

REVISION DE EVALUACIONES HIDROGEOLOGICAS DEL PROYECTO CONGA

Introducción

El Proyecto Conga ha tenido dos estudios hidrogeológicos principales; uno que fue realizado como parte del EIA en el año 2010, realizado en conjunto por las empresas Golder Associates y Knight Piésold, y una actualización del modelo hidrogeológico conceptual realizado por Schlumberger Water Services (SWS) en el año 2012.

Objetivos del estudio

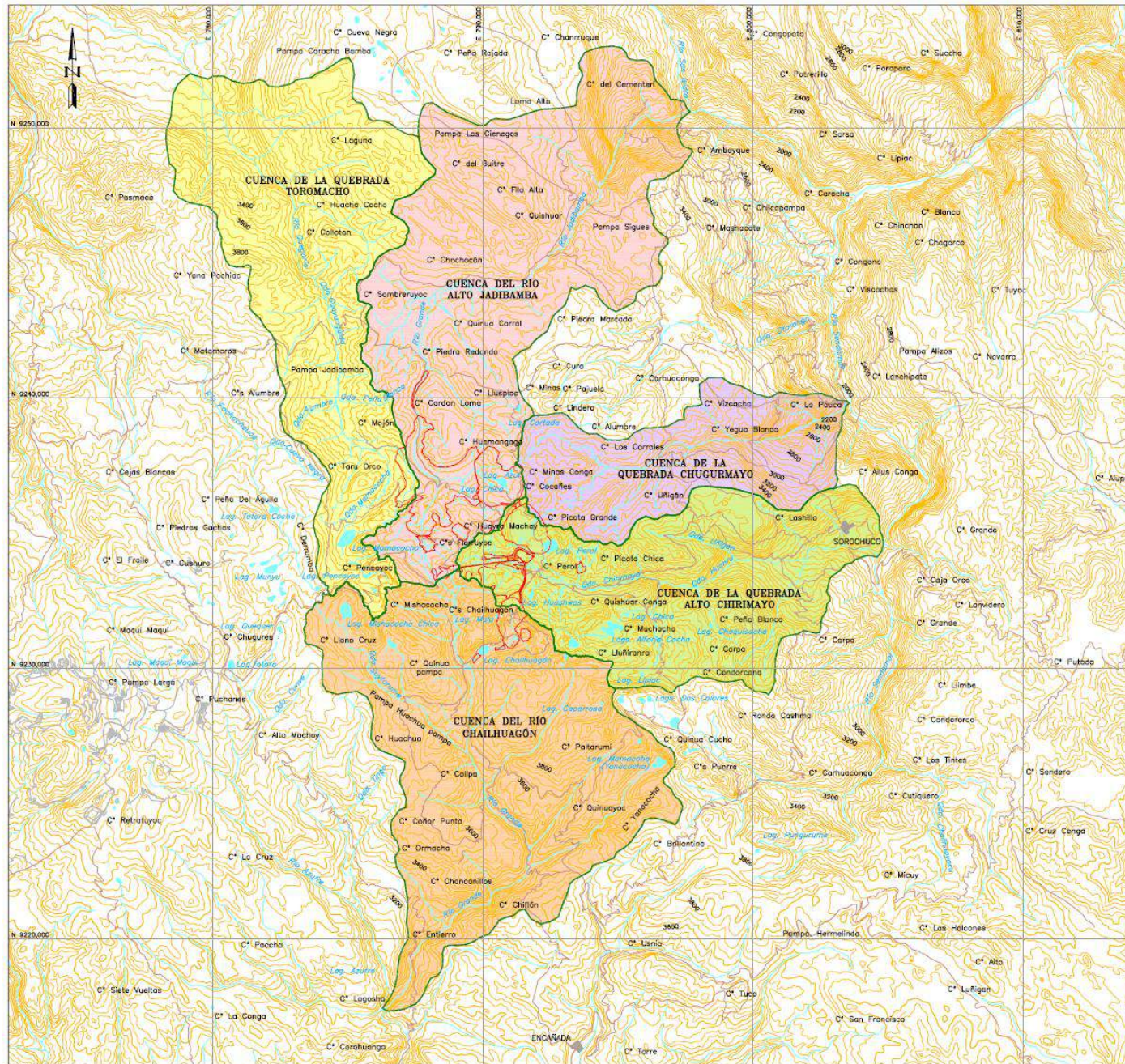
- Evaluación del monitoreo hidrogeológico realizado en la zona de influencia del proyecto.
- Evaluación de la construcción y calibración de los modelos numéricos.
- Análisis de la evaluaciones de impacto sobre los cuerpos de agua, bofedales y flujo base.
- Recomendaciones de futuras evaluaciones a implementar.
- Recomendaciones de mejora en el monitoreo de aguas subterráneas.

Modelo Hidrogeológico Conceptual

Para la construcción del modelo conceptual se incluyó 3 cuencas principalmente, en las cuales se desarrollara el Proyecto Minero Conga, las cuales son: Alto Chirimayo, Chailhuagon y Alto Jadibamba, y donde también se incluye la Laguna Mamacocha en la cuenca Toromacho y También parte de la cuenca Chugurmayo; como se especifica en el EIA desarrollado en el 2010 y en el estudio de actualización del modelo en el año 2012; el área total del desarrollo del modelo se consideró en 96 kilómetros cuadrados.

En la zona de estudio las características relevantes al régimen de aguas subterráneas:

1. La precipitación anual es de 1134 mm/a.
2. La estación seca ocurre entre los meses de Mayo y Septiembre.
3. Los caudales de las quebradas principales son altos durante las épocas de lluvias y después de eventos de precipitación, pero estos son muy bajos durante la época seca.
4. Posee una alta escorrentía y un flujo subsuperficial que drena rápidamente a las quebradas.
5. La precipitación y escorrentía directas conforman la recarga más importante de lagunas, bofedales y sedimentos aluviales.
6. El rebose de lagunas y bofedales aporta a los caudales superficiales de las quebradas.
7. Las variaciones estacionales en los niveles de agua son consistentes con la variación en precipitaciones y caudales de quebradas.

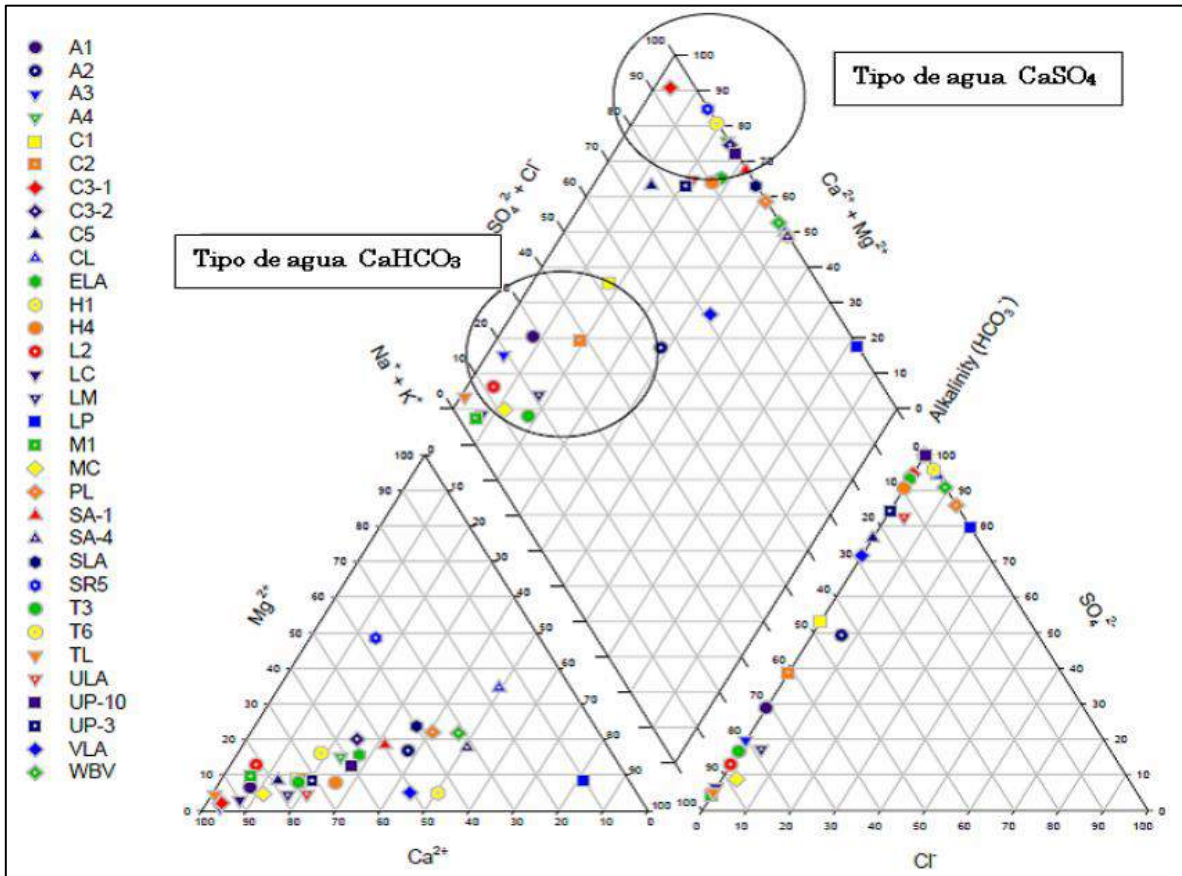


LEYENDA:

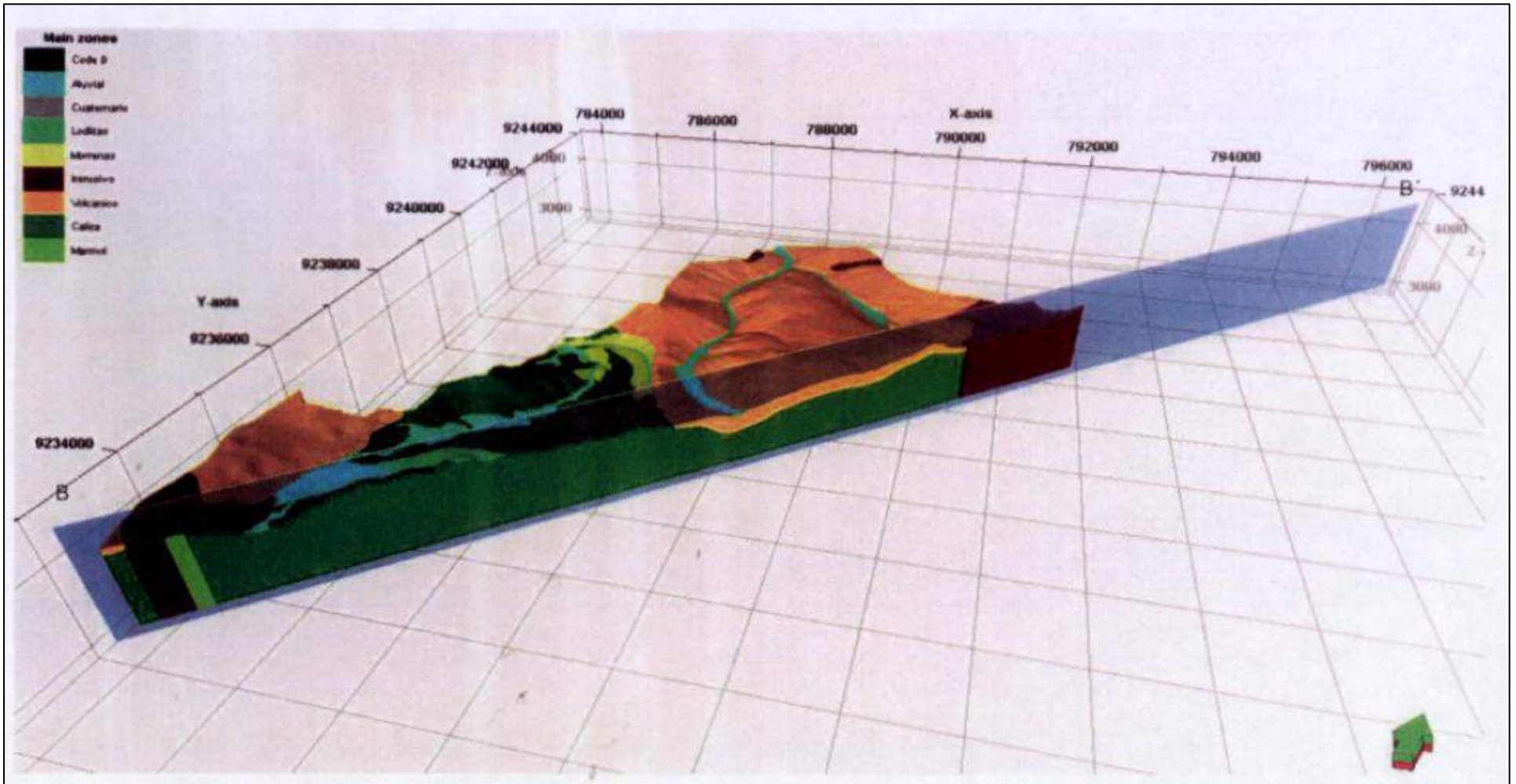
- 4400 CURVAS DE NIVEL
- HIDROGRAFIA
- VÍAS DE ACCESO
- LAGUNA
- HUELLA DEL PROYECTO
- DELIMITACIÓN DE CUENCAS
- ÁREA URBANIZADA

Mapa de cuencas hidrográficas estudiadas en el Proyecto Conga.

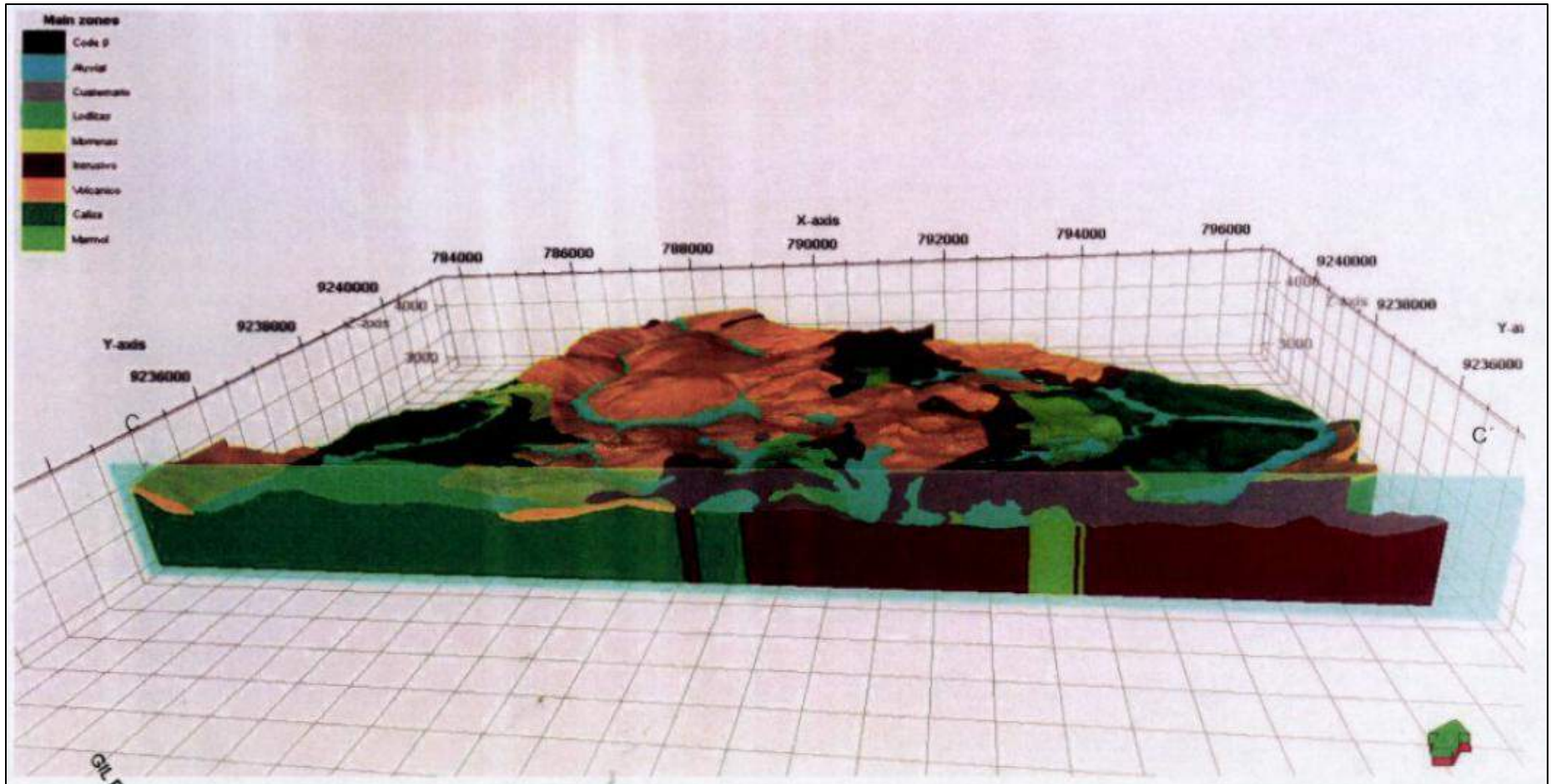
Diagrama de Piper del análisis de aniones y cationes de química del agua



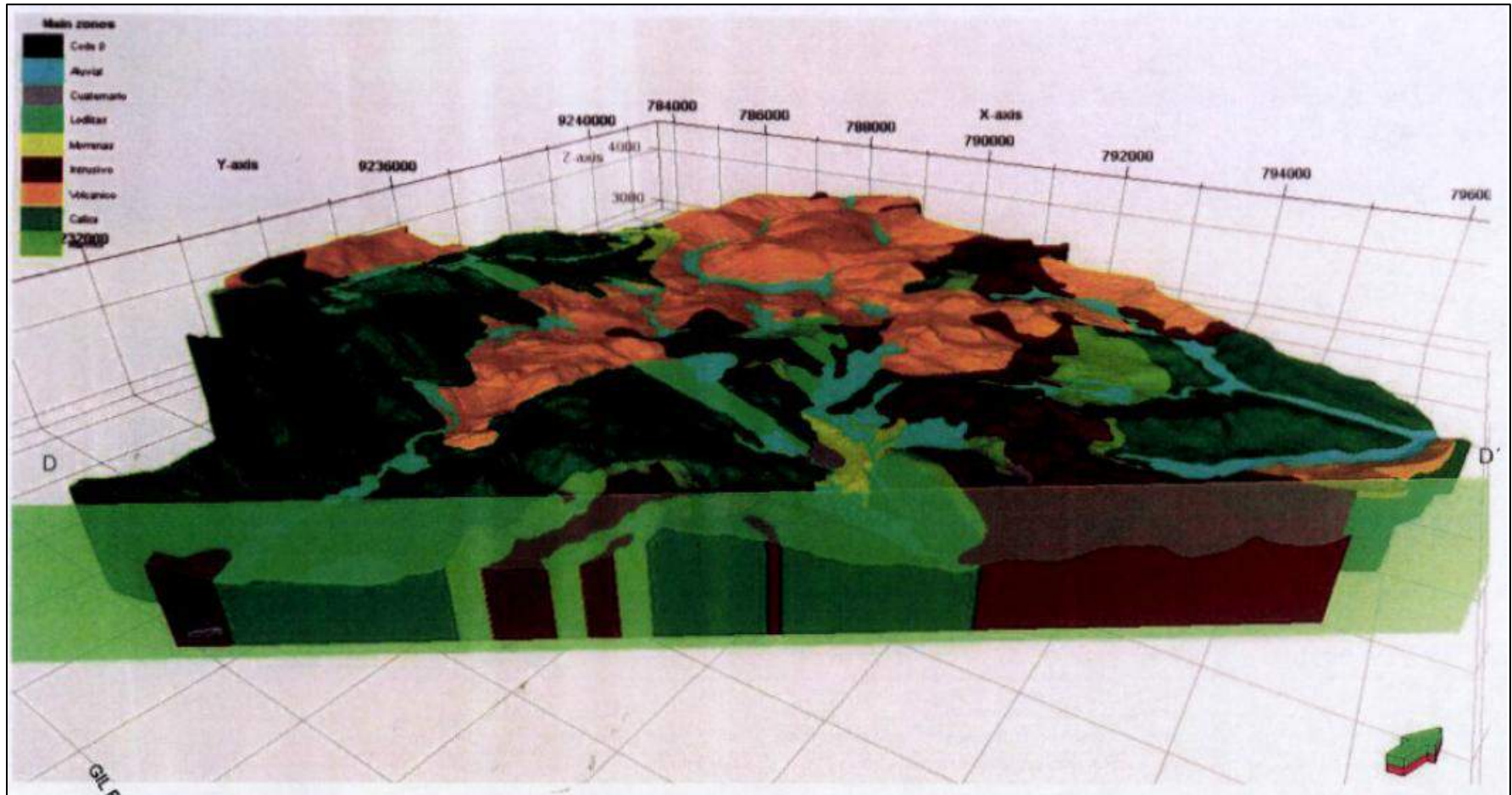
Sección Geológica – Modelo hidrogeológico



Sección Geológica – Modelo hidrogeológica



Sección Geológica – Modelo hidrogeológica



Régimen Hidrogeológico

En el área del proyecto Conga se consideraron dos sistemas de agua subterránea: uno somero y otro profundo, los cuales fueron considerados con las siguientes características:

Sistema de agua subterránea somero:

El sistema se encuentra dentro del material aluvial, morrenas y la zona meteorizada y fracturada de la parte superior de las rocas volcánicas y calizas; es considerado un sistema colgado, separado de la roca subyacente y que drena hacia las quebradas principales.

Su nivel freático es considerado de 5 metros de espesor, por las características geomorfológicas de la zona se le considera con un flujo interno somero.

En la roca superficial la profundidad fluctúa entre 5 a 20 m aproximadamente; los manantiales, lagunas y bofedales están asociados a estos sistemas someros.

Durante las diferentes pruebas de campo realizadas por las consultoras entre los años 2004 y 2011, se puede indicar que la conductividad hidráulica está comprendida entre 1×10^{-5} y 1×10^{-7} m/s.

Sistema de agua subterránea profunda:

Este sistema está asociado con las rocas volcánicas, intrusiva y Calizas.

Posee un nivel de agua variable que depende de su ubicación, pero la mayor parte de niveles estáticos ocurren entre los 40 a 120 metros de profundidad.

De los estudios realizados se infiere que la conductividad hidráulica de la roca volcánica está dentro del rango de 10^{-8} a 10^{-9} m/s, mientras que en las calizas es de 10^{-7} a 10^{-11} m/s; también se concluye que a mayor profundidad la conductividad hidráulica disminuye.

Se observó que en las medidas de permeabilidad los valores más bajos fueron tomados en las zonas de calizas que han sido alteradas a mármol.

Sistema de Recarga y Descarga

Recarga de agua subterránea:

La principal recarga directa del sistema somero de agua subterránea es por infiltración de la precipitación; la precipitación anual promedio es de 1134 mm/a. En esta zona la recarga se ve afectada por la altitud, la topografía, el suelo, la cobertura vegetal y las propiedades hidráulicas de las formaciones litológicas; en este caso la recarga esta evaluada por el modelo en cada unidad hidrogeológica en base al porcentaje de precipitación anual; la recarga como porcentaje de elevación está dada en la siguiente tabla:

Unidades Hidrogeológicas	Índice de Recarga
Sedimentos aluviales someros	10%
Depósitos morrénicos	1%
Rocas volcánicas	3%
Caliza	3%
Intrusivos	1%

La mayor parte de la recarga se distribuye por el sistema somero y una menor parte por el sistema profundo; las fracturas y fallas forman parte de zonas de flujo preferente que interactúan con las otras unidades hidrogeológicas.

En el caso del sistema de aguas subterráneas profundas el mejor valor de recarga obtenido durante la calibración del modelo es de 0.5% de la precipitación total, lo que equivale a 6 mm/a.

Descarga de agua subterránea:

Las descargas de aguas subterráneas se producen como manantiales e infiltraciones o afloramientos en áreas húmedas y por evapotranspiración.

Existen áreas de infiltración de hasta 500 m² que se han identificado en el área de Perol y al sur de Chailhuagon, también se ha identificado que los manantiales estarían asociados a zonas de fracturas y contactos litológicos.

Los manantiales en su totalidad descargan sobre las principales fuentes de agua superficial ya sean estas lagunas o bofedales, en el caso de las lagunas las descargas son por reboce durante periodos de avenidas.

Las descargas durante la época seca son mantenidas por intermedio de flujos perennes menores en la mayoría de los ríos y son alimentados por descargas de agua subterránea somera, estas descargas son mínimas hasta un máximo de 2 l/s en algunos manantiales. Los caudales mínimos de los ríos en época de estiaje han sido medidos entre 1 a 14 l/s.

Estimación del Balance Hídrico

En los informes se estimó que el 40% de la precipitación anual total se pierde debido a la evapotranspiración, mientras que el 60% que resta forma escorrentía con una menor infiltración.

Variaciones de las aguas subterráneas:

- En el sistema de agua subterránea somera se observa que los niveles más bajos se encuentran en los periodos de estiaje entre Julio y Septiembre; y sus niveles máximos durante Noviembre – Febrero; y esta diferencia de niveles mínimos y máximos esta entre 0.5 m a 4 m.
- Se concluye que el sistema de agua subterránea somera posee una distribución en elevación básicamente similar a la topografía superficial, y con gradientes hidráulicos entre 0.3 en zonas altas, hasta 0.03 en zonas con baja pendiente y zonas de descargas; estando el caudal concentrado en los valles principales.
- En el sistema de agua subterránea profunda los niveles varían entre 40 a 130 m en profundidad.

Unidades Hidrogeológicas:

Para la configuración del Modelo SWS (2012) utilizo información litológica de campo para determinar los espesores de las capas, estas fueron asignadas en base a datos de sondajes de perforación para obtener los espesores de las capas; a continuación tabla de datos de las capas litológicas y espesores considerados para la construcción del modelo:

Capa	Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica (m/s)	Espesor (m)	
			Mínimo	Máximo
1	Aluvión / morrenas	$10^{-5} - 10^{-7}$	5	26
2	Masa de roca meteorizada	$10^{-6} - 10^{-8}$	20	43
3	Rocas volcánicas / intrusiva	$10^{-5} - 10^{-11}$	25	200
4	Caliza / intrusiva	$10^{-6} - 10^{-10}$	144	366
5	Masa de roca impermeable	$10^{-9} - 10^{-11}$	144	366

Cabe resaltar que en el modelo, el sistema de aguas subterráneas someras está representado por las capas 1 y 2, antes descritas; en el caso de las capas 3, 4 y 5 caracterizan el sistema profundo de baja permeabilidad.

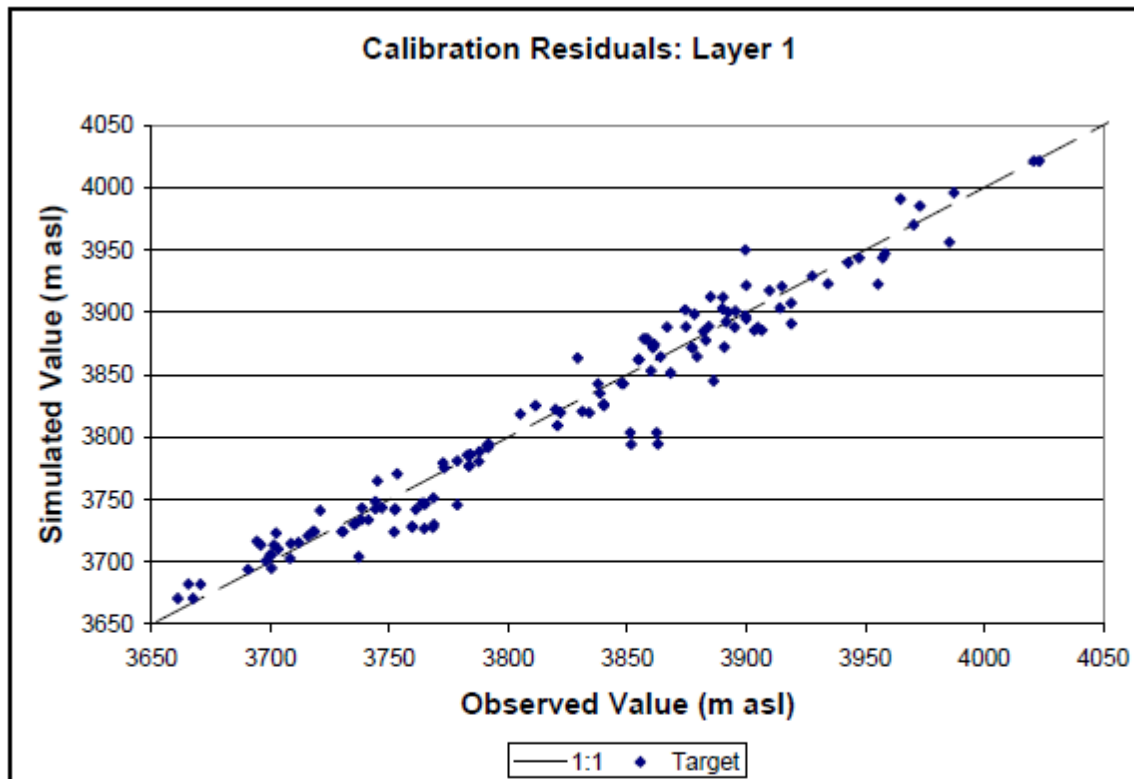
Construcción del Modelo

El método elegido por SWS (2012) consistió en modelar ambos sistemas (somero y profundo) en forma separada y luego unirlos en un solo modelo combinado.

Para la discretización espacial del área de estudio en la etapa de construcción, se eligió la técnica de elementos finitos, por sus diferentes ventajas, como la posibilidad de generar mallas multi-escala, el refinamiento local de las mallas y el menor esfuerzo en cuanto al uso computacional (tiempo y espacio de almacenamiento).

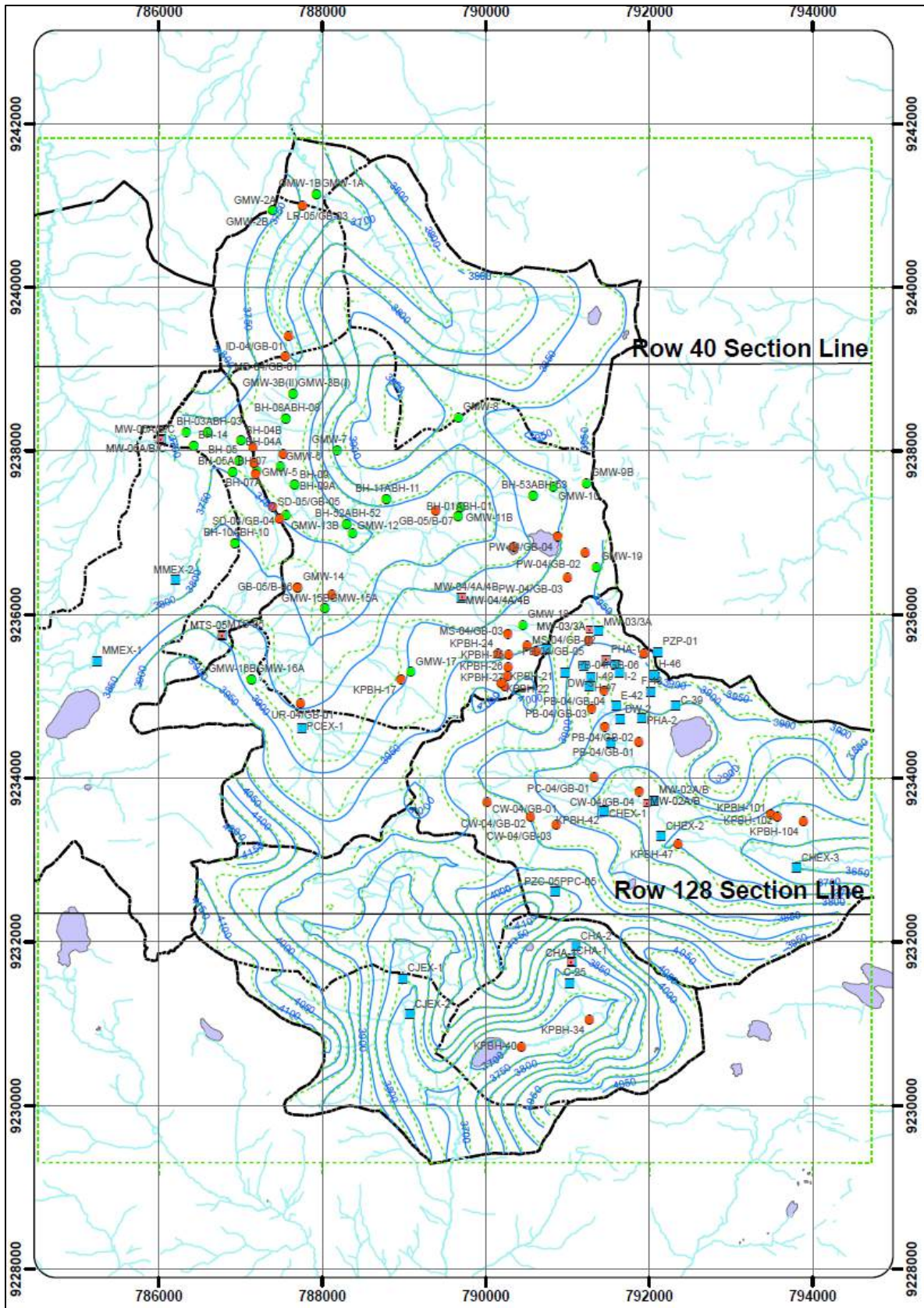
Dominio del Modelo:

El dominio es definido en función de la captación de agua subterránea la cual coincide con el área de estudio.



CAPA 1 Resultados de Calibración:
Número de Objetivos = 135
RMSE Ponderada = 18.4 m
Rango = 380 m
RMSE/Rango % = 4.85

Superficie Potenciométrica Capa 1



Generación de Mallas y Capas:

La malla se define como una sucesión de prismas triangulares de 6 nodos, en el cual cada uno se constituye como un elemento finito.

A continuación se presenta la distribución de las 5 capas:

Capa	Unidad Hidrogeológica	Características
1	Aluvión / morrenas	Depósitos aluviales (pantanos) y morrenas glaciales
2	Masa de roca meteorizada	Unidades de roca meteorizada
3	Rocas volcánicas / intrusiva	Unidades menos permeables que la superpuesta
4	Caliza / intrusiva	La parte inferior fue establecida a 3390 msnm.
5	Masa de roca impermeable	Roca competente masiva y casi impermeable

Condiciones de Contorno

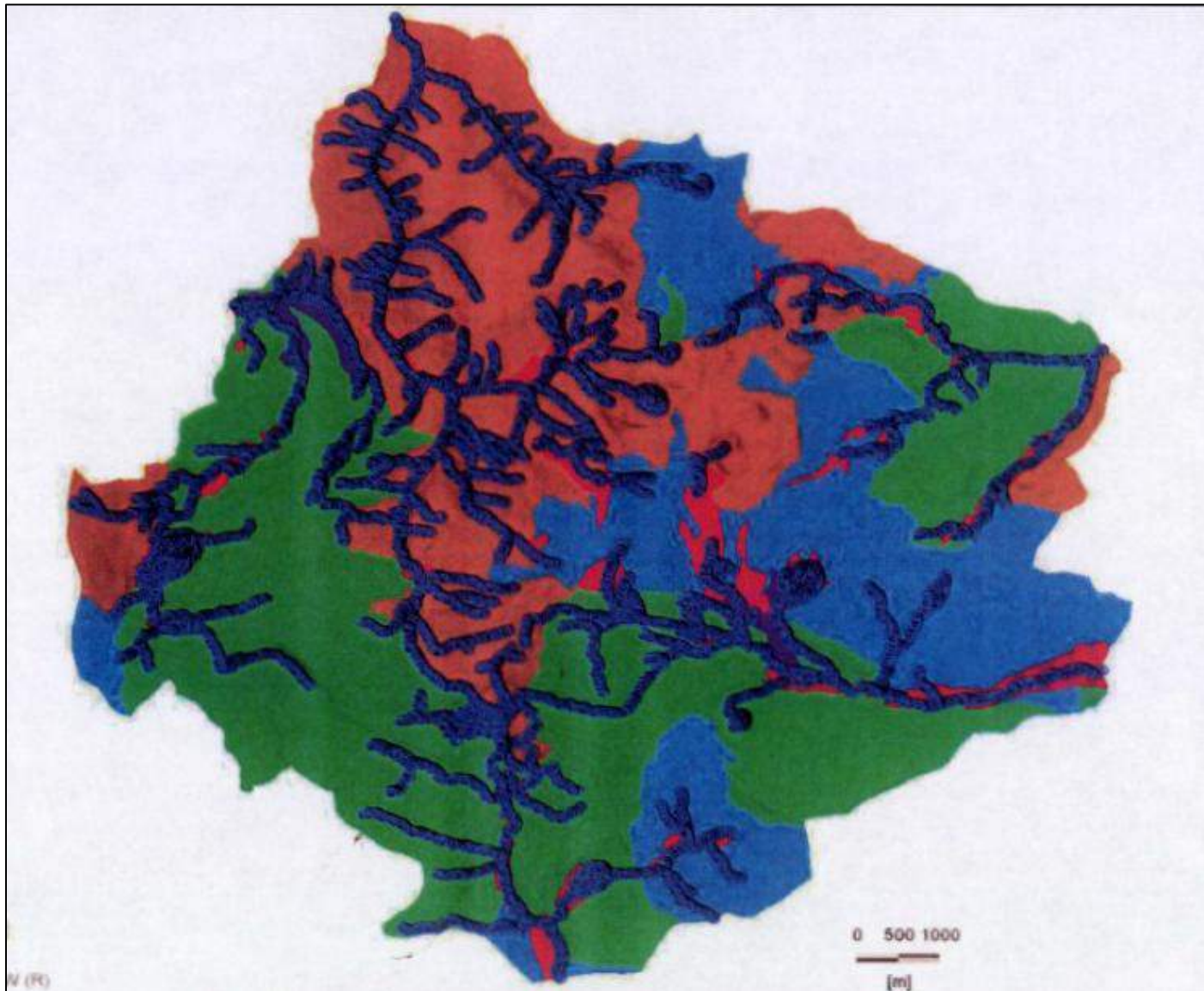
Las condiciones de borde en la capa 1 se han implementado para simular los procesos de filtración hacia las quebradas y lagunas, y los flujos de salida de agua subterránea en los valles principales, a través de las capas 1 y 2.

Las quebradas Chirimayo, Chailhuagon, Jadibamba, Rio Quengoria y Chugurmayo se representan en el modelo de FEFLOW mediante nodos de "seepage".

Esta condición describe un valor fijo de la carga hidráulica para cada nodo en el que fluyen las quebradas, cada valor de carga hidráulica se basa en la elevación topográfica de su nodo asociado.

Los límites de captación de la capa 1 y 2 se han determinado como contornos sin flujo. Sin embargo, los nodos de "seepage" fueron colocados a lo largo del contorno, en secciones que separan las capas 3, 4, y 5 para permitir el movimiento del agua subterránea profunda hacia fuera y gradiente abajo del área del modelo.

Condiciones de Borde



Calibración del Modelo Numérico

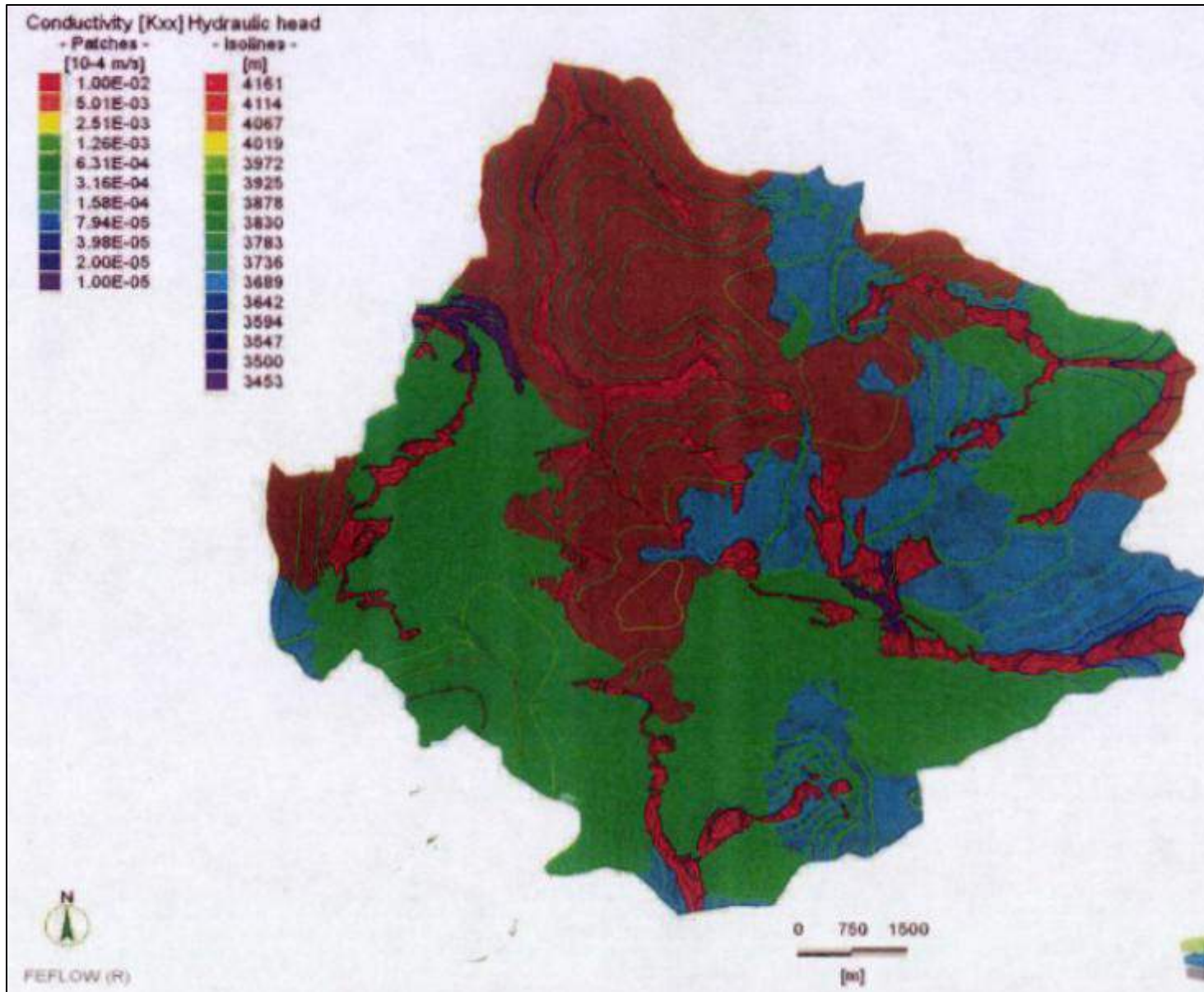
Calibración del modelo en régimen permanente:

El objetivo es simular el estado sin perturbaciones del sistema de agua subterránea que define la condición de línea de base.

Curvas de nivel de agua calibrada:

Curvas de nivel de la napa freática en el sistema somero, modeladas en condiciones naturales.

Niveles de Agua Simulados – Modelo Somero



Estadísticas de la Calibración:

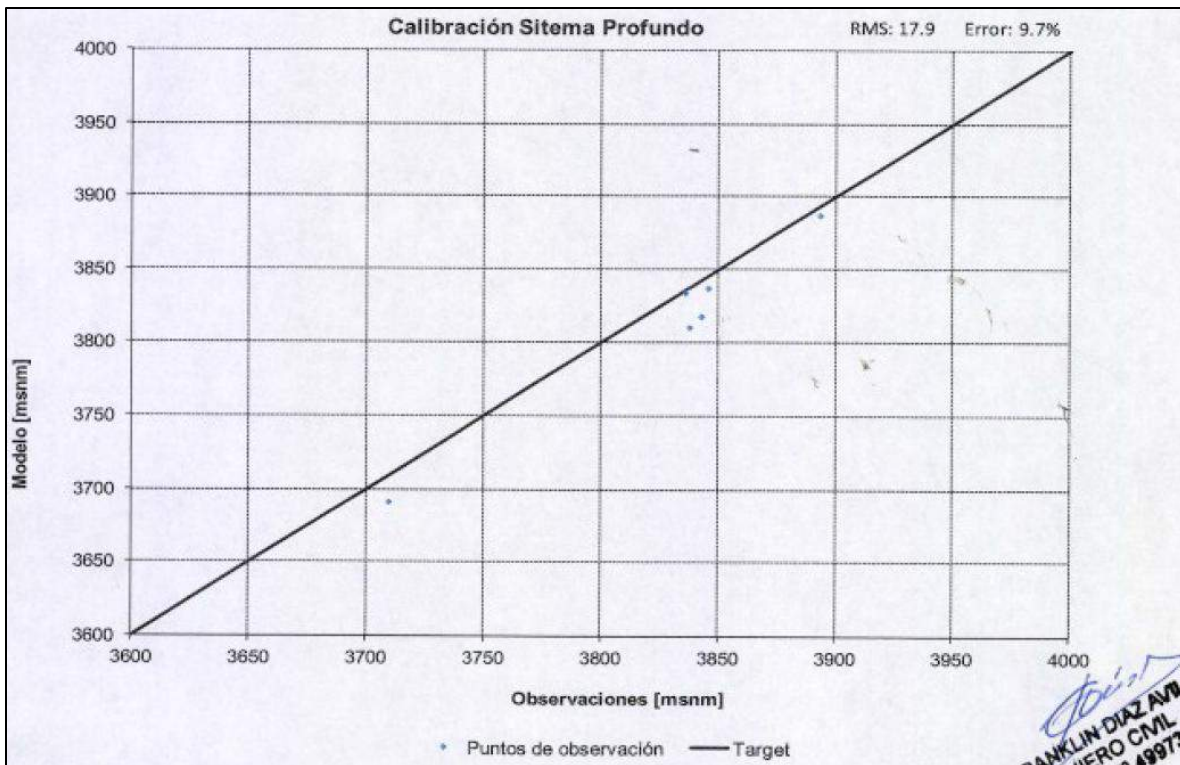
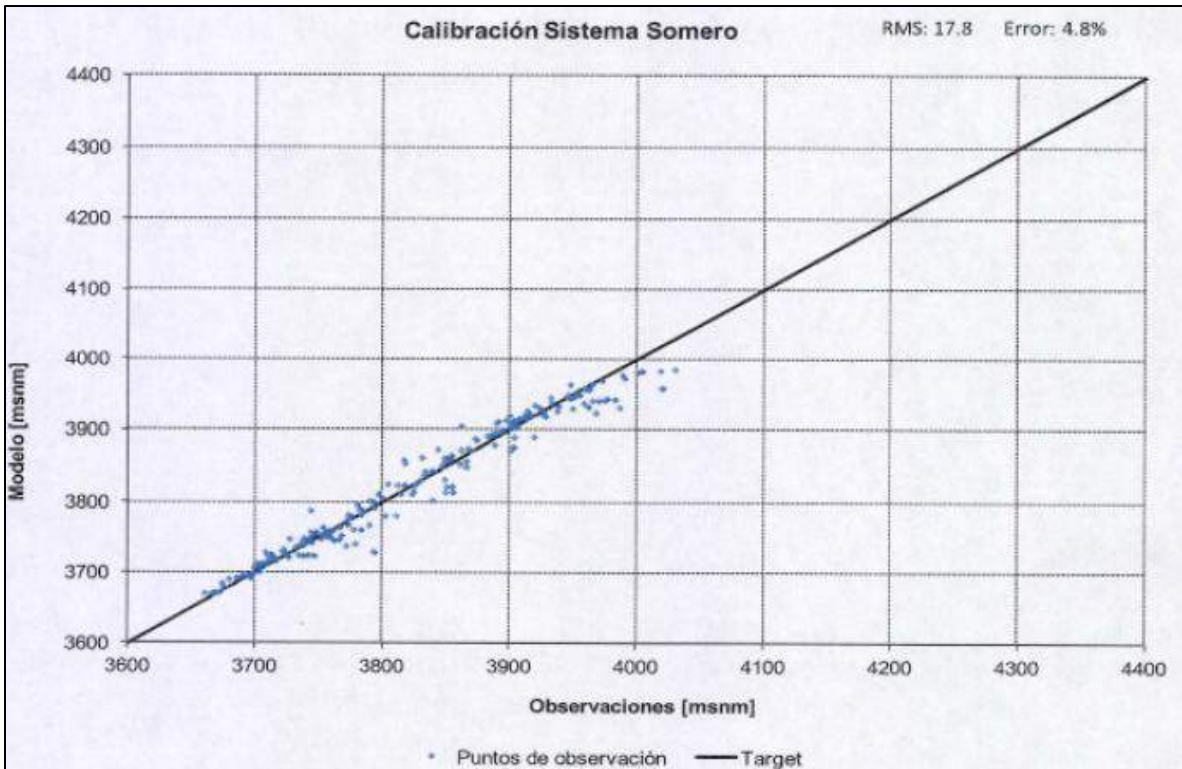
Para validar la simulación en estado estacionario, las cargas se comparan con los datos del nivel de agua monitoreado.

Las estadísticas de calibración de los modelos citan tres valores:

- Error medio: en el modelo estacionario es de 3.3 m.
- Error medio absoluto: en el modelo estacionario es de 11.9 m.
- Error medio cuadrático: en el modelo estacionario es de 17.8 m.

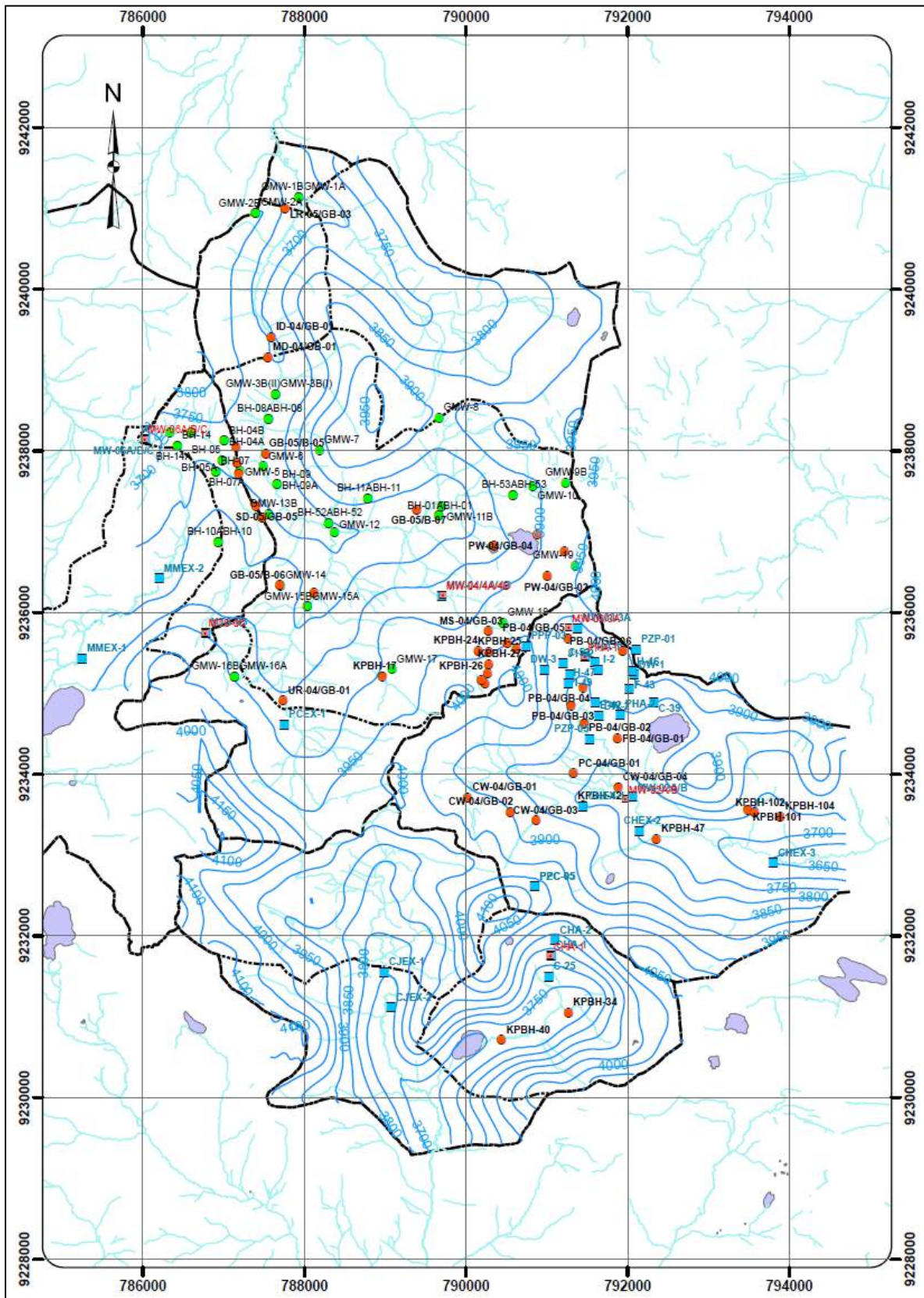
Los flujos bases simulados se comparan con los flujos base promedio medidos, el cual se resume en la siguiente tabla:

Punto de monitoreo	Cuenca	Flujo base simulado	Flujo base Objetivo	Diferencia
MC-08	Chirimayo	19.1	19.8	0.7
MC-01	Chailhuagon	18.5	19.4	0.9
MC-22	Toromacho	1.7	0.15	-1.55
MC-11	Alto Jadibamba	35.1	42.8	7.7
-	Chugurmayo	17.9	-	-



Handwritten signature
FRANKLIN DIAZ AVILA
INGENIERO CIVIL
19973

Superficie Potenciométrica Estimada



Principales Impactos Reportados

- Impacto en el flujo base, reducción de los caudales naturales de las cuencas Alto Jadibamba, Alto chirimayo y Chailhuagon.
- El almacenamiento de agua subterránea se verá disminuido por la creación de los diferentes reservorios y construcción de los componentes de la mina.
- Dentro de los informes no se ha detallado los trayectos de flujo de filtraciones para los botaderos de desmonte, los cuales se necesitan para hacer seguimiento a las partículas y ayudarían a dar un panorama de la distribución de los trayectos de flujos de las cuencas involucradas.
- No se ha encontrado un modelamiento de transporte de contaminantes para los botaderos y depósito de relaves con concentraciones previstas de los contaminantes importantes, la cual ayudaría a dar una visión general de los impactos de los contaminantes en los cursos de agua en los reservorios de agua subterránea.

Conclusiones y Recomendaciones

- Los bajos valores en los índices de recarga indican una subestimación de la recarga, lo cual puede alterar las simulaciones.
- Se observa una falta de medición disciplinada y frecuente para determinar el flujo base; esto ha conllevado a que se estime el flujo base y de allí se determine la recarga, la cual no incluye la descarga por evapotranspiración.
- Se recomienda hacer mediciones continuas de los flujos base y de evapotranspiración en los bofedales, también modificar la precisión en el balance hídrico y la capacidad de representar las descargas por evapotranspiración.
- Se recomienda mayor recarga en la parte superior y menor recarga en la parte aluvial inferior.
- Se recomienda utilizar una calibración dinámica ya que se poseen resultados de años de monitoreo y esto nos proveerán de resultados de los parámetros hidráulicos estáticos y dinámicos.
- Se recomienda que el modelo se realice en Modflow por su mejor balance entre los flujos de entrada y de salida y por su capacidad de modelamiento de transporte de contaminantes.
- Las calibraciones deberían ser transientes.
- Se recomienda hacer simulaciones de toda la etapa de vida de la mina y de la época de cierra.
- Estamos de acuerdo con la extensión del modelo del 2012 que incluye las cuencas de Alto Chirimayo, Chailhuagon y Chugurmayo. Este modelo ha sido simulado y calibrado, pero no presenta simulaciones. Las simulaciones de impacto deben ser en esta extensión del modelo.

Recomendaciones de evaluación de impacto

En cuanto a las simulaciones de evaluación de impacto, se recomienda:

1. **Evaluación de impacto a flujo base al Río Chirimayo, Río Chailhuagón, Río Alto Jadibamba, y Río Mamacocha.** Esta evaluación debe considerar simulaciones transitorias durante la mina y en periodo de cierre. Se requiere un largo periodo de simulación ya que debe incluir el impacto del desarrollo del cono de depresión de los tajos Perol y Chailhuagón que ocurre en la época de cierre.
2. **Modelamiento de transporte de contaminantes desde el Depósito de Relaves, Depósito de Desmonte Perol y Depósito de Desmonte Chailhuagón.** Con las concentraciones previstas de los contaminantes importantes de los botaderos y depósitos de relaves, se construirá y simulará un modelo de transporte de contaminantes. Esta simulación proporcionará una visión general de los impactos de los contaminantes en los reservorios de agua subterránea y los cursos de agua. Diferentes escenarios de utilización de técnicas de remediación pueden ser evaluadas en esta simulación.
3. **Evaluación de ingresos de agua al Tajo Perol y al Tajo Chailhuagón.** A partir del modelo calibrado, se debe realizar una simulación transitoria de los flujos de entrada a los tajos; esta simulación puede incluir los esquemas planeados de pre-drenaje. Los flujos de entrada totales deben ser separados en sus componentes de flujo regional y de almacenamiento. Los resultados de la simulación deben incluir el nivel freático al fin de la mina y el cono de depresión para diferentes años de la mina (mínimo 4).
4. **Evaluación de rebose del Tajo Perol y del Tajo Chailhuagón.** Los tajos se inundarán luego de la vida de la mina por efectos del ciclo hídrico y de las opciones de cierre. La simulación de la inundación del tajo es iterativa e interactúa con el modelo de agua superficial. Los resultados de esta simulación deben incluir la distribución final del nivel freático y el nivel final del agua en el tajo. Es importante analizar los desbordes en el tajo y los flujos de agua subterránea provenientes del tajo.