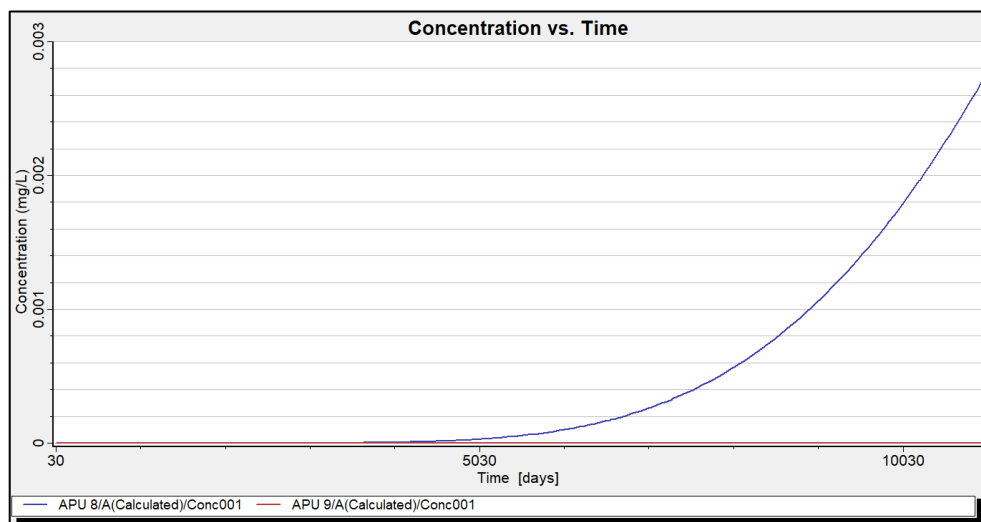
**Figura 60. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 3.**

Fuente: elaboración propia

En las siguientes figuras vemos la evolución de la concentración en los cuatro piezómetros instalados, en el piezómetro APU 6 colindante al pad de lixiviación va aumentando de manera gradual hasta llegar a un máximo de 0.35 mg/l a los 1100 días, luego disminuye debido a la detención de la fuga del cianuro que se da después de 3 años. En el piezómetro APU 4 (a unos 200 m del área del vertido) aún no se alcanza a ver la máxima concentración luego de 30 años. Así también en los piezómetros APU 8 y APU 9 (adyacentes a la quebrada) no se alcanza a la concentración de 0.02 mg/l (valor máximo permitido según los ECA) hasta los 30 años de simulación.



**Figura 61. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 62. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

#### **Escenario 4**

En este escenario se plantea la simulación de infiltración de cianuro en el pad de lixiviación, con una entrada puntual mediante un pozo de inyección con un caudal equivalente al 25% de la recarga en toda el área del pad de lixiviación, el cual es de 38.56 m<sup>3</sup>/día ubicado en el punto más cercano a la quebrada. Dicha entrada se dará de forma continua por 30 años sin detenerse en ningún momento y con la misma concentración de los escenarios anteriores, 50 mg/l.

#### **Resultados:**

Al igual que en los escenarios anteriores, se observa el desplazamiento de la pluma en la dirección del flujo, que en este caso al ser una entrada puntual la concentración del contaminante es mucho mayor en todo el período de simulación a comparación de los escenarios 1, 2 y 3, teniéndose hasta casi 40 mg/l cerca al punto del vertido al cabo de 30 años de la descarga continua (ver figura 63), además el tiempo de llegada de la pluma delimitada por la isólinea de concentración de 0.02 mg/l llega a la quebrada antes de los 20 años, como se puede ver en la figura 65.

También se puede ver en la figura 64 que hacia la capa 2 se ha tenido un desplazamiento importante de masa de contaminante llegando hasta un máximo de 0.5 mg/l a los 30 años de simulación, aunque parte de la pluma de concentración menor a 0.02 mg/l (ECA) aún no ha llegado a la quebrada en dicho período.

En cuanto a la masa acumulada del contaminante para este escenario en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación se tiene un total de 20719 Kg.



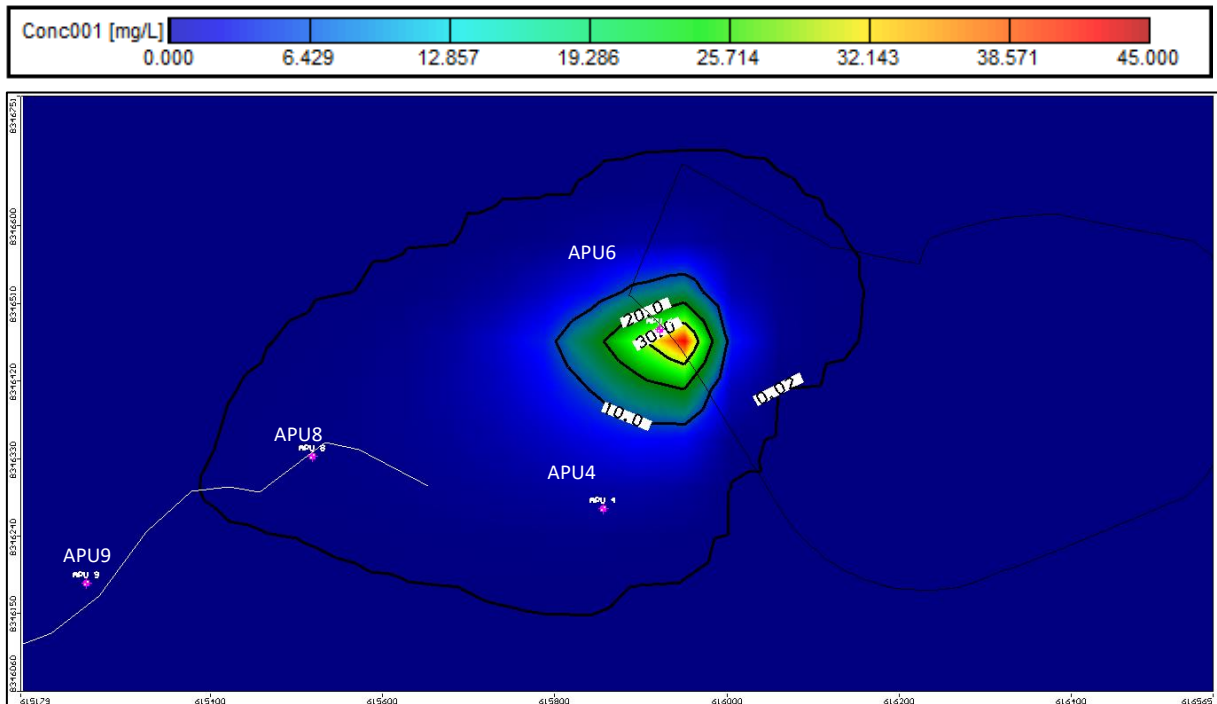


Figura 63. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en el escenario 4 en la capa 1. Fuente: elaboración propia

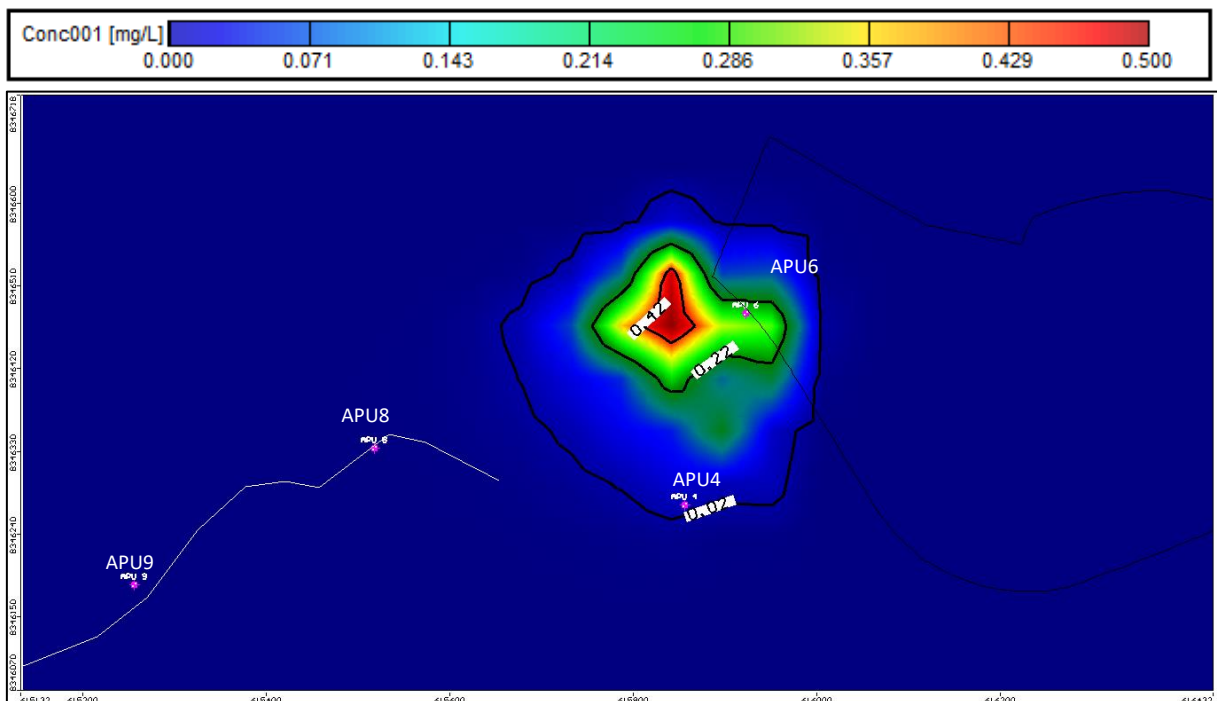


Figura 64. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en el escenario 4 en la capa 2. Fuente: elaboración propia

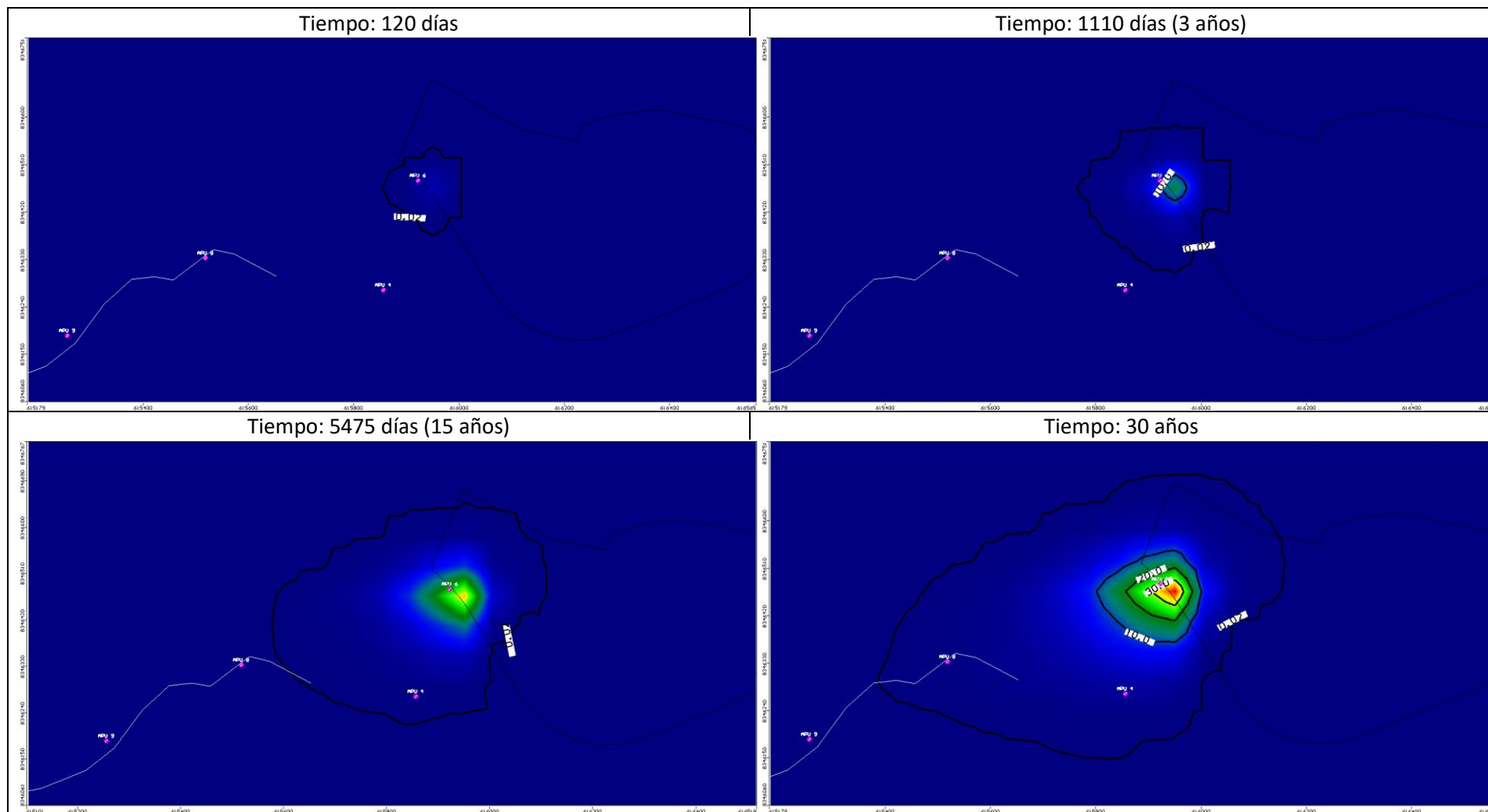
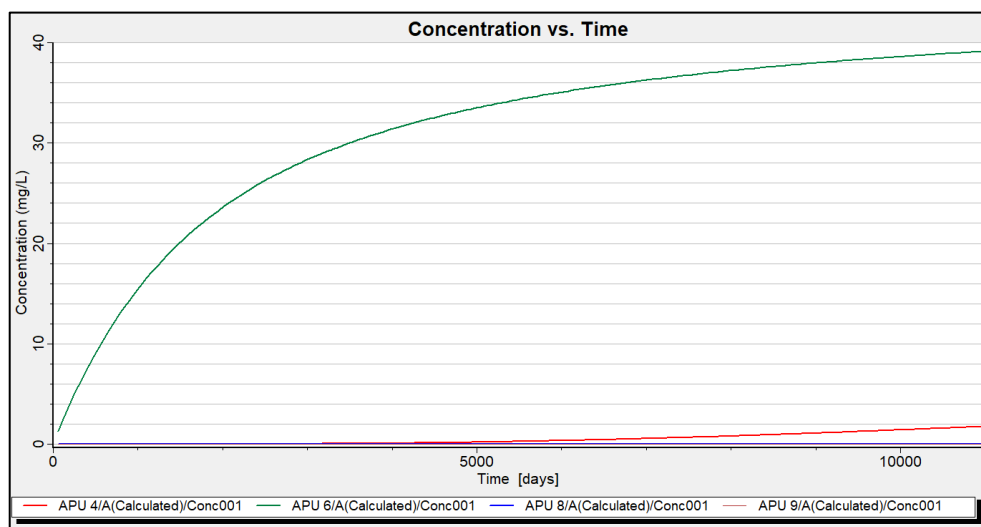


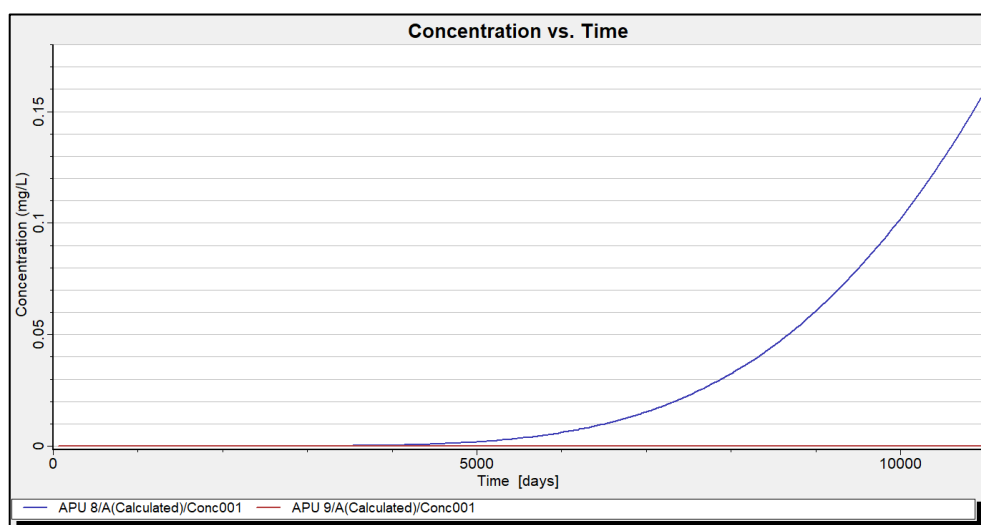
Figura 65. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 4.

Fuente: elaboración propia

En las siguientes figuras se presenta la evolución de la concentración en los piezómetros instalados, observándose que en el piezómetro APU 6 hay un aumento gradual del contaminante hasta 39 mg/l a los 30 años de simulación con una tendencia a estabilizarse debido a la recarga continua. En los piezómetros APU 4 y APU 8 ubicados cerca a la quebrada también se observa el aumento de la concentración llegando a 2 y 0.16 mg/l respectivamente a los 30 años. Sin embargo en el piezómetro APU 9 que se encuentra en una parte más baja de la quebrada se puede ver que la pluma no ha llegado en todo el tiempo de la simulación.



**Figura 66. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 67. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

### **Escenario 5**

En este escenario la simulación de infiltración de cianuro se da con el mismo pozo de inyección planteado en el escenario anterior y con el mismo caudal de  $38.5 \text{ m}^3/\text{día}$ , pero esta vez la entrada del contaminante será solo durante de 3 años, mientras que la simulación continuará siendo por 30 años al igual que todos los escenarios.

### **Resultados:**

En cuanto a los resultados de este escenario, como se observa en la figura 71, a los 120 días se tiene las mismas concentraciones y extensión del contaminante que en el escenario 4, siendo así hasta los 3 años, puesto que luego de que se detiene el vertido y se llega a una concentración máxima de  $16 \text{ mg/l}$  a los 1080 días (ver figura 68), las concentraciones empiezan a disminuir en toda el área de extensión de la pluma (ver figura 71).

Según se observa en la figura 69, a los 30 años de la simulación la isolínea de concentración de  $0.02 \text{ mg/l}$  ha llegado a la quebrada estando en un punto medio entre los piezómetros APU 8 y APU 9 y en las zonas cercanas al punto de inyección se llega a tener un máximo de  $1.3 \text{ mg/l}$ .

En la figura 70 se puede observar la pluma que se desplazó verticalmente hacia la capa 2, y también horizontalmente al igual que en la capa 1 hasta los 30 años, la concentración máxima es de  $0.1 \text{ mg/l}$  pero las concentraciones mayores a  $0.02 \text{ mg/l}$  (ECA) aún no llegó a la zona de la quebrada.

La masa acumulada del contaminante para este escenario, en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación es de un total de 2025 Kg.

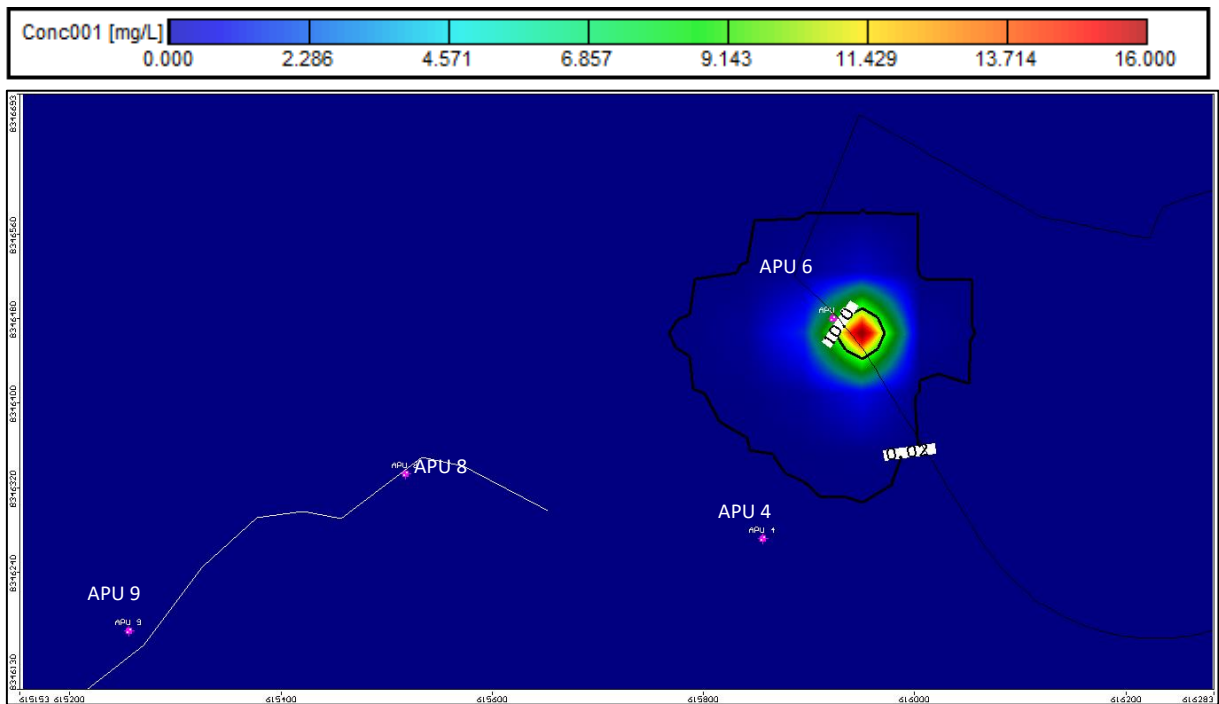


Figura 68. Modelación del transporte de cianuro después de 1080 días en el escenario 5 en la capa 1. Fuente: elaboración propia

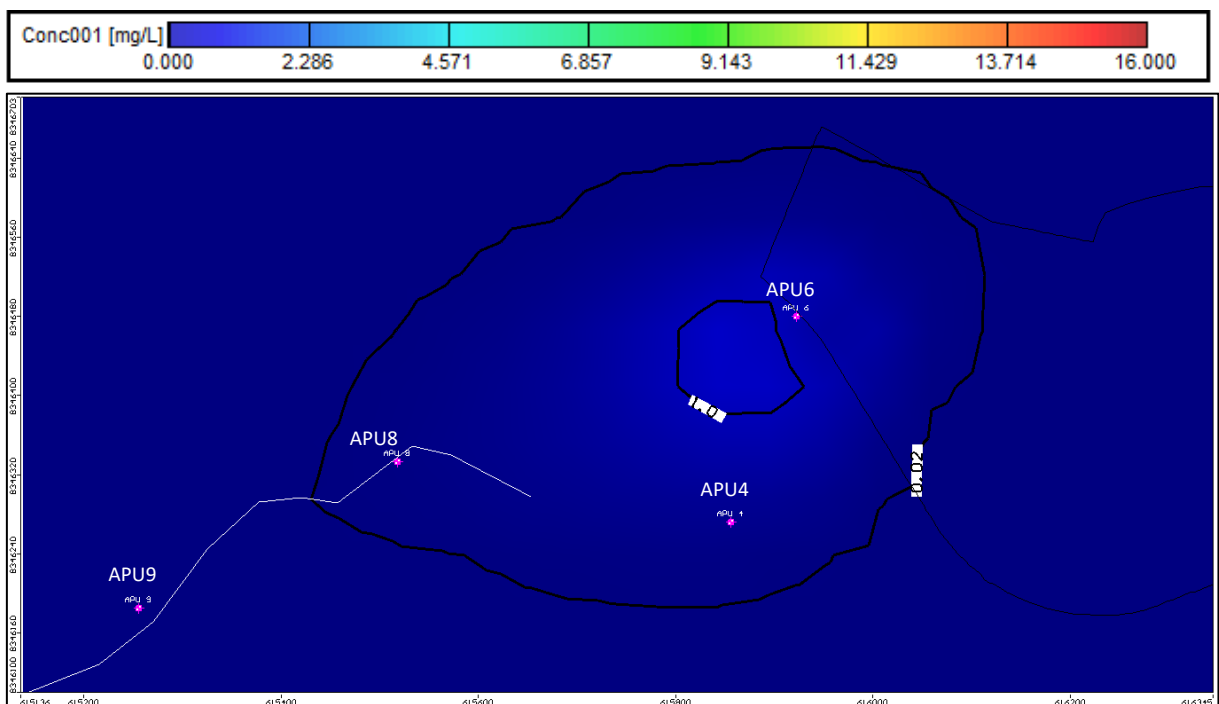
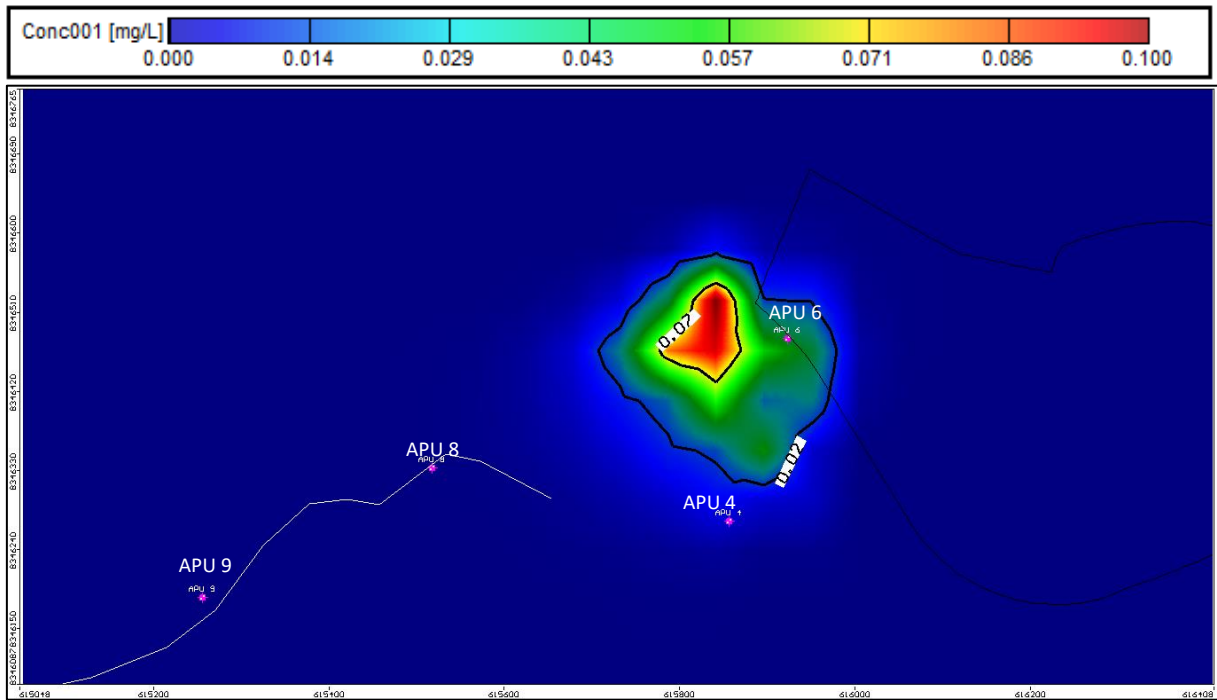


Figura 69. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en el escenario 5 en la capa 1. Fuente: elaboración propia



**Figura 70. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en el escenario 5 en la capa 2. Fuente: elaboración propia**

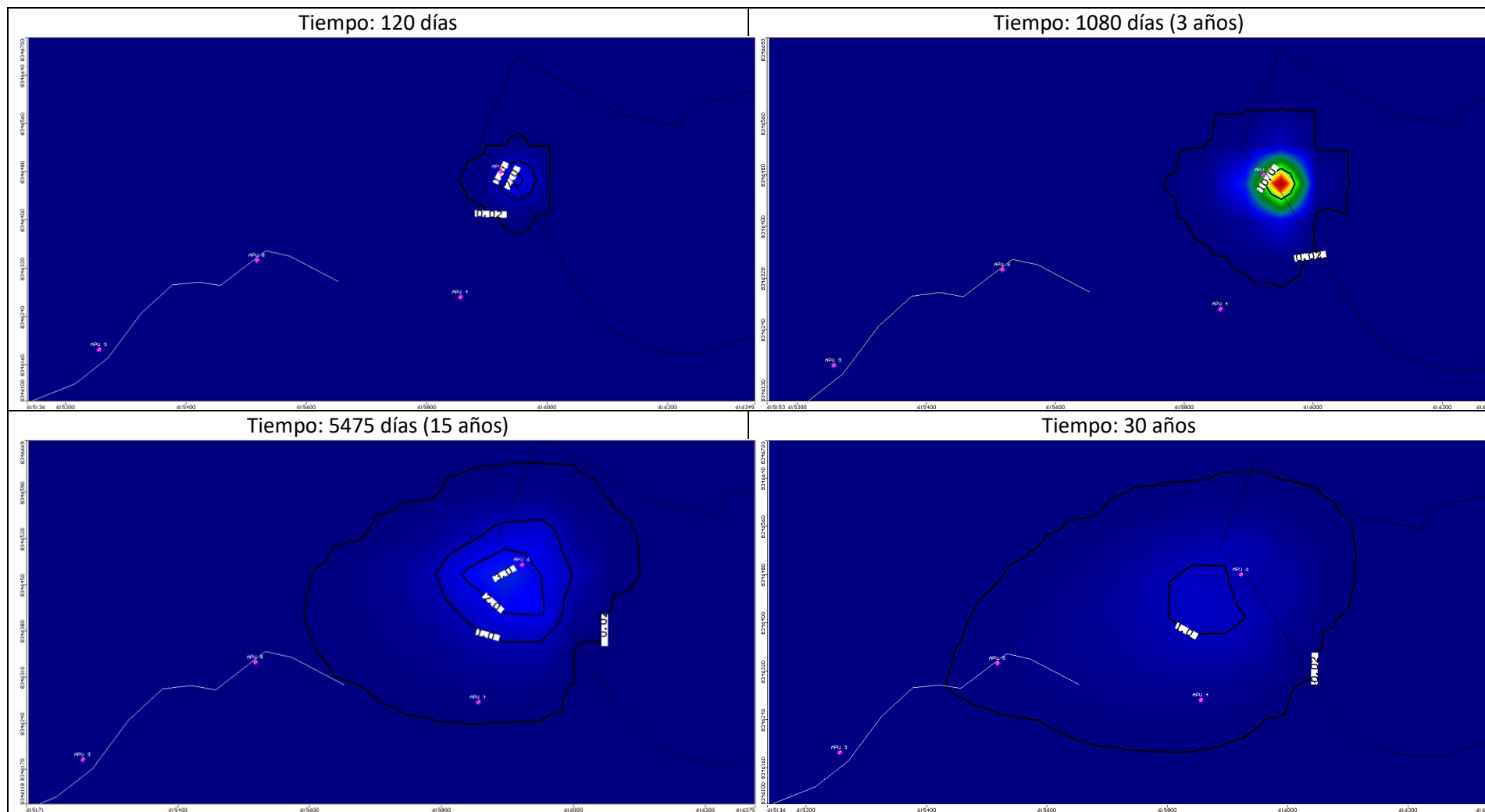
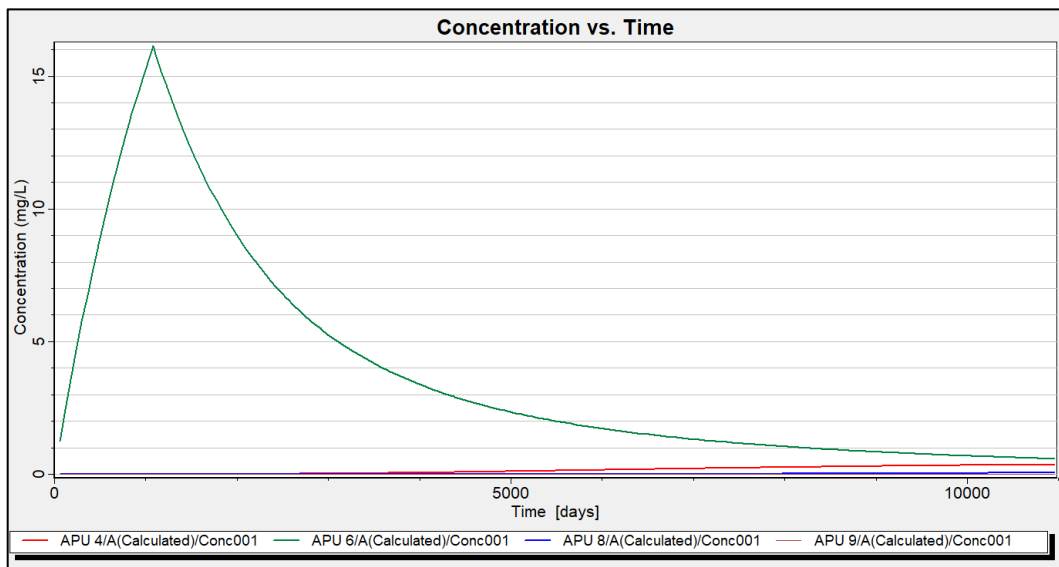
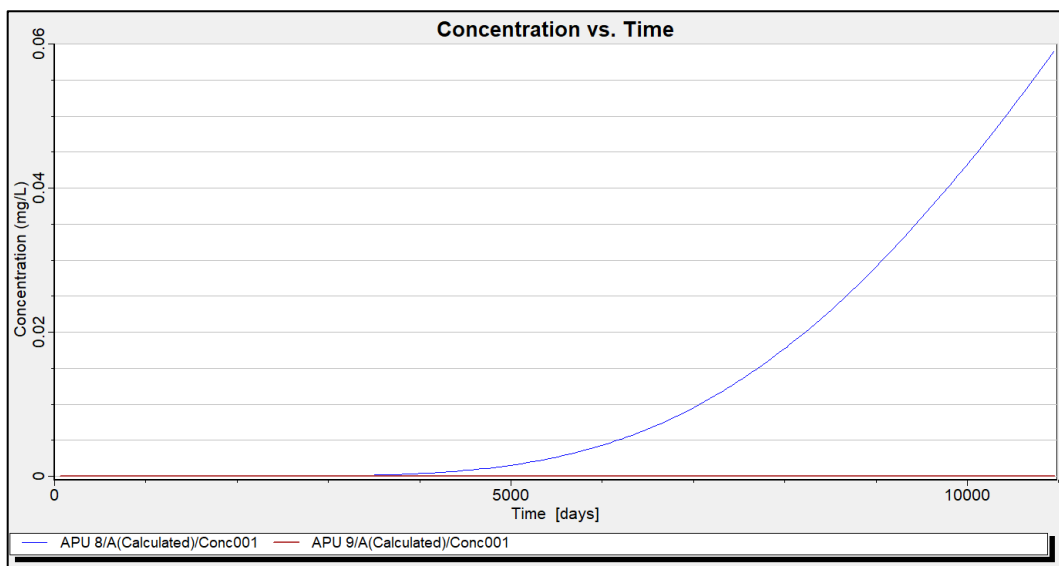


Figura 71. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 5.

En cuanto a la variación de la concentración en los piezómetros instalados, en el APU 6 se llega a un máximo de 16 mg/l a los 1300 días. Mientras que en los piezómetros APU 4 y APU 8 aún no se alcanza la máxima concentración hasta los 30 años de simulación debido a lento movimiento del contaminante en el flujo, aunque en el piezómetro APU 8 si se llega a 0.02 mg/l (valor máximo permitido por los ECA) a los 8300 días. La pluma no llega hasta el punto del piezómetro APU 9.



**Figura 72. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 73. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



## **Escenario 6**

En este escenario se establecieron dos pozos de inyección de las mismas características que el anterior, con caudal de 38.5 m<sup>3</sup>/día, pero con una entrada del cianuro de forma continua por 30 años. Se adicionó el segundo pozo de 38.5 m<sup>3</sup>/día con el fin de simular un mayor vertido en el evento y desde dos zonas puntuales, además de realizar una comparación con el caudal equivalente al 50% de la recarga en toda el área del pad de lixiviación que se planteó en el escenario 1.

### **Resultados:**

En la figura 75 se observa que en comparación al escenario 4 (donde se simuló el vertimiento continuo de un sólo pozo), se tiene una mayor extensión del área de la pluma generada debido al segundo pozo de inyección adicional, pero el alcance de su desplazamiento hacia la quebrada es sólo ligeramente mayor, así también las concentraciones son un poco más altas teniéndose valores de hasta un máximo de 41 mg/l en el área de extensión de la pluma luego de los 30 años de vertimiento. Sin embargo, el desplazamiento de la pluma hacia la quebrada si es notablemente mayor en comparación al escenario 1 (cuya entrada del contaminante fue mediante recarga en el área del pad).

En la figura 76 se puede ver que a los 30 años de la simulación se ha tenido un transporte vertical de la masa hacia la capa 2 teniéndose concentraciones de hasta de 1.5 mg/l para este período, siendo menores a los de la capa 1; además se observa que la pluma cuya concentración es menor a 0.02 mg/l (ECA) a los 30 años aún no ha llegado a la quebrada.

Respecto a la de masa acumulada del contaminante para este escenario en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación se tiene un total de 41133 Kg.

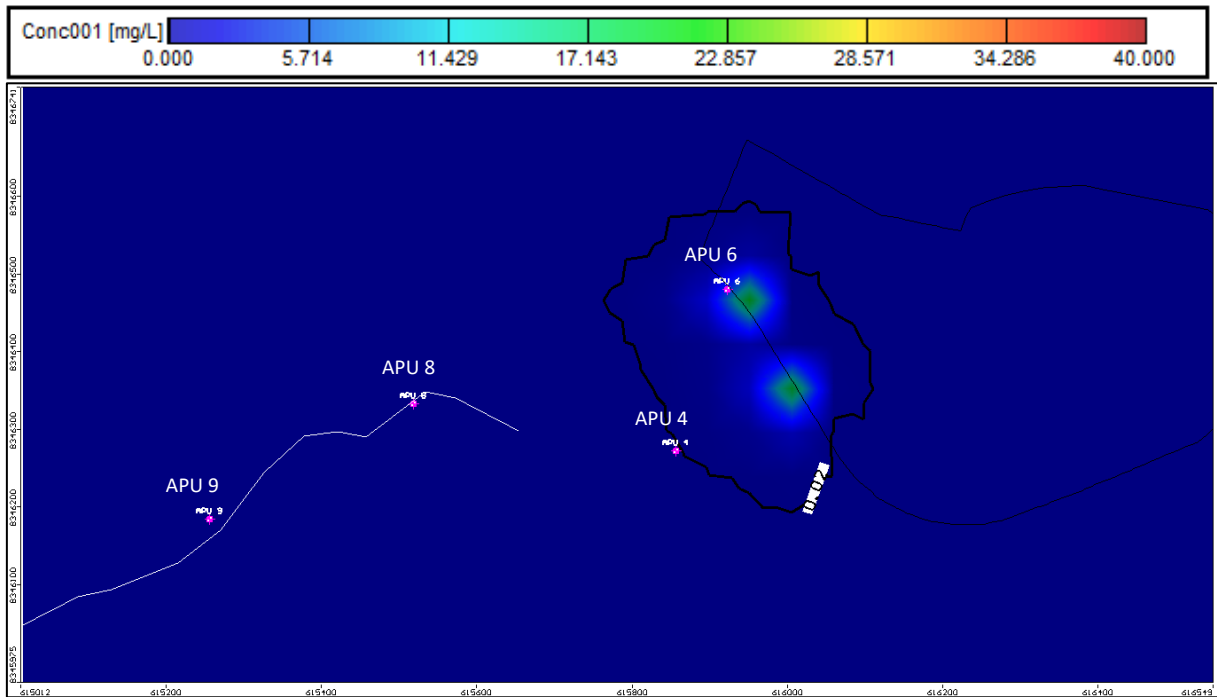


Figura 74. Modelación del transporte de cianuro después de 1080 días el escenario 6 en la capa 1. Fuente: elaboración propia

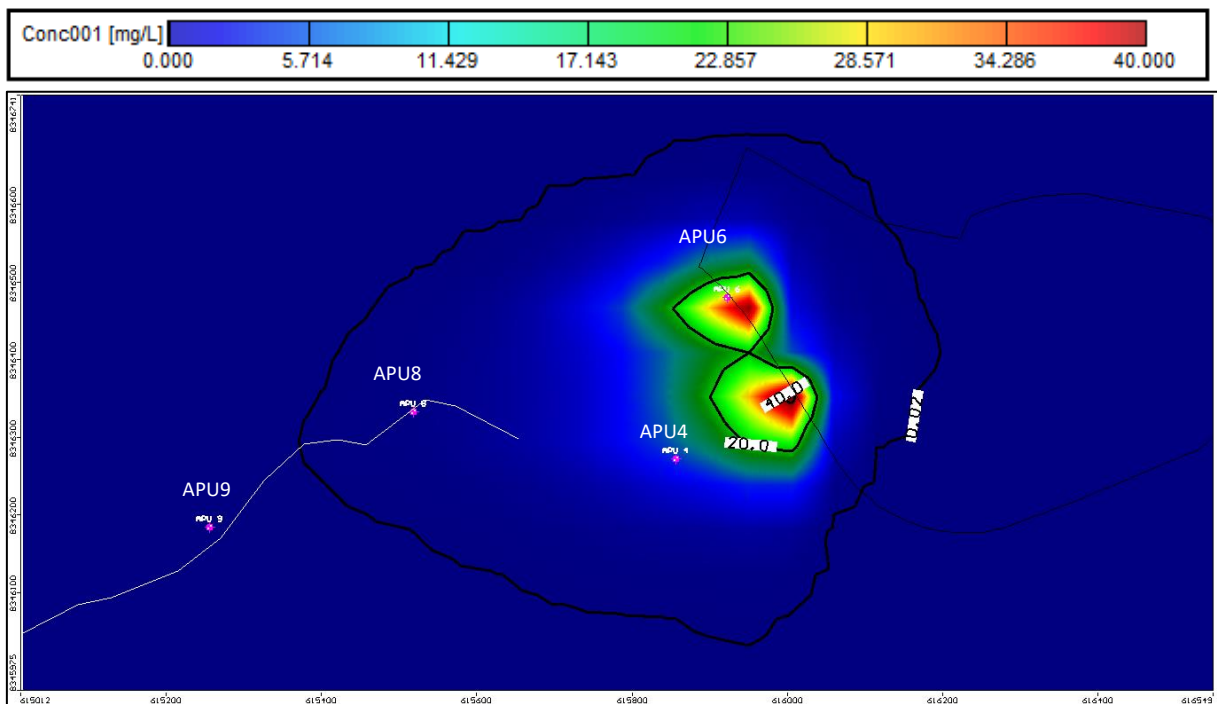


Figura 75. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 1 para el escenario 6. Fuente: elaboración propia

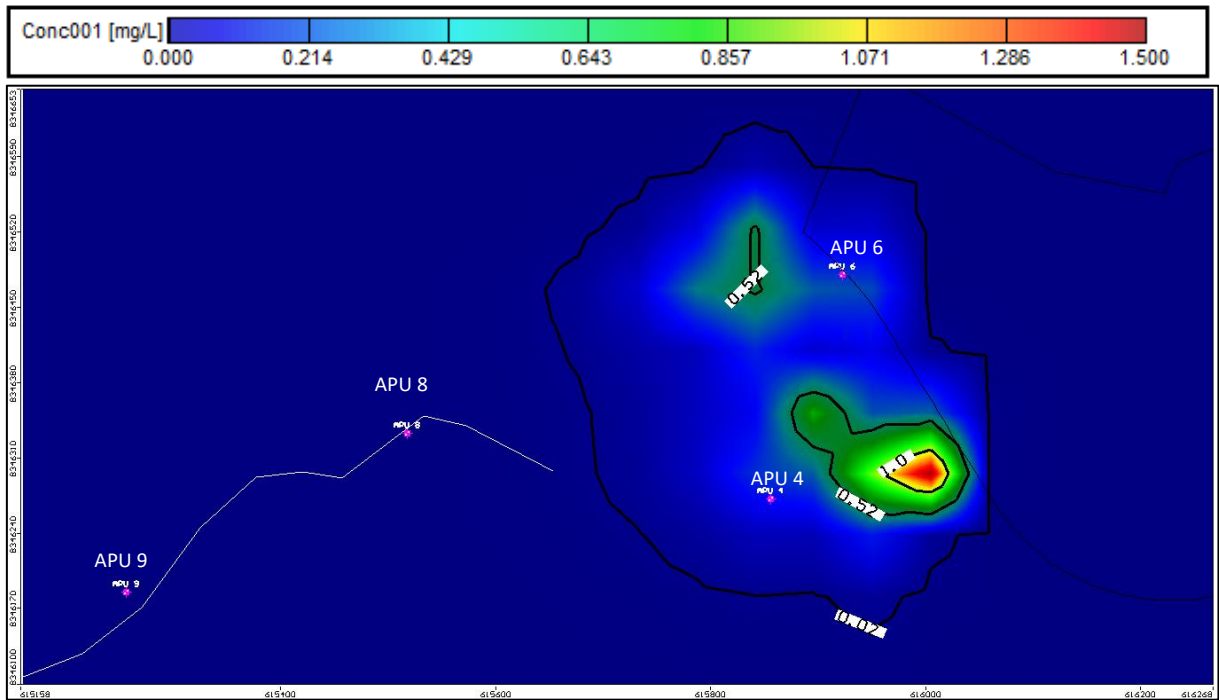


Figura 76. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 2 para el escenario 6. Fuente: elaboración propia.

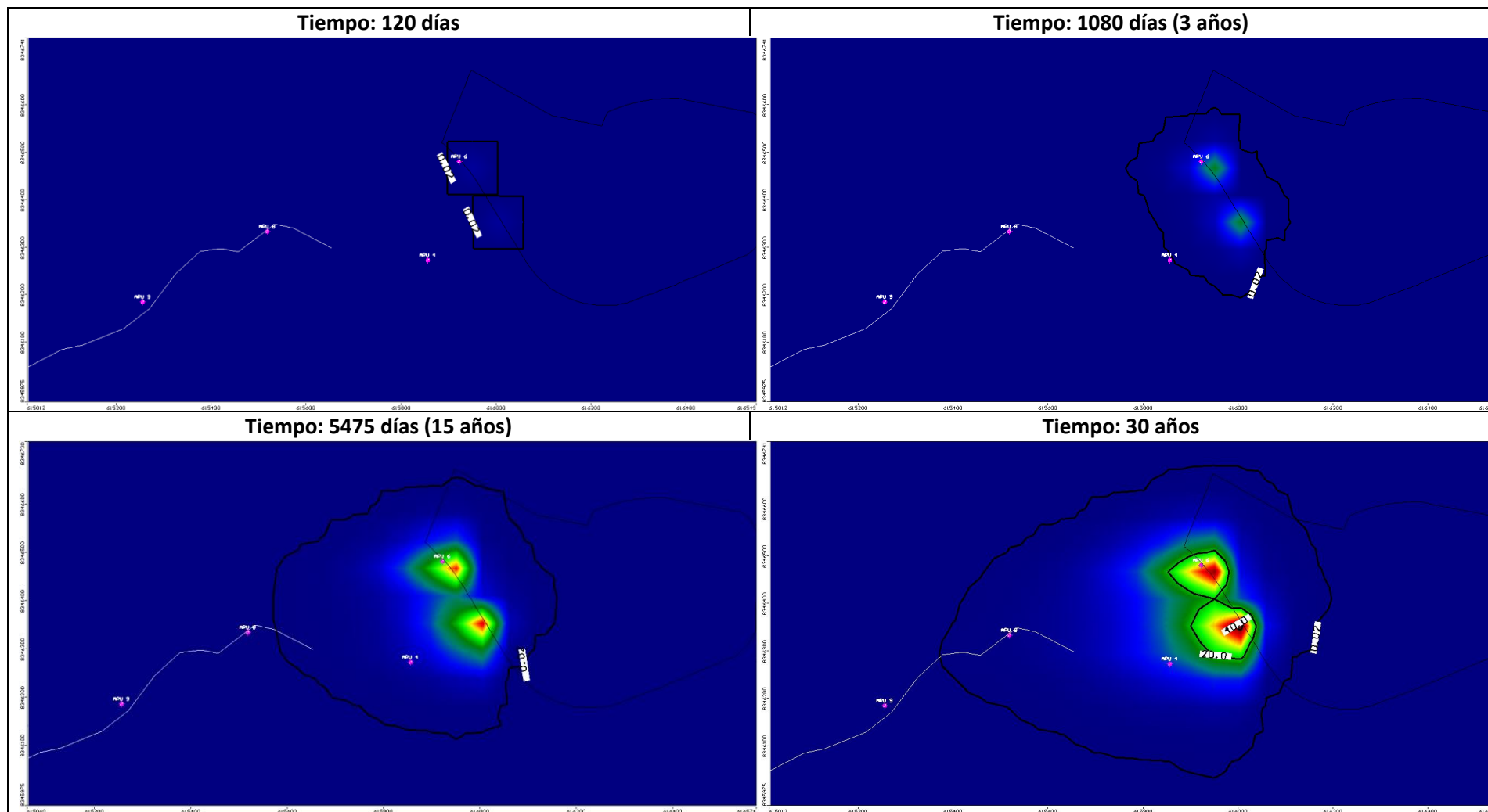
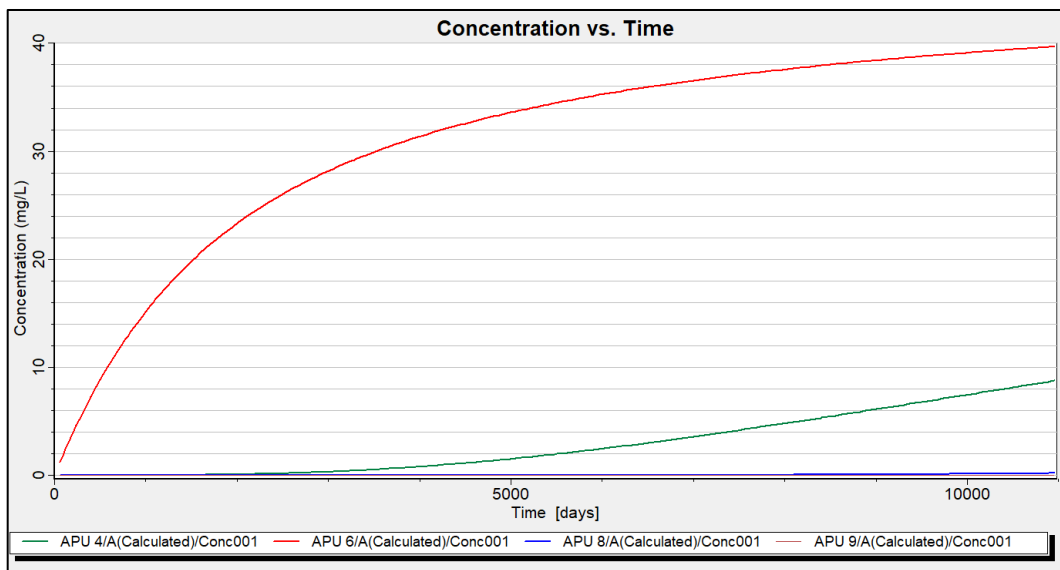
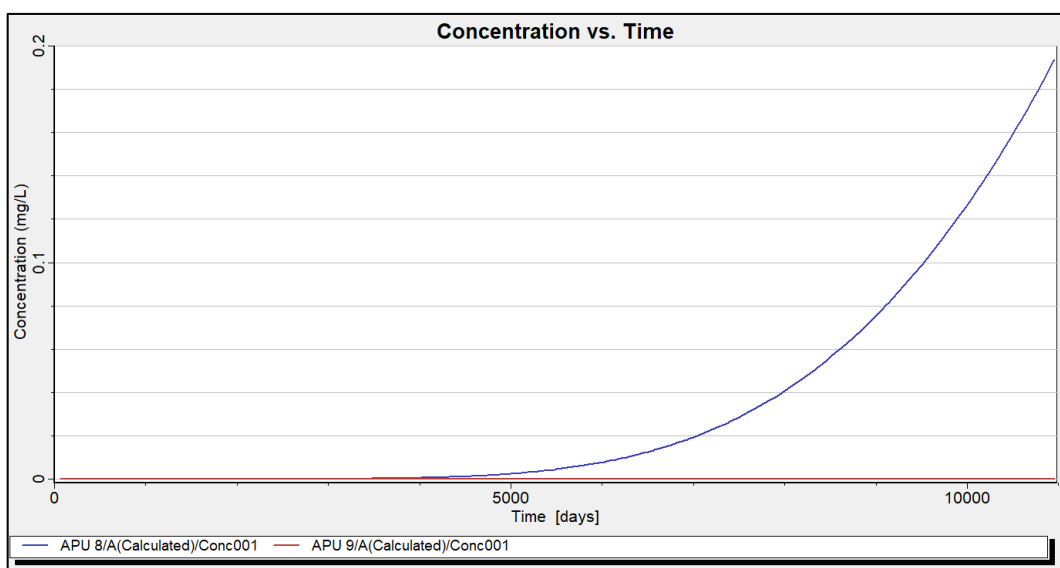


Figura 77. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 6.

A continuación podemos ver la evolución de la concentración en el piezómetro APU 6 (ubicado a unos pocos metros del primer pozo) donde se alcanza gradualmente un valor de 40 mg/l con una tendencia a su estabilización a los 30 años; mientras que en el piezómetro APU 4 (que se encuentra a unos 200 m de los puntos del vertido) se tiene 9 mg/l luego de los 30 años de vertimiento. En el piezómetro APU 8, ubicado adyacente al inicio de la quebrada, la concentración de 0.02 mg/l (valor máximo permitido según los ECA) se alcanza a los 7000 días.



**Figura 78. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 79. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

## **Escenario 7**

En este escenario la simulación de infiltración de cianuro se da con los mismos pozos de inyección planteados en el escenario anterior y con los mismos caudales, pero la diferencia es que la descarga del vertido será sólo por 3 años, mientras que la simulación continuará siendo por 30 años al igual que todos los escenarios.

### **Resultados:**

Se observa que el desplazamiento de la pluma hacia la quebrada es similar al del escenario anterior en el que la descarga fue continua, sin embargo las concentraciones son menores debido a que se detuvo el vertido luego de 3 años, por lo que luego de alcanzar una concentración máxima de casi 16 mg/l a los 1080 días (ver figura 81), se presenta una atenuación a los 15 y 30 años de la simulación tal como se ve en la figura 83. Teniéndose una concentración máxima de 1.9 mg/l en el área de extensión de la pluma luego de 30 años de simulación (ver figura 81).

En la figura 82 se muestra la pluma que hasta los 30 años de simulación se desplazó hacia la capa 2, tanto vertical como horizontalmente, viéndose que la pluma que tiene una concentración mayor a 0.02 mg/l (ECA) no llegó a la zona de la quebrada para este período; así también en las zonas de máxima concentración alcanzó un valor de 0.2 mg/l.

Respecto a la de masa acumulada del contaminante para este escenario, en todo el sistema acuífero al final de los 30 años de simulación se tiene un total de 4018.5 Kg.

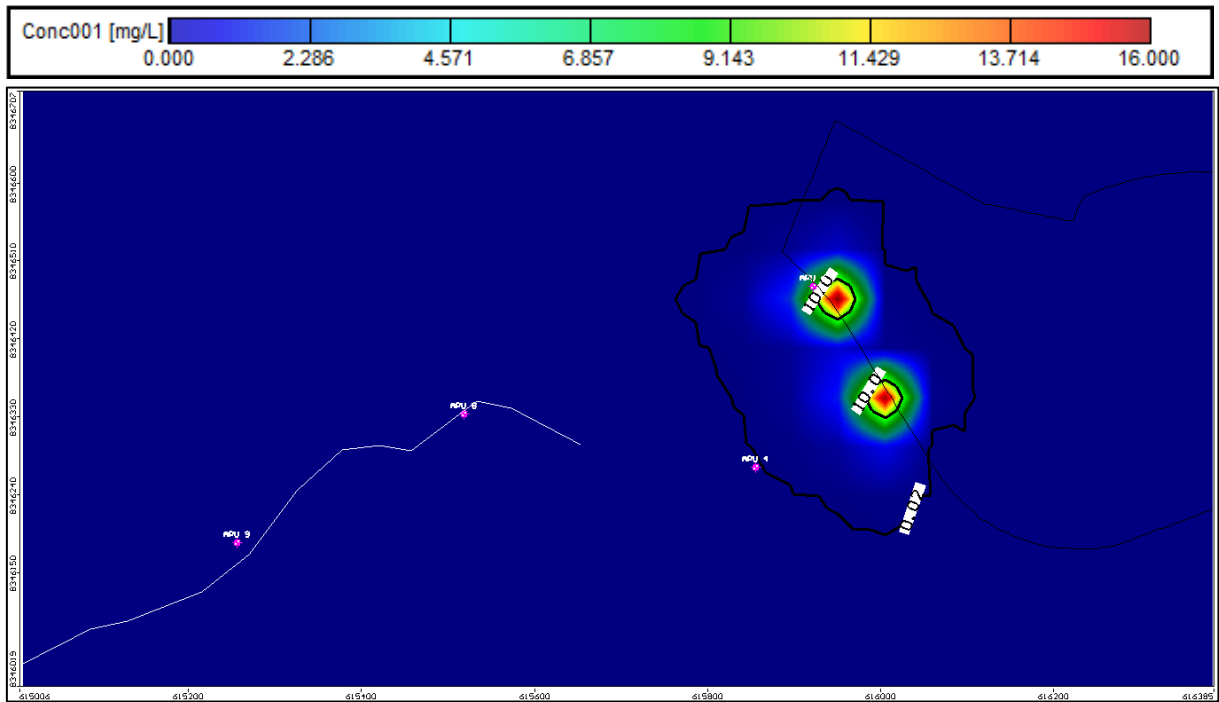


Figura 80. Modelación del transporte de cianuro después de 1080 días en la capa 1 para el escenario 7. Fuente: Elaboración propia

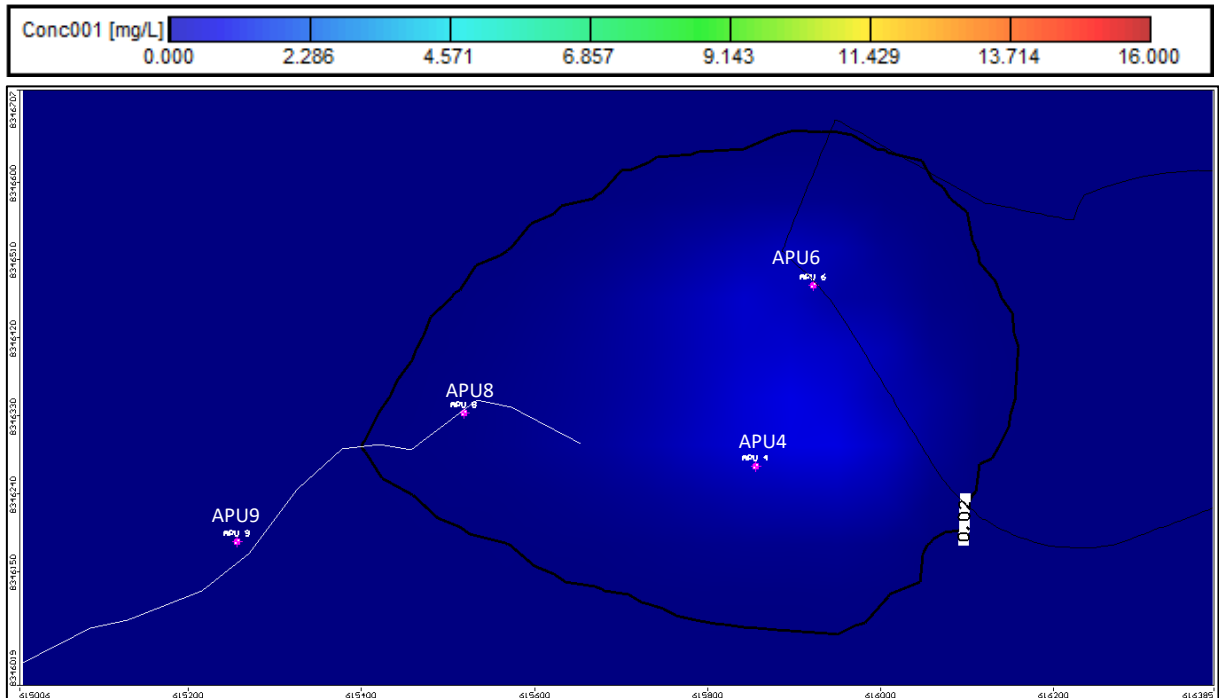
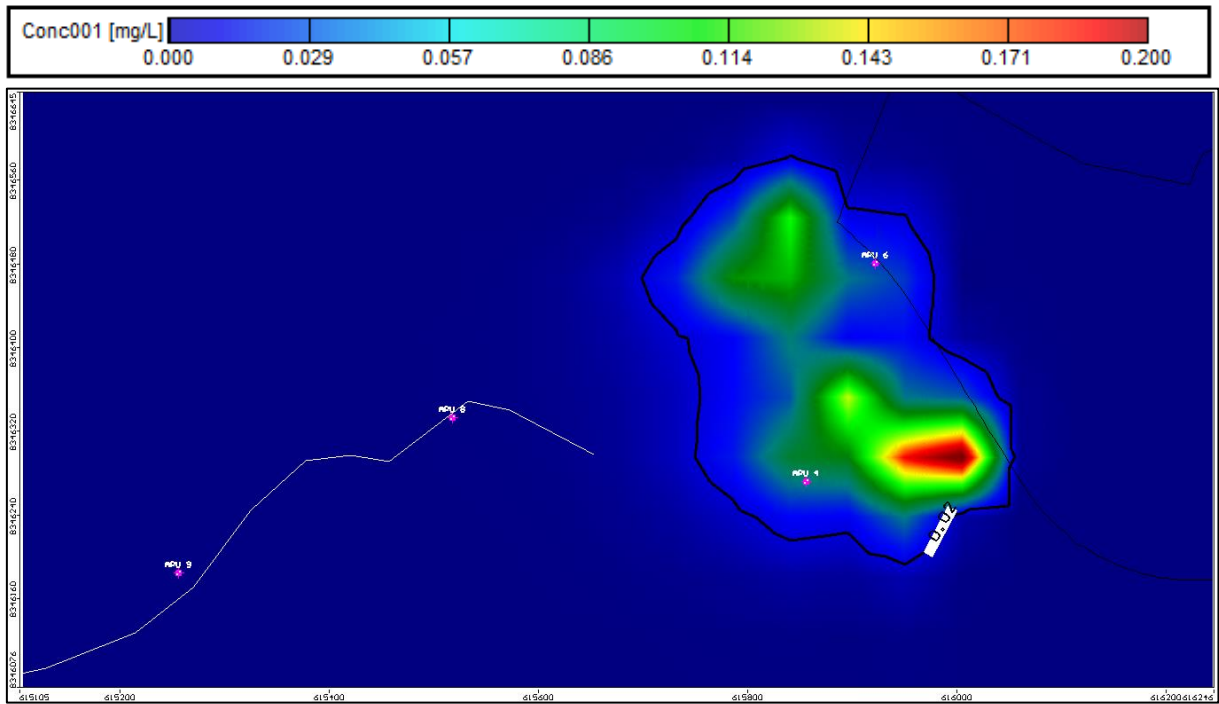
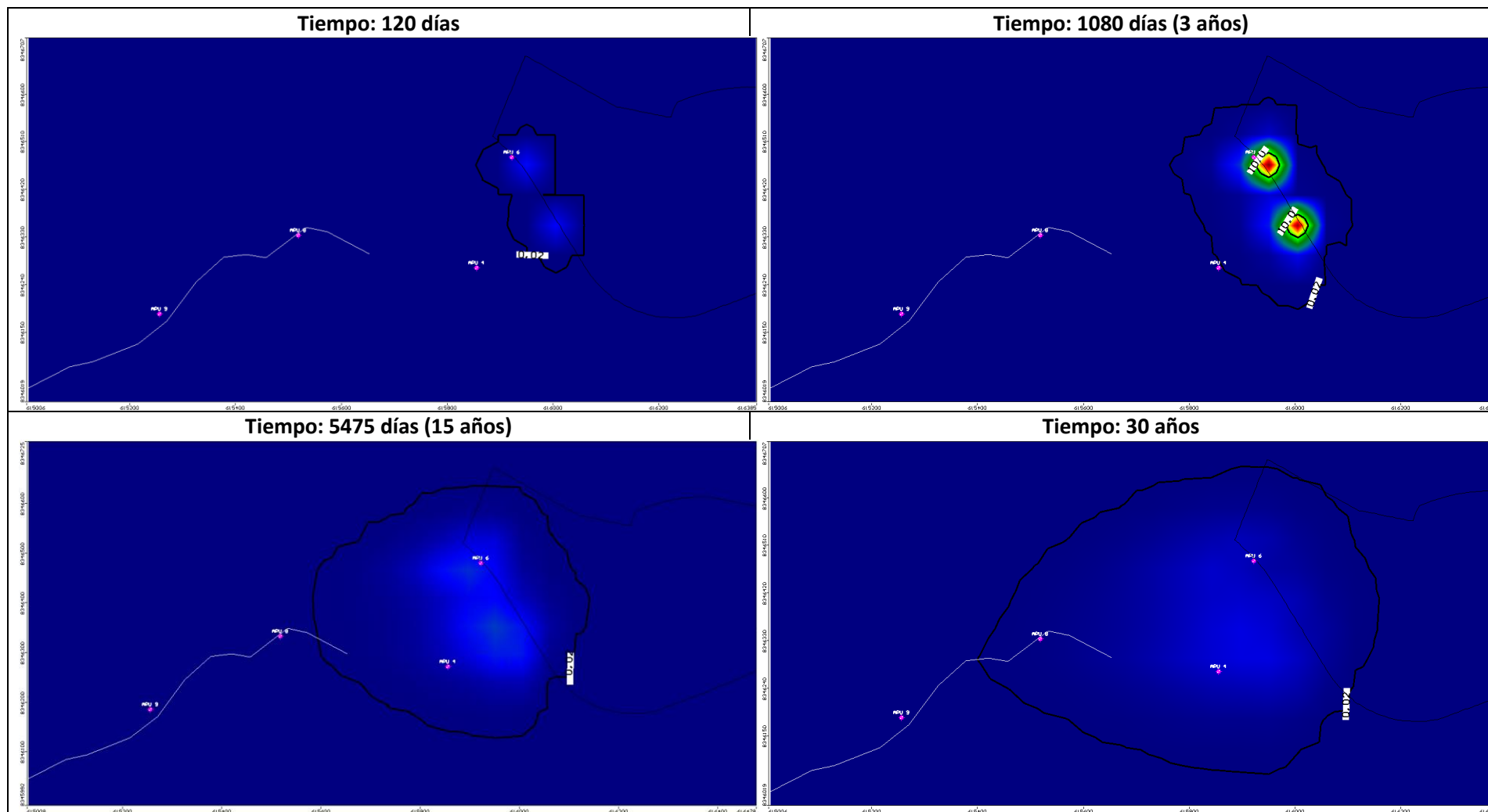


Figura81. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 1 para el escenario 7. Fuente: Elaboración propia



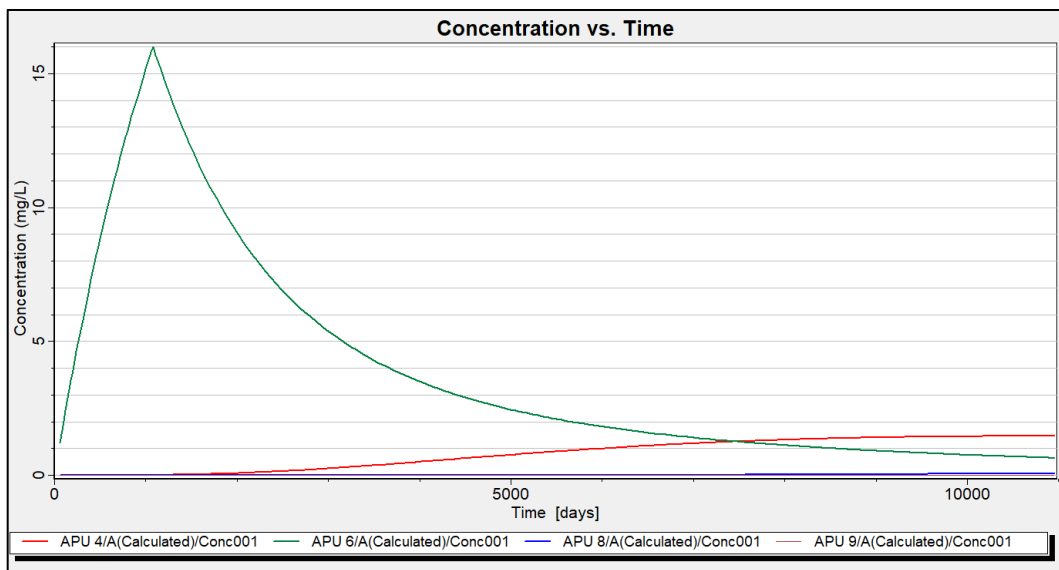
**Figura 82. Modelación del transporte de cianuro después de 30 años en la capa 2 para el escenario 7. Fuente: Elaboración propia**



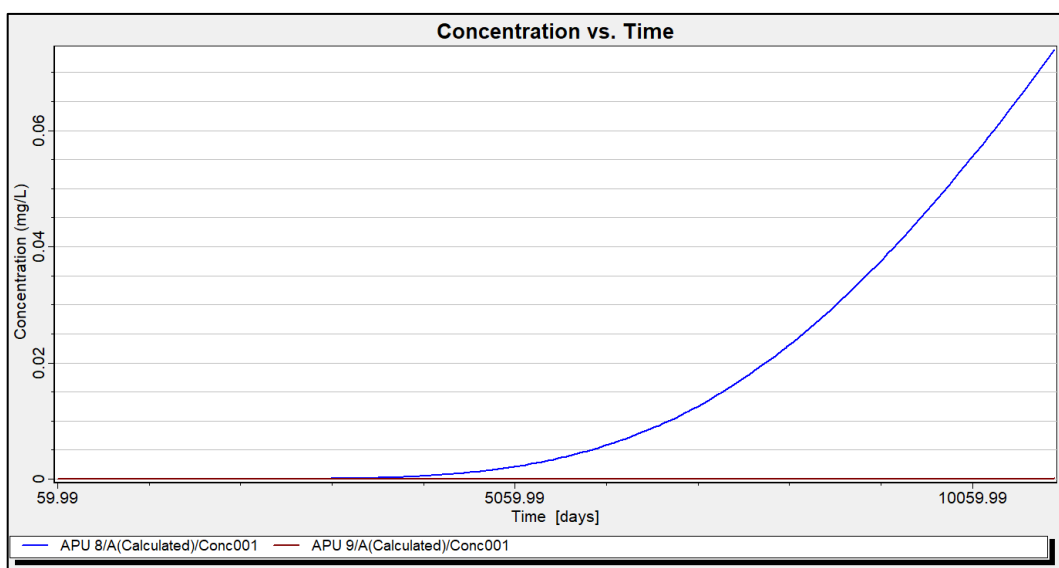


**Figura 83. Evolución de la pluma del contaminante en la capa 1 para el escenario 7.**

La evolución de la concentración en el piezómetro APU 6 (ubicado a unos pocos metros del primer pozo) llega a un máximo de 16 mg/l a los 1100 días, luego inicia su atenuación; mientras que en el piezómetro APU 4 (que se encuentra a unos 200 m de los puntos del vertido), hasta los 30 años aún no se observa una atenuación del contaminante luego de alcanzar la máxima concentración. En el piezómetro APU 8, ubicado adyacente al inicio de la quebrada, la concentración de 0.02 mg/l (valor máximo permitido por los ECA) se alcanza a los 7800 días.



**Figura 84. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 85. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

#### 4.2. Simulación y análisis de escenarios en las escombreras de estériles con Cd

En esta sección se realizó la simulación de la ocurrencia de la infiltración de un metal pesado en áreas de las escombreras de estériles de mina, en este caso se escogió al cadmio por ser el metal más tóxico que tuvo concentraciones altas en las muestras de agua tomadas del sistema de subdrenaje de la escombrera. La entrada del contaminante se estableció mediante una recarga por precipitación con un valor del 70% de la recarga que se calculó para el modelo del flujo, ya que aunque este componente minero no se encuentra impermeabilizado se tiene un sistema de subdrenaje con el fin de captar el flujo que se infiltraría a través de la escombrera para tratar dicho efluente en el caso de que se presente la generación de aguas ácidas. Para este escenario la entrada del contaminante se dará de forma continua durante los 50 años de simulación. Además, se ha considerado una concentración de 10 mg/l y un coeficiente de difusión molecular del cadmio de  $1.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{día}$ . A lo largo de la descripción de los resultados de concentraciones en las plumas se ha tenido como referencia el valor límite de concentración establecido en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de la normativa peruana, el cual es de 0.003 mg/l para el cadmio siendo representado mediante una isolínea de concentración.

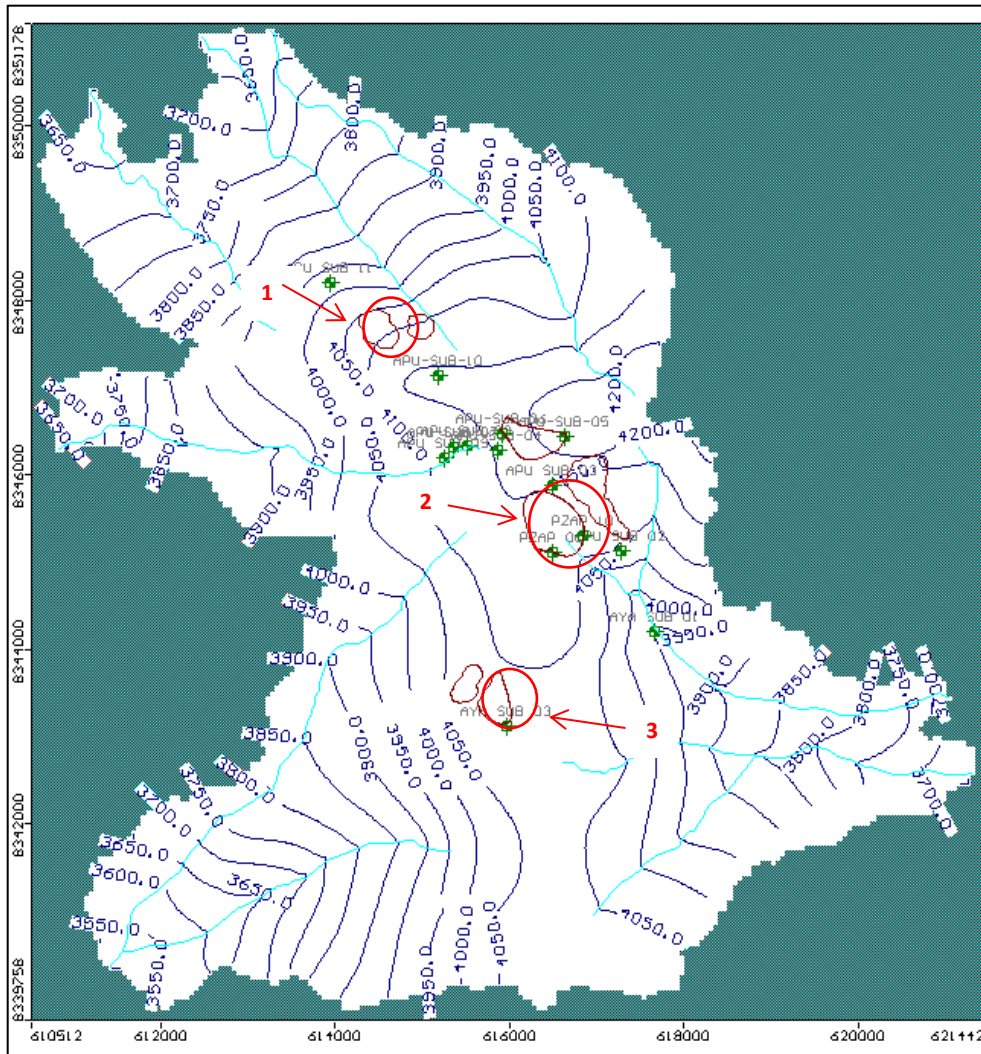


Figura 86. Ubicación de las escombreras de estériles 1, 2 y 3.

### Resultados:

Según los resultados, para el caso de la escombrera 1 la isolínea de concentración de 0.003 mg/l (ECA) en la capa 1 alcanzaría la zona de la quebrada de agua superficial a los 25 años, observándose en la figura 87 que a los 50 años la pluma ya alcanzó a la zona de la quebrada y se tiene una concentración máxima de 3.5 mg/l en la zona de recarga. En la figura 88 se observa la pluma que se transportó hacia la capa 2, viéndose que en este caso la isolínea de concentración de 0.003 mg/l no llegó a la zona de la quebrada y las concentraciones máximas son mucho menores que en la capa 1.

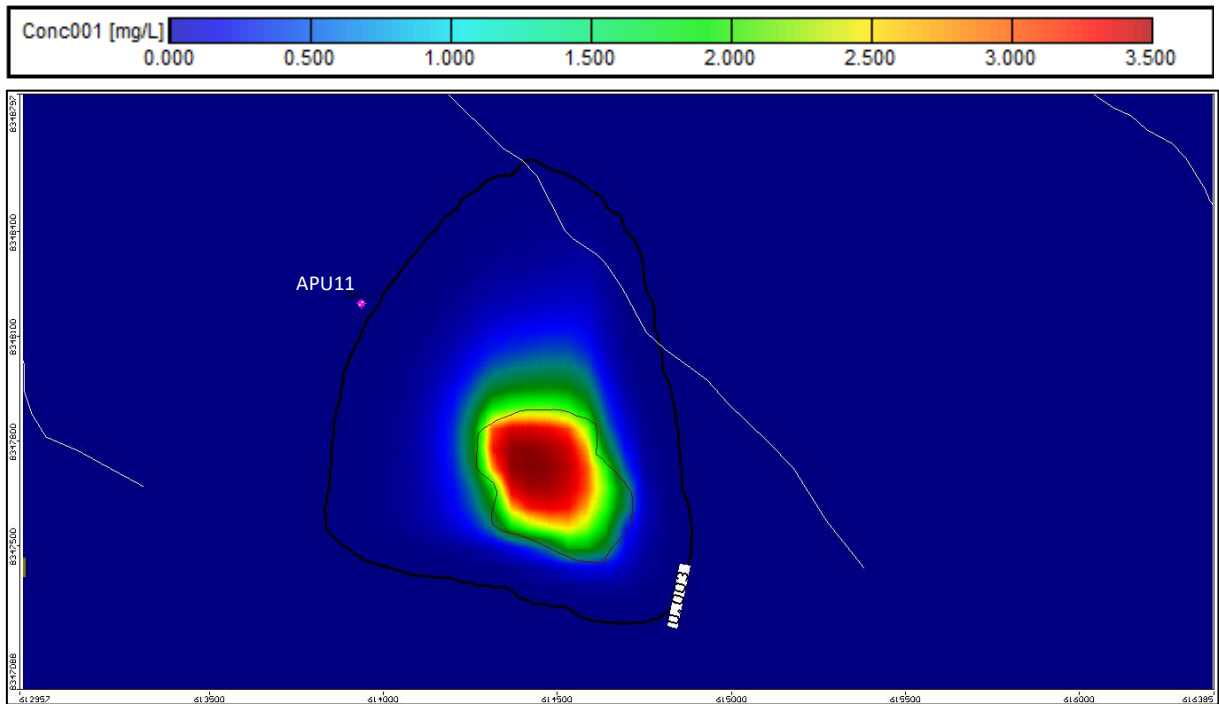


Figura 87. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 1 del área de la escombrera 1. Fuente: elaboración propia

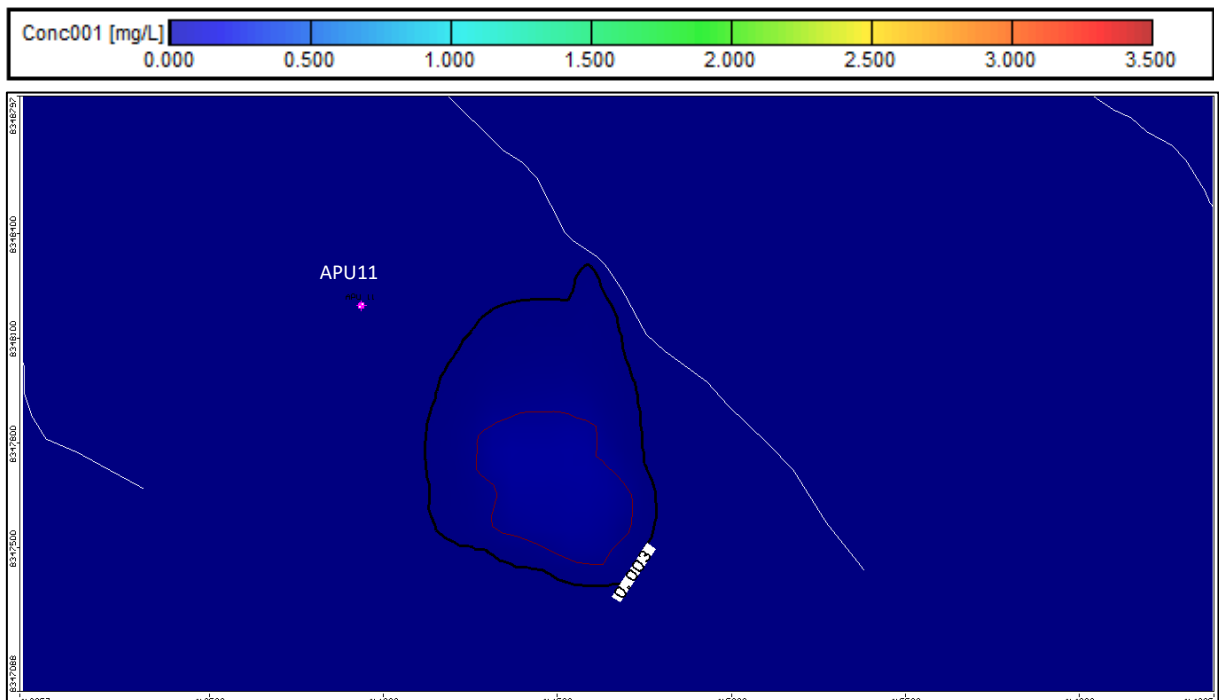
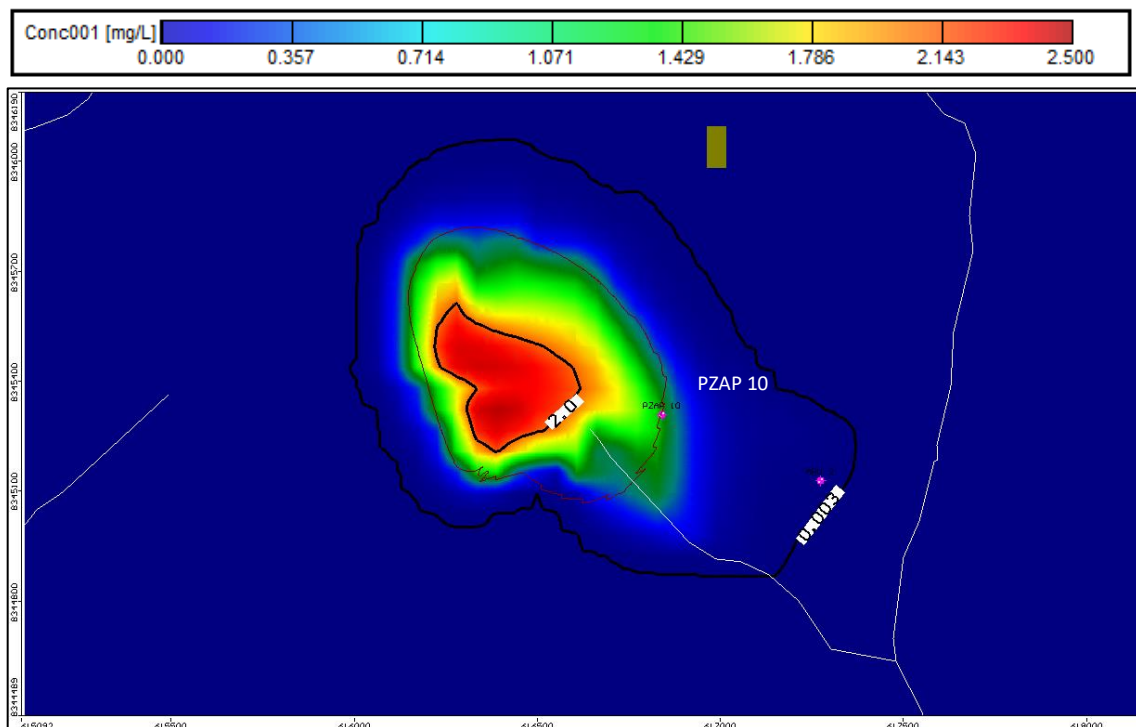
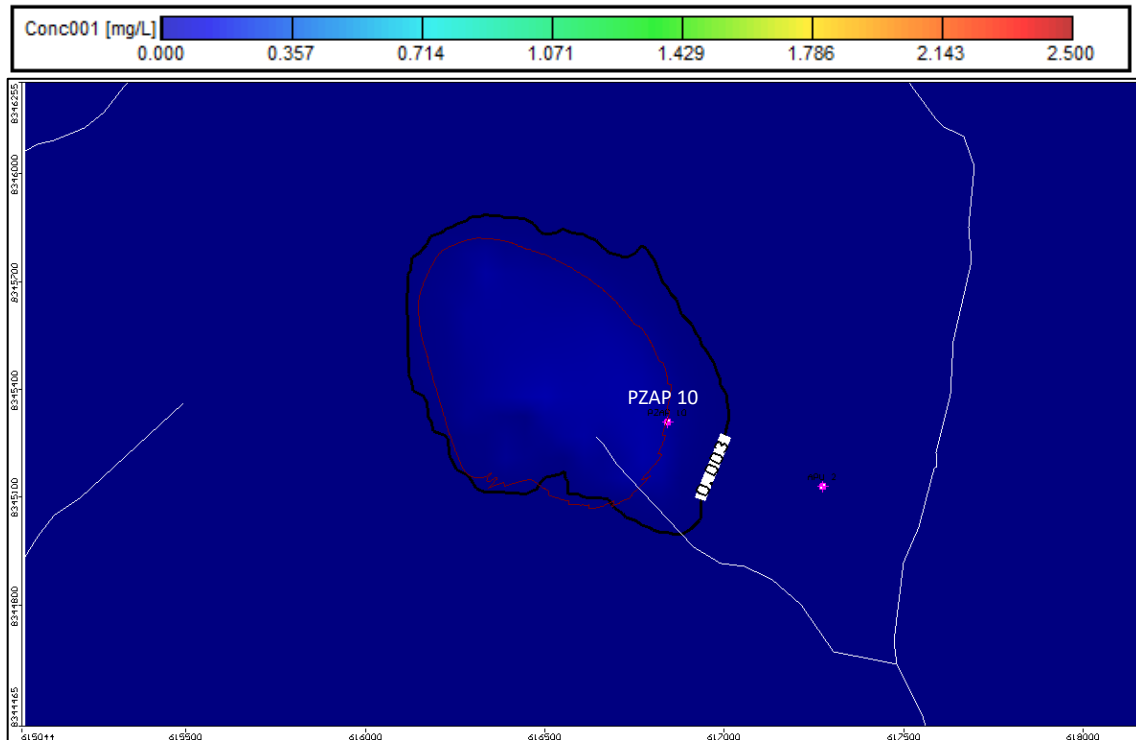


Figura 88. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 2 del área de la escombrera 1. Fuente: elaboración propia

Sobre la escombrera 2, en la figura 89 se observa que la pluma del contaminante en la capa 1, ha afectado gran parte de la zona de la quebrada de agua superficial ya que ésta prácticamente inicia al pie de la escombrera, a los 50 años de simulación se tiene una concentración máxima de casi 2.5 mg/l en las zonas de recarga. En la figura 90 se observa la pluma que se transportó hacia la capa 2, aunque a los 50 años las concentraciones son menores a los de la capa 1, éstas superan el umbral de 0.003 mg/l (ECA).



**Figura 89. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 1 del área de la escombrera 2. Fuente: elaboración propia**



**Figura 90. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 2 del área de la escombrera 1. Fuente: elaboración propia**

En cuanto a la escombrera 3, como se ve en las figuras 91 y 92, no se alcanza a ningún cuerpo de agua superficial hasta los 50 años, sin embargo la máxima concentración que se presenta en el área de expansión de la pluma al final de la simulación es de 4.7 mg/l en la capa 1 y de 0.02 mg/l en la capa 2.

Respecto a la masa acumulada del contaminante después de 50 años de su recarga continua a través de las escombreras, se tiene un total de 42162 Kg en todo el sistema acuífero.

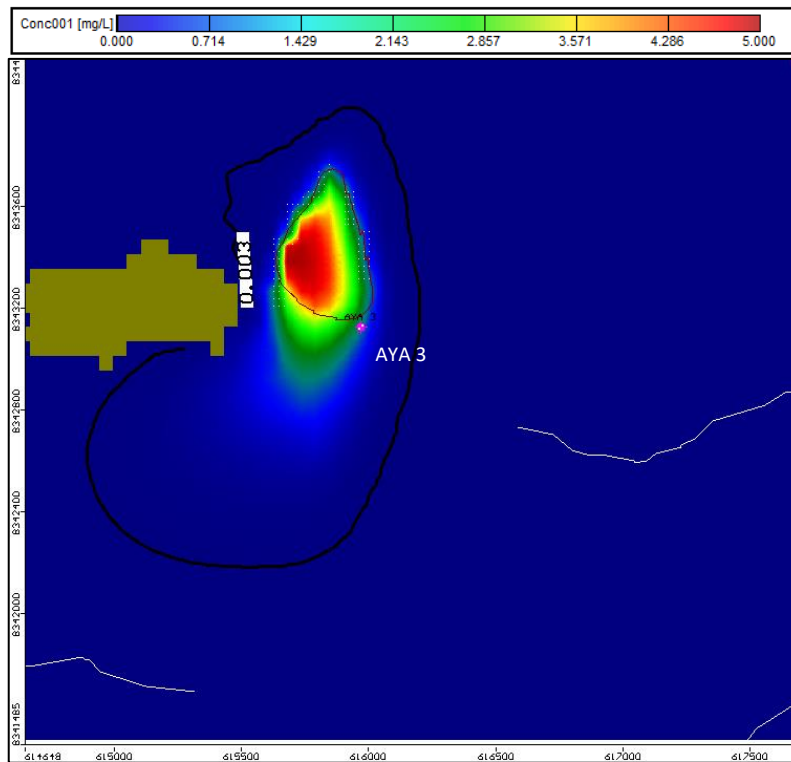


Figura 91. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 1 de la escombrera 3. Fuente: elaboración propia

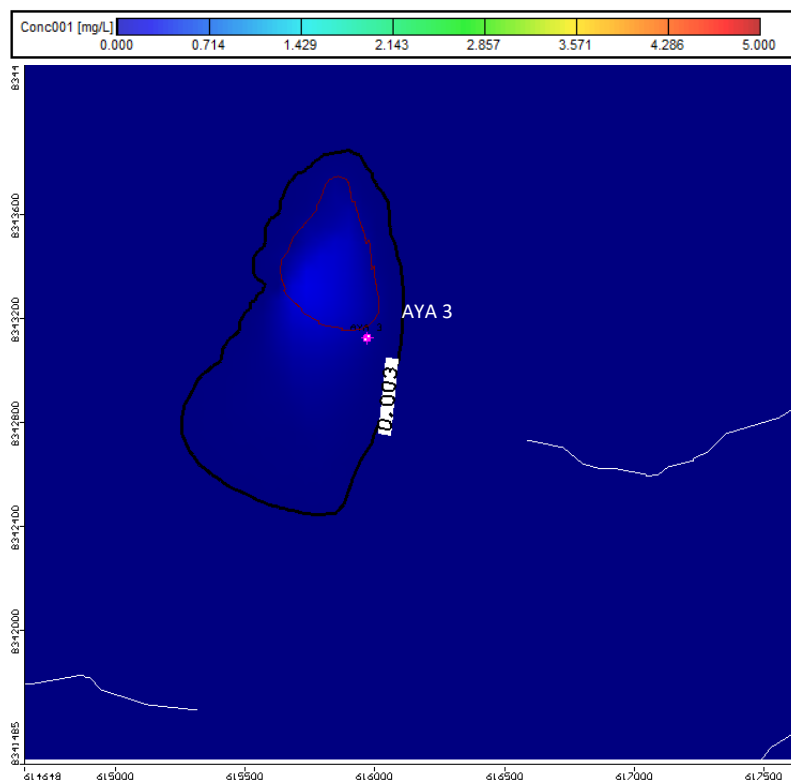
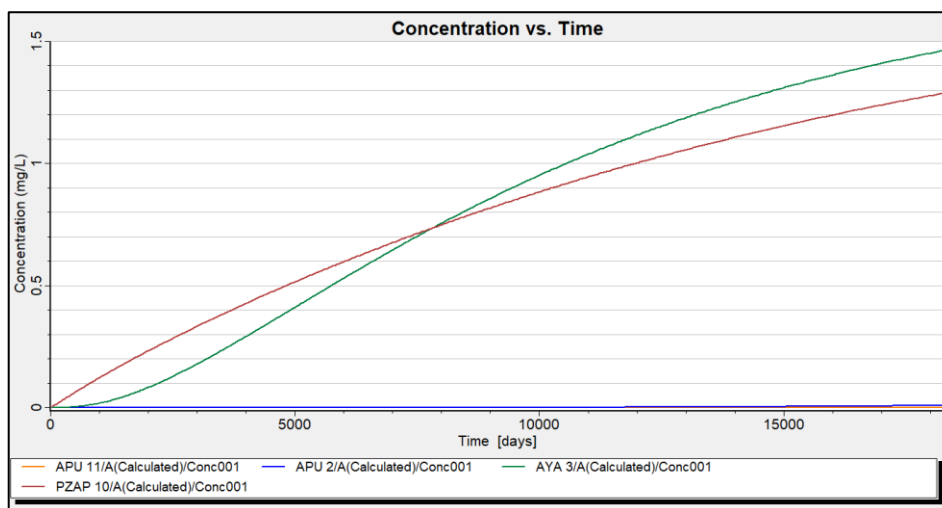


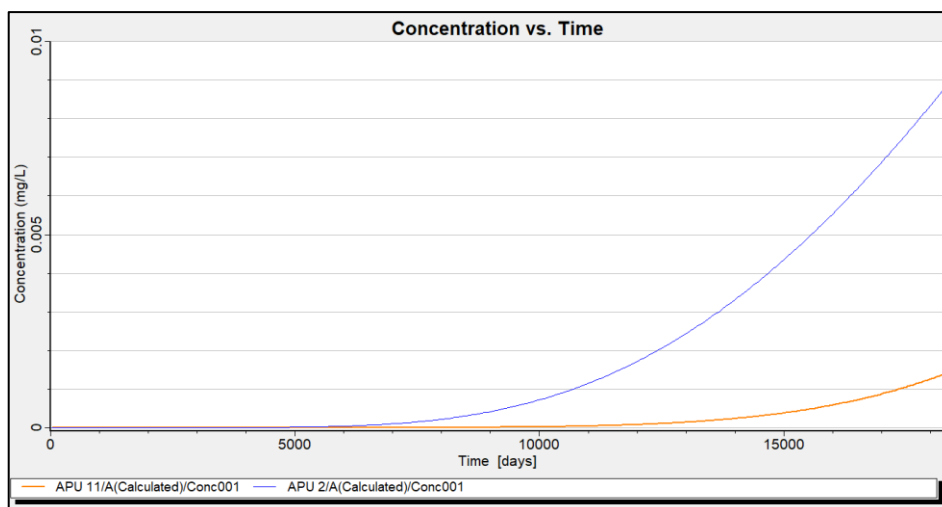
Figura 92. Modelación del transporte de cadmio después de 50 años en la capa 2 de la escombrera 3. Fuente: elaboración propia



De la figura 93 se obtiene que en el piezómetro AYA 3, ubicado a unos 30 m de la escombrera 3, la concentración de 0.003 mg/l de la pluma alcanzaría este punto a los 550 días; y luego de 50 años de descarga continua se tendría 1.45 mg/l. Mientras que en el caso del piezómetro PZAP 10 adyacente a la escombrera 2, la concentración de 0.003 mg/l se detectaría en dicho piezómetro después de 30 días y a los 50 años de recarga continua, en este punto se llegaría a una concentración de 1.3 mg/l. Por último, en el piezómetro APU 11 la pluma no se detecta hasta los 50 años, ya que dicho piezómetro no se ubica aguas abajo de la dirección del flujo subterráneo, el cual se dirige hacia la quebrada.



**Figura 94. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 94. Variación de la concentración del contaminante en los piezómetros de observación. Fuente: elaboración propia.**

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las mejoras realizadas en el modelo del flujo numérico, tales como el replanteo de las condiciones de contorno, ajuste de la calibración en régimen estacionario, análisis de sensibilidad y calibración en régimen transitorio, han permitido obtener niveles piezométricos más cercanos a los observados que en el modelo numérico del Estudio de Impacto Ambiental (2015) de la Unidad Minera Apumayo, pues ya no se presentan problemas de salida del flujo sobre el nivel del terreno que se tenían en dicho modelo no siendo representativo de la realidad, además la calibración de mejor ajuste tuvo una media cuadrática o RMS (Root Mean Square) normalizada de 2.6 % el cual es menor al RMS normalizado de 8% del modelo numérico del 2015.
- Los resultados de la simulación y calibración del flujo subterráneo en régimen transitorio han permitido mejorar la robustez del modelo obtenido luego de realizar la calibración en régimen estacionario, ya que se utilizaron las mediciones mensuales que se realizan en los piezómetros del área de estudio desde el año 2013, los cuales no se consideraron en el modelo realizado para el Estudio de Impacto Ambiental (2015), sin embargo la validación de este modelo se podría realizar con un mayor registro de datos que se obtendría si se continuara con las mediciones mensuales en los piezómetros.
- El modelo numérico del flujo podría ser mejorado en cuanto a la incertidumbre que se tiene respecto a la conductividad hidráulica ya que para su zonificación se partió del mapa geológico a escala regional, por lo que sería importante obtener información basada en la caracterización geológica local para así generar una zonificación distribuida de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero en cuanto a su heterogeneidad y anisotropía.
- El posible impacto negativo del agua subterránea ante un evento de infiltraciones en el pad de lixiviación no es altamente significativo a corto plazo, pues en ninguno de los escenarios establecidos se detectó la presencia del contaminante al cabo de 30 años en el piezómetro APU 9 que se ubica a 750 m aguas abajo del componente minero, por lo que

se puede decir que el proceso del movimiento de la pluma contaminante es muy lento, teniendo en cuenta que se consideró como un contaminante conservativo.

- Se puede decir que el desplazamiento de la pluma contaminante es muy lento debido a las bajas permeabilidades que se determinaron en el modelo numérico del flujo subterráneo durante el proceso de calibración, cuyos valores partieron de las pruebas de permeabilización de ensayos de Lugeon y Lefranc.
- Según los resultados de la simulación del transporte, el proceso de difusión en este caso es significativo debido a las bajas permeabilidades en gran parte del dominio del modelo, por lo que el movimiento de la pluma es lento generándose en un principio una acumulación en el área de la entrada del contaminante, siendo así este tipo de comportamiento podría generar un riesgo a largo plazo, por ello sería importante realizar una simulación a más de 50 años en el caso de suscitarse algún tipo de evento similar al de los escenarios planteados.
- Las plumas de contaminantes de los vertidos simulados mediante pozos de inyección han tenido un mayor desplazamiento que las plumas generadas por la entrada mediante una recarga, por lo que si se quiere simular en el escenario más desfavorable se puede plantear la entrada del contaminante a través de pozos de inyección, esto también dependerá de la ubicación de dichos pozos.
- En los escenarios 1 y 6 que son los más críticos que se plantearon sobre el vertido a través del pad de lixiviación, las concentraciones de cianuro por encima de 0.02 mg/l (límite máximo según los ECA), serían detectadas con tiempo suficiente para implementar medidas de mitigación antes de que la pluma alcance la zona del curso de agua de la quebrada más cercana, puesto que en el caso del escenario 1 esta concentración se detectaría a los 48 días en el piezómetro APU 6 y a los 4123 días en el piezómetro APU 4, mientras que en el escenario 6 se detectaría en menos de 10 días en APU6 y en 1360 días en APU 4.



- En general los piezómetros instalados tienen una ubicación estratégica para el control de la calidad del agua subterránea, a excepción del piezómetro APU 11 que corresponde al control de la influencia de la escombrera 1, ya que no se encuentra alineado con la dirección del flujo subterráneo, pues según el resultado de la simulación para dicha escombrera, la pluma contaminante llegaría en un menor tiempo a la quebrada de agua superficial, mientras que en el piezómetro no se detectó en los 30 años de simulación, por lo que se recomienda la instalación de un piezómetro más representativo para el control de la influencia de este componente minero.

## VI. BIBLIOGRAFIA



- CRAIG, J. 2015. The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. *Applied Geochemistry*. 57:194-205.
- CUSTODIO E., LLAMAS M. 2001. *Hidrogeología Subterránea*. Tomo I. Barcelona. Ediciones Omega S.A.
- DURIEZ S, 2005. On the Use of Groundwater Contaminant Transport Modelling in Risk Assessments. Master's Thesis in Applied Environmental Measurement Techniques. Chalmers University of Technology. Sweden.
- ESPINOZA, C. 2005. Tutorial 3, Visual MODFLOW y MT3D Modelo de flujo y transporte utilizando el módulo MT3D, Departamento de Ingeniería Civil División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile.
- Galán E., Romero A., 2008. *Contaminación de Suelos por Metales Pesados*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química agrícola. Universidad de Sevilla.
- HGS PERÚ S.A. 2015. Estudio Hidrológico e Hidrogeológico para la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Apumayo. Perú.
- MCDONALD, M. G., & HARBAUGH, A. W. 2003. The history of MODFLOW. *Ground Water*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02591.x>
- MEEUSSEN J.C.L., VAN RIEMSDIJK W.H., VAN DER ZEE S.E.A.T.M. 1995. Transport of complexed cyanide in soil. *Geoderma*. 67:73-85.
- PAPELIS CH., ROBERTS P., LECKIE J. 1995. Modeling the rate of cadmium and selenite adsorption on micro and mesoporous transition aluminas. *Environ. Sci. Technol*, 29: 1099-1108.



- SEA. 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA - Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (S. Servicio de Evaluación Ambiental, Ed)
- SOTOMAYOR, C. 2016. Evaluación del impacto ambiental de la implantación de una industria mediante modelos de simulación numérica. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 2017. Modflow 2005: USGS three-dimensional finite-difference ground-water model. <https://water.usgs.gov/ogw/modflow/mf2005.html>
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual for Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling. <http://www.pdfdrive.net/visual-modflow-20111-users-manual-d22572407.html>
- ZHENG, C. AND WANG, P. 1999. MT3DMS a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. strategic environmental research and development program. The Hydrogeology Group. The University of Alabama. Alabama. USA.