



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL TRANSPORTE DE MERCURIO EN AGUAS
SUBTERRÁNEAS: APLICACIÓN AL CASO DE QUEBRADA LA COIPA, CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

RODRIGO ROY ZAMORANO MORALES

PROFESOR GUÍA:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
JUVENAL LETELIER VILLALÓN
JULIO CORNEJO MORALES

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magíster en Ciencias de la
Ingeniería, Mención Recursos y Medio
Ambiente Hídrico
POR: Rodrigo Roy Zamorano Morales
FECHA: Agosto 2019
PROF. GUÍA: Carlos Espinoza Contreras

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL TRANSPORTE DE MERCURIO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS: APLICACIÓN AL CASO DE QUEBRADA LA COIPA, CHILE

En sistemas de alta montaña del norte grande de Chile, formados generalmente de rocas altamente mineralizadas, existen compuestos que poseen altas concentraciones, que a partir de procesos erosivos y/o de lixiviación, pueden conectarse con sistemas de aguas subterráneas, provocando problemas de contaminación aguas abajo de su fuente. De esta forma surge la necesidad de utilizar herramientas de modelación numérica, de manera de estudiar y analizar el problema de transporte de contaminantes en medios subterráneos.

En particular, en el presente trabajo de tesis, se busca como objetivo realizar una modelación numérica del transporte de mercurio aplicado en la quebrada La Coipa, ubicada en la región de Atacama de Chile, y analizar el sistema hidráulico en términos de la contención de la pluma de mercurio y el efecto en la restauración del acuífero.

La metodología del presente trabajo contempla una revisión bibliográfica de los enfoques de modelación numérica del transporte de solutos actualmente utilizados, analizando mediante simulaciones simples los alcances de las diferencias finitas y los elementos finitos en la resolución de un problema de transporte. Los resultados de estas simulaciones indican que ambos enfoques reproducen de manera adecuada los fenómenos que se quieren modelar, sin embargo, en términos computacionales y constructivos específicos de un modelo hidrogeológico, elementos finitos presenta ventajas con respecto a diferencias finitas.

A partir de la elección del enfoque de elementos finitos y el uso del software FEFLOW, con la información pública disponible se construye un modelo conceptual del acuífero La Coipa, y con esto, se construye un modelo numérico capaz de representar estas condiciones. Con un modelo numérico calibrado, se procede a elaborar escenarios de simulación, cuyo objetivo corresponde al análisis del sistema de bombeo e inyección, en términos de la contención de la pluma de mercurio y del efecto en la restauración del acuífero, es decir, los tiempos que demora el sistema en alcanzar concentraciones de línea base de mercurio.

De los resultados de los análisis realizados en la presente tesis, se concluye que, para asegurar la contención de la pluma de mercurio, la ubicación espacial de los pozos de bombeo e inyección no es única, y es importante asegurar un gradiente hidráulico inverso en la zona de la cortina de bombeo e inyección. Además, en términos de magnitud de extracción, los resultados indican que los pozos de extracción requieren bombear al menos un 90% del caudal total pasante del acuífero, para generar el efecto de contención de la pluma.

De manera de lo lograr una limpieza del acuífero y reducir el tiempo para lograr rangos de línea base del sector contaminado, es necesario realizar medidas de contención en la fuente de contaminante, ya que ésta, corresponde al aspecto más relevante para lograr los objetivos de restauración del acuífero contaminado.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a la empresa HIDROMAS por brindarme todo el apoyo y facilidades para poder continuar con mis estudios compatibilizando con mis labores como ingeniero. En particular a Carlos Espinoza y Julio Cornejo por motivarme y aportar con su amplio conocimiento en mi formación profesional y en el desarrollo del Magíster.

Además, me gustaría agradecer a mi familia, ya que todos mis logros personales y profesionales son producto de un trabajo en equipo, que sin cada uno de ellos no hubiese podido lograr. A mi madre Marcela por hacer todo lo posible para darme la mejor educación y formarme como persona, a mi abuela Juana y tía Pamela que fueron siempre un apoyo, a mi primo Tomás por aportar con su alegría de niño y a mi pareja Eve por su apoyo incondicional, en las buenas y en las malas durante todo este tiempo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Aspectos Generales	1
1.2.	Situación Particular a Estudiar	2
1.3.	Objetivos del Trabajo de Tesis	3
1.3.1.	Objetivos Generales.....	3
1.3.2.	Objetivos Específicos	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Antecedentes Modelos de Transporte en Medios Porosos	4
2.2.	Sistemas Bombeo-Inyección (<i>Pump & Treat</i>).....	5
3.	ESQUEMAS NUMÉRICOS PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3.1.	Antecedentes Generales	10
3.2.	Diferencias Finitas	10
3.3.	Elementos Finitos	11
3.4.	Discusión sobre las similitudes/diferencias entre los enfoques	11
4.	MODELACIÓN NUMÉRICA DE CASOS DE ESTUDIO	13
4.1.	Descripción General de Casos de Estudio	13
4.2.	Casos Base “A”, Sistema Unidimensional con Solución Analítica.....	13
4.2.1.	Aspectos Generales.....	13
4.2.2.	Configuración de la modelación numérico.....	14
4.2.3.	Resultados escenario caso base A	14
4.3.	Casos Base “B”, Sistema Bi-Dimensional Acuífero Tipo “Caja”.....	16
4.3.1.	Aspectos Generales.....	16
4.3.2.	Configuración general de la modelación	16
4.3.3.	Resultados principales de simulación Caso B	18
4.4.	Discusión de las Simulaciones Preliminares	21
5.	APLICACIÓN A CASO REAL.....	23
5.1.	Aspectos Generales.....	23
5.2.	Selección de Caso Real.....	23
5.3.	Antecedentes Generales de la Zona de Estudio	24
5.3.1.	Marco geológico local:	24
5.3.2.	Marco hidrogeológico local:.....	27
5.3.3.	Sistema de remediación implementado en quebrada La Coipa.....	29
5.3.4.	Marco conceptual de balance hídrico del dominio hidrogeológico:.....	31
5.4.	Modelación Numérica del Transporte de Contaminante en La Coipa.....	32

5.4.1.	Geometría y dominio del modelo numérico	32
5.4.2.	Condiciones de borde	33
5.4.3.	Calibración del modelo de flujo	36
5.4.4.	Implementación del modelo de transporte.....	40
5.5.	Evaluación sistema existente	41
6.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	47
6.1.	Aspectos Generales.....	47
6.2.	Descripción de los Escenarios de Simulación	47
6.2.1.	Aspectos generales conjunto de Escenarios 1	47
6.2.2.	Aspectos generales conjunto de Escenarios 2	52
6.2.3.	Aspectos generales conjunto de Escenarios 3	58
6.2.4.	Aspectos generales conjunto de Escenarios 4	59
6.3.	Resultados Conjunto de Escenarios 1	62
6.4.	Resultados Conjunto de Escenarios 2	78
6.5.	Resultados Conjunto de Escenarios 3	82
6.6.	Resultados Conjunto de Escenarios 4	86
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
7.1.	Conclusiones Generales.....	90
7.2.	Recomendaciones para Trabajos Futuros	93
	BIBLIOGRAFÍA	94
	ANEXO A.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema conceptual del funcionamiento de un sistema de bombeo y tratamiento.....	5
Figura 2-2 Esquema conceptual del funcionamiento del gradiente inverso.....	7
Figura 2-3 Resultados de los estudios de sistemas de bombeo e inyección, Cunningham y Reinhard (2002)	7
Figura 2-4 Configuración para la configuración espacial de sistema de bombeo y tratamiento.....	9
Figura 3-1 Representación del dominio numérico y discretización especial utilizando diferencias finitas y elementos finitos.....	12
Figura 4-1 Esquema Esquemático del Caso A	14
Figura 4-2 Variación de concentración en la dirección longitudinal para los métodos de diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF) y solución analítica.....	15
Figura 4-3 Esquema Esquemático del Caso B	16
Figura 4-4 Serie transiente de concentración de fuente de masa modelo 3.....	17
Figura 4-5 Avance de la pluma simulada en caso B para el modelo 1, en tiempo de 2 años, resultados de elementos finitos y diferencias finitas.	19
Figura 4-6 Comparación entre la concentración a lo largo del eje longitudinal para la situación con y sin refinamiento de la grilla.....	20
Figura 4-7 Resultado del comportamiento temporal de la pluma de contaminante al aplicar una concentración de entrada variable en el tiempo.....	20
Figura 5-1 Ubicación de la quebrada la Coipa	26
Figura 5-2 Mapa geológico	26
Figura 5-3 Mapa hidrogeológico	28
Figura 5-4 Esquema de sistema de inyección de agua, quebrada La Coipa.....	30
Figura 5-5 Esquema de la operación del sistema de remediación de La Coipa	30
Figura 5-6 Malla considerada en dominio numérico de modelación	33
Figura 5-7 Representación de las condiciones de borde del modelo numérico.....	35
Figura 5-8 Valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de la calibración	37
Figura 5-9 Indicadores de ajuste del proceso de calibración.....	38
Figura 5-10 Mapa de equipotenciales y direcciones de flujo	39
Figura 5-11 Relación entre dispersividad longitudinal y escala.....	41
Figura 5-12 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para un tiempo de simulación de 30 años	43
Figura 5-13 Trayectoria de partículas ingresadas desde la entrada al dominio de modelación	44
Figura 5-14 Radio de captura de los pozos de bombeo.....	45
Figura 5-15 Concentración en perfil transversal ubicado en la cortina de bombeo (1 mg/l equivale a 1000 ppb).....	46
Figura 6-1 Serie de concentración de entrada en el tiempo para los escenarios E1-1 a E1-4	50
Figura 6-2 Pozos considerados para escenario E1-5	51
Figura 6-3 Agrupación de pozos del sistema para escenario 2.....	53
Figura 6-4 Configuración del sistema de pozos para los escenarios E2-3 y E2-4.....	56
Figura 6-5 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-1	60
Figura 6-6 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-2	61
Figura 6-7 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-3.....	61
Figura 6-8 Puntos de observación para análisis del escenario 1.....	64
Figura 6-9 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-1 a E1-4, para tres puntos de control	65
Figura 6-10 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-1 y E1-5, para tres puntos de control	66

Figura 6-11 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-6 y E1-9, para tres puntos de control	67
Figura 6-12 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-1, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	69
Figura 6-13 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-2, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	70
Figura 6-14 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-3, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	71
Figura 6-15 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-4, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	72
Figura 6-16 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-5, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	73
Figura 6-17 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-6, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	74
Figura 6-18 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-7, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	75
Figura 6-19 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-8, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	76
Figura 6-20 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-9, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.....	77
Figura 6-21 Avance de partículas en E2-1 provenientes desde la entrada del sistema	80
Figura 6-22 Avance de partículas en E2-2, E2-3 y E2-4 provenientes desde la entrada del sistema	81
Figura 6-23 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-1.....	83
Figura 6-24 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-2.....	83
Figura 6-25 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-3.....	84
Figura 6-26 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-4.....	84
Figura 6-27 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-5.....	85
Figura 6-28 Partículas desde la entrada para el conjunto de escenarios 3.....	85
Figura 6-29 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-1....	87
Figura 6-30 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-2....	87
Figura 6-31 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-3....	88
Figura 6-32 Resultado de trayectoria de partículas E4-1	88
Figura 6-33 Resultado de trayectoria de partículas E4-2	89
Figura 6-34 Resultado de trayectoria de partículas provenientes E4-3	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Configuración de los modelos del caso B	17
Tabla 5-1. Rangos de conductividad hidráulica para sedimentos no consolidados.....	27
Tabla 5-2. Caudales de bombeo e inyección en los pozos ubicados en el dominio hidrogeológico	31
Tabla 6-1. Condiciones de borde impuestas para el Escenario A 1	50
Tabla 6-2. Resumen de caudales de los pozos del sistema para los escenarios del conjunto 2.....	57
Tabla 6-3. Resumen de caudales de los pozos del sistema para los escenarios del conjunto 3.....	58
Tabla 6-4. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral de 1ppb en cada uno de los pozos de observación analizados, E1-1 a E1-5	63
Tabla 6-5. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral de 1ppb en cada uno de los pozos de observación analizados, E1-6 a E1-9	63
Tabla 6-6. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral para MDO-110	64
Tabla 6-7. Gradiente hidráulico inverso en zona de contención hidráulica	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos Generales

En el sector del norte grande de Chile, existen diversas formaciones geológicas compuestas de rocas con un alto contenido de minerales y metales. Estas unidades están sujetas a procesos erosivos o de lixiviación que permiten la conexión de estos compuestos altamente concentrados con sistemas acuíferos adyacentes (Wang et al, 2004; Fetter, 2000).

De la misma forma, existen procesos mineros que pueden afectar negativamente las aguas subterráneas o incrementar los efectos producidos de manera natural en los sistemas en los cuales se encuentran inmersos, pudiendo provocar contaminación en acuíferos de manera local o transportarse hacia otros sistemas cercanos (Wang et al, 2004).

En este contexto, es necesario estudiar y analizar con detalle la contaminación de aguas subterráneas. En particular, es importante contar con una herramienta capaz de representar de manera adecuada el transporte de contaminante, permitiendo así, analizar la afectación de sistemas hídricos relevantes ambientalmente.

De manera de realizar una representación simplificada de un sistema físico real, surgen los modelos hidrogeológicos, los cuales pueden ser implementados de manera numérica. Esta herramienta es útil a la hora de representar sistemas complejos, en donde existen diversos componentes que afectan el sistema hidrogeológico.

Un modelo numérico, resuelve las ecuaciones que gobiernan el problema de flujo y transporte en medios porosos. En la actualidad, existen distintos enfoques numéricos para la solución del problema, dentro de las que destacan: Diferencias finitas, Elementos finitos y Volúmenes finitos.

El método de las diferencias finitas es el enfoque numérico clásico (Euleriano) más utilizado en resolver este tipo de problemas, en el cual el dominio de estudio se discretiza en una grilla (generalmente uniforme), en donde se resuelve la ecuación de flujo en el centro de cada celda definida dentro del dominio de modelación. Con la solución de carga hidráulica en cada celda del dominio, es posible obtener la velocidad del flujo, para luego resolver la ecuación de transporte de manera de obtener la distribución de concentración de un determinado soluto en el medio (Zheng y Wang, 1999).

Los softwares comerciales que utilizan el método de las diferencias finitas para abordar el transporte de contaminantes en aguas subterráneas, se basan principalmente en el modelo MODFLOW, desarrollado inicialmente por el USGS (*United States Geological Service*), el cual simula el flujo subterráneo en medios porosos. Este modelo posee una estructura modular, que consiste en el código principal y distintas sub unidades (o paquetes) independientes con características específicas. Dentro de estas subunidades, se encuentra el paquete MT3D (*Modular three-dimensional transport model*), el cual fue desarrollado para resolver el problema de transporte de soluto mediante distintas técnicas de solución.

Otro enfoque que permite resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno, corresponde a los elementos finitos. Esta metodología de discretización, ofrece un enfoque alternativo para la resolución del problema, en donde el acuífero es dividido en celdas poligonales. Los nodos que intersectan estas celdas, representan los puntos en donde las variables son resueltas, como por ejemplo carga hidráulica o concentración (Fetter, 2000).

Dentro de los softwares comerciales que utilizan elementos finitos, destaca FEFLOW (*Finite element subsurface flow and transport system*), que corresponde a un sistema de modelación de aguas subterráneas con múltiples capacidades y es utilizado eficientemente para representar la distribución espacial y temporal de reacciones de contaminantes, modelar procesos geotermales, planificar y diseñar estrategias de remediación, entre otros (FEFLOW, 2017).

En este contexto, la motivación principal de este trabajo de tesis, es el poder aplicar los conceptos de transporte de masa en un medio poroso en casos reales ubicados en quebradas de alta montaña, y analizar el caso particular de sistemas de remediación para el control del problema de contaminación.

1.2. Situación Particular a Estudiar

A partir de la revisión bibliográfica de proyectos ingresados en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), se encuentra el proyecto de “Tratamiento de Aguas” (MYMA, 2007) asociado a la RCA n°171 del 3 de agosto de 2007, correspondiente a la Faena La Coipa de la Compañía Minera Mantos de Oro, ubicada en la Región de Atacama, al norte de Chile, a aproximadamente 140 km al noroeste de la ciudad de Copiapó.

En este documento se señala que, en el año 1994, se detectaron trazas de este metal en las aguas subterráneas de la Quebrada La Coipa, a partir de entonces se han realizado diversas actividades con tal de eliminar el contenido de mercurio presente en el agua.

Las actividades asociadas al tratamiento de aguas subterráneas en la Quebrada La Coipa, corresponden a la captación, tratamiento y contención del agua, con el propósito de impedir que éstos afecten a potenciales receptores presentes en el área de influencia.

Un enfoque bastante común para abordar el problema de contaminación de agua subterránea, es el extraer esta agua y tratarla en la superficie para posteriormente descargarla o inyectarla, este sistema es conocido como remediación por bombeo-tratamiento o bombeo e inyección (Cohen et al, 1997).

En la quebrada La Coipa se cuenta con un sistema de extracción e inyección. El procedimiento consiste en un sistema de captación que extraen las aguas subterráneas contaminadas, con concentraciones de mercurio que varían entre 900 y 2500 ppb, estas se llevan a la planta de tratamiento, cuyo objetivo es el de disminuir el nivel de mercurio. El agua tratada, con contenidos menores a 1 ppb de mercurio, es inyectada directamente al acuífero mediante pozos de inyección de manera de cumplir con la norma chilena de agua potable (MYMA, 2007).

La configuración actualmente en operación en la quebrada La Coipa, fue implementada de manera de cumplir con la normativa chilena, sin embargo, existen muchas estrategias para llevar a cabo un sistema de bombeo-tratamiento, dependiendo de los objetivos de restauración (limpieza) o contención y las condiciones específicas del sitio en cuestión (Cohen et al, 1997).

De esta forma, con un modelo numérico que represente de manera adecuada los procesos involucrados en la quebrada La Coipa, se busca analizar el sistema de contención, verificar estrategias y configuraciones distintas a las actualmente implementadas, y estimar los tiempos de limpieza o restauración del acuífero, ante distintas medidas de control realizadas en el sistema.

1.3. Objetivos del Trabajo de Tesis

1.3.1. Objetivos Generales

- Realizar una modelación numérica del transporte de mercurio en aguas subterráneas de la quebrada La Coipa y analizar el sistema hidráulico de contención y remediación implementado.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Revisar bibliografía de los enfoques de modelación numérica de transporte de soluto utilizado actualmente en problemas de contaminación de aguas subterráneas. Además de una revisión de los sistemas de remediación basados en bombeo e inyección.
- Establecer los alcances, ventajas y desventajas de los enfoques de modelación numérica que permite representar de mejor manera el transporte de mercurio en aguas subterráneas.
- Realizar una modelación numérica que represente adecuadamente un sistema de remediación implementado en un caso real en proyectos a nivel nacional.
- Analizar mediante simulaciones numéricas el sistema de bombeo-inyección actualmente en operación y su efecto en la contención hidráulica de la pluma de contaminante.
- Simular mediante escenarios de modelación, los tiempos de restauración o limpieza del acuífero al aplicar medidas de control en la pluma, y/o modificar la operación del sistema de bombeo e inyección.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes Modelos de Transporte en Medios Porosos

En el estudio de contaminación de aguas subterráneas, es importante conocer las teorías básicas que gobiernan el movimiento de un determinado soluto en un medio poroso. Básicamente, se pueden clasificar en dos los procesos de transportes que dominan el problema en cuestión (Fetter, 2000).

En primer lugar, está la difusión, el cual corresponde al proceso en el cual las especies disueltas en el agua se mueven siguiendo un gradiente de concentración, y, en segundo lugar, se tiene la advección, proceso en el cual el movimiento del agua acarrea distintos solutos (Fetter, 2017).

Las ecuaciones de derivadas parciales que gobiernan el problema de transporte de contaminante de una cierta especie “ k ” en tres dimensiones, pueden ser escritas de la siguiente forma (Zheng y Wang, 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

Donde:

θ : Porosidad del medio subterráneo (adimensional).

C^k : Concentración de la especie k , [ML⁻³].

t : Tiempo, [T].

$x_{i,j}$: Distancia a lo largo del respectivo eje de coordenadas cartesianas, [L].

D_{ij} : Tensor de coeficiente de dispersión hidrodinámico, [L²T⁻¹]

v_i : Velocidad lineal de poros, se relaciona con la descarga específica o velocidad de Darcy mediante la relación $v_i = q_i/\theta$, [LT⁻¹].

q_s : Flujo volumétrico por unidad de volumen del acuífero que representa fuentes (positivo) o sumideros (negativo), [T⁻¹].

C_s^k : Concentración de la fuente o sumidero de la especie k , [ML⁻³].

$\sum R_n$: Término asociado a las reacciones químicas, [ML⁻³]

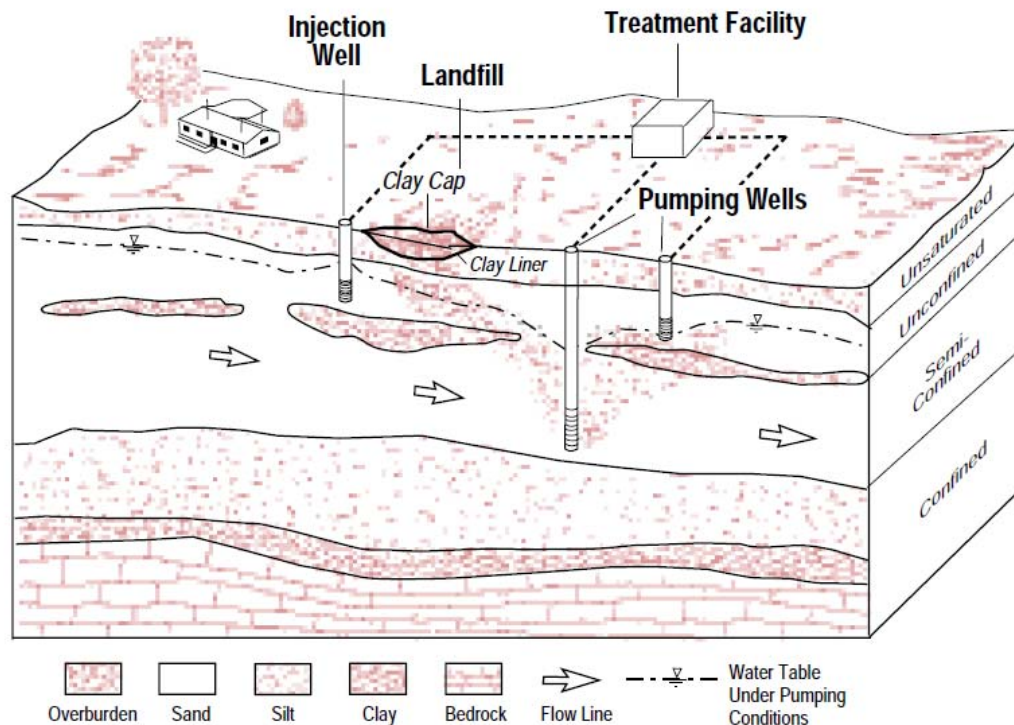
El término asociado a la reacción química, se utiliza para incluir el efecto de reacciones como la absorción y las reacciones de primer orden. La sorción es un proceso que puede producir distintos efectos en el comportamiento general del movimiento de la pluma de contaminante. Si un soluto no adsorbe en las partículas sólidas del acuífero, la tasa promedio del transporte de soluto puede ser estimada directamente por la velocidad lineal media. Caso contrario, cuando el soluto adsorbe significativamente, su movimiento es menor que la velocidad media del flujo (Fitts, 2013).

2.2. Sistemas Bombeo-Inyección (*Pump & Treat*)

El bombeo y tratamiento es un método común para la limpieza de aguas subterráneas. Pozos de bombeo son utilizados para extraer el agua contaminada hacia la superficie, de esta forma puede ser limpiada o tratada de manera más fácil (EPA, 2001).

El funcionamiento básico de estos sistemas consiste en implementar uno o más pozos equipados con bombas, de manera de que extraigan el agua contaminada. El agua ya en superficie es tratada mediante distintos métodos, finalmente el agua limpia puede ser reingresada al sistema acuífero. En la Figura 2-1 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento de un sistema típico de bombeo e inyección.

Figura 2-1 Esquema conceptual del funcionamiento de un sistema de bombeo y tratamiento



Fuente: Cohen et. al (1997)

Las estrategias para gestionar la contaminación de aguas subterráneas usando bombeo y tratamiento incluyen principalmente (Cohen et. al 1997):

- Contención hidráulica: Estos sistemas son diseñados para controlar el movimiento del agua contaminada en orden de prevenir la expansión de la zona comprometida.
- Limpieza/restauración: En algunos sitios es posible realizar una limpieza de la pluma disuelta, los sistemas de bombeo tratamiento generalmente combinan la contención hidráulica con procesos de limpieza o tratamiento de manera de obtener rangos aceptables de concentración del contaminante.

Un sistema de contención hidráulica corresponde al “Gradiente inverso”, el cual consiste en forzar un gradiente hidráulico inverso a la dirección de flujo, de manera que la pluma de contaminación no continúe avanzando hacia aguas abajo del acuífero.

En términos físicos, se posee una línea de pozos de inyección aguas abajo de la pluma de contaminación, la cual introduce agua no contaminada al sistema, generando un incremento del nivel piezométrico en la proximidad del pozo de inyección, ganando así carga hidráulica. Del mismo modo, al bombear el agua contaminada en el sector de aguas arriba de la pluma, los niveles subterráneos se deprimen, perdiendo carga hidráulica en la cercanía del pozo de extracción. De esta forma se produce una diferencia de energía negativa, invirtiendo el gradiente natural que da origen a la dirección del flujo. Matemáticamente se define el gradiente inverso como:

$$i_{inverso} = \frac{h_2 - h_1}{L} < 0$$

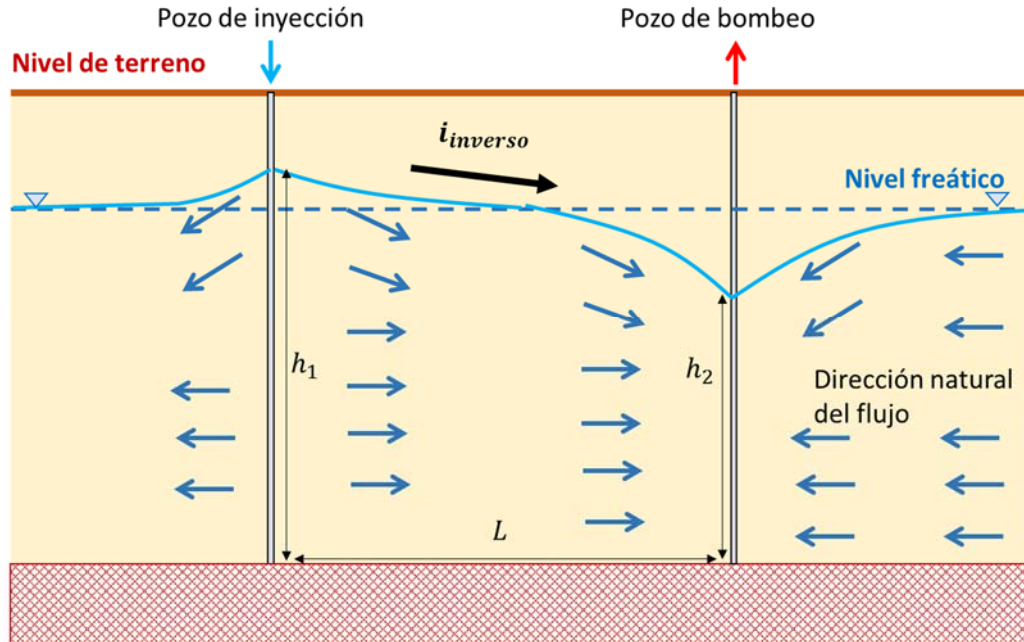
En donde $i_{inverso}$ corresponde al gradiente hidráulico inverso, h_1 al nivel piezométrico aguas abajo, h_2 el nivel piezométrico aguas arriba y L la distancia longitudinal entre ambos niveles.

De esta forma la eficiencia del sistema quedara determinada por la diferencia de cargas hidráulicas entre la sección aguas abajo y aguas arriba, es decir mientras se cumpla que $h_2 < h_1$. Es importante señalar que, al generarse el gradiente inverso entre los pozos de inyección y bombeo, se crea un flujo subterráneo pasante que se moviliza hacia las captaciones del pozo de extracción, ayudando a la descontaminación y lavado del acuífero. En la Figura 2-2 se presenta un esquema del funcionamiento del sistema descrito.

Cunningham y Reinhard (2002) demostraron tanto matemáticamente como a través de un modelo numérico que tanto la inyección como el bombeo operados de forma conjunta, permiten que el sistema de remediación Bombeo y Tratamiento actúe como una barrera hidráulica evitando la contaminación hacia el sector limpio del acuífero ubicado aguas abajo. Además, se enfocan en estudiar el ancho de captura de la pluma desde un punto de vista hidráulico, evidenciando que este sistema de tratamiento ofrece un excelente desempeño en cuanto a la captura de contaminantes.

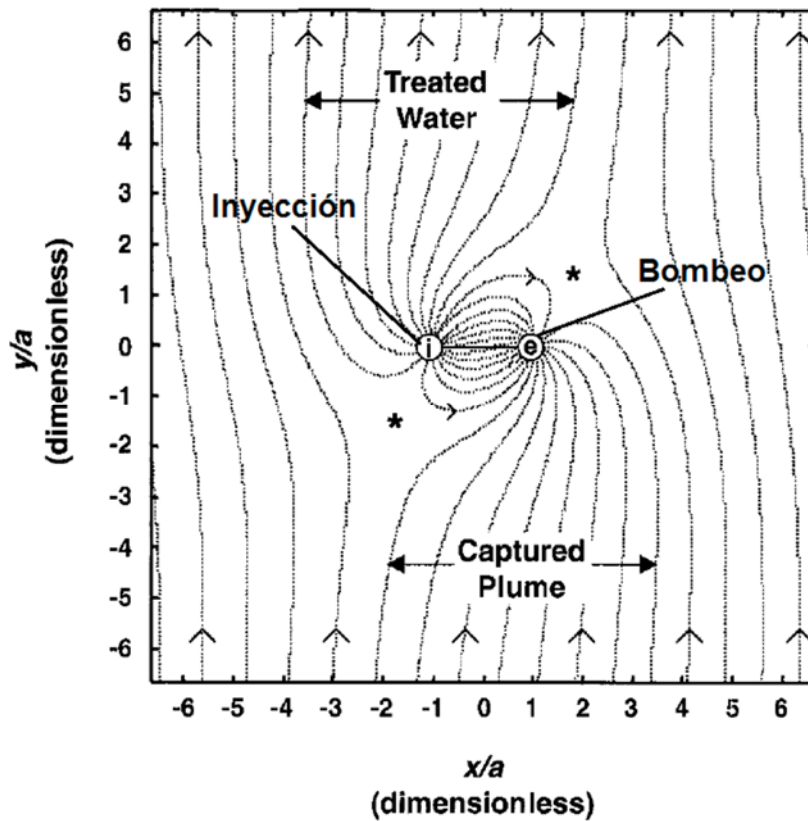
En la Figura 2-3, se muestran los resultados obtenidos de la investigación de Cunningham y Reinhard (2002), cuya modelación numérica identifica la presencia de una barrera hidráulica generada por un pozo de bombeo y otro de inyección, en donde el primero capta las aguas contaminadas y luego de un tratamiento *in situ* se regresa al acuífero a través del pozo de inyección.

Figura 2-2 Esquema conceptual del funcionamiento del gradiente inverso



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-3 Resultados de los estudios de sistemas de bombeo e inyección, Cunningham y Reinhard (2002)



Fuente: Cunningham y Reinhard (2002)

Dentro de los objetivos principales en el diseño de un sistema de bombeo e inyección, se destacan los siguientes aspectos:

- Tasa de bombeo
- Ubicación de los pozos
- Número de pozos
- Proyección en el tiempo de la limpieza del acuífero
- Objetivo de la remediación

Con respecto a los pozos de extracción, estos son diseñados para capturar la pluma, mientras que al mismo tiempo remueven la menor cantidad de agua limpia. Además, estos pozos pueden ser planificados como pozos de estabilización de la pluma, en estos casos, estos se ubican dentro de la extensión de la pluma y dimensionados para revertir el gradiente hidráulico más allá del borde de la pluma, de esta forma es posible prevenir el posible movimiento de esta (Fetter, 2000).

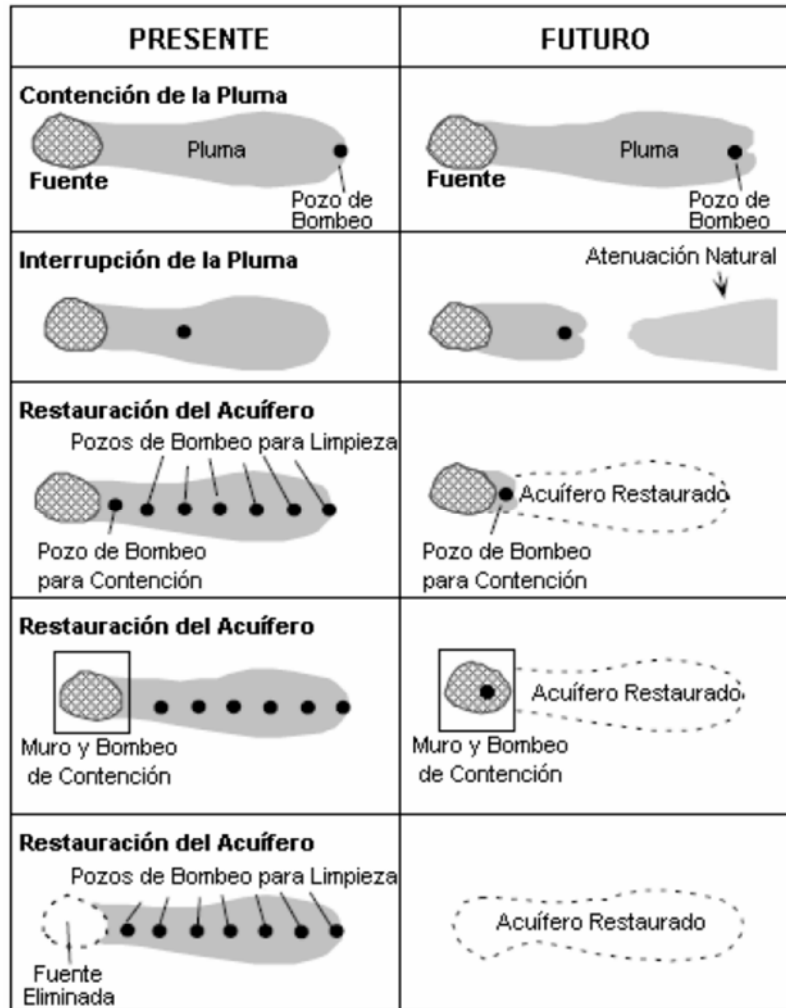
Otro aspecto relevante, es considerar cual es el objetivo de la remediación, ya sea una contención del avance de la pluma versus la limpieza del sistema acuífero. Un objetivo de contención es apropiado cuando existe una fuente continua de contaminación que no permite una limpieza adecuada del acuífero, mientras que un objetivo de limpieza o restauración es apropiado cuando la fuente ha sido removida o contenida efectivamente (EPA, 1999).

En términos generales, existen distintas estrategias para la implementación de los sistemas de bombeo e inyección, que dependen de las condiciones del medio, avance de la pluma y objetivos de remediación que se busquen, en la Figura 2-4 se presenta un resumen de estas diferentes configuraciones descritas por la Cohen (1997).

Uno de los componentes principales de los sistemas de bombeo y tratamiento, tienen que ver con diseñar un adecuado modelo de simulación de aguas subterráneas (EPA,1999). Dos clases de modelos surgen de este análisis, los modelos de flujo y los de transporte. Para la optimización hidráulica, el modelo de flujo es utilizado para predecir niveles piezométricos del sistema, descensos, gradientes y velocidades, de manera de utilizar esta información de salida como base para analizar la trayectoria de partículas y así definir zonas de captura y direcciones preferenciales de flujo.

Los modelos de transporte, en general son más complejos de implementar y requieren una mayor información de entrada, sin embargo, a partir de estos, se pueden simular la distribución espacial de concentraciones de un determinado soluto, y así determinar zonas en donde existe una mayor concentración del contaminante. Del mismo modo, estos modelos permiten obtener la variación temporal de las concentraciones en el medio poroso, y así, analizar los tiempos de restauración de un acuífero contaminado.

Figura 2-4 Configuración para la configuración espacial de sistema de bombeo y tratamiento



Fuente: Cohen (1997)

3. ESQUEMAS NUMÉRICOS PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Antecedentes Generales

Los problemas de modelación numérica de sistemas hidrogeológicos, radican en resolver las ecuaciones en derivadas parciales que, en el caso de medios porosos, corresponde a la ecuación de Darcy.

En términos generales, existen tres tipos de metodologías para la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales: método de las diferencias finitas, método de los elementos finitos y método de los volúmenes finitos. Sin embargo, en la práctica, solamente los dos primeros son los que se utilizan mayoritariamente en los problemas de aguas subterráneas para simular el transporte de masa en medios porosos.

El enfoque de los elementos finitos realiza los cálculos en los nodos de cada celda o elemento, los que poseen formas irregulares, pero debido a condiciones numéricas se utilizan generalmente elementos triangulares. Con este método, las ecuaciones diferenciales son aproximadas utilizando el método de los residuales ponderados para obtener el conjunto de ecuaciones algebraicas a resolver (SEA, 2012).

Por otro lado, el método de las diferencias finitas realiza el cálculo en el centro de cada celda, las cuales poseen una forma prismática rectangular, conceptualmente son más sencillas y fáciles de utilizar.

A continuación, se realizará una descripción más detallada de los métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

3.2. Diferencias Finitas

Con este método de resolución, las ecuaciones de derivadas parciales que gobiernan el problema, son aproximadas por cocientes incrementales. Este método posee una sencilla implementación y se encuentra limitado por la construcción de una grilla con celdas prismáticas rectangulares.

En términos prácticos, los modelos hidrogeológicos resueltos mediante el método de diferencias finitas, se basan en el código MODFLOW para resolver el problema de flujo planteado.

MODFLOW simula el flujo subterráneo en un medio poroso utilizando una estructura modular que permite modificar y analizar de mejor forma el modelo realizado. A partir de este código se genera la solución del flujo en el medio saturado, el cual será utilizado como entrada para la resolución del problema de transporte de masa, utilizando para esto último, el código MT3D (Zheng, 1999). De esta forma, se resuelve desacopladamente el problema de flujo y transporte, y al desarrollarse en conjunto permiten representar los procesos de transporte de soluto en un medio saturado en acuíferos granulares.

El paquete MT3D incluye distintos métodos para la resolución del problema de transporte, dentro de las que destacan el método estándar de diferencias finitas, varios métodos mixtos de enfoques Eulerianos-Lagrangianos y método TVD (Zheng, 1999). Estas opciones de solución modelan la dispersión, fuentes o términos de reacción de la misma forma que el método de diferencias finitas, es decir, enfocado en el centro del bloque, tanto de manera explícita como implícita.

3.3. Elementos Finitos

En este método de resolución de las ecuaciones de derivadas parciales, el dominio de modelación se divide en subdominios disjuntos, que corresponden a los elementos finitos, en donde sus vértices definen los nodos en donde se realizaran los cálculos.

El método de elementos finitos posee características que destacan en los siguientes aspectos:

- Geometrías arbitrarias. El método de elementos finitos es esencialmente libre de geometría, en principio puede ser aplicado a dominios de forma arbitraria con condiciones de borde libres.
- Mallas no estructuradas. El método de elementos finitos por su naturaleza se basa en mallas no estructuradas, esto significa, que en principio el modelador puede poner elementos en cualquier lugar. De esta forma, geometrías complejas pueden ser fácilmente manejadas.
- Robustez. En los elementos finitos la contribución a aproximaciones locales por sobre elementos individuales son juntados de forma sistemática para lograr una aproximación global de una solución a la ecuación de derivadas parciales. Generalmente esto conlleva a esquemas que son estables e insensibles a singularidades o distorsiones de la malla, en contraste con un enfoque clásico de diferencias finitas.
- Fundamentación matemática. Hoy en día está disponible una rica y sólida base matemática para enfoques de elementos finitos.

Dentro de los softwares comerciales, destaca FEFLOW (*Finite element subsurface flow and transport system*), el cual utiliza el enfoque de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones que gobiernan el problema. Este Software fue desarrollado por DHI-WASY, y corresponde a un sistema de modelación que permite modelos en 3D y 2D, condiciones de saturación variable, régimen transiente y permanente, resuelve ecuaciones de flujo, transporte de masa o calor, transporte de multi especies reactivas.

FEFLOW puede ser utilizado eficientemente para el análisis de la distribución espacial y temporal de reacciones de contaminantes en aguas subterráneas, modelar procesos geotermiales, estimar tiempos de viaje de especies químicas en acuíferos, planificar y diseñar estrategias de remediación, entre otros.

3.4. Discusión sobre las similitudes/diferencias entre los enfoques

Los métodos enfocados en las diferencias finitas, aproximan la ecuación mediante series de Taylor, en general son más rápidos computacionalmente, y más fáciles de implementar. Sin embargo, su limitante se centra en la utilización de celdas regulares, ya sean cuadradas o rectangulares. Para realizar refinamiento en zonas de interés, se incrementa el total de celdas en la fila o columna, de manera que la cantidad de elementos del modelo aumenta considerablemente, disminuyendo la eficiencia computacional.

Los métodos basados en elementos finitos, siguen un esquema integral de resolución, es decir se integran en el espacio. En general requieren una capacidad computacional mayor, de manera que los procesos pueden tomar mayor tiempo. Una de las ventajas considerables, es el de poder adaptar la geometría a elementos integrales, de manera de tener una mayor flexibilidad a la hora de poder representar aspectos específicos del problema en estudio.

El método de elementos finitos por su naturaleza y origen se basa en mallas no estructuradas, por lo que en un principio se pueden disponer de elementos en cualquier lugar dentro del dominio de modelación. De esta forma, geometrías complejas pueden ser fácilmente manejadas.

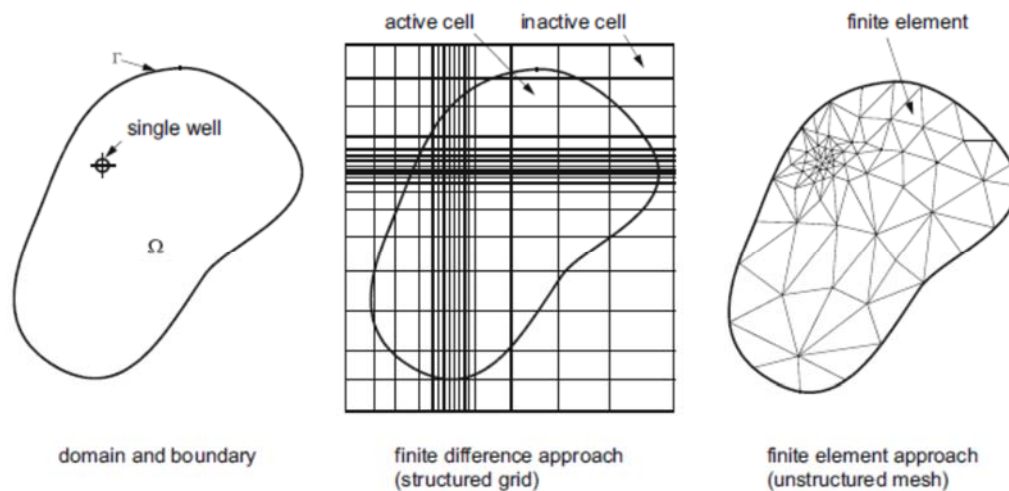
En los elementos finitos la contribución a aproximaciones locales por sobre elementos individuales son juntados de forma sistemática para lograr una aproximación global de una solución a la ecuación de derivadas parciales. Generalmente esto conlleva a esquemas que son estables e insensibles a singularidades o distorsiones de la malla, en contraste con un enfoque clásico de diferencias finitas.

Los elementos finitos son especialmente útiles en los modelos de sistemas de una alta anisotropía y casos en que es necesario una versatilidad en la discretización de elementos, ya que permite realizar refinamientos locales de manera eficiente en sectores en donde es necesario realizar un análisis crítico. Sin embargo, una de las desventajas principales que presentan los elementos finitos, están relacionadas con una mayor complejidad teórica y una velocidad discontinua en los elementos que se encuentran en los bordes del modelo (Cid, 2014).

Con respecto a las ventajas del método de las diferencias finitas, se destaca en el hecho de que al utilizar grillas regulares la aproximación de la solución puede ser realizada de una manera más eficiente. Del mismo modo, es aceptado favorablemente por los sectores privados y gubernamentales a nivel mundial, siendo ampliamente utilizado en los servicios de ingeniería y estudios ambientales. Por otro lado, las desventajas de este método, consisten en la imposibilidad de restaurar celdas secas que se producen durante el proceso de cálculo, generando inestabilidad y problemas de resolución del transporte de soluto, la otra desventaja, tiene que ver con la modelación de geometrías complejas y acuíferos con propiedades de anisotropía y una alta heterogeneidad en sus propiedades hidrogeológicas (Vargas, 2013).

A partir de los antecedentes revisados, es posible establecer que la principal diferencia de ambos métodos radica en la representación de geometrías complejas y en el refinamiento de la malla en sectores críticos en donde se requiere un mayor detalle. De esta forma en la Figura 3-1 se presenta de forma esquemática la forma de discretizar el dominio de modelación utilizando el método de diferencias finitas y el de elementos finitos.

Figura 3-1 Representación del dominio numérico y discretización especial utilizando diferencias finitas y elementos finitos



Fuente: Diersch 2013

4. MODELACIÓN NUMÉRICA DE CASOS DE ESTUDIO

4.1. Descripción General de Casos de Estudio

Como fue descrito anteriormente en el capítulo 3, existen distintos enfoques y algoritmos de resolución de las ecuaciones que rigen el fenómeno de transporte de masa en un medio poroso. En el presente capítulo se estudiarán la resolución del problema de transporte utilizando diferencias finitas y elementos finitos.

Para cada uno de estos enfoques de resolución del problema de transporte, se simulan numéricamente casos preliminares o casos base, que permiten analizar cuantitativamente las capacidades y alcances de cada uno de estos, y como responden ante distintas configuraciones de la modelación, variando parámetros del flujo y del modelo de transporte, además de familiarizarse con los softwares para la realización de modelos numéricos. Los resultados de estos casos base, permiten tomar una decisión del enfoque de modelación a considerar para la simulación del caso del problema de transporte de mercurio en la quebrada La Coipa.

Cada uno de los casos bases, se simulan utilizando el enfoque de diferencias finitas, específicamente con el paquete MT3D incluido en el software GMS versión 3.0. Del mismo modo, este caso se simula mediante elementos finitos utilizando el software FEFLOW versión 7.1.

En primer lugar, se simula un caso básico en una dimensión, cuya solución analítica es conocida, de esta forma es posible validar los resultados obtenidos de los modelos numéricos. Este caso de simulación tiene por objetivo realizar un análisis de sensibilidad de los distintos parámetros de entrada de los modelos asociados a las propiedades del transporte y como afectan el resultado. Del mismo modo, al conocer la solución analítica del problema, será posible identificar fuentes de error que se relacionen con la dispersión numérica, asociada a este tipo de problemas de advección dominante.

En segundo lugar, se realiza una simulación estándar en dos dimensiones de un acuífero tipo caja, el cual estará compuesto de condiciones de borde de entrada y salida del sistema, además se incluirán elementos de pozo de bombeo, los que permiten estudiar el efecto que producen estos sobre el transporte de masa en el medio.

4.2. Casos Base “A”, Sistema Unidimensional con Solución Analítica

4.2.1. Aspectos Generales

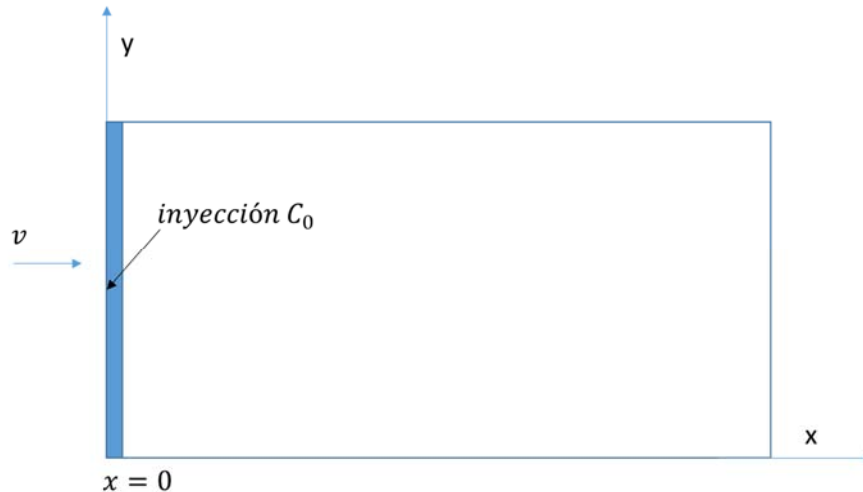
El caso A, corresponde a la simulación de una situación simple en una dimensión, con una inyección de un soluto en un medio poroso de forma puntual, cuya solución analítica es conocida mediante ciertos supuestos.

Específicamente, el caso A corresponde a una columna en 1D de un medio poroso homogéneo, en donde los efectos radiactivos no se consideran, con un flujo de entrada constante y una difusión-dispersión uniforme, de esta forma, la ecuación de advección-dispersión en una dimensión se escribe como (Fetter, 2001):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Donde “c” corresponde a la concentración del soluto, D es el coeficiente de dispersividad, v es la velocidad constante de entrada al sistema y x es la variable espacial que represente la distancia a lo largo de la columna. En la Figura 4-1 se presenta un esquema de la situación a modelar.

Figura 4-1 Esquema Esquemático del Caso A



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Configuración de la modelación numérico

Se considera un dominio rectangular, lo suficientemente extenso en la dirección longitudinal de manera de cumplir con las condiciones expuestas en el acápite anterior. Se considera una malla con elementos de 1 m de largo y 1 m de ancho.

El flujo será modelado con una velocidad uniforme de 0,24 m/d, la cual será impuesta a partir de condiciones de borde de carga constante en la entrada y salida del sistema, de manera de obtener un gradiente hidráulico que satisfaga la velocidad mencionada.

En términos del transporte, se considerará una inyección continua de un soluto con una concentración fija C_0 , lo que corresponde a una condición de borde de tipo dos (Dirchlet). Esta será ingresada en la posición de entrada al modelo, es decir, para $x=0$. La simulación se realiza en régimen transiente, considerando un tiempo de modelación de 500 días totales.

4.2.3. Resultados escenario caso base A

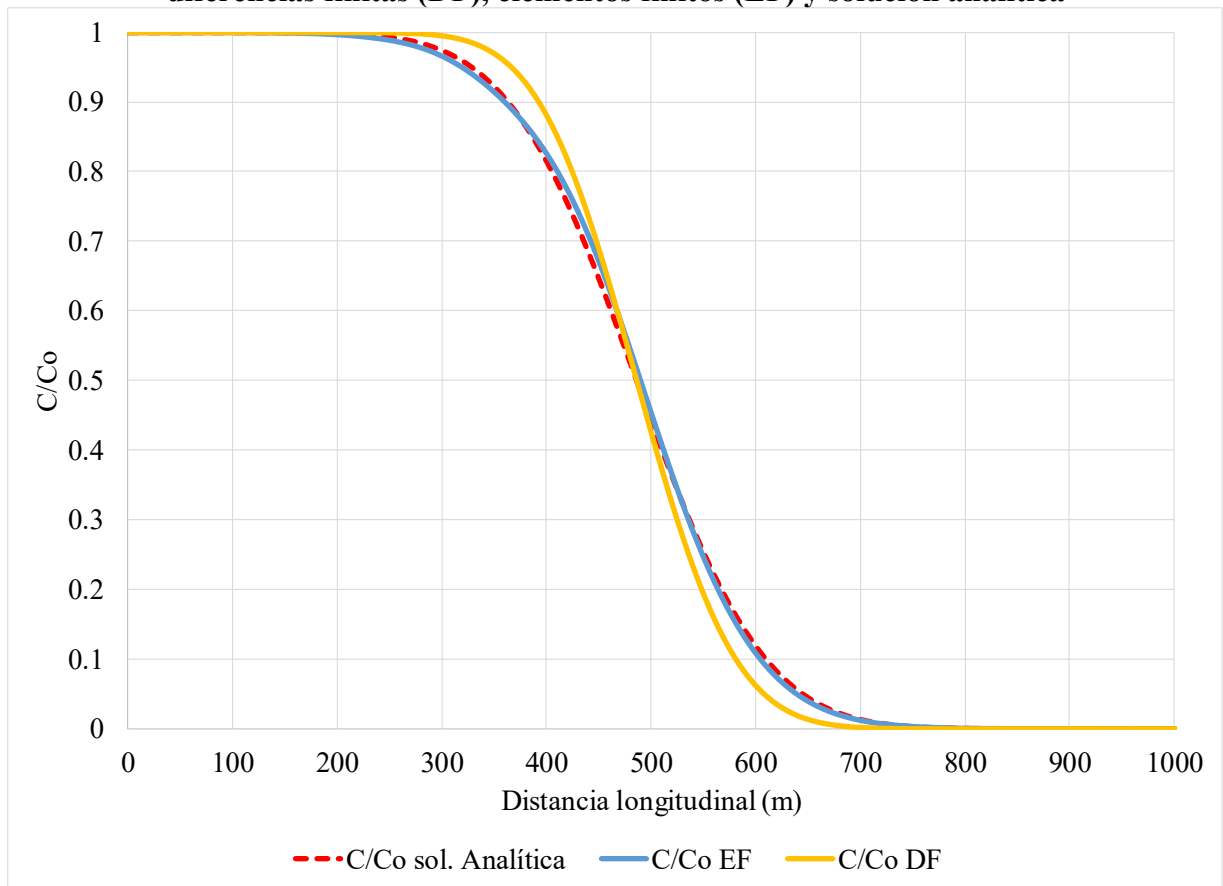
De manera de analizar comparativamente los resultados obtenidos mediante la solución analítica, diferencias finitas (DF) y elementos finitos (EF), en la Figura 4-2 se presenta la variación de la concentración en la longitudinal obtenida mediante los dos métodos mencionados anteriormente, para uno de los casos simulados. Todos los resultados de este caso base se presentan en el Anexo A.

Como se observa en la figura descrita anteriormente, los resultados obtenidos siguen la forma esperada para este tipo de problema, en donde a medida que se aleja de la fuente de contaminación, la concentración se atenúa.

Las concentraciones simuladas muestran que en términos generales las tres metodologías de resolución se ajustan adecuadamente entre sí, siendo la curva obtenida de la simulación con diferencias finitas la que se aleja más de las otras dos soluciones.

De esta forma, en este problema unidimensional, los resultados obtenidos mediante elementos finitos muestran un mejor ajuste a la solución analítica del problema.

Figura 4-2 Variación de concentración en la dirección longitudinal para los métodos de diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF) y solución analítica



Fuente: Elaboración propia

4.3. Casos Base “B”, Sistema Bi-Dimensional Acuífero Tipo “Caja”.

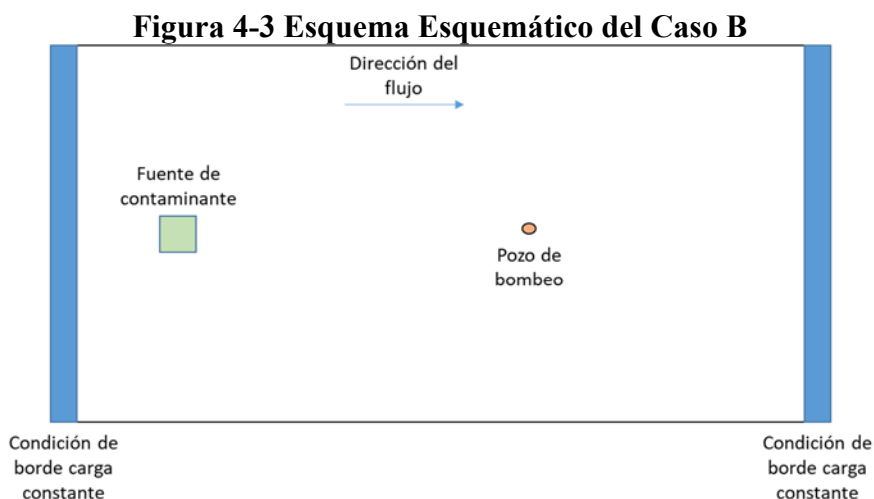
4.3.1. Aspectos Generales

Del mismo modo que en el caso A, se realiza una simulación base para contrastar los efectos de un enfoque con diferencias finitas (paquete MT3DMS de GMS) y elementos finitos (FEFLOW).

El caso B consiste en la representación de un acuífero mediante un “modelo de caja”, en donde, al utilizar dos condiciones de borde de carga constante, se genera un gradiente hidráulico permitiendo el flujo de agua subterránea.

El sistema cuenta con una fuente contaminante con una concentración dada, de esta manera se observa en dos dimensiones como se distribuye la pluma de contaminación en distintos tiempos de simulación.

Finalmente, se analiza el efecto del bombeo de un pozo en las cercanías de la fuente de contaminación. En los casos de la simulación se analiza el efecto de una malla refinada en el sector del pozo de bombeo. En la Figura 4-3 se presenta un esquema del caso B a simular.



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Configuración general de la modelación

El dominio del modelo es un rectángulo de 1000 m x 1000 m, todas las modelaciones se realizan en dos dimensiones, de manera que el espesor no es relevante para el modelo.

La dirección de flujo es de izquierda a derecha, y está dado por el gradiente hidráulico impuesto por las condiciones de borde de tipo Dirichlet, correspondiente a una carga constante en los bordes del dominio. Para el propósito de este ejercicio, se fija una carga hidráulica de 30 m en el borde izquierdo, y de 29,85 m en el borde derecho. A partir de estos valores, se calcula un gradiente hidráulico de 0,015% en el dominio de estudio.

En cuanto a las propiedades hidrogeológicas del modelo, se considera un acuífero homogéneo, con un valor de transmisividad de 170 m²/d. Otra condición de borde considerada, corresponde a la de un pozo de bombeo, ubicado en el sector cercano a la salida del dominio, a 250 m aguas abajo de la fuente de contaminante, el caudal de extracción considerado es de 500 m³/d.

El problema de flujo se simula en régimen permanente, mientras que el modelo de transporte se simula en régimen transiente, con una duración total de 2 y 3 años según el escenario simulado.

Con respecto a la fuente de contaminante, se considera una región de 50 x 50 m ubicada aguas arriba del pozo de bombeo, cercano a la entrada del dominio. La condición de borde asociada, se define como concentración conocida, la cual varía según el escenario de simulación. La condición inicial del resto del sistema, se asume como agua limpia con 0 mg/l de concentración.

Para la modelación del transporte de la primera etapa, se deben definir los coeficientes necesarios para resolver el transporte de masa, estos corresponden a los de dispersividad longitudinal y transversal. Según Schulze-Makuch (2005), el coeficiente de dispersividad longitudinal posee una relación con la escala del modelo a considerar, para este caso en particular el valor de este parámetro varía entre 1 y 100 m aproximadamente. De esta forma se considera un valor de dispersividad longitudinal de 10 m.

Para el termino asociado a la dispersividad transversal, se considera que este parámetro corresponde a un diez por ciento de la dispersividad longitudinal (Fetter, 2001). De esta forma se adopta un valor de 1 m para la dispersividad transversal.

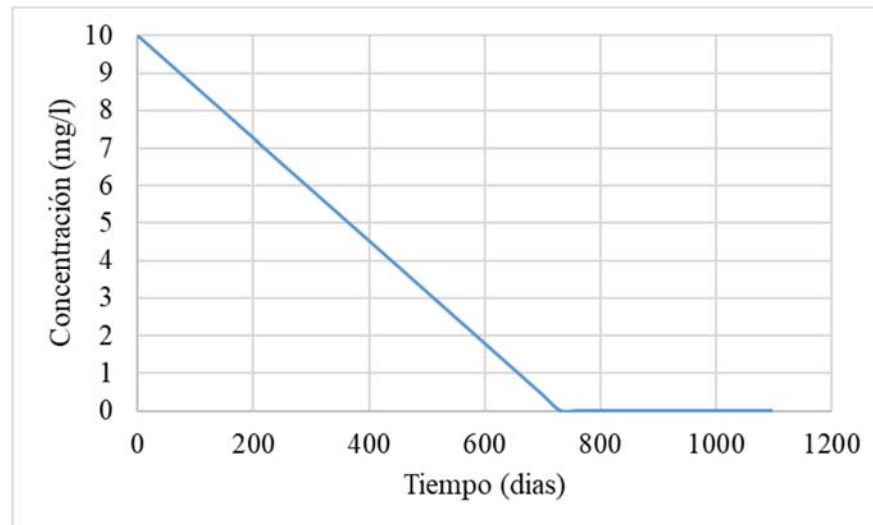
A partir de los objetivos planteados para el presente escenario, se realizan tres simulaciones para diferencias finitas y elementos finitos, en las cuales se busca analizar el efecto de un refinamiento local en la malla en los resultados y variaciones en la serie de concentración liberada por la fuente de contaminación. Los escenarios mencionados comparten los mismos parámetros de flujo y transporte, como lo son: transmisividad, porosidad, coeficiente de dispersividad longitudinal y transversal, las características específicas de cada uno se presentan en la Tabla 4-1 mientras que la Figura 4-4 se presenta la serie transiente de la concentración de entrada.

Tabla 4-1 Configuración de los modelos del caso B

Parámetro	Unidad	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tiempo de simulación transporte	d	730	730	1095
Concentración de entrada	mg/l	5	5	Serie transiente
Tamaño malla/elementos	m	10	Con refinamiento	Con refinamiento

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-4 Serie transiente de concentración de fuente de masa modelo 3



Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. Resultados principales de simulación Caso B

Uno de los principales objetivos de la simulación de este caso, corresponde al análisis de un pozo de bombeo al enfrentarse al avance de la pluma de contaminación. En la Figura 4-5 se presenta la distribución de concentración simulada para el modelo 2 para el tiempo final de dos años, comparando la solución entre los resultados calculados por elementos finitos (EF) y diferencias finitas (DF). El resto de resultados se presenta en el Anexo A.

Como se observa en la figura mencionada, se logra reproducir la extracción del pozo de bombeo, deteniendo el avance la masa de soluto en el sistema. Sin embargo, al comparar ambas soluciones, se es importante señalar que, los resultados obtenidos por el enfoque de elementos finitos, generó curvas de isoconcentración más suaves, que permiten delimitar de mejor forma la zona de efecto o el área en la cual se posee una determinada concentración.

Del mismo modo, se observa que estableciendo un umbral de 0,01 mg/l, en el caso de los elementos finitos, el pozo de bombeo contiene completamente el avance de la pluma, mientras que, en el resultado obtenido mediante diferencias finitas, muestra un efecto de dispersión hacia aguas abajo del pozo de bombeo, mismo efecto se replica hacia aguas arriba de la fuente de contaminación.

Los resultados obtenidos de aplicar un refinamiento local en el sector del pozo de bombeo y la fuente de contaminación, incrementaron la cantidad de celdas y elementos considerados en el dominio de modelación, ya sea utilizando diferencias finitas como elementos finitos, sin embargo, con respecto a los tiempos de resolución del problema, existe una gran diferencia entre ambos enfoques. Diferencias finitas se resuelve el problema de transporte en régimen transiente en aproximadamente 20 minutos, mientras que, utilizando elementos finitos, los tiempos de cálculo fueron de solo 3 minutos aproximadamente.

Del mismo modo, en la Figura 4-6 se presenta la comparación de la concentración a lo largo del eje longitudinal entre el modelo sin refinamiento y con refinamiento utilizando elementos finitos, en el sector del pozo de bombeo y en la fuente de contaminación. Como se observa en la figura, existe una diferencia en las concentraciones simuladas, entre la pluma de contaminación y la ubicación del pozo de bombeo, las diferencias varían entre 0,2 y 0,5 mg/l, siendo mayores para el modelo con refinamiento de la malla.

Es importante considerar las variaciones de resultados de concentración provocadas netamente por el refinamiento de la malla utilizada, ya que según las magnitudes relativas con las cuales se trabajan, un error de 0,3 mg/l puede significar diferencias significativas en ciertos análisis desarrollados.

A partir de estos resultados, es posible concluir que ambos enfoques de modelación presentan mejoras en la resolución del problema al aplicar un refinamiento en el sector del pozo de interés, sin embargo, en términos de la eficiencia computacional, elementos finitos posee una gran ventaja con respecto a diferencias finitas, ya que logra resolver el problema en un tiempo casi seis veces menor.

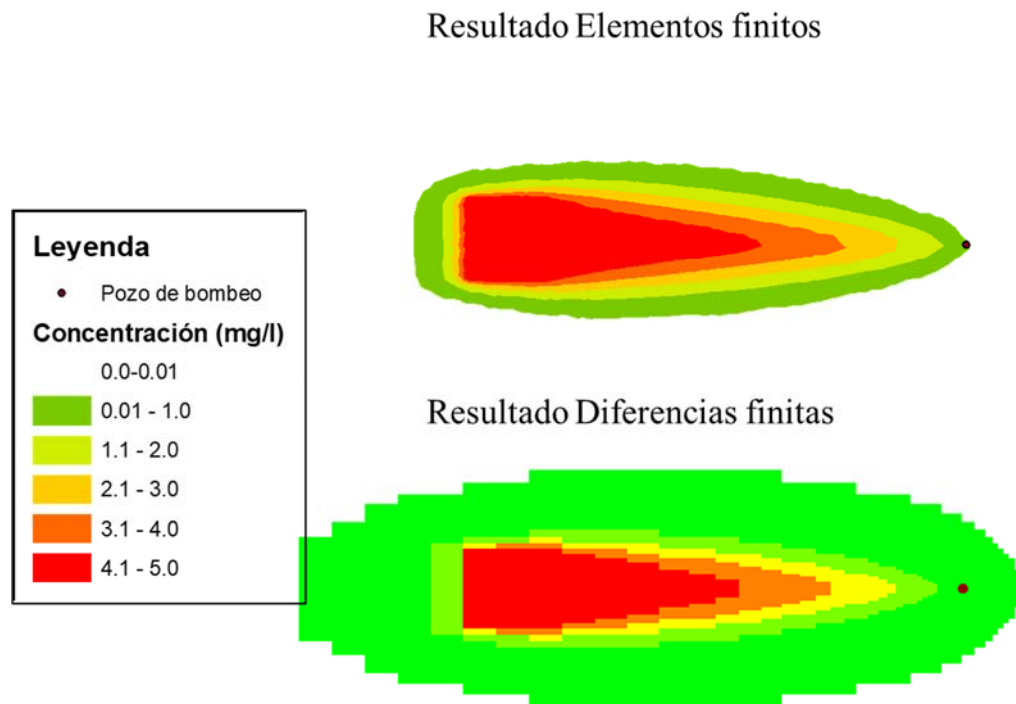
En la construcción de modelos numéricos que representan casos reales de problemas de transporte de contaminante, muchas veces es necesario contar con un mayor refinamiento en elementos específicos de interés hidrogeológico, de esta forma, es importante contar con una herramienta que permita el desarrollo de una malla detallada sin perjudicar de gran manera la eficiencia computacional utilizada para resolver el problema.

El modelo 3 tiene por objetivo analizar el efecto del ingreso de una concentración variable en el tiempo, para esto, se considera el grado de refinamiento generado en el modelo 2, pero con una reducción lineal en el tiempo de la concentración de la fuente de contaminación.

En la Figura 4-7 se presenta para distintos tiempos, la variación a lo largo del eje longitudinal por donde se encuentra el pozo de bombeo. Como se observa en la figura mencionada anteriormente, los resultados obtenidos tanto con diferencias finitas como con elementos finitos, permiten concluir que ambos enfoques logran reproducir de manera adecuada una concentración variable en la fuente de contaminación. A pesar de que se observan diferencias entre ambos enfoques, en términos generales, la evolución de la pluma de contaminación sigue el mismo comportamiento.

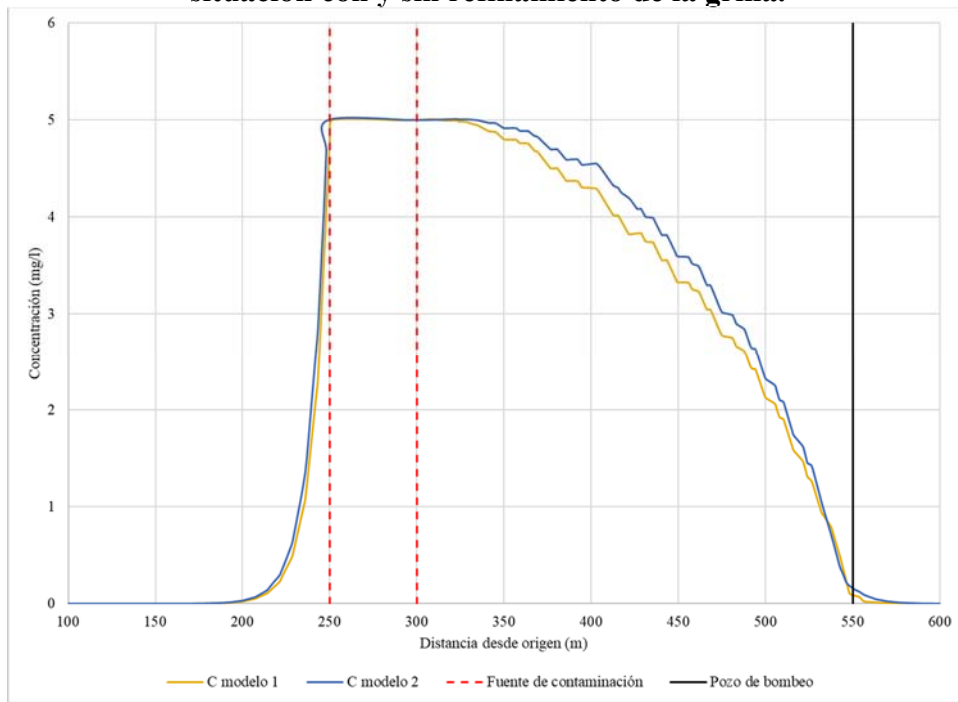
La mayor diferencia se observa para el tiempo final de simulación, en donde la serie de concentración calculada mediante diferencias finitas, se encuentra por sobre la calculada con elementos finitos cuyo resultado muestra concentraciones prácticamente nulas, al cabo de 3 años de simulación.

Figura 4-5 Avance de la pluma simulada en caso B para el modelo 1, en tiempo de 2 años, resultados de elementos finitos y diferencias finitas.



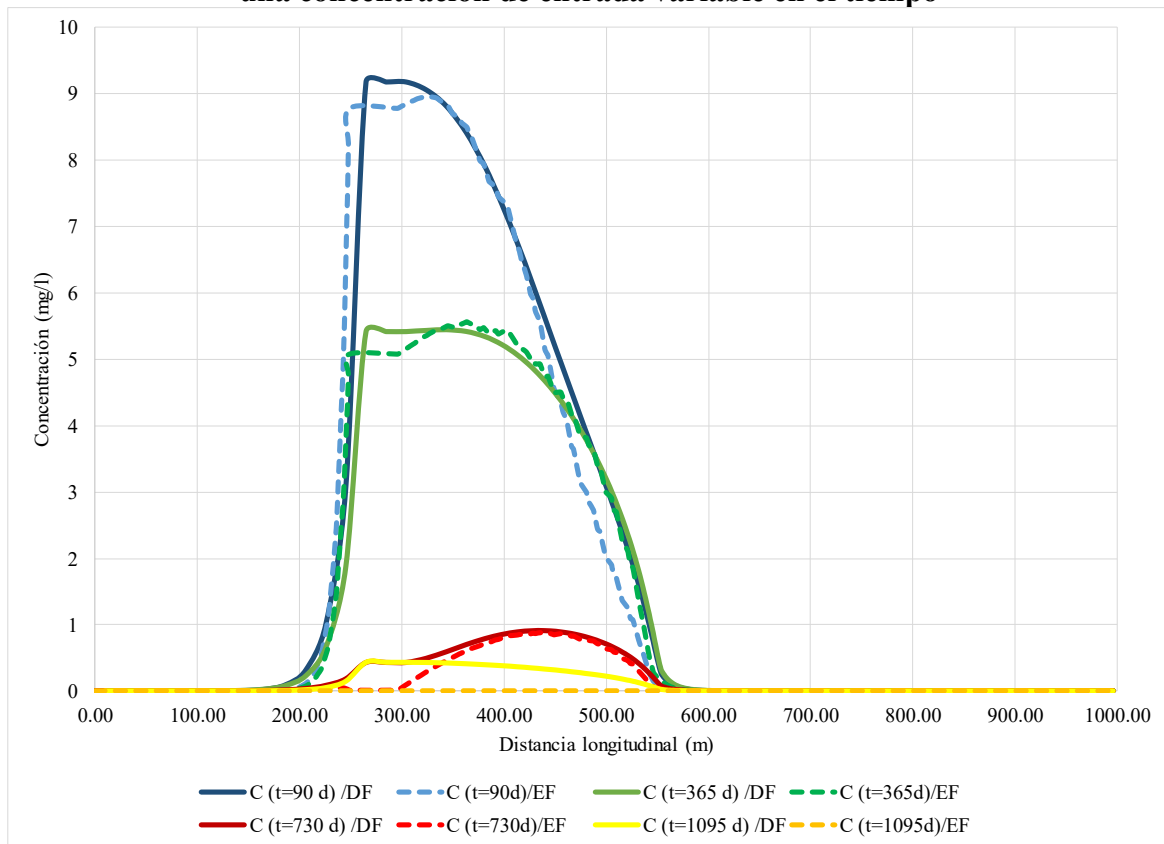
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-6 Comparación entre la concentración a lo largo del eje longitudinal para la situación con y sin refinamiento de la grilla.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-7 Resultado del comportamiento temporal de la pluma de contaminante al aplicar una concentración de entrada variable en el tiempo



Fuente: Elaboración Propia

4.4. Discusión de las Simulaciones Preliminares

A partir de las simulaciones preliminares, se puede corroborar que tanto el enfoque de modelación basado en diferencias finitas como elementos finitos, reproducen de manera adecuada el transporte de masa en un medio poroso. En términos de software, tanto GMS como FEFLOW poseen una interfaz que permite una fácil integración de elementos asociados a sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés), herramienta muy útil para poder simular sistemas con geometrías más complejas.

En términos generales, al utilizar el modelo MODFLOW y MT3D de GMS, se debe resolver el problema de flujo para luego modelar el transporte de masa. Al realizar cambios en las componentes del transporte, no es necesario simular el flujo nuevamente. Por otro lado, al realizar la simulación con elementos finitos en FEFLOW, tanto el flujo como el transporte son simulados simultáneamente, y ante cualquier modificación de parámetros, el modelo es resuelto por completo nuevamente.

Según los resultados del escenario del caso A, se concluye que, si bien ambos enfoques resuelven de manera adecuada el problema de transporte unidimensional, la solución obtenida mediante el enfoque de elementos finitos posee una mejor correlación con la solución analítica del problema.

A partir de los resultados de las simulaciones del caso “B”, para ambos modelos análogos en términos geométricos, la representación de los elementos mediante prismas triangulares en el enfoque de elementos finitos, permite obtener soluciones de concentración que se pueden ajustar de mejor forma al comportamiento real del sistema, representando de manera más adecuada la captación de soluto de parte del pozo de bombeo.

La solución calculada por las diferencias finitas, presentan una mayor dispersión, de manera de que el efecto expansivo del soluto, abarca una mayor superficie espacial, específicamente en el sector aguas abajo del pozo de bombeo, y aguas arriba de la fuente de contaminación.

En términos computacionales, es importante señalar que, para el método de diferencias finitas al aplicar un refinamiento importante en algunos elementos, los tiempos de simulación aumentaron considerablemente, esto se debe a que este enfoque no permite realizar un detalle localizado, de manera que se refinan todas las celdas asociadas a la misma fila y columna de interés, de manera que la cantidad de celdas se incrementa en gran cantidad, haciendo poco eficiente la modelación numérica en términos de recursos computacionales. Cuantitativamente, los tiempos de simulación para diferencias finitas alcanzan cerca de 20 minutos, mientras que, con elementos finitos, en aproximadamente tres minutos se resuelve el modelo de transporte en régimen transiente con refinamiento local en los pozos de bombeo.

Los resultados al aplicar un refinamiento en zonas de interés, reproducen valores más precisos, de manera de que poseen una menor fuente de error, éste concepto es clave en la selección del método de resolución para el modelo de transporte, ya que una malla muy gruesa genera problemas de convergencia en la solución de transporte, y en sistemas con grandes efectos advectivos como el producido por pozos de bombeo, puede generar un mayor error y dispersión numérica en las soluciones calculadas.

En síntesis, ambos enfoques poseen muchas capacidades y características que permiten representar problemas de transporte de masa en sistema hidrogeológicos simples. Pero al querer aplicarlo en un caso real, en donde se requiere tener una mayor precisión tanto en flujo como en concentraciones simuladas, aplicar un refinamiento local en puntos de interés es de suma importancia, de manera de que los elementos finitos generan una ventaja con respecto a las diferencias finitas. Del mismo

modo, las herramientas de mallado y caracterización mediante elementos prismáticos triangulares de los elementos finitos, generan una mayor flexibilidad al trabajar con geometrías o topografías complejas, que es el caso de la gran mayoría de los problemas de casos reales.

Por lo anteriormente indicado, en las secciones siguientes se utiliza el enfoque de elementos finitos, mediante el software FEFLOW en su versión 7.1.

5. APLICACIÓN A CASO REAL

5.1. Aspectos Generales

El presente capítulo tiene por objetivo la selección de un caso real para aplicar un modelo hidrogeológico de manera de analizar en profundidad los sistemas de remediación implementados, y como estos funcionan para lograr una contención del avance de los contaminantes, como también analizar el efecto de la limpieza y restauración del sistema acuífero. Es importante señalar, que la información y análisis presentados en este trabajo de tesis, corresponden a una interpretación personal de los datos, y no necesariamente refleja la situación actual del sistema analizado.

A partir de antecedentes públicos disponibles tanto de la DGA, SEIA, SMA, SERNAGEOMIN, literatura pertinente y otros supuestos, se construye un modelo conceptual que refleje una situación puntual en base a los datos recopilados, de manera de representar de forma adecuada el comportamiento hidrogeológico de un caso real, y a partir de este, construir un modelo numérico para realizar un análisis cuantitativo del flujo y transporte del acuífero.

El software y código de modelación que se utiliza, corresponde a FEFLOW basado en elementos finitos, el cual se escoge en base a los resultados obtenidos en las simulaciones preliminares desarrolladas en el capítulo anterior.

El objetivo de la construcción de un modelo hidrogeológico en este sector, es principalmente poder contar con una herramienta que represente adecuadamente el flujo subterráneo y además pueda simular el transporte de masa. De esta forma, se desarrollan distintos escenarios para evaluar el funcionamiento del sistema de bombeo e inyección para la contención y remediación de la pluma de contaminante.

5.2. Selección de Caso Real

A partir de la revisión de información pública disponible, MYMA (2007) en el documento de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del Proyecto de Tratamiento de aguas de Mina La Coipa, asociado a la RCA n°171, se describe la problemática ambiental del transporte de una pluma de mercurio a lo largo de La quebrada La Coipa.

La Mina La Coipa, es operada por la Compañía Minera Mantos de Oro, en esta se realiza la extracción de minerales a través del método de rajo abierto y los minerales son beneficiados mediante el proceso de cianuración por agitación. La Mina se encuentra ubicada en la Región de Atacama, a 140 km al noroeste de la ciudad de Copiapó. En la DIA del proyecto (MYMA, 2007), se señala que los relaves generados son filtrados y dispuestos en un depósito de relaves que se encuentra ubicado en una quebrada sin nombre en el flanco poniente del Cerro Pedregoso, al norte de la Quebrada La Coipa.

A mediados del año 1994 se detectaron trazas de mercurio en las aguas subterráneas de la Quebrada La Coipa, este metal es considerado de alto riesgo para la salud humana y a partir de esto, la compañía ha realizado diversas actividades con el objetivo de eliminar el mercurio presente en el agua. Uno de los sistemas implementados en el sector, corresponde a una serie de pozos de extracción que captan agua contaminada, la cual es tratada y devuelta con una calidad de línea base al acuífero.

A partir de estos antecedentes, surge la motivación de representar el sistema acuífero de la quebrada La Coipa, de manera de analizar tanto el movimiento de la pluma de mercurio, como también el funcionamiento del sistema de remediación que actualmente opera en el sector.

5.3. Antecedentes Generales de la Zona de Estudio

La quebrada La Coipa se ubica en la cordillera de Domeyko, en la III Región de Atacama a 140 km aproximadamente al noreste de la ciudad de Copiapó. En la Figura 5-1 se presenta la ubicación espacial de la quebrada en estudio.

La cuenca hidrográfica de esta quebrada posee un área total de 97 km² aproximadamente, con una altitud media de 4155 msnm, variando entre una elevación mínima de 3321 msnm y alcanzando un máximo de 4847 msnm. Debido a las alturas en donde se encuentra inmersa la quebrada La Coipa, posee características de una cuenca Nivo-pluvial, en donde las precipitaciones solidas se dan en la parte alta de la cuenca, y debido a los deshielos se generan escurrimientos aguas abajo.

En la zona de estudio, el drenaje principal, corresponde a la quebrada La Coipa, la cual no presenta escurrimientos superficiales debido a las características climáticas y de suelo de la zona, además de las intervenciones en forma de bocatomas instaladas aguas arriba. Hacia aguas abajo, ésta confluye con la quebrada Codoceo, para finalmente desembocar en la quebrada Paipote e incorporarse a la cuenca del río Copiapó.

5.3.1. Marco geológico local:

Con respecto a la geomorfología, la quebrada la Coipa se ubica en el Norte Grande de Chile, en el borde occidental del Altiplano de Copiapó. En particular, se ubica en el extremo norte de la Franja de Maricunga, que es en donde se presentan los principales depósitos de oro y plata descubiertos en la región.

La geología en el sector central, donde se desarrolla quebrada La Coipa cerca de la confluencia con la quebrada Codoceo, está dominada por sedimentos no consolidados, presentándose un relleno aluvial y coluvial, los cuales son los de mayor importancia hidrogeológica. Por otra parte, el basamento y los afloramientos en las partes altas de la zona exponen rocas del Triásico al Mioceno Medio, se pueden observar afloramientos de rocas sedimentarias de la Formación Quebrada Monardes (Kqm). En la Figura 5-2, se presenta un mapa geológico de la zona de confluencia de las quebradas Codoceo y La Coipa, el cual ha sido elaborado a partir del estudio de SERNAGEOMIN (2012).

A partir de estas unidades geológicas identificadas por SERNAGEOMIN (2012), a continuación, se presenta una breve descripción de estas, las cuales pueden ser agrupadas en unidades no consolidadas y unidades de roca.

Unidades no consolidadas:

- Depósitos coluviales (PIHac): Estos depósitos corresponden a mezclas de fragmentos rocosos, predominantemente clastos soportados. En la quebrada La Coipa, los procesos coluviales representan un aporte menor al relleno sedimentario.
- Depósitos aluviales y fluviales (PIHa): Esta unidad se compone por gravas y gravillas arenosas, con abundante contenido de arenas, fragmentos rocosos, vinculados a el transporte fluvial. Esta unidad domina en el relleno sedimentario que define el sistema acuífero de la quebrada La Coipa.

Unidad de roca en la parte alta

- Formación quebrada Monardes (Kqm): Corresponden a areniscas rojas de 300 a 400 m de espesor, que afloran en el sector nor-oeste de la quebrada La Coipa ante la junta con la

quebrada Codoceo. Las areniscas, se encuentran muy bien estratificadas, con intercalaciones de lutitas y conglomerados.

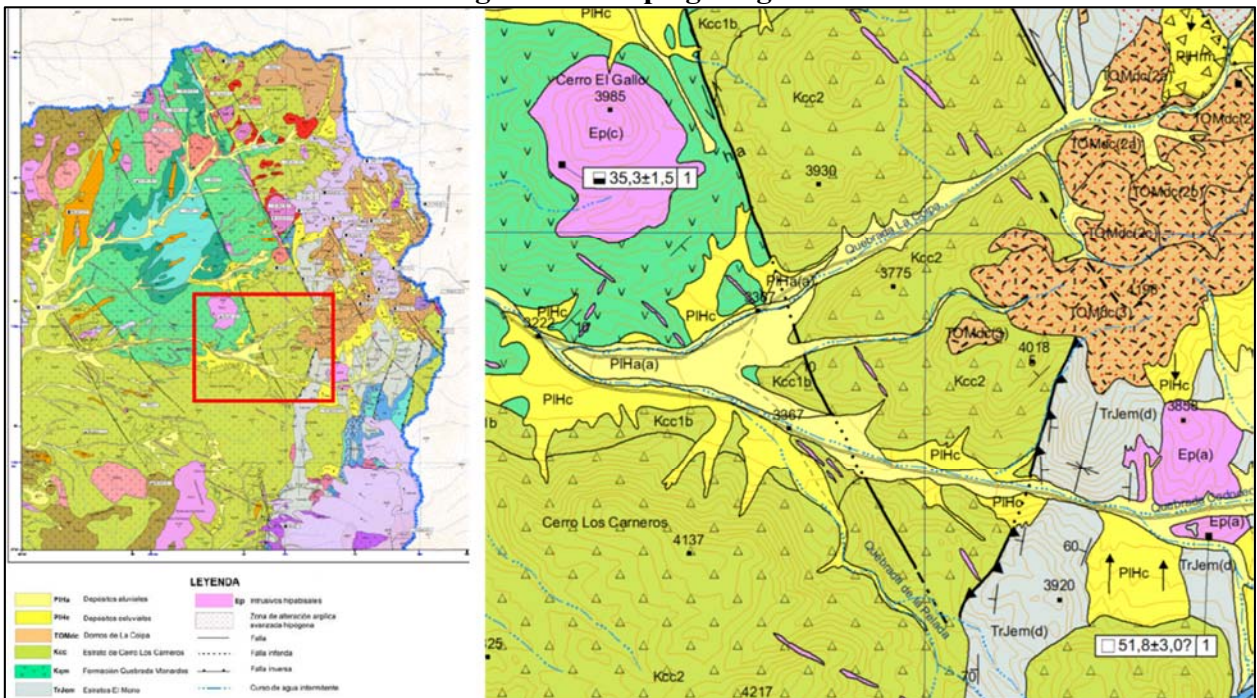
- Estrato de Cerro Los Carneros (Kcc): Corresponden a unidades del cretácico superior, se componen de brechas y conglomerados verdosos, con fragmentos volcánicos, con intercalaciones de lavas andesíticas. En las zonas más someras de estas formaciones, se compone de lavas dacíticas de color gris rojizo, con intercalaciones de brechas piroclásticas y tobas. En el sector de la quebrada La Coipa, esta formación subyace la gran parte de los depósitos coluviales, aluviales y fluviales que conforman la unidad del relleno sedimentario.
- Domos de La Coipa (TOMdc): Corresponde a un complejo de domos múltiples y productos piroclásticos asociados y afectados por alteración hidrotermal, que hospedan la mineralización epitermal de plata y oro del distrito de La Coipa. Este complejo, se ubica en el sector nor-este de la cuenca. Los productos volcánicos de este emplazamiento del conjunto de domos riolíticos y dacíticos y brechas piroclásticas y tobas de lapilli gruesas.
- Estratos El Mono (TrJem): Corresponde a una secuencia sedimentaria detrítica de hasta 2000 m de espesor. Los niveles intermedios corresponden a una sección de más de 1.300 m, de lutitas carbonosas negras laminadas, ricas en materia orgánica, con intercalaciones de areniscas finas con laminación paralela y gradación normal, que se exponen en la zona de la mina La Coipa y portezuelo Codoceo. Los niveles superiores de los Estratos El Mono, están formados, en la zona de las quebradas Codoceo, La Coipa y La Pelada, por 800 y 1.200 m, de conglomerados finos y areniscas cuarcíferas de color pardo amarillento
- Intrusivos hipabísales (Ep): Intrusivos menores que se concentran en la zona norte de la cuenca, relacionados con fallas nor-oeste.

Figura 5-1 Ubicación de la quebrada la Coipa



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2 Mapa geológico



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2012)

5.3.2. Marco hidrogeológico local:

De acuerdo a estudios hidrogeológicos realizados en el sector de interés, el acuífero posee características de libre no confinado, que escurre por sedimentos cuaternarios. En la parte superior se alcanzan potencias de 45 m aproximadamente, mientras que en la parte inferior estas profundidades llegan a los 120 m (MYMA, 2007).

Dentro de las unidades hidrogeológicas de la quebrada La Coipa, se destaca principalmente los sedimentos no consolidados. Estas corresponden a unidades conformadas por gravas, gravas arenosas y arenas con variable contenido de finos.

A partir de los mapas hidrogeológicos interpretados por SERNAGEOMIN (2012), se identifica un sistema acuífero definido por la quebrada La Coipa. En términos generales, el sistema acuífero corresponde a una menor superficie con respecto al resto de unidades presentes en la cuenca, con un ancho que varía entre 300 m en la zona alta, llegando hasta casi 900 m en el sector de la confluencia a la quebrada Codoceo.

El sistema acuífero se encuentra rodeado por un sistema fisurado, contenido entre los sistemas de fallas paralelas que cruzan la quebrada La Coipa. En la Figura 5-3 se presenta el mapa hidrogeológico que define el sistema acuífero de la quebrada La Coipa en el área de estudio, elaborado a partir de lo presentado en SERNAGEOMIN (2012).

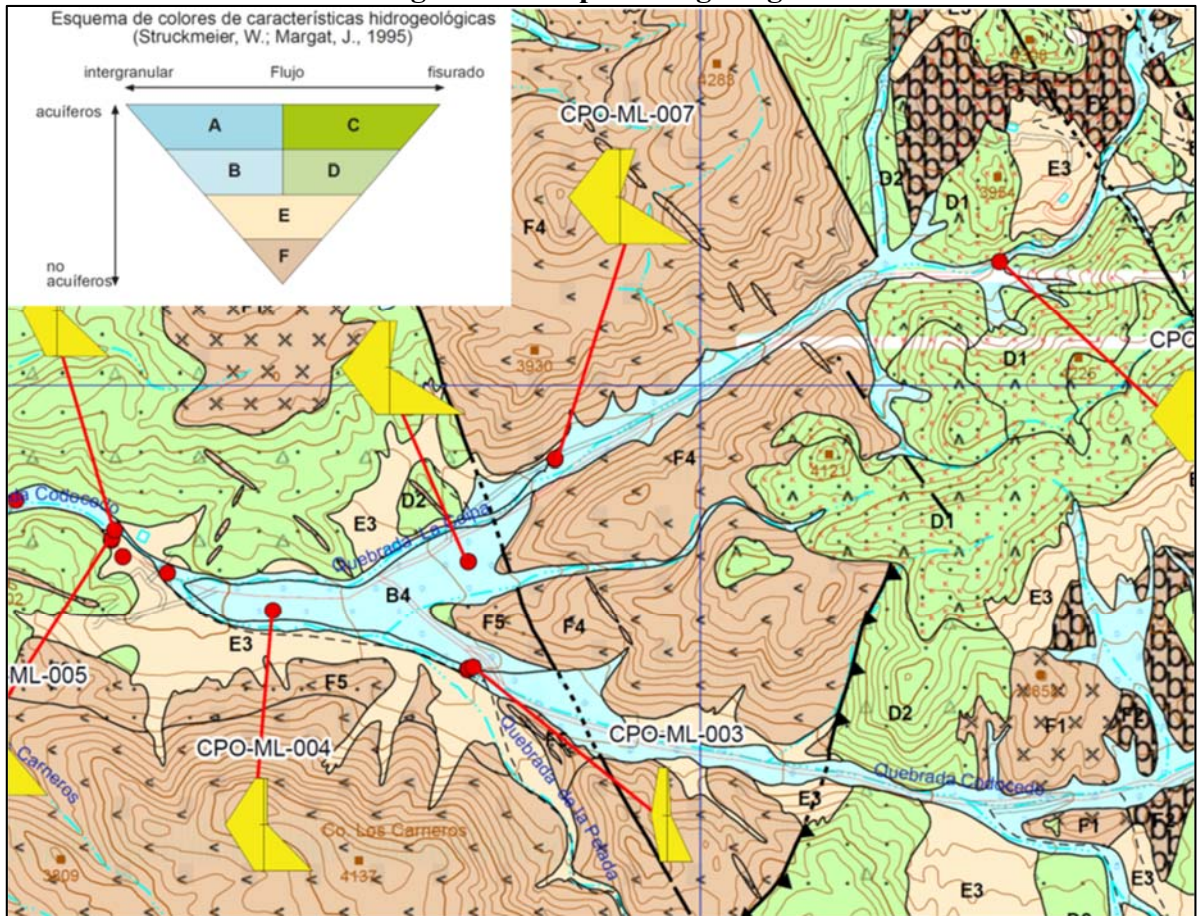
Debido a la composición de las unidades hidrogeológicas del sistema, para los materiales no consolidados se establecen rangos de conductividad hidráulica a partir de la bibliografía. En la Tabla 5-1 se presentan los rangos de este parámetro para sedimentos no consolidados. En el caso particular del acuífero que define la quebrada La Coipa, el rango de permeabilidades esperadas varía en un rango entre 0,01 y 86 m/d.

Tabla 5-1. Rangos de conductividad hidráulica para sedimentos no consolidados

Material	Conductividad hidráulica (cm/s)		Conductividad hidráulica (m/d)	
Arcilla	1,00E-09	1,00E-06	8,64E-07	0,001
Limo, arenas limosas, arcillas arenosas, till	1,00E-06	1,00E-04	0,000864	0,086
Limos arenosos, arenas finas	1,00E-05	1,00E-03	0,00864	0,864
Arenas bien graduadas, material glaciario	1,00E-03	1,00E-01	0,864	86
Gravas bien distribuidas	1,00E-02	1,00E+00	8,64	864

Fuente: Elaboración Propia a partir de Fetter (2001)

Figura 5-3 Mapa hidrogeológico



Fuente: Elaborado a partir de SERNAGEOMIN (2012)

5.3.3. Sistema de remediación implementado en quebrada La Coipa

De la declaración de impacto ambiental (MYMA 2007) del proyecto de Tratamiento de Aguas, se identifica un problema de contaminación de aguas subterráneas en este sector, particularmente se señala que los minerales existentes en el área presentan un contenido de mercurio (Hg) del orden de 30 gr/ton de forma natural. En el año 1994 se detectó trazas de este metal en las aguas subterráneas de la Quebrada La Coipa, a partir de ese momento se han realizado diversas actividades con el objetivo de eliminar el mercurio presente en el agua.

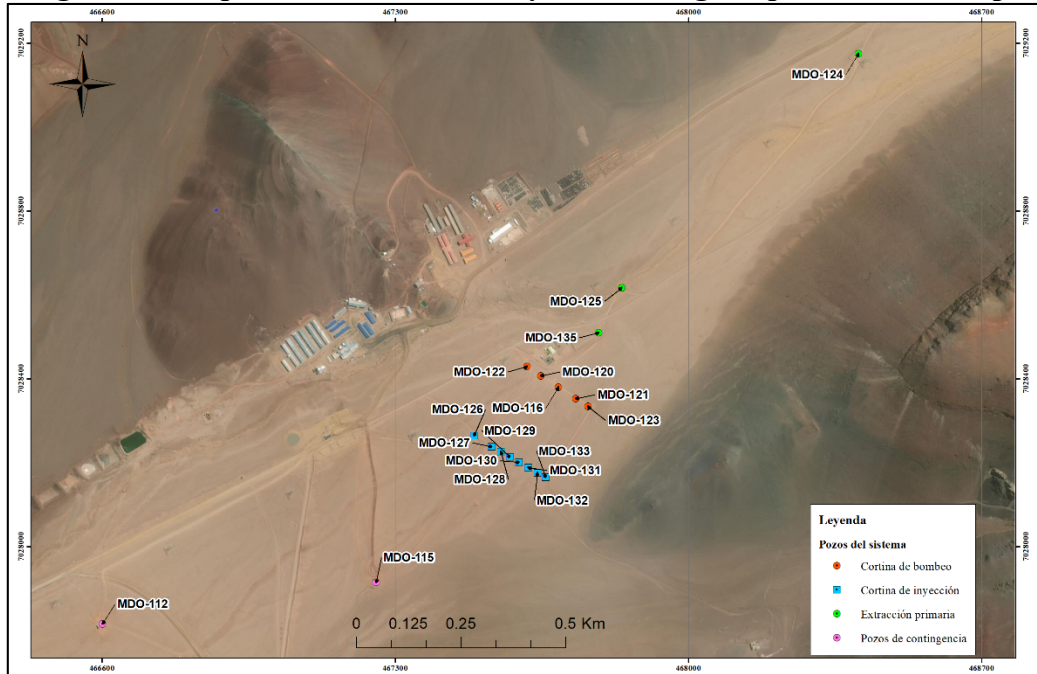
El sistema de remediación implementado en la quebrada La Coipa, está constituido por una secuencia de procesos los cuales tienen por objetivo descontaminar las aguas subterráneas con presencia de mercurio. En la Figura 5-4 se presenta un esquema general del sistema instalado en la quebrada La Coipa. En particular, en el presente trabajo de tesis se analizará la configuración del sistema de bombeo e inyección, denominado como Fase III del proyecto de “Tratamiento de aguas” (MYMA, 2007).

Los procesos que componen el sistema denominado como Fase III descritos en la RCA n°171 del 3 de agosto de 2007, del proyecto “Tratamiento de Agua Quebrada La Coipa” (MYMA, 2007) corresponden a:

- Captación y tratamiento primario: este sistema corresponde a un sistema de bombeo para captar las aguas subterráneas con mercurio. Se compone por los pozos MDO-124, MDO-125 y MDO-135 (captación superior) y MDO-122, MDO-120, MDO-116, MDO-121 y MDO-123 (captación inferior). Las concentraciones promedio de mercurio para los pozos de la captación superior corresponden a 2000 ppb, mientras que para los pozos de la captación inferior la concentración promedio de mercurio es de 1300 ppb.
- Las aguas captadas de los pozos MDO-121, MDO-122 y MDO-123 son conducidas directamente a la planta de tratamiento. Por otro lado, los pozos MDO-124, MDO-125, MDO-135, MDO-116 y MDO-120 poseen columnas primarias cargadas con resinas de intercambio iónico.
- Planta de tratamiento de aguas: Las aguas que provienen del tratamiento primario y de los pozos de bombeo, se conducen hasta el estanque n°1, en donde son almacenadas para luego ser enviadas a la planta abatidora, las que alimentan dos columnas de mercurio cargadas con resina. Finalmente, esta descarga se realiza hacia el Estanque N°2 donde se almacena el agua tratada.
- Inyección de aguas tratadas al acuífero: El agua tratada acumulada en el estanque N°2 (Figura 5-5), que presenta concentraciones inferiores a 1 ppb de mercurio, se inyectan directamente al acuífero a partir de pozos de inyección.

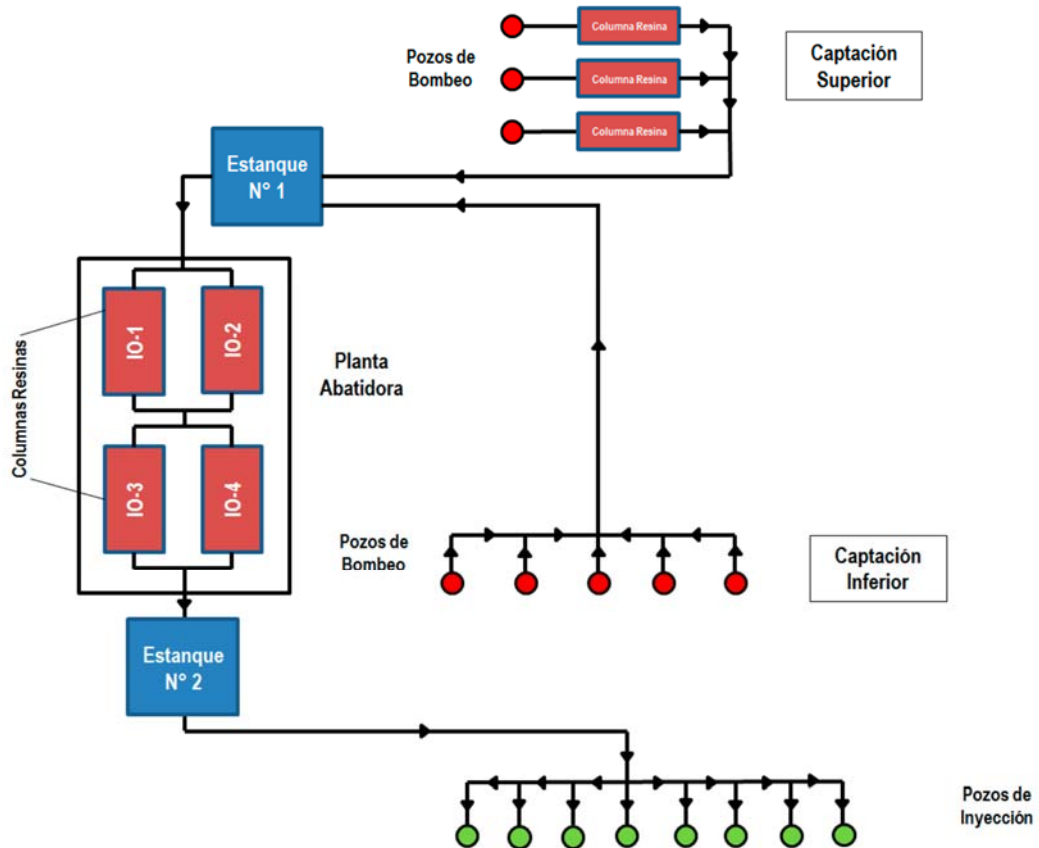
Esta línea de inyección genera un gradiente hidráulico inverso en el sector de interés del acuífero, formando así una barrera de contención hidráulica que impide el desplazamiento de la pluma de mercurio hacia aguas abajo.

Figura 5-4 Esquema de sistema de inyección de agua, quebrada La Coipa



Fuente: Elaboración Propia a partir de SMA (2018)

Figura 5-5 Esquema de la operación del sistema de remediación de La Coipa



Fuente: SMA (2018), Anexo 8 Plan de Cumplimiento

5.3.4. Marco conceptual de balance hídrico del dominio hidrogeológico:

Dentro del dominio hidrogeológico de estudio, se considera una serie de entradas y salidas de caudal, las cuales se destacan: el flujo subterráneo de entrada como principal fuente de recarga, y el caudal inyectado por los pozos de inyección. Por otro lado, la principal salida del sistema, corresponde a las extracciones de los pozos de bombeo.

El flujo pasante o caudal de entrada del sistema, se estima a partir de la información constructiva y de la prueba de bombeo asociada al pozo extractivo MDO-124, ya que, éste corresponde al pozo ubicado más cerca del inicio del modelo, cuyos datos fueron obtenidos del catastro de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas de la DGA (código expediente ND-0302-1315).

De la reinterpretación de la prueba de bombeo señalada, se estima que el valor de conductividad hidráulica en la zona del pozo es de 2,5 m/d en términos promedios, mientras que el espesor saturado se cuantifica en 30 m, del mismo modo se estima un gradiente hidráulico de 4%, de esta forma, al aplicar la fórmula de Darcy, se obtiene que el caudal pasante aproximado por la sección es de 8,5 l/s.

Del mismo modo, a partir de la información disponible del resto de pozos de bombeo e inyección del sector, se cuantifica que en total se extrae un caudal de 10,84 l/s, del mismo modo que el caudal de inyección debe ser el igual al de extracción. En la Tabla 5-2 se presenta un resumen de los caudales de bombeo e inyección de cada pozo presente en el dominio hidrogeológico.

Tabla 5-2. Caudales de bombeo e inyección en los pozos ubicados en el dominio hidrogeológico

Nombre pozo	Tipo de pozo	Caudal L/s
MDO-124	Bombeo	3,00
MDO-125	Bombeo	1,13
MDO-135	Bombeo	0,79
MDO-116	Cortina de bombeo	1,77
MDO-120	Cortina de bombeo	1,87
MDO-121	Cortina de bombeo	1,12
MDO-122	Cortina de bombeo	1,10
MDO-123	Cortina de bombeo	0,05
Total extracción		10,84
MDO-126	Inyección	0,15
MDO-127	Inyección	0,28
MDO-128	Inyección	1,02
MDO-129	Inyección	3,32
MDO-130	Inyección	2,19
MDO-131	Inyección	2,13
MDO-132	Inyección	1,09
MDO-133	Inyección	0,67
Inyección total		10,84

Fuente: Elaboración Propia

5.4. Modelación Numérica del Transporte de Contaminante en La Coipa

A partir de la conceptualización del sistema realizada en el capítulo anterior, se elabora un modelo numérico del acuífero de la Quebrada La Coipa. Para desarrollar la modelación propuesta, se utiliza el software FEFLOW en su versión 7.1.

5.4.1. Geometría y dominio del modelo numérico

El dominio de modelación se determina de manera de representar el acuífero de la quebrada la Coipa, con énfasis en el sector del sistema de bombeo e inyección implementado. La extensión de este, se determina en función del modelo hidrogeológico conceptual establecido, modelando así la zona del relleno sedimentario de la quebrada La Coipa, a partir de la definición realizada por SERNAGEOMIN (2012). Los límites laterales, se establecen a partir de la geología, definidos por el contacto entre el relleno y la roca. El dominio de modelación comprende un área total de 3,57 Km².

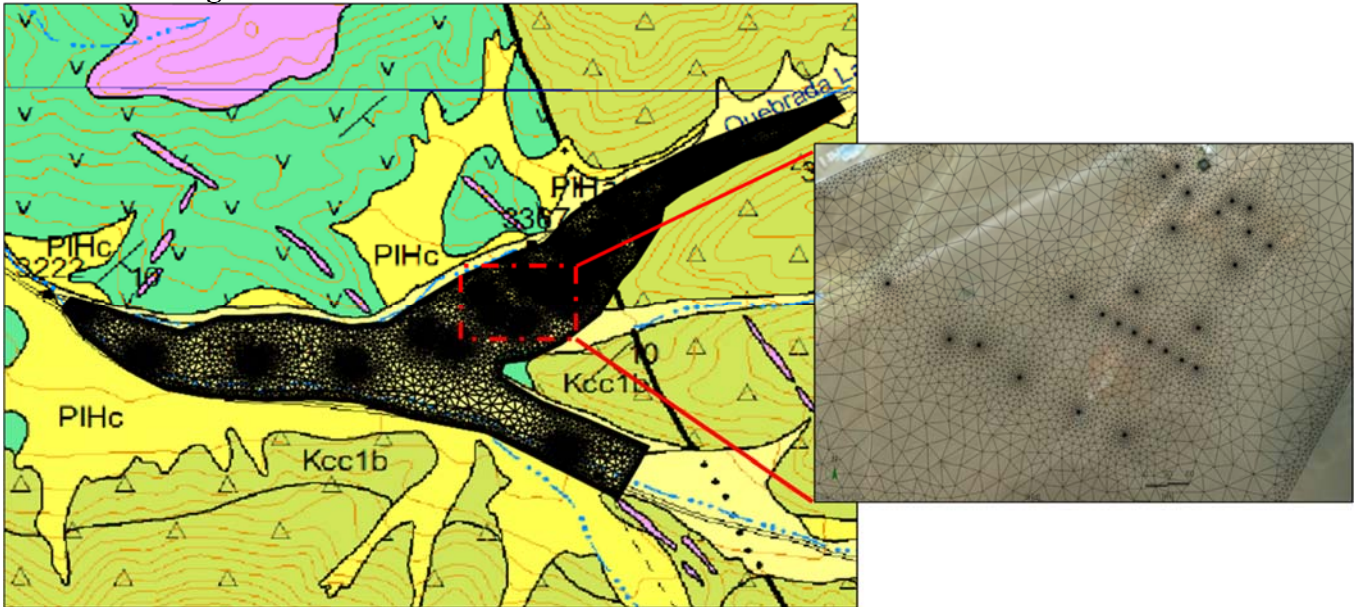
El mallado del dominio del modelo numérico se realiza con elementos de prisma triangular, en donde el tamaño de cada uno varía en el rango entre 0,2 y 80 m. El total de elementos del modelo es de 85396, con 67149 nodos.

Debido a que el objetivo principal del presente estudio, consiste en el análisis de detalle y precisión el efecto del bombeo e inyección, se realiza un refinamiento de la malla en todos los pozos del proyecto, tanto de extracción, inyección y observación, en la proximidad de estos puntos es en donde se alcanzan elementos con diámetros mínimos de 0,2 m, mientras que en las zonas alejadas se alcanzan hasta 80 m.

Es importante señalar, de manera de asegurar una correcta convergencia y estabilidad del desarrollo matemático del modelo, se debe contar con un tamaño adecuado de los elementos. De esta forma, luego de generada la malla con las condiciones mencionadas anteriormente, se realiza un refinamiento en los límites exteriores del modelo, como también en zonas marcadas por el avance de la pluma de contaminante.

En la Figura 5-6 se presenta un esquema en planta de la malla utilizada con un acercamiento en la zona de interés en donde se puede apreciar el refinamiento realizado.

Figura 5-6 Malla considerada en dominio numérico de modelación



Fuente: Elaboración Propia

5.4.2. Condiciones de borde

Definida la geometría del modelo numérico, es necesario definir las condiciones de borde de manera de representar lo establecido en el modelo conceptual. Estas se clasifican en dos categorías, la primera consiste en aquellas condiciones impuestas y, en segundo lugar, las condiciones calculadas por el modelo.

Condiciones de bordes impuestas al modelo:

Pozos de inyección:

Flujo de ingreso al acuífero: Aguas arriba del acuífero, en la sección de entrada, se ingresó una condición de borde de flujo conocido de tipo Neuman, cuantificado en 8,5 l/s.

Cortina de inyección, sistema bombeo y tratamiento: En el sistema de bombeo y tratamiento, aguas abajo se encuentra una cortina de pozos que inyecta agua limpia al acuífero. En total corresponden a 8 pozos, que para el caso base de simulación inyectan un total de 10,84 l/s con una concentración de 0,5 ppb cada uno.

Pozos de bombeo:

Sistema de bombeo: En el sector donde se encuentra el sistema de bombeo y tratamiento, se cuenta con 8 pozos de extracción, los cuales bombean un total de 10,84 l/s. Aguas abajo de la cortina de inyección, se encuentran 2 pozos de extracción adicionales, que corresponden a los pozos de contingencia del proyecto, los cuales bombean en conjunto 1,44 l/s.

Condiciones de bordes calculadas por el modelo:

Altura conocida:

Flujo de salida del acuífero: En la salida del acuífero se establece una condición de borde de primer orden (Dirichlet) obtenida a partir de la estimación de equipotenciales del sistema, esta se fija en 3157 msnm.

Es importante mencionar, que esta condición de borde se encuentra lo suficientemente alejada del sistema de bombeo y tratamiento, de manera que no afecta la modelación en la zona de interés.

Condiciones de borde de transporte:

Con respecto a las condiciones de borde del modelo de transporte, estas se presentan mediante una carga constante en la entrada del acuífero, su magnitud y serie temporal dependerá del caso en análisis, además se impuso una concentración de 0,5 ppb (0,0005 mg/l) en los pozos de inyección de manera de representar el ingreso de agua limpia o de condición de línea base, ya tratada al sistema.

En la Figura 5-7 se presenta de manera esquemática las condiciones de borde impuestas en el modelo numérico.

Figura 5-7 Representación de las condiciones de borde del modelo numérico



Fuente: Elaboración Propia

5.4.3. Calibración del modelo de flujo

Asignadas las condiciones de borde, es necesario resolver el modelo de flujo del acuífero. Para lograr lo anterior, se debe asignar el parámetro hidrogeológico de conductividad hidráulica en el dominio de estudio. Este parámetro se ajusta de manera de calibrar el modelo numérico y así, obtener una correlación adecuada entre los niveles simulados y observados, otro de los objetivos de esta etapa consiste en lograr reproducir el gradiente inverso en el sector de la cortina de pozos de bombeo e inyección.

Este proceso fue realizado utilizando dos técnicas de calibración, en primer lugar, se realiza un ajuste automático de los parámetros, mediante la extensión FePEST (Diersch, 2013) de FEFLOW. Este paquete resuelve un problema de optimización en el que el resultado de salida consiste en aquellos valores de conductividad hidráulica que minimicen el error entre los valores observados con los simulados por el modelo.

A partir de este resultado, se ajustan algunas zonas del acuífero de forma manual, específicamente en el sector del gradiente hidráulico inverso y en algunas zonas cercanas a pozos de bombeo, de manera de reproducir adecuadamente las concentraciones de mercurio registradas en cada pozo. En la Figura 5-8 se presenta la configuración final de conductividades hidráulicas.

La asignación de valores de conductividad hidráulica sigue una estrecha relación con lo presentado en el acápite 5.1, en particular con lo presentado en la Tabla 5-1 en donde se señalan los rangos de este parámetro a partir de lo establecido en la literatura.

Con respecto a los resultados estadísticos del proceso de calibración, en la Figura 5-9 se presenta el ajuste logrado entre los valores de nivel simulados versus los observados. Como se ilustra en la gráfica mencionada, los valores se encuentran alineados en torno a la recta de 45° indicando el buen ajuste de niveles logrado. En términos numéricos, en la misma Figura 5-9 se presentan los principales estadígrafos obtenidos de la calibración, en donde se destaca un error cuadrático medio normalizado (RMSN) de un 1,2%, del mismo modo se obtuvo un error medio absoluto normalizado (MAEN) de 0,9%.

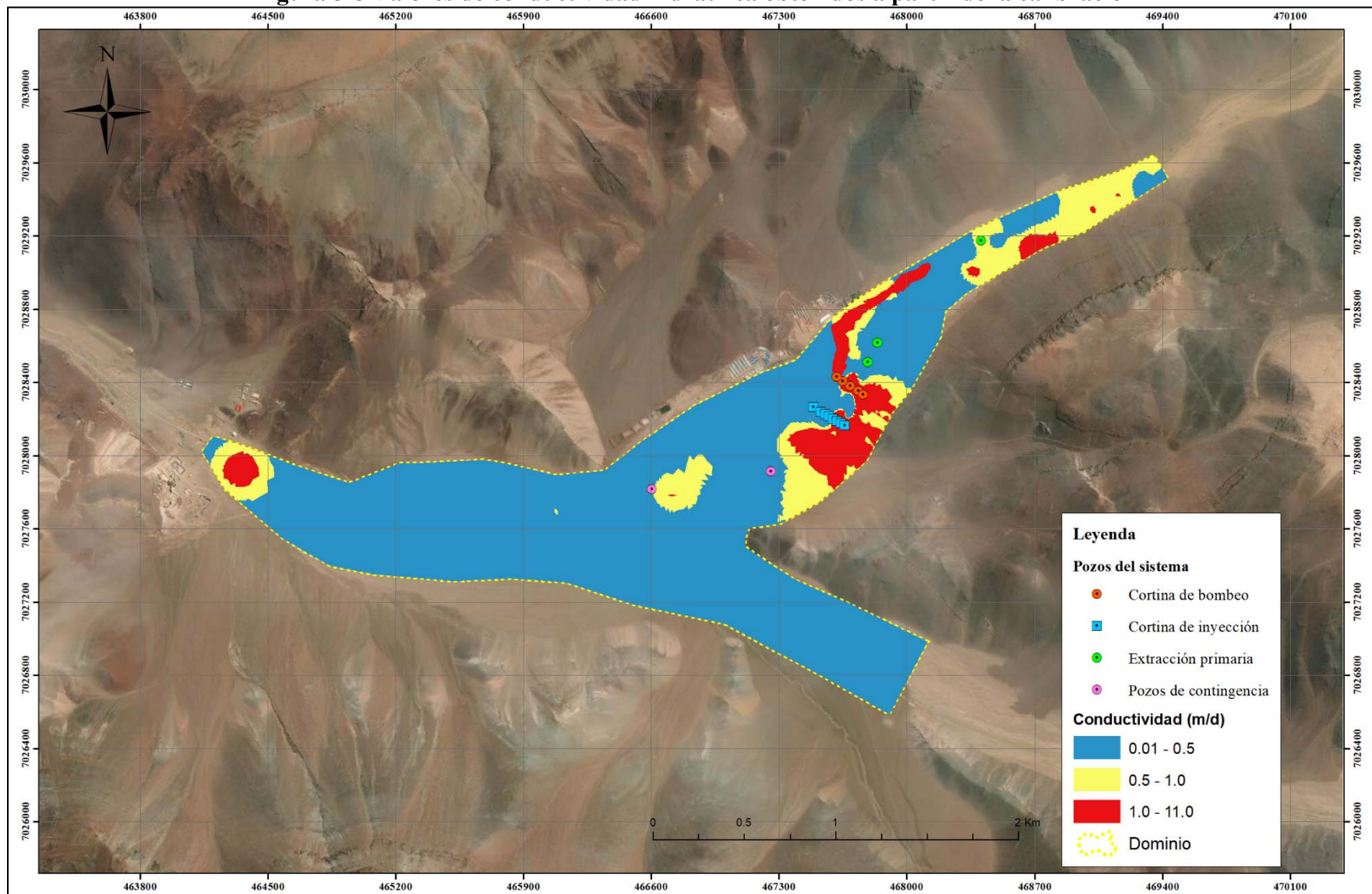
A partir de los resultados de la calibración del modelo de flujo en régimen permanente realizada, se puede concluir que los valores se ajustan correctamente a lo observado en el sistema real.

En la Figura 5-10 se presenta el resultado de mapas de equipotenciales en todo el dominio del modelo hidrogeológico, del mismo modo se presenta un acercamiento en la zona de interés en donde se realiza el bombeo y tratamiento del sistema de remediación de la quebrada La Coipa.

Como se observa en la figura anterior, las equipotenciales se ven influenciadas por el bombeo de los pozos de extracción, y debido a la inyección de caudal se observa el gradiente hidráulico inverso, en el sector resaltado en el mapa respectivo.

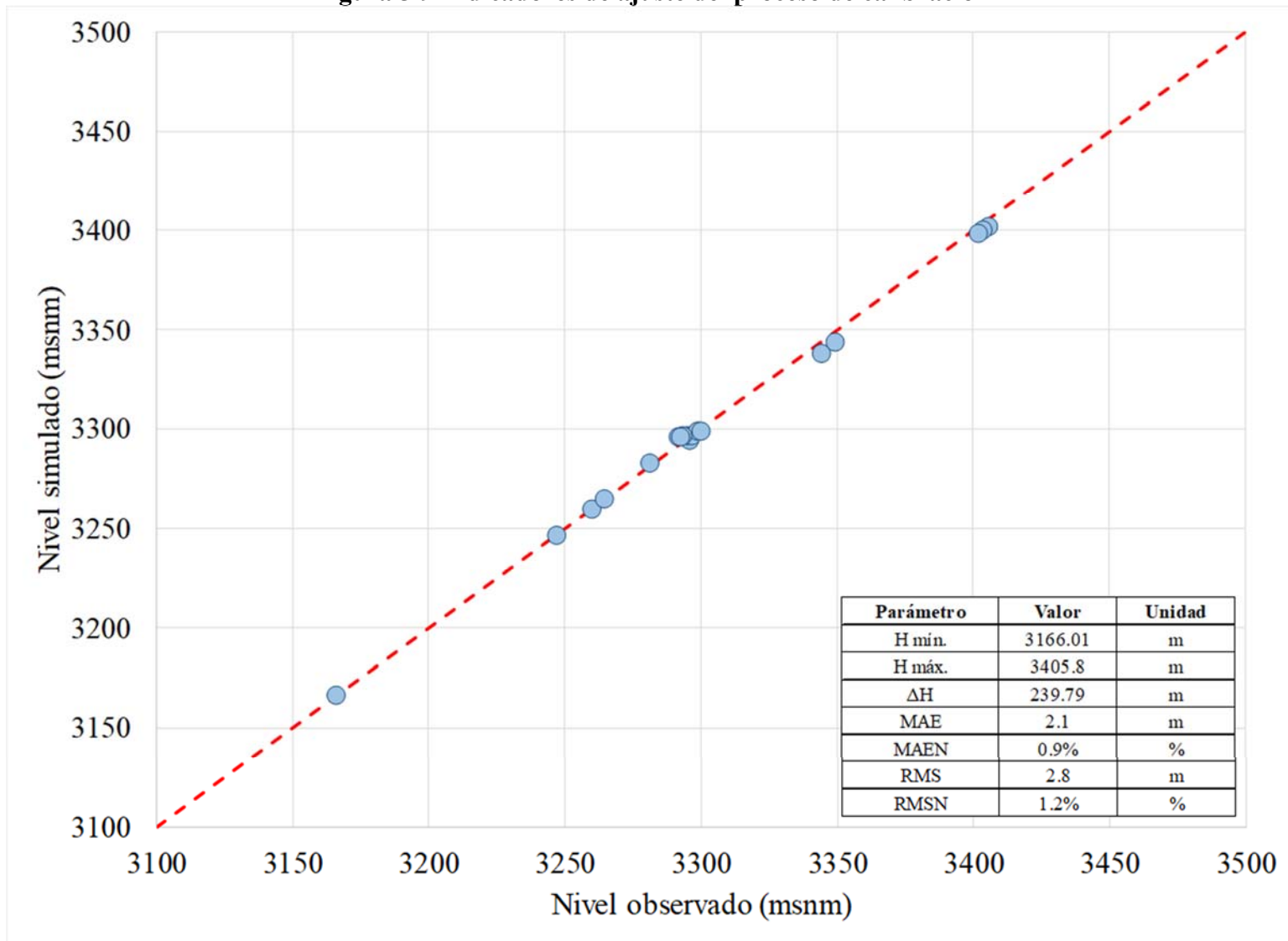
Aguas arriba de la barrera de pozos de bombeo e inyección, se cuenta con un gradiente hidráulico que varía entre 3 y 5%, coincidente con la dirección natural del flujo, dada por la topografía del sector. En el sector ubicado entre la cortina de bombeo e inyección, el efecto de estos genera una diferencia en el potencial hidráulico, generando así un gradiente hidráulico inverso que se opone al flujo natural del sistema, este tiene un valor de -3% aproximadamente. Esta condición es clave para el objetivo de contención del avance de la pluma de contaminante.

Figura 5-8 Valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de la calibración



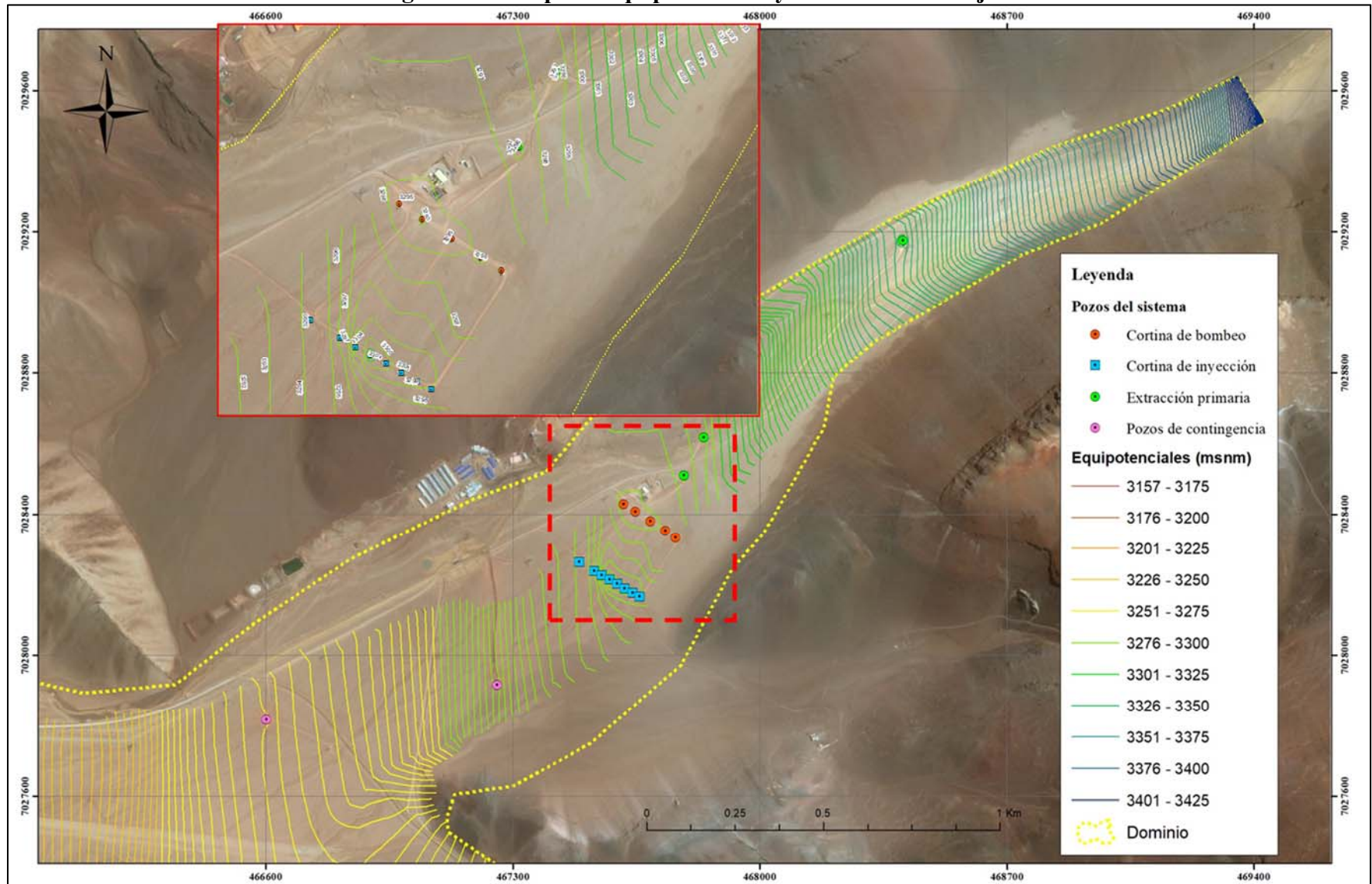
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5-9 Indicadores de ajuste del proceso de calibración



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5-10 Mapa de equipotenciales y direcciones de flujo



Fuente: Elaboración Propia

5.4.4. Implementación del modelo de transporte

A partir del modelo de flujo calibrado descrito anteriormente, se implementa un modelo de transporte de masa, que simula el avance de la pluma de mercurio presente en la quebrada la Coipa.

La condición de borde implementada para el caso base, corresponde a una concentración fija en la sección de entrada del dominio numérico. La magnitud de esta concentración se fija en 2400 ppb (2,4 mg/l), la que corresponde a las mediciones del pozo de control MDO-124, ubicado aguas arriba del acuífero más cerca de la entrada del dominio.

La condición inicial de concentración de mercurio en todos los nodos del dominio, se establece igual a 1 ppb (0,001 mg/l), correspondiente al valor de condición natural adoptado para este análisis.

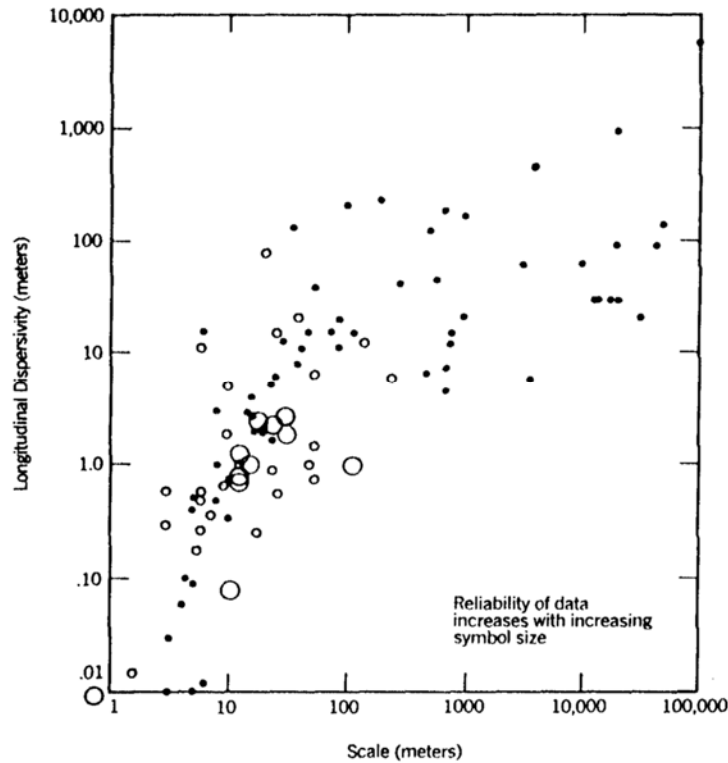
Los parámetros asociados al transporte, como lo son la porosidad, dispersividad longitudinal y transversal, se estiman a partir de bibliografía pertinente.

A partir de lo mencionado por Fetter (2001), los rangos de porosidad según las características hidrogeológicas del sistema acuífero, varían entre un 10 y un 30%. De esta forma, el modelo numérico fue ejecutado con un valor de porosidad de 10% que se encuentra dentro de los rangos establecidos.

Del mismo modo, se estima el coeficiente de dispersividad longitudinal mediante la relación establecida por Schulze-Makuch (2005), en el que, a partir de la escala de longitud del modelo, es posible estimar el coeficiente de dispersividad longitudinal. En la Figura 5-11 se presenta la relación descrita anteriormente, para el caso particular de estudio, se estima una extensión de la pluma de aproximadamente 6 km de manera que el coeficiente de dispersividad longitudinal se encuentra en un rango entre 10 a 100 m. Para efectos del presente modelo numérico se fija el coeficiente de dispersividad longitudinal en 15 m para todo el dominio.

Con respecto al coeficiente de dispersividad transversal, se considera un valor correspondiente a un 10% del coeficiente de dispersividad longitudinal (Fetter, 2001).

Figura 5-11 Relación entre dispersividad longitudinal y escala



Fuente: Schulze-Makuch (2005)

5.5. Evaluación sistema existente

A partir de la conceptualización del sistema presentada en el acápite 5.1 y la construcción del modelo numérico tanto de flujo como de transporte presentado en el acápite 5.2, se modela numéricamente el actual sistema de remediación de la quebrada La Coipa.

Para representar el transporte, se consideran las mediciones de concentración de mercurio en los pozos de observación ubicados a lo largo del acuífero, y se calibran los parámetros de porosidad, dispersividad longitudinal y transversal, de manera de representar de forma adecuada las concentraciones medidas en cada uno de estos pozos. El tiempo de simulación del modelo numérico corresponde a 30 años, que se estima a partir de una fecha aproximada en que señalan haber encontrado trazas de mercurio en la quebrada La Coipa (MYMA, 2007).

En la Figura 5-12 se presenta el resultado de las concentraciones de la pluma de mercurio en el dominio de modelación transcurridos los 30 años de simulación. Como se observa en la figura, existen mayores concentraciones en la zona del norte del acuífero, y aguas arriba de la cortina de bombeo, específicamente en los alrededores del pozo MDO-123 y MDO-120, ubicados en los bordes de la cortina de extracción. Aguas abajo de la cortina de inyección, se puede observar que la concentración de mercurio se mantiene en sus valores basales o de condición natural. De esta forma, el sistema de bombeo e inyección implementado en la quebrada La Coipa logra contener toda la pluma de contaminación.

Analizando la capacidad de contención de la barrera hidráulica bajo un enfoque netamente advectivo, se utiliza el resultado del modelo de flujo para analizar la trayectoria de las partículas

que provienen desde la fuente de contaminación, es decir, la entrada del dominio del modelo numérico.

En la Figura 5-13 se presenta la trayectoria de las partículas simuladas a partir de la condición de borde de entrada del modelo numérico. Del mismo modo que con el modelo de transporte mencionado previamente, se observa que el sistema de bombeo e inyección funciona como una barrera hidráulica, capaz de captar todas las partículas que provienen desde aguas arriba.

Otro aspecto relevante para evaluar la efectividad del sistema de bombeo-inyección, corresponde al análisis del radio o zona de captura de los pozos de bombeo (Fitts, 2013; EPA, 1999). En la Figura 5-14 se presenta un mapa con la trayectoria de las partículas que capturan los pozos de la cortina de extracción con las actuales tasas de bombeo de operación utilizadas por el sistema de bombeo e inyección.

Como se observa en la figura, los pozos del sistema de bombeo en conjunto logran formar una zona de captura que abarca todo el ancho del acuífero, y tal como se mencionó previamente, logran capturar todas las partículas provenientes desde aguas arriba.

Con este análisis es posible determinar de qué sectores se ven mayormente influenciados los pozos de captura. En particular, se observa que los pozos de extracción captan aguas provenientes desde el sistema de inyección ubicado aguas abajo, de esta forma, existe un efecto de dilución en los pozos de bombeo, provocado por la mezcla entre el agua contaminada y el agua con tratamiento ingresada desde los pozos de inyección.

En la Figura 5-15 se presenta un perfil transversal que muestra la distribución de concentración de mercurio en la cortina de bombeo. Tal como se observa, los pozos ubicados en la izquierda de la cortina poseen una mayor concentración que los pozos del sector derecho. Las concentraciones varían en la dirección transversal, influenciados principalmente por las magnitudes de las extracciones, las propiedades hidrogeológicas de las zonas aledañas, y la captura de aguas limpias provenientes de la cortina de inyección.

Este efecto mencionado en el párrafo anterior, es posible de observar entre los pozos MDO-121 y MDO-123, los cuales se encuentra en el borde este de la cortina, uno al lado del otro, con una diferencia de concentraciones de aproximadamente 1000 ppb (1 mg/l). Debido a que el pozo MDO-123 posee un bajo caudal de extracción, su radio de captura queda contenido, de manera de que no es factible la captación de agua limpia desde aguas abajo, y las concentraciones medidas y simuladas en este pozo superan en magnitud a las del MDO-121.

Es importante señalar que el movimiento de la pluma de mercurio está dominado principalmente por los procesos advectivos del sistema, en donde las propiedades hidrogeológicas y las tasas de bombeo de los pozos, son los factores principales que determinan las velocidades y direcciones de flujo y así, la distribución de concentraciones.

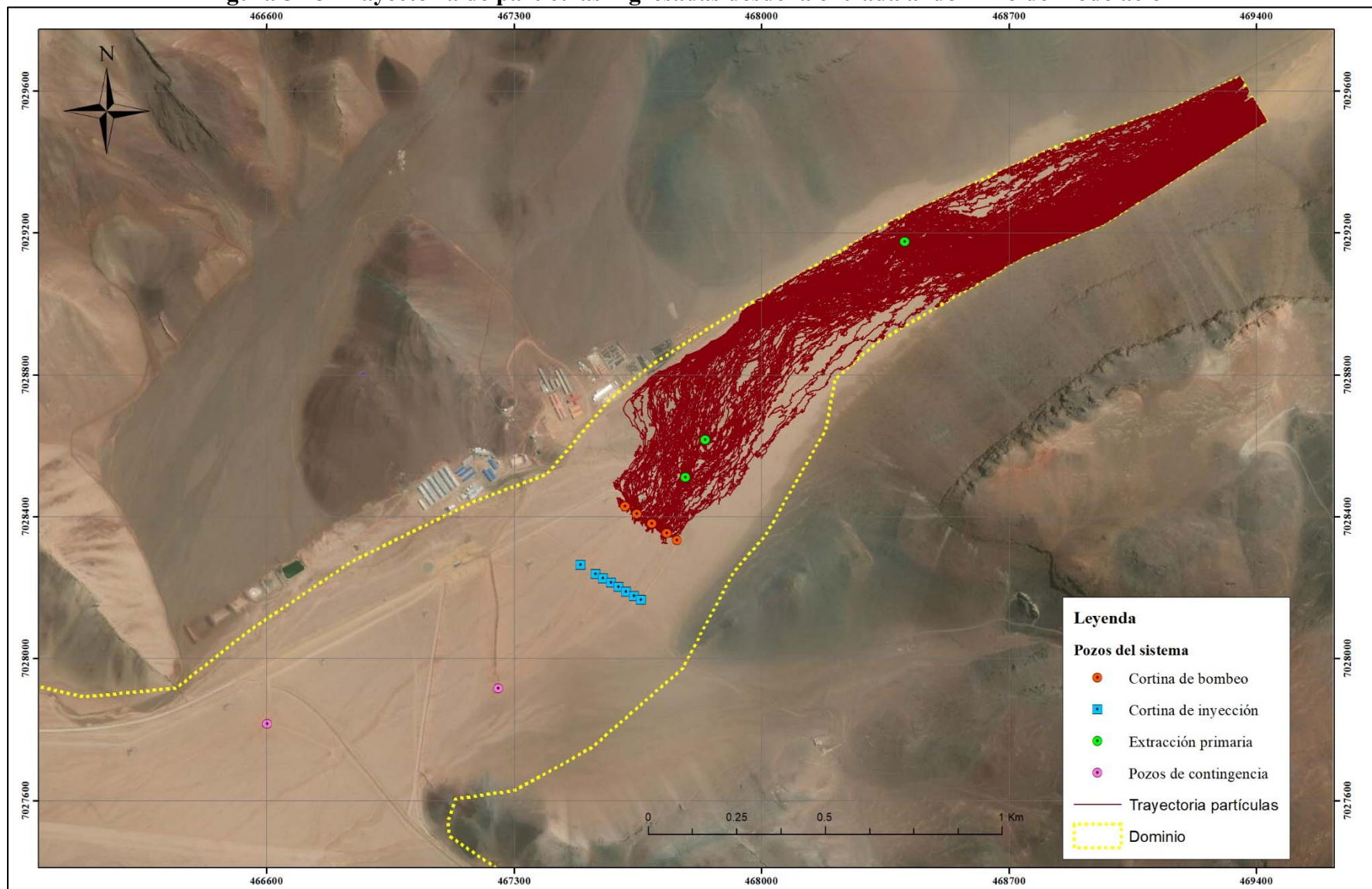
A partir de los resultados de la modelación, se observa que el sistema actual de bombeo e inyección instalado, logra de manera eficiente el objetivo de contención hidráulica del avance de la pluma de mercurio, sin embargo, no se puede establecer que la limpieza o restauración del acuífero se pueda lograr en base solamente a esta medida, debido a la incertidumbre de la fuente de contaminación.

Figura 5-12 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para un tiempo de simulación de 30 años



Fuente: elaboración Propia

Figura 5-13 Trayectoria de partículas ingresadas desde la entrada al dominio de modelación



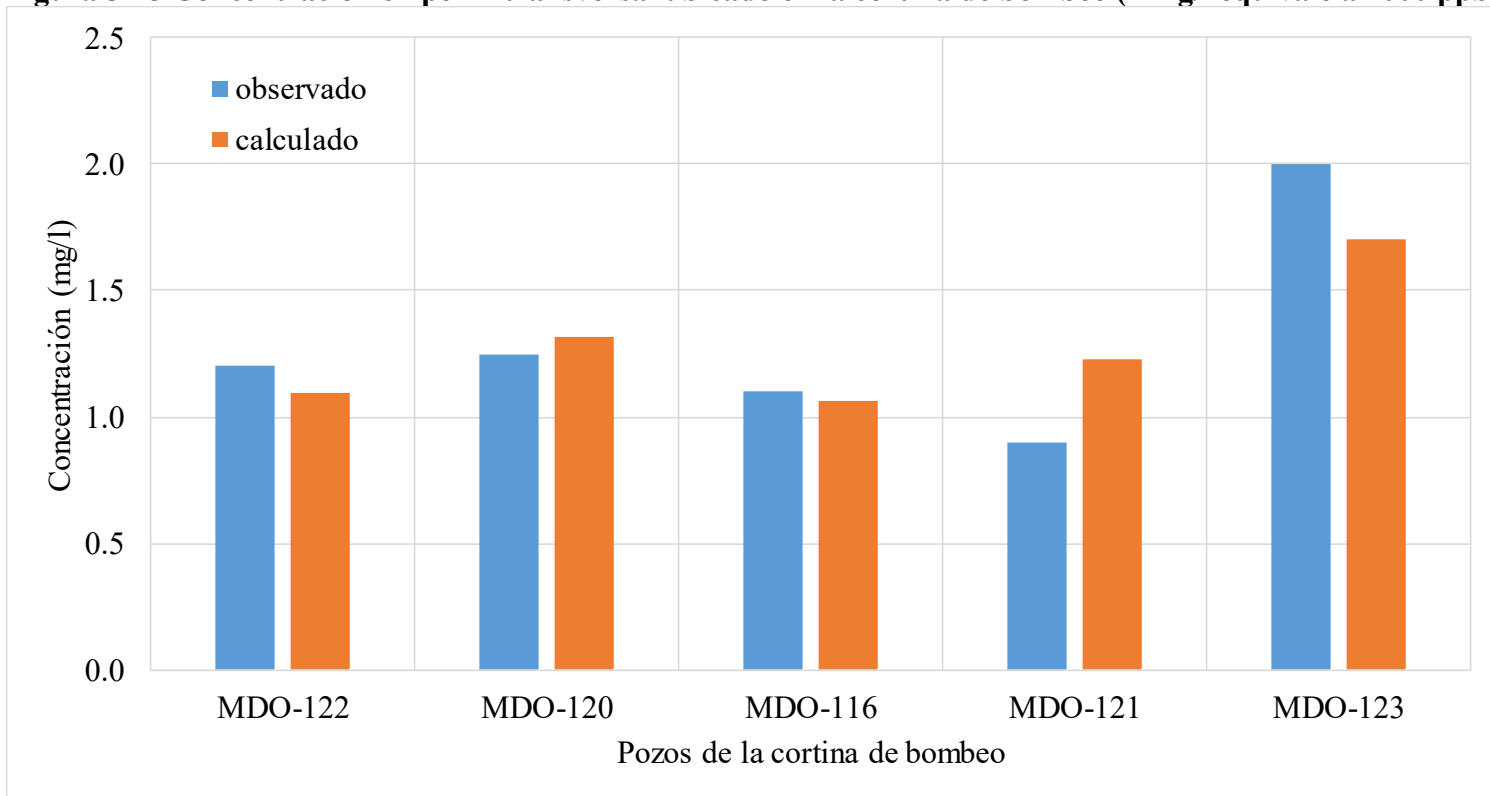
Fuente: elaboración Propia

Figura 5-14 Radio de captura de los pozos de bombeo



Fuente: elaboración Propia

Figura 5-15 Concentración en perfil transversal ubicado en la cortina de bombeo (1 mg/l equivale a 1000 ppb)



Fuente: Elaboración Propia

6. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

6.1. Aspectos Generales

Una vez construido y calibrado el modelo numérico que represente de manera satisfactoria los procesos relacionados con el flujo y transporte de masa en la quebrada La Coipa, se procede a la elaboración de distintos escenarios de simulación, de manera de analizar distintos aspectos en la operación del sistema de bombeo e inyección. Los principales objetivos que se busca analizar con estos escenarios son:

Objetivo de limpieza del acuífero:

- Analizar la limpieza o restauración del sistema acuífero, simulando distintas configuraciones con el objetivo del control de la fuente de contaminación.
- Analizar la eficiencia de limpieza del acuífero ante una acción conjunta entre el control de la fuente de contaminación y el sistema de bombeo e inyección.

Objetivo de contención hidráulica de la pluma:

- Analizar la eficiencia de control hidráulico sobre la pluma de mercurio, al simular distintas operaciones y patrones de bombeo con respecto a la configuración existente actualmente.
- Simular los efectos de modificaciones en la magnitud del bombeo e inyección y evaluar los efectos del balance hídrico en la contención de la pluma de contaminante.
- Simular diferentes configuraciones espaciales de los pozos de bombeo y analizar la eficiencia en el control del avance de la pluma de mercurio.

De manera de cumplir con los objetivos anteriormente expuestos, se han desarrollados 4 conjuntos de escenarios con configuración de modelación particulares, donde el Escenario 1 busca el análisis del sistema en términos de la limpieza del acuífero, mientras que los Escenarios 2, 3 y 4 tienen por objetivo el análisis en la eficiencia de la contención hidráulica del sistema de bombeo e inyección. A continuación, se describe cada uno de estos.

6.2. Descripción de los Escenarios de Simulación

6.2.1. Aspectos generales conjunto de Escenarios 1

A partir de un sistema de bombeo e inyección no es factible predecir o lograr un nivel de limpieza del acuífero sin que se logre controlar las concentraciones provenientes de la fuente de contaminación (EPA, 1999).

De esta forma, los escenarios E1-1 al E1-5, buscan analizar la respuesta del sistema ante acciones que logren controlar la fuente de contaminación que, en términos prácticos, se encuentra ubicada aproximadamente 2 km aguas arriba de la entrada del dominio de modelación.

En términos numéricos, la implementación de cada uno de los escenarios de simulación, implica la modificación de la condición de borde de entrada, correspondiente a una de primer orden (Dirchlet) de concentración constante conocida en todos los nodos asociados a la entrada del dominio del modelo.

Otro aspecto relevante de análisis corresponde a la eficiencia en la limpieza del sistema acuífero, de esta forma se han desarrollado los escenarios E1-6 a E1-9, en los cuales, a partir del supuesto de un control total de la fuente de contaminación, se analizan distintas configuraciones del bombeo

e inyección, y así analizar la eficiencia de la limpieza, en términos de los tiempos que le toma al sistema disminuir sus niveles de concentración.

Es importante señalar que la condición inicial de concentración del presente escenario, corresponde a la solución simulada en el modelo base presentado en el capítulo anterior, de manera que se busca representar una condición futura a partir del actual sistema implementado. A continuación, se describe cada uno de estos escenarios.

En los escenarios del grupo 1 se considera como condición inicial el resultado obtenido del Modelo Base descrito en el capítulo anterior, el cual fue resuelto aplicando una concentración constante en la entrada del dominio de modelación (C_{base}). Todos estos escenarios, corresponden a simulaciones que se proyectan temporalmente una vez finalizado el Modelo Base.

6.2.1.1. Escenario 1-1 (E1-1)

El presente escenario considera un horizonte de modelación de 100 años en total, en donde los primeros 20 años la concentración de entrada se mantiene como C_{base} . Posterior a esta fecha, se considera que se aplicaron medidas de control en la fuente de contaminante, de manera de controlarla completamente, es decir se considera una inyección de concentración de mercurio equivalente a 0,001 mg/l (1 ppb, considerado como concentración del sistema natural).

En síntesis, la concentración de entrada al sistema, asociada a la fuente de contaminación, queda definida por:

- 0 a 20 años: C_{base}
- 20 a 100 años: 0,001 mg/l

El patrón de bombeo se mantiene en base a la condición actual simulada en el Modelo base presentado en el capítulo anterior.

6.2.1.2. Escenario 1-2 (E1-2)

El presente escenario considera un horizonte de modelación de 100 años en total, en donde los primeros 10 años la concentración de entrada se mantiene como C_{base} . Posterior a esta fecha, entre los 10 y 20 años, se supone que las medidas de control realizadas en la fuente logran disminuir la concentración en un 50%, finalmente, posterior a los 20 años se logra un control total de la fuente, es decir se considera una inyección de concentración de mercurio equivalente a 0,001 mg/l (1 ppb, considerado como concentración del sistema natural).

En síntesis, la concentración de entrada al sistema, asociada a la fuente de contaminación, queda definida por:

- 0 a 10 años: C_{base}
- 10 a 20 años: $50\%C_{base}$
- 20 a 100 años: 0,001 mg/l

El patrón de bombeo se mantiene en base a la condición actual simulada en el Modelo base presentado en el capítulo anterior.

6.2.1.3. Escenario 1-3 (E1-3):

El presente escenario considera un horizonte de modelación de 100 años en total, en donde se logra inmediatamente un control de la fuente de contaminación, de manera que los primeros 20 años la concentración de entrada corresponde a $50\%C_{base}$. Posterior a los 20 años se logra un control total

de la fuente, es decir se considera una inyección de concentración de mercurio equivalente a 0,001 mg/l (1 ppb, considerado como concentración del sistema natural).

En síntesis, la concentración de entrada al sistema, asociada a la fuente de contaminación, queda definida por:

- 0 a 20 años: $50\%C_{base}$
- 20 a 100 años: 0,001 mg/l

El patrón de bombeo se mantiene en base a la condición actual simulada en el Modelo base presentado en el capítulo anterior.

6.2.1.4. Escenario 1-4 (E1-4):

El presente escenario considera un horizonte de modelación de 100 años en total, en donde se realizan medidas de control en la fuente de contaminación de forma paulatina, logrando una reducción lineal de la concentración de entrada, iniciando en un valor igual a C_{base} para el tiempo $t=0$ años, llegando hasta una concentración de 0,001 mg/l en $t=20$ años, manteniendo esta última concentración hasta el tiempo final de modelación.

En síntesis, la concentración de entrada al sistema, asociada a la fuente de contaminación, queda definida por:

- 0 a 20 años: Reducción a tasa lineal desde C_{base} a concentración de 0,001 mg/l.
- 20 a 100 años: 0,001 mg/l

El patrón de bombeo se mantiene en base a la condición actual simulada en el Modelo base presentado en el capítulo anterior.

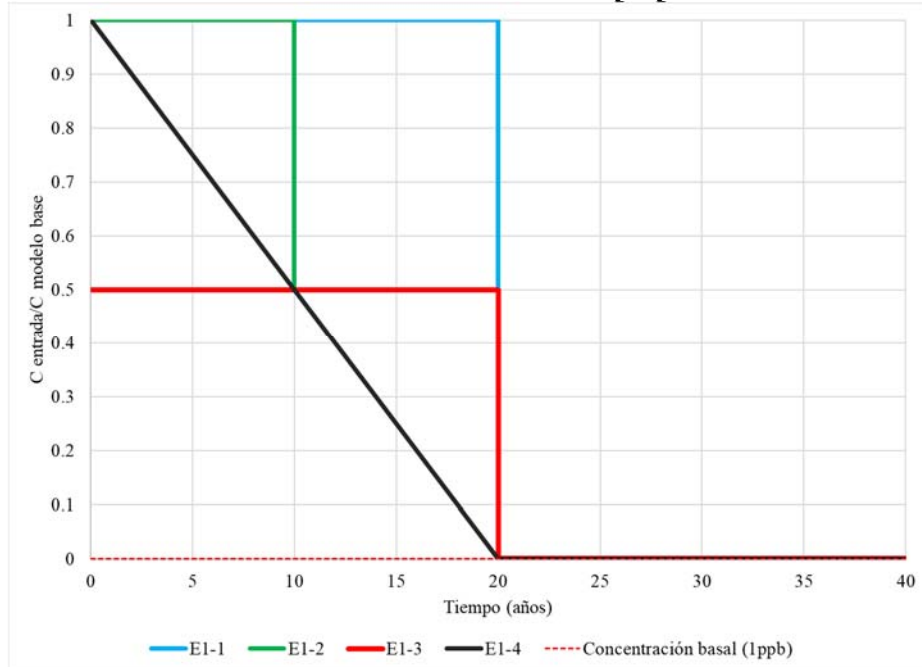
En la Tabla 6-1 se presenta un resumen de la condición de borde asociada a la entrada de concentración de mercurio al sistema para los escenarios E1-1 al E1-4. Del mismo modo, en la Figura 6-1 se presenta esquemáticamente cada serie de condición de borde de entrada.

Tabla 6-1. Condiciones de borde impuestas para el Escenario A 1

Tiempo	Concentración de entrada (mg/l)			
	E1-1	E1-2	E1-3	E1-4
0 a 10 años	Cbase	Cbase	0,5Cbase	Reducción lineal desde Cbase a 0,001 mg/l
10 a 20 años	Cbase	0,5Cbase	0,5Cbase	
20 a 100 años	0,001	0,001	0,001	0,001

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-1 Serie de concentración de entrada en el tiempo para los escenarios E1-1 a E1-4



Fuente: Elaboración Propia

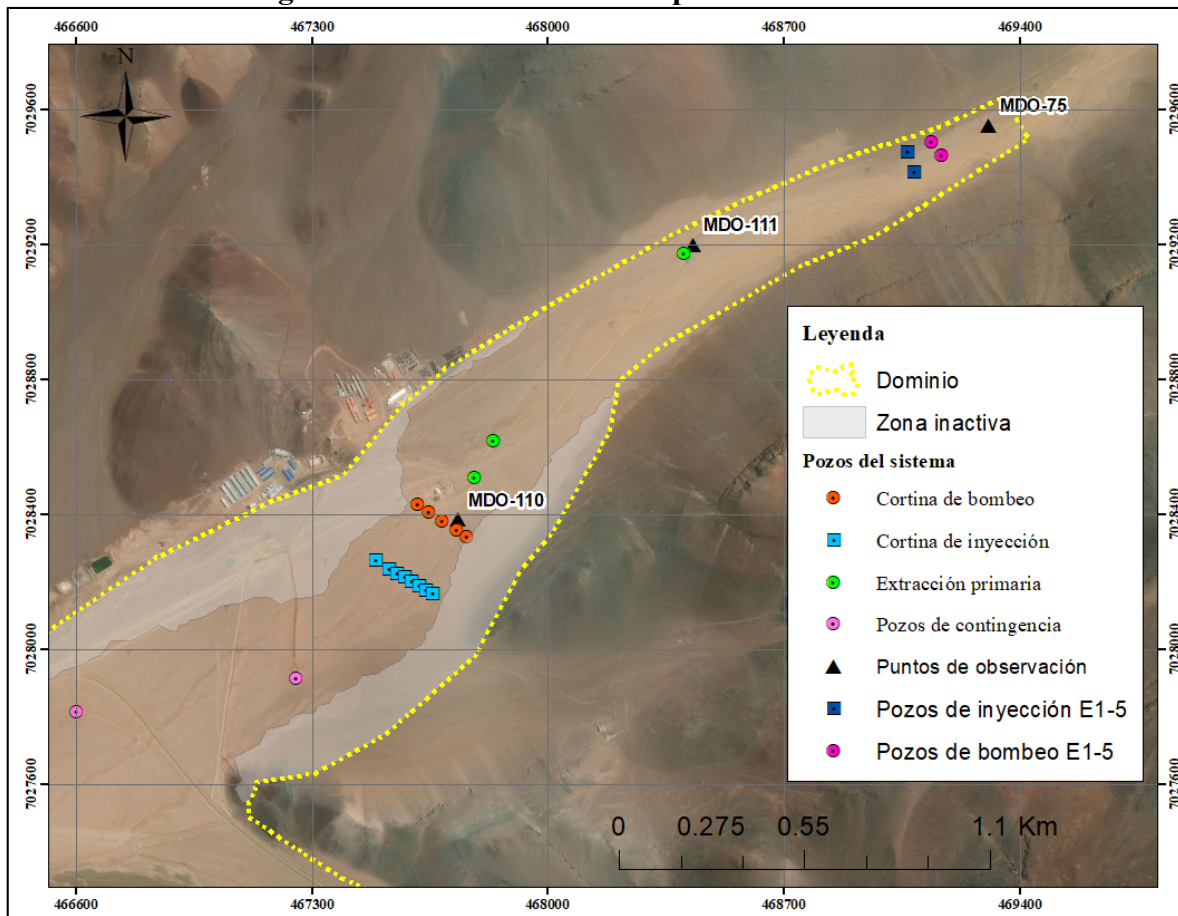
6.2.1.5. Escenario 1-5 (E1-5)

Este escenario reproduce las mismas consideraciones planteadas en el E1-1, en términos de la condición de borde de entrada al modelo numérico.

La diferencia radica en que, en este escenario, se incluyen 2 pozos extra de bombeo, los cuales extraen un total de 4 l/s en total (2 l/s cada uno), con una reinyección inmediatamente aguas debajo de estos por el mismo monto de 4 l/s. La ubicación de estos pozos se muestra en la Figura 6-3.

El resto de pozos de bombeo e inyección, se mantienen según lo presentado en el modelo base desarrollado en el capítulo anterior.

Figura 6-2 Pozos considerados para escenario E1-5



Fuente: Elaboración Propia

6.2.1.6. Escenario 1-6 (E1-6)

Los escenarios E1-6 a E1-9 analizan la eficiencia en la restauración del sistema acuífero, al aplicar una medida de control total en la fuente de contaminación y la operación de distintas configuraciones del sistema de bombeo e inyección.

La condición de borde de concentración de mercurio de ingreso al sistema, asociada a la fuente de contaminación, se fija en un valor constante de 0,001 mg/l (1 ppb). Es decir, se asume que se realiza un control total de la fuente de contaminación. El tiempo de simulación total es de 100 años posterior al control total de la fuente de contaminación. Estas condiciones aplican a los escenarios E1-6 a E1-9.

En particular, en el E1-6 se simula una condición hipotética en la que, una vez logrado el control total de la fuente de contaminación, se deja de operar el sistema de bombeo e inyección, es decir, el sistema queda sin intervención externa.

6.2.1.7. Escenario 1-7 (E1-7)

En particular, en el E1-7 se simula que el actual sistema de bombeo e inyección continúa operando por el tiempo total de modelación. En la operación actual, el caudal total extraído por el sistema de extracción primaria y cortina de bombeo es de 10,34 l/s, que es equivalente al caudal total de inyección.

6.2.1.8. Escenario 1-8 (E1-8)

En particular, en el E1-8 se simula que se mantiene la configuración actual de pozos de bombeo e inyección, sin embargo, el caudal de extracción e inyección se reduce a 8,5 l/s, que equivale al flujo subterráneo pasante por la quebrada La Coipa.

6.2.1.9. Escenario 1-9 (E1-9)

En particular, en el E1-9 se simula una configuración alternativa del sistema de bombeo e inyección, en la que se dispone de la extracción en 8 pozos de bombeo ubicados en forma lineal a lo largo de la quebrada La Coipa. El caudal total de extracción e inyección es de 8,5 l/s, equivalente al flujo subterráneo pasante. Más detalles de esta configuración, se presentan en la descripción del E4-2, en el acápite 6.1.4.2.

6.2.2. Aspectos generales conjunto de Escenarios 2

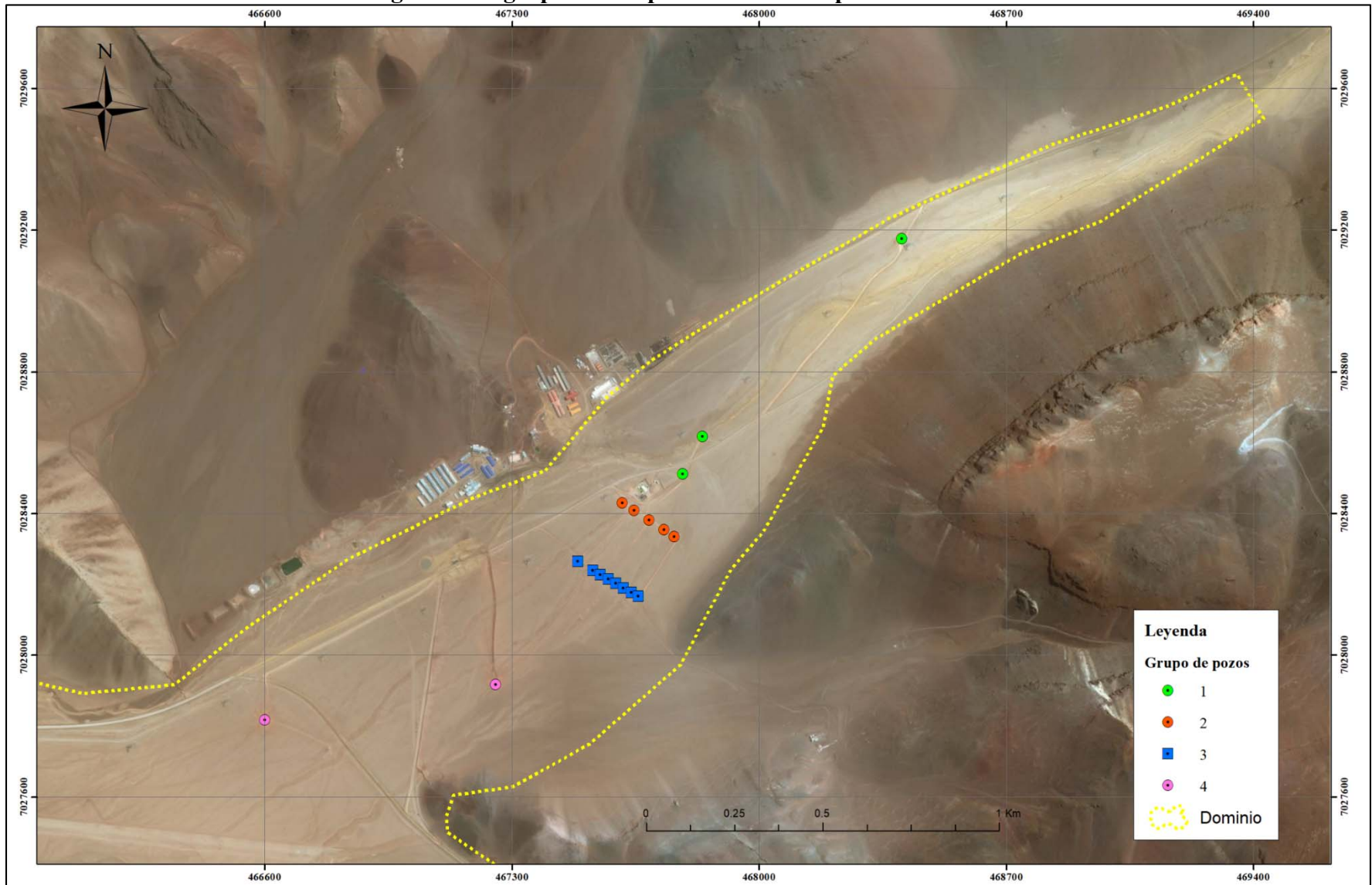
Con respecto al objetivo de analizar la eficiencia del sistema de bombeo e inyección, con respecto a la contención hidráulica del avance de la pluma de mercurio. Se desarrolla este conjunto de escenarios, cuyo objetivo es modificar el actual funcionamiento del sistema de contención hidráulica, bajo las variables de cantidad de pozos, tasas de bombeo, entre otros.

En términos numéricos, la implementación de cada uno de estos escenarios de simulación, implica la modificación de la condición de borde impuesta de tipo pozo (*Well*), dejando inactivos algunos de estos (según el escenario de modelación), como también modificando las magnitudes de caudal, ya sea de extracción o inyección.

A partir de la descripción general del sistema de bombeo e inyección (capítulo 4), los pozos se pueden agrupar en 4 grandes grupos, en primero lugar se encuentran tres pozos de bombeo aguas arriba de la cortina de bombeo, denominado como contención primaria (Grupo 1), los asociados a la cortina de bombeo propiamente tal (Grupo 2), los pozos de inyección (Grupo 3) y los pozos de contingencia ubicados aguas abajo de la cortina (Grupo 4). En la Figura 6-3 se presenta la distribución espacial de los grupos de pozos del sistema.

Las condiciones de borde y propiedades hidrogeológicas del medio, se mantienen según lo establecido en el modelo base, presentado en el capítulo anterior. Del mismo modo, la condición inicial de concentración del presente escenario, corresponde a una situación basal del sistema acuífero, es decir un valor de 1ppb. Es decir, se simula una situación hipotética bajo nuevas configuraciones, y así contrastar los resultados, con los del modelo base (situación actual). Este conjunto de escenarios comprende 4 configuraciones distintas, las cuales se detallan a continuación:

Figura 6-3 Agrupación de pozos del sistema para escenario 2



Fuente: Elaboración Propia

6.2.2.1. Escenario 2-1 (E2-1):

Este escenario tiene por objetivo el análisis de la efectividad en remoción de mercurio considerando la operación solamente de la cortina de bombeo (Grupo 2 de pozos de extracción).

En particular, se considera que aquellos tres pozos del Grupo 1, correspondientes a los pozos de extracción primaria, dejan de operar, de manera que la extracción proviene solamente de la cortina de bombeo (Grupo 2). El resto de grupo de pozos se mantiene según la configuración del modelo base, es decir la cortina de inyección y los pozos de bombeo asociados al plan de contingencia.

Es importante señalar que, al remover de la operación a los pozos de extracción primaria, el caudal de bombeo global se ve disminuido, ya que estos aportan cerca del 45% del caudal total extraído por los Grupos 1 y 2.

Esta disminución en el caudal extraído, no es redistribuida en el resto del sistema, de manera de que el balance hídrico entre inyección y extracción deja de cumplirse, además el caudal total bombeado por la cortina (Grupo 2) es de 5,9 l/s, es decir 2,6 l/s menor que el caudal total pasante por el acuífero de la quebrada La Coipa (8,5 l/s). En la Tabla 6-2 se presenta un resumen con las magnitudes de caudal de cada pozo del sistema.

6.2.2.2. Escenario 2-2 (E2-2):

Este escenario se basa en las consideraciones adoptadas del E2-1, de manera que la extracción está controlada solamente por el bombeo realizado en la cortina hidráulica (Grupo 2 de pozos).

Sin embargo, este escenario considera que se mantiene el balance hídrico del caso base del modelo, es decir, aquel caudal que se deja de extraer por los pozos del Grupo 1 (4,9 l/s), se reparte proporcionalmente en los pozos de bombeo de la cortina de extracción (Grupo 2), manteniendo así un caudal total de extracción equivalente a la inyección, y con una magnitud mayor a los 8,5 l/s determinados como el caudal pasante subterráneo del sistema. En la Tabla 6-2 se presenta un resumen con las magnitudes de caudal de cada pozo del sistema.

6.2.2.3. Escenario 2-3 (E2-3):

Este escenario tiene por objetivo analizar distintas configuraciones de los pozos existentes del sistema de bombeo e inyección. En particular, se analiza la situación en donde se reduce la cantidad de pozos de bombeo de la cortina de extracción (Grupo 2), de manera de operar solamente con dos pozos ubicados al centro de la cortina, estos corresponden a MDO-116 y MDO-120. Los pozos del Grupo 1, de la extracción primaria, continúan operando de manera equivalente al caso base.

Esta configuración fue diseñada, a partir de los resultados de las zonas de captura simuladas en el caso base en el capítulo 5 del presente documento.

De esta forma el caudal total extraído por la cortina de bombeo se ve reducido en aproximadamente un 40%, sin embargo, el caudal total de extracción del sistema considerando tanto la extracción primaria (Grupo 1) y los dos pozos del Grupo 2, es de 8,56 l/s, magnitud equivalente al caudal pasante en el sistema.

A partir de esta reducción en el caudal total extraído, se considera un reajuste en el caudal total de inyección de los pozos del Grupo 3, de esta forma se realiza una disminución en cada uno de estos proporcionalmente al aporte que tiene cada uno de forma particular. Con este ajuste, se modifica el caudal total de inyección, haciéndolo equivalente al caudal de extracción, que corresponde a 8,56 l/s. En la Figura 6-4 se presenta aquellos pozos que se mantienen activos en la cortina de bombeo y en la Tabla 6-2 las magnitudes de caudal de cada uno.

6.2.2.4. Escenario 2-4 (E2-4):

Este escenario tiene por objetivo determinar la cantidad mínima de pozos del actual sistema que se requiere para operar, de manera de asegurar que la pluma de contaminante quede completamente contenida, es decir que no exista un traspaso hacia aguas debajo de la cortina de inyección.

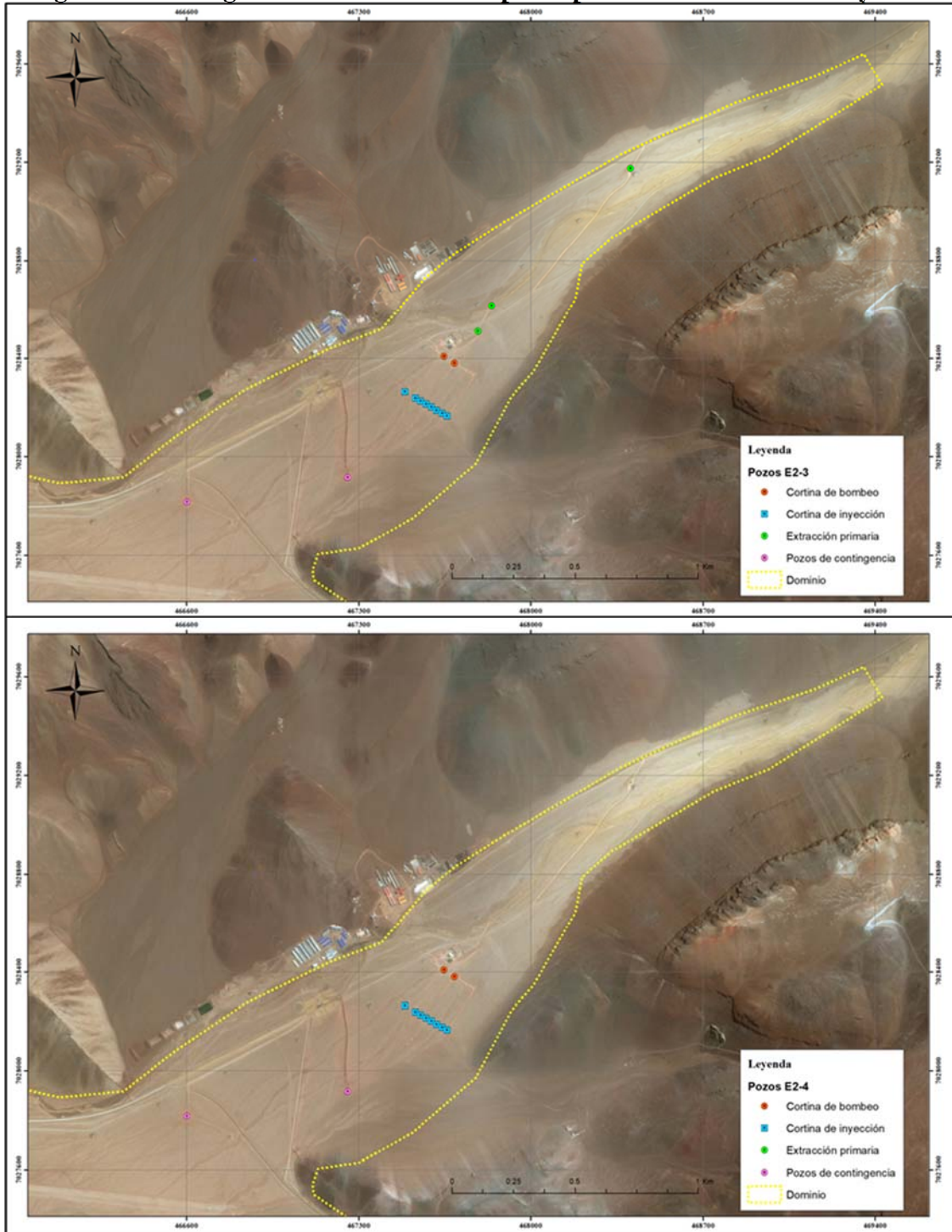
La configuración de pozos de extracción a considerar debe cumplir con el requisito de que la pluma de mercurio no sea transportada hacia aguas abajo del sistema de inyección, del mismo modo el balance hídrico entre el caudal total extraído e inyectado debe mantenerse.

La metodología empleada en el desarrollo de este escenario de simulación tiene un carácter iterativo, en donde se elimina de la operación un pozo de bombeo y el caudal respectivo se redistribuye de manera proporcional en el resto de pozos del sistema. De esta forma se mantiene un balance hídrico entre el caudal extraído e inyectado en el sistema.

La configuración final del sistema de bombeo considera un total de 2 pozos ubicados en la zona central de la cortina de bombeo (MDO-116 y MDO-120), con un caudal total de extracción de 8,56 l/s entre ambos pozos. La inyección total del sistema se distribuyó de manera de representar este caudal.

En la Figura 6-4 se presenta la ubicación de los pozos a considerar en este escenario y de igual forma, en la Tabla 6-2 se presenta un resumen de los valores de caudal adoptados para el presente escenario.

Figura 6-4 Configuración del sistema de pozos para los escenarios E2-3 y E2-4



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-2. Resumen de caudales de los pozos del sistema para los escenarios del conjunto 2

Grupo	ID pozo	Tipo de pozo	Caudal l/s				
			Caso Base	Esc 2-1	Esc 2-2	Esc 2-3	Esc 2-4
1	MDO-124	Bombeo	-3,00	0,00	0,00	-3,00	0,00
1	MDO-125	Bombeo	-1,13	0,00	0,00	-1,13	0,00
1	MDO-135	Bombeo	-0,79	0,00	0,00	-0,79	0,00
2	MDO-116	Cortina de bombeo	-1,76	-1,77	-3,23	-1,77	-4,23
2	MDO-120	Cortina de bombeo	-1,87	-1,87	-3,43	-1,87	-4,34
2	MDO-121	Cortina de bombeo	-1,12	-1,12	-2,06	0,00	0,00
2	MDO-122	Cortina de bombeo	-1,10	-1,10	-2,01	0,00	0,00
2	MDO-123	Cortina de bombeo	-0,06	-0,05	-0,10	0,00	0,00
3	MDO-126	Inyección	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12
3	MDO-127	Inyección	0,28	0,28	0,28	0,22	0,22
3	MDO-128	Inyección	1,02	1,02	1,02	0,80	0,80
3	MDO-129	Inyección	3,32	3,32	3,32	2,62	2,62
3	MDO-130	Inyección	2,19	2,19	2,19	1,73	1,73
3	MDO-131	Inyección	2,14	2,13	2,13	1,69	1,69
3	MDO-132	Inyección	1,09	1,09	1,09	0,86	0,86
3	MDO-133	Inyección	0,67	0,67	0,67	0,53	0,53
		Total aguas arriba	-4,92	0,00	0,00	-4,92	0,00
		Total cortina	-5,92	-5,92	-10,84	-3,64	-8,56
		Total extracción	-10,84	-5,92	-10,84	-8,56	-8,56
		Inyección total	10,84	10,84	10,84	8,56	8,56

* Nota: El signo negativo implica que corresponde a una extracción del sistema, mientras que el signo positivo indica una inyección de caudal.

Fuente: Elaboración Propia

6.2.3. Aspectos generales conjunto de Escenarios 3

Este conjunto de escenarios de modelación, tiene por objetivo simular los efectos de modificaciones en la magnitud del caudal de bombeo e inyección y evaluar la incidencia del balance hídrico en la contención de la pluma de contaminante. Este escenario, al igual que el anterior, tiene por objetivo principal el análisis de la eficiencia en la contención del avance de la pluma de mercurio.

De esta forma, se analiza el efecto en la efectividad en la captura de la pluma de mercurio, al extraer una cantidad de agua inferior al caudal subterráneo pasante estimado ($Q_{entrada} = 8,5 L/s$). En particular se evaluaron cinco configuraciones distintas, en donde el caudal total extraído ($Q_{extraído}$) corresponde a un 50, 75, 85, 90 y 100% del $Q_{entrada}$. Todas las reducciones de caudal se distribuyeron de forma proporcional en cada uno de los pozos de los Grupos 1, 2 y 3.

En la Tabla 6-3 se presenta la configuración final de caudal extraído e inyectado en cada pozo, para cada uno de los cinco escenarios en análisis.

Las condiciones iniciales y el resto de condiciones de borde del sistema, se mantienen con respecto al modelo base planteado en el capítulo 5.

Tabla 6-3. Resumen de caudales de los pozos del sistema para los escenarios del conjunto 3

Grupo	ID pozo	Tipo de pozo	Caudal l/s					
			Caso Base	Esc 3-1	Esc 3-2	Esc 3-3	Esc 3-4	Esc 3-5
1	MDO-124	Bombeo	-3,00	-2,35	-2,12	-2,00	-1,77	-1.18
1	MDO-125	Bombeo	-1,13	-0,88	-0,80	-0,75	-0,66	-0.44
1	MDO-135	Bombeo	-0,79	-0,62	-0,56	-0,53	-0,47	-0.31
2	MDO-116	Cortina de bombeo	-1,77	-1,38	-1,25	-1,18	-1,04	-0.69
2	MDO-120	Cortina de bombeo	-1,87	-1,47	-1,32	-1,25	-1,10	-0.73
2	MDO-121	Cortina de bombeo	-1,12	-0,88	-0,79	-0,75	-0,66	-0.44
2	MDO-122	Cortina de bombeo	-1,10	-0,86	-0,78	-0,73	-0,65	-0.43
2	MDO-123	Cortina de bombeo	-0,05	-0,04	-0,04	-0,04	-0,03	-0.02
3	MDO-126	Inyección	0,15	0,11	0,10	0,10	0,09	0.06
3	MDO-127	Inyección	0,28	0,22	0,20	0,19	0,17	0.11
3	MDO-128	Inyección	1,02	0,80	0,72	0,68	0,60	0.40
3	MDO-129	Inyección	3,32	2,60	2,34	2,21	1,95	1.30
3	MDO-130	Inyección	2,19	1,71	1,54	1,46	1,29	0.86
3	MDO-131	Inyección	2,13	1,67	1,51	1,42	1,26	0.84
3	MDO-132	Inyección	1,09	0,85	0,77	0,73	0,64	0.43
3	MDO-133	Inyección	0,67	0,52	0,47	0,44	0,39	0.26
		Total aguas arriba	-4.92	-3,86	-3,47	-3,28	-2,90	-1,93
		Total cortina	-5.92	-4,64	-4,18	-3,94	-3,48	-2,32
		Total extracción	-10.84	-8,50	-7,65	-7,23	-6,38	-4,25
		Inyección total	10.84	8,50	7,65	7,23	6,38	4,25

* Nota: El signo negativo implica que corresponde a una extracción del sistema, mientras que el signo positivo indica una inyección de caudal.

Fuente: Elaboración Propia

6.2.4. Aspectos generales conjunto de Escenarios 4

Este conjunto de escenarios, tiene por objetivo analizar distintas configuraciones alternativas a la actualmente implementada, de manera de modificar la ubicación de los pozos de bombeo e inyección, y analizar la eficiencia en la contención del avance de la pluma de mercurio.

De esta forma se modifican las condiciones de borde de tipo pozo del modelo numérico, distribuyendo espacialmente de forma alternativa los pozos tanto de bombeo como de inyección

Dentro de las condiciones necesarias para el desarrollo de cada diseño de bombeo e inyección, se considera que se debe cumplir la condición de balance hídrico, es decir la magnitud total extraída debe ser equivalente a la cantidad de agua inyectada. Así mismo, se considera que esta magnitud está dada por el caudal de entrada pasante del sistema, es decir 8,5 l/s.

Es importante señalar, que tanto las propiedades hidrogeológicas del medio, como las condiciones de borde, provienen del *Modelo Base*, sin considerar los pozos de bombeo e inyección los cuales se ingresan nuevamente según el caso correspondiente. Como condición inicial se considera una concentración basal del régimen natural de la quebrada, establecido como 1 ppb.

A partir de lo anterior, se desarrollan tres distintos diseños cuyas características se describen a continuación.

6.2.4.1. Escenario 4-1 (E4-1)

Este escenario se basa en una configuración de dos cortinas de bombeo e inyección ubicadas en paralelo a lo largo de la quebrada. En la Figura 6-5 se presenta la distribución espacial de la configuración diseñada para el presente escenario.

En total se cuenta con dos cortinas de pozos, cada uno con seis pozos en total, tres de bombeo y tres de inyección, cada uno con caudales de 1,42 l/s, de manera que cada cortina bombea e inyecta 4,25 l/s, con un total de 8,5 l/s.

La distancia entre los pozos se establece aproximadamente en 50 m, según corresponda, para el desarrollo de este escenario en particular, se simuló distintas configuraciones o ubicaciones de estas dos cortinas operando en serie.

6.2.4.2. Escenario 4-2 (E4-2)

Este escenario se basa en una configuración en línea o en serie de los pozos de bombeo, seguidos por una cortina de pozos de inyección. Este diseño se basa en lo planteado por Cohen (1997), que sugiere una configuración en línea de pozos, para lograr una restauración del sistema acuífero. En la Figura 6-6 se presenta la distribución espacial de la configuración diseñada para el presente escenario.

En total se cuenta con ocho pozos de bombeo ubicados a lo largo del eje de la quebrada La Coipa, cada uno con un caudal de 1,06 l/s, que en total extraen 8,5 l/s. Aguas abajo del último pozo de extracción, se cuenta con una cortina de cinco pozos de inyección, ubicados transversalmente al eje de la quebrada, cada uno inyectando un caudal de 1,7 l/s, con un total de 8,5 l/s.

6.2.4.3. Escenario 4-3 (E4-3)

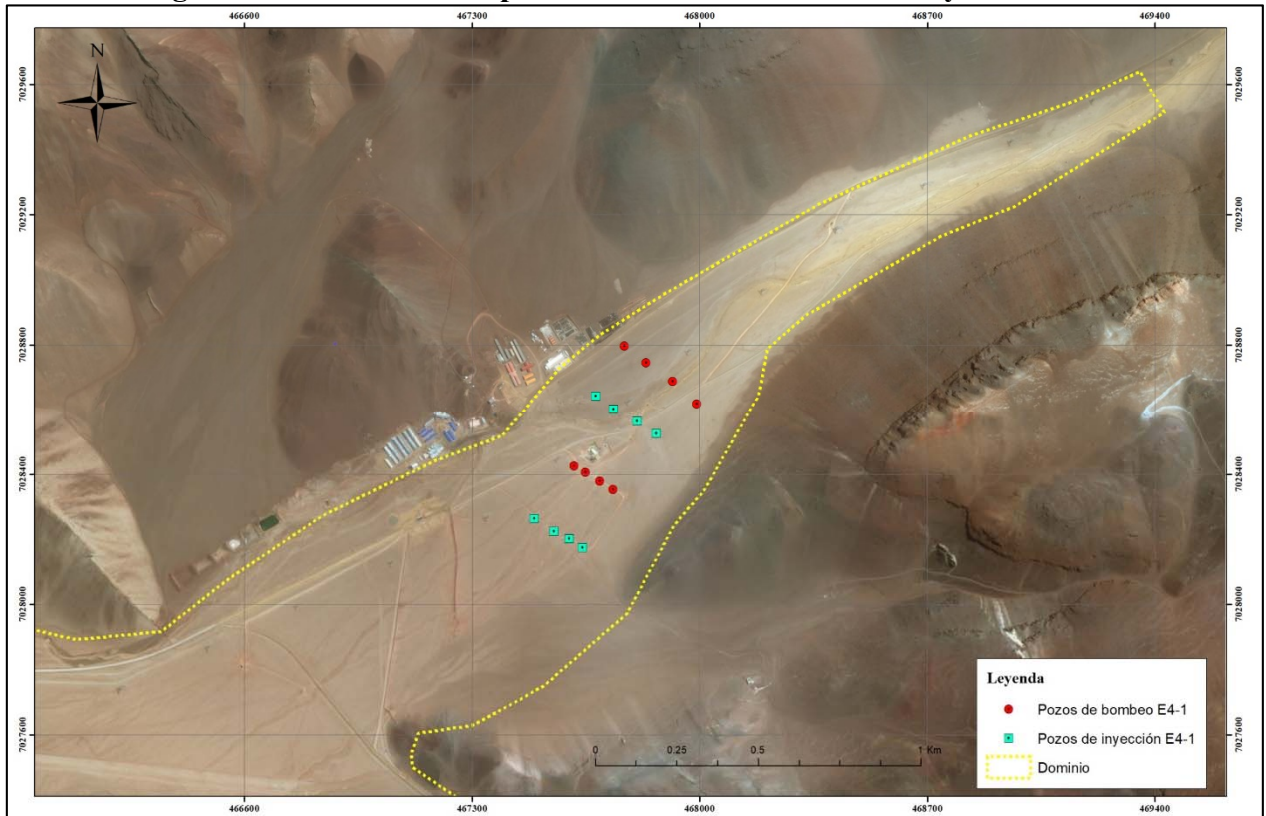
Este escenario se basa en una configuración en “V” o de esquema triangular de los pozos de bombeo, seguidos por una cortina de pozos de inyección. En la Figura 6-7 se presenta la distribución espacial de la configuración diseñada para el presente escenario.

En total se cuenta con 5 pozos de bombeo, alineados en forma de “V”, es decir se consideran 3 filas de pozos de bombeo, la primera con un pozo ubicado en la zona central de la quebrada, la

segunda línea de operación, corresponde a dos pozos de bombeo operando en paralelo ubicados hacia los costados del eje de la quebrada, finalmente una tercera cortina de pozos de bombeo, en donde operan dos pozos ubicados en los extremos de la quebrada.

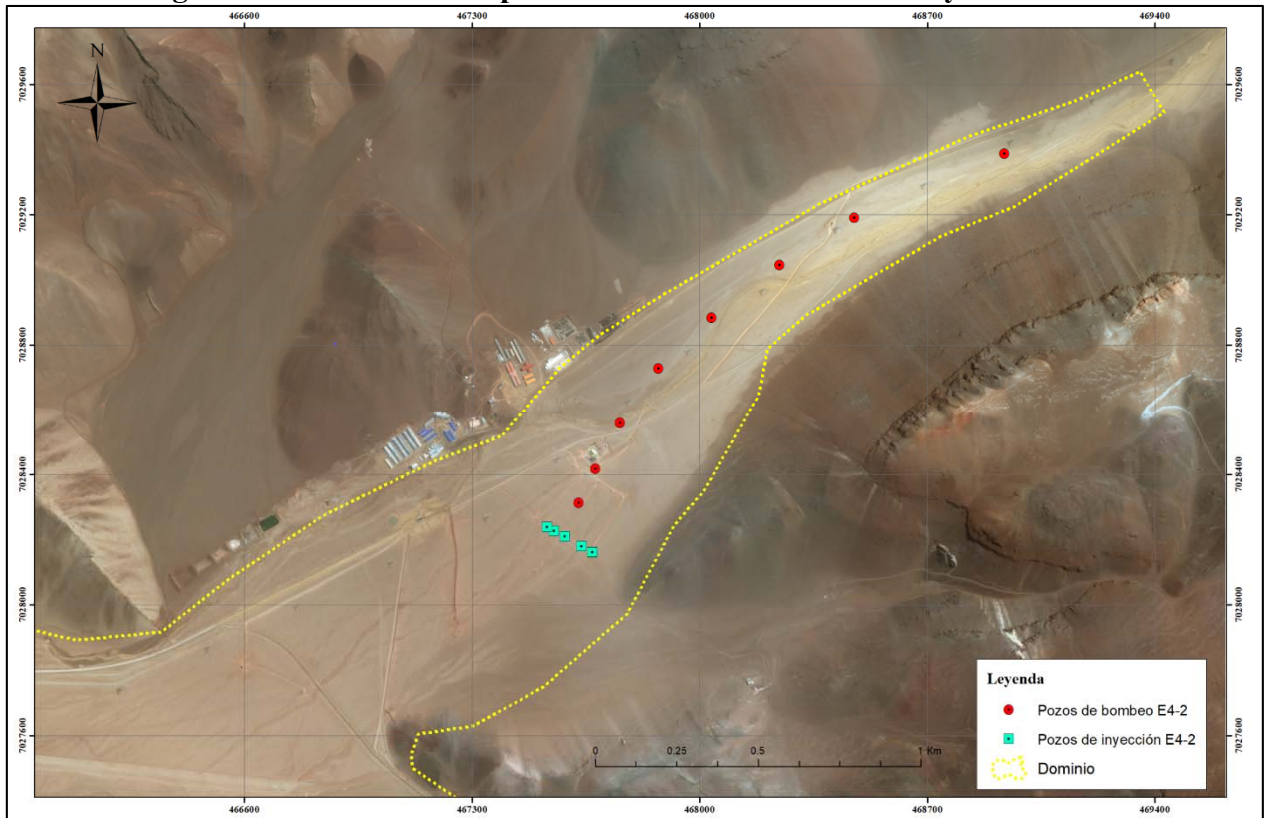
Aguas abajo de la tercera línea de pozos, se encuentra una cortina de pozos de inyección constituida por cinco pozos de inyección. Todos los pozos de este escenario poseen un caudal de 1,7 l/s, con un total de 8,5 l/s tanto para el bombeo como para la inyección.

Figura 6-5 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-1



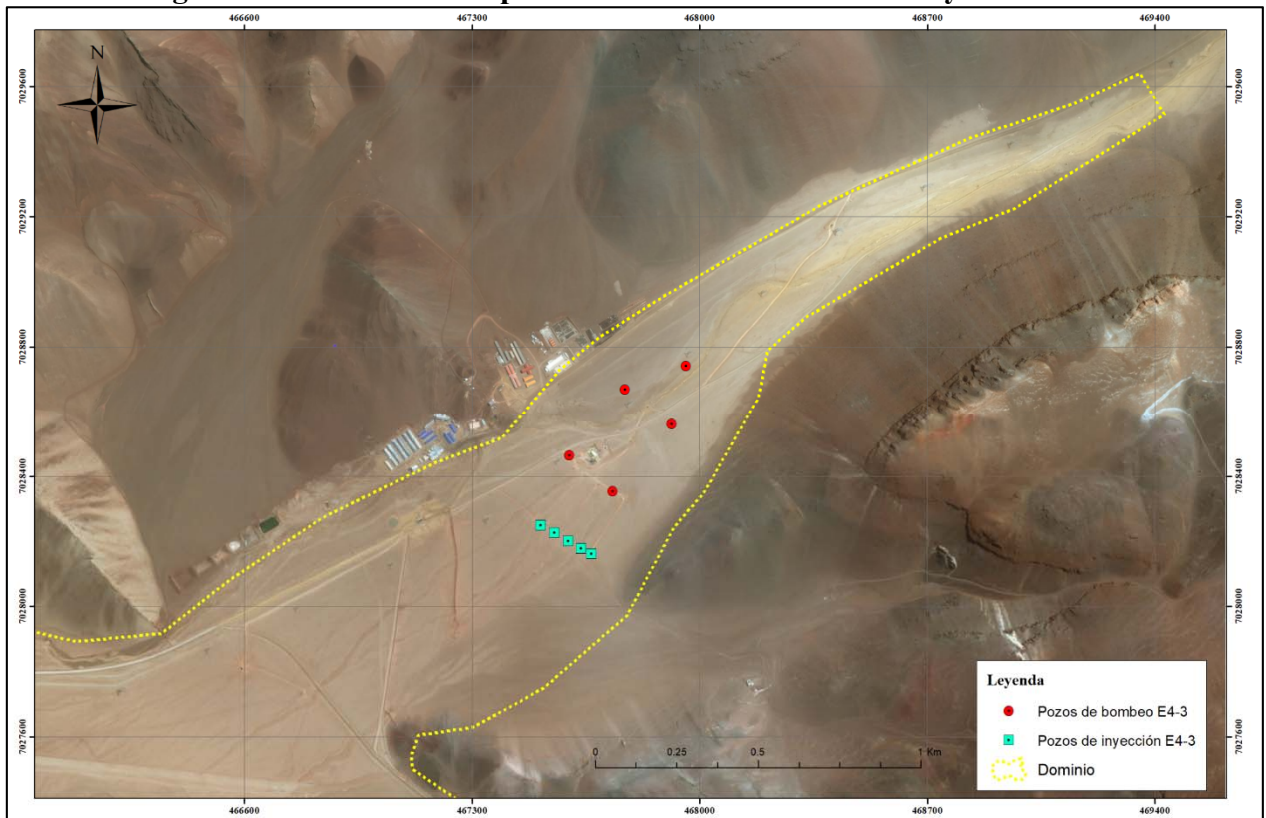
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-6 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-2



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-7 Distribución espacial de sistema de bombeo e inyección E4-3



Fuente: Elaboración Propia

6.3. Resultados Conjunto de Escenarios 1

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos de las simulaciones de los escenarios E1-1 a E1-9. Los análisis se centran principalmente en la capacidad de limpieza del acuífero al realizar acciones de control sobre la fuente de contaminación.

Para cada uno de estos escenarios se analiza el tiempo que toma al sistema, para lograr una reducción de la concentración del acuífero a valores basales de concentración de mercurio, fijados en 0,001 mg/l (1ppb). Este análisis se realiza, mediante la serie temporal de concentración calculada en tres puntos del acuífero, asociados a pozos de observación del sistema. El primer punto de control, corresponde al pozo MDO-75 ubicado cerca de la entrada del dominio del modelo numérico, el segundo pozo, se encuentra en la sección media del acuífero, correspondiente al pozo MDO-111 y finalmente, el pozo MDO-110 ubicado justo aguas arriba del sistema de cortina de bombeo. En la Figura 6-8 se presenta la distribución espacial de estos puntos de observación.

En la Figura 6-9 se presentan cuatro gráficos, para los escenarios E1-1 a E1-4 respectivamente, de la serie temporal de concentración de mercurio calculada por el modelo, en los tres puntos de observación mencionados previamente. Del mismo modo en la Figura 6-10 se presenta la comparación entre los la serie temporal calculada para el E1-1 y E1-5.

A partir de este análisis, se confecciona la Tabla 6-4 que resume los tiempos (en años) en los que cada pozo de observación alcanza una concentración bajo el umbral de 1 ppb. Como se observa en esta tabla, los tiempos en los que se alcanza una concentración bajo los 1 ppb en el pozo ubicado aguas abajo (MDO-110), se encuentran entre 73 y 79 años a partir de la situación actual, es decir entre 53 y 59 años posterior al control definitivo de la fuente de contaminación (se logra a los 20 años).

Tomando como base el E1-1, en donde manteniendo por 20 años sin control la fuente de contaminación, la mayor reducción en tiempos de limpieza, se logra con el E1-4, que considera una reducción a tasa lineal de la concentración proveniente de la fuente. La reducción máxima es de 6 años, y en general se observa que, al aplicar medidas de control de la fuente, los tiempos se reducen con respecto al caso E1-1.

Al analizar los resultados obtenidos en E1-1 y E1-5, se observa que no existe una mejora en los tiempos de limpieza del acuífero al agregar un mayor bombeo aguas arriba, el tiempo total aguas abajo, es de 79 años en ambos casos, mientras que en el sector medio (pozo MDO-111) los tiempos se incrementan, ya que los pozos nuevos agregados aguas arriba actúan como una barrera de contención, retardando el avance de la pluma, de manera de que aguas abajo de estos, los tiempos de restauración se incrementan.

A partir de estos resultados, se puede concluir que el mayor factor para lograr una reducción del tiempo de restauración del sistema, consiste a realizar medidas en el control de la fuente de contaminación, que logren disminuir las magnitudes de manera paulatina hasta completar un control total de la pluma al cabo de 20 años.

Del mismo modo, en la Figura 6-11 se presentan las series temporales de concentración de mercurio simuladas en los tres pozos de control, para los escenarios E1-6 a E1-9. Es importante señalar, que para el E1-6, se agrega un cuarto punto de observación ubicado en la salida aguas abajo, cercano a la salida del dominio de modelación, ya que este caso considera el sistema acuífero sin intervención, de manera de que no existe un control hidráulico y la pluma de contaminación continúa avanzando.

En Tabla 6-5 se presentan los tiempos calculados en los que cada pozo de observación alcanza el valor umbral de 1 ppb. Como se observa en la tabla, al no controlar el avance de la pluma (E1-6), el sector local en donde se ubica el sistema de bombeo e inyección, alcanza concentraciones basales en 38 años.

Del mismo modo, al comparar los escenarios E1-7 y E1-8, se observa que no existe una mejora en términos de limpieza del acuífero al bombear un mayor caudal, ya que el efecto de la extracción e inyección se relaciona principalmente con el efecto en la contención hidráulica.

Finalmente, en el E1-9, se observa que en termino de restauración del sistema, la configuración lineal de pozos de extracción, no genera una mejora en la disminución de los tiempos de limpieza del acuífero.

Adicionalmente, se analiza el tiempo de limpieza del sistema, enfocado en el pozo MDO-110, correspondiente al ubicado justo aguas arriba de la cortina de bombeo, para cada escenario de simulación para distintos valores umbrales, considerando 1ppb, 3 ppb y 5 ppb. En la Tabla 6-6 se presentan los resultados de este análisis.

Como se observa en la Tabla 6-6, los tiempos de limpieza disminuyen a medida que se incrementa el umbral de concentración de mercurio. En términos promedios, existe una diferencia de 7 años, entre el tiempo en el cual el pozo MDO-110 alcanza una concentración de 1 ppb y 5 ppb. La diferencia entre alcanzar niveles de concentraciones menores a 3 ppb o 5 ppb es de tan solo dos años para cada escenario (con excepción del E1-9 que posee una configuración de pozos diferente).

Tabla 6-4. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral de 1ppb en cada uno de los pozos de observación analizados, E1-1 a E1-5

Escenario	Tiempo para alcanzar < 1 ppb		
	MDO-75	MDO-111	MDO-110
E1-1	22	36	79
E1-2	22	35	77
E1-3	22	35	76
E1-4	21	33	73
E1-5	22	49	79

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-5. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral de 1ppb en cada uno de los pozos de observación analizados, E1-6 a E1-9

Escenario	Tiempo para alcanzar < 1 ppb		
	MDO-75	MDO-111	MDO-110
E1-6	2	16	38
E1-7	2	16	59
E1-8	2	16	52
E1-9	2	18	79

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-6. Tiempos en los que se alcanza una concentración bajo el umbral para MDO-110

Escenario	Tiempo para concentración de limpieza MDO-110		
	< 1 ppb	< 3 ppb	< 5 ppb
E1-1	79	74	72
E1-2	77	72	70
E1-3	76	71	69
E1-4	73	68	66
E1-5	79	75	73
E1-6	38	35	33
E1-7	59	54	52
E1-8	52	47	46
E1-9	79	73	70

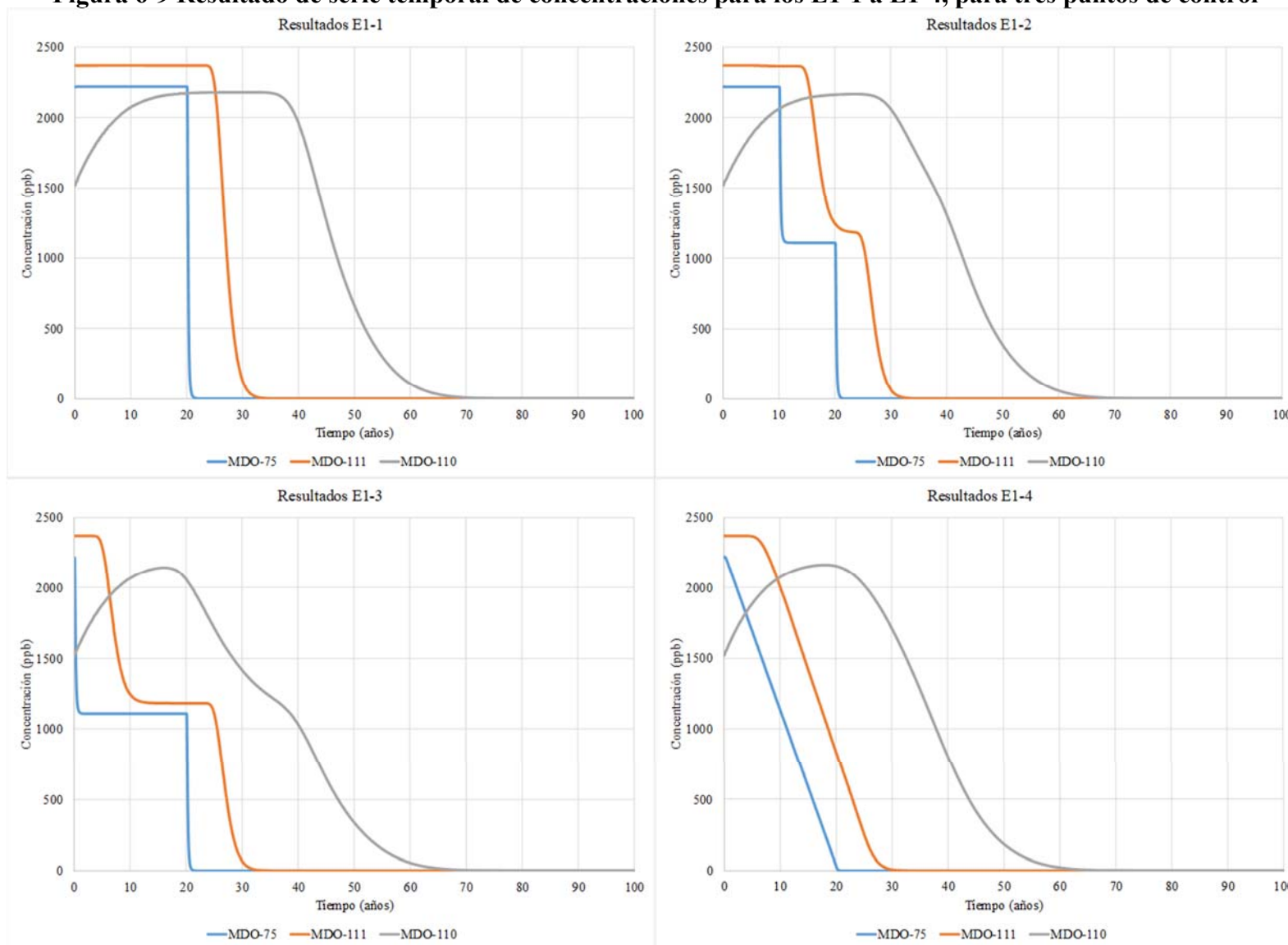
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-8 Puntos de observación para análisis del escenario 1



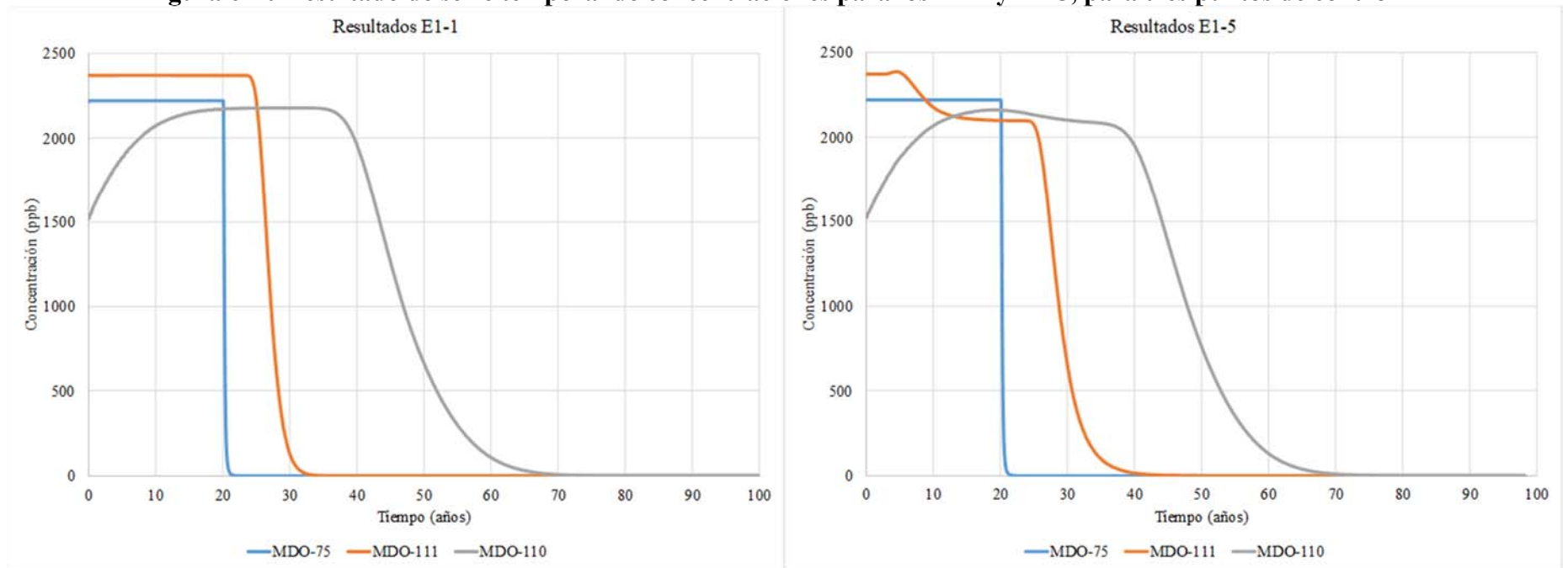
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-9 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-1 a E1-4, para tres puntos de control



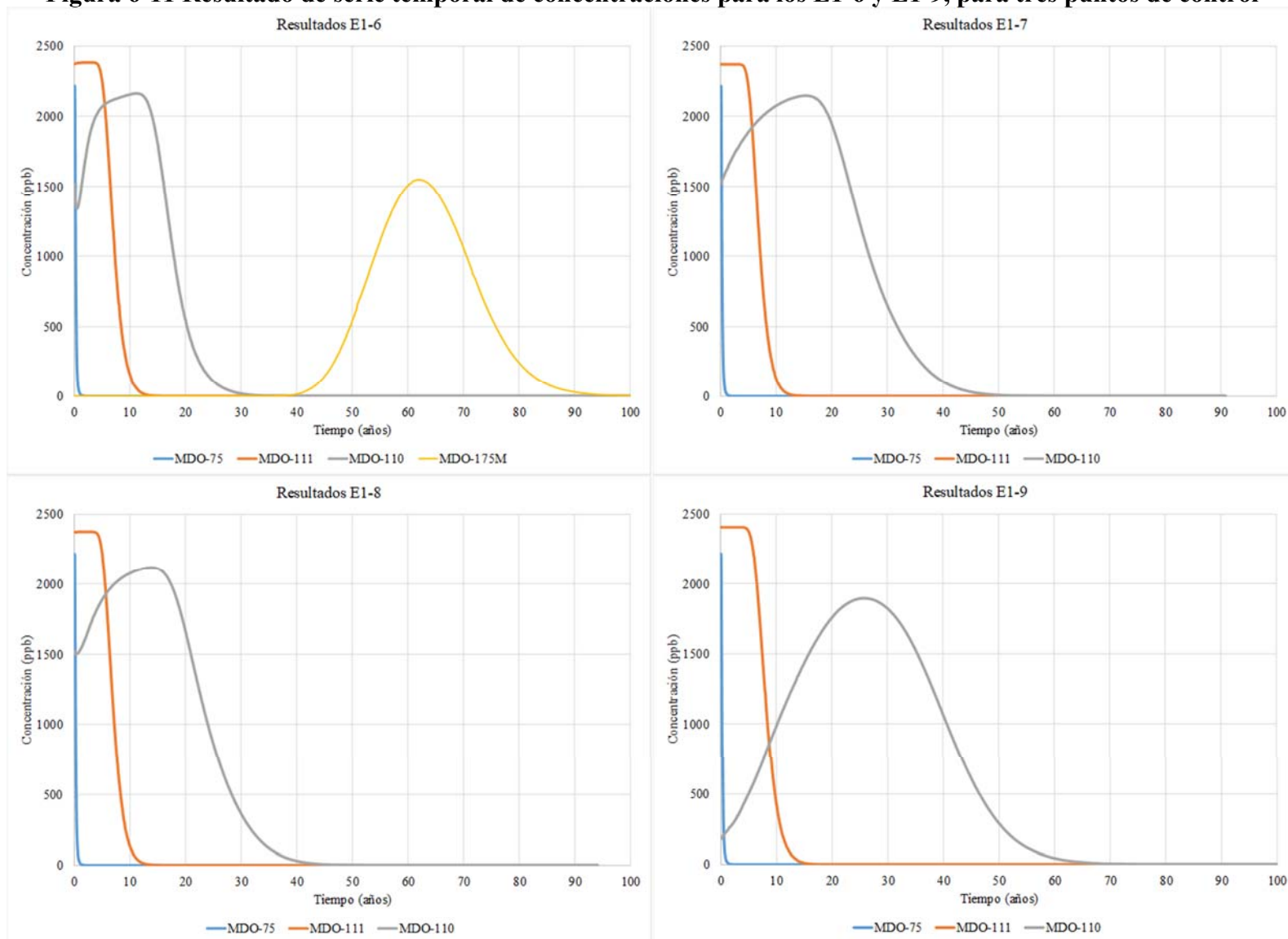
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-10 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-1 y E1-5, para tres puntos de control



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-11 Resultado de serie temporal de concentraciones para los E1-6 y E1-9, para tres puntos de control



Fuente: Elaboración Propia

Además, se analiza el resultado de distribución de concentración de mercurio en distintos periodos de tiempo, mediante los resultados obtenidos por el modelo numérico. De esta forma, se analizan cuatro periodos de tiempo, para 5, 25, 50 y 100 años, en cada uno de los escenarios planteados.

En las Figura 6-12 a 6-20 se presentan los resultados de la modelación en términos de la distribución espacial de concentración de mercurio para cuatro distintos tiempos, en cada uno de los nueve escenarios.

En estas figuras es posible analizar el movimiento de la pluma de mercurio e identificar las zonas en donde se encuentran las mayores concentraciones en el sistema. En términos generales, para cada uno de los escenarios, a los 100 años el sistema se encuentra completamente bajo la concentración umbral de 1 ppb.

Del análisis del efecto del control de la pluma de mercurio en su fuente, que se presenta en los E1-1 a E1-5, se observa que en el caso con una medida de control que permita ir reduciendo paulatinamente la concentración de la fuente de contaminación, se obtiene una pluma de mercurio más acotada en términos de su extensión superficial.

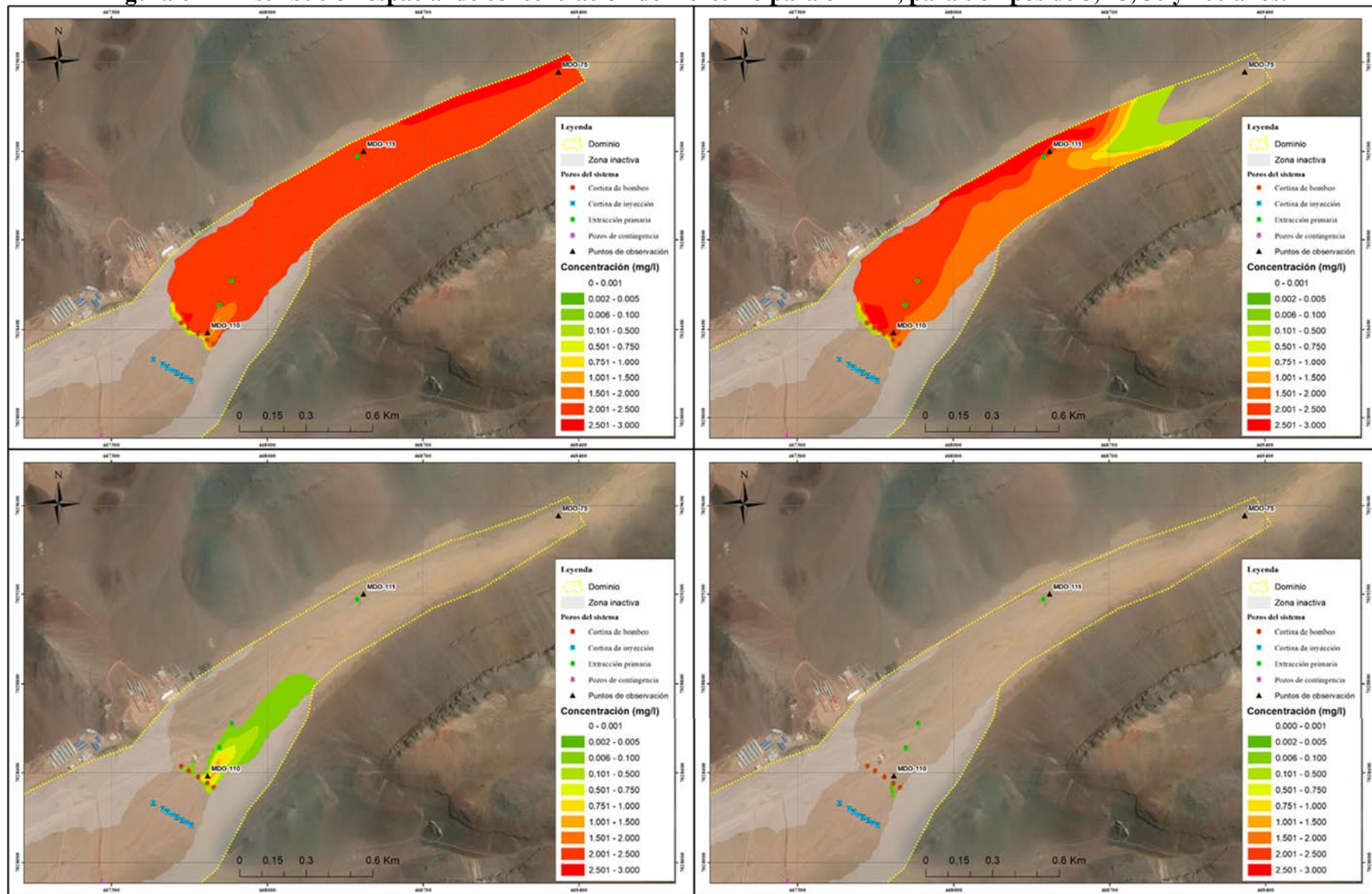
Al comparar la Figura 6-12 y Figura 6-16, que muestran los resultados del E1-1 y E1-5, se observa que al agregar los pozos de extracción extra aguas arriba, genera un efecto de contención de la pluma, de manera que el gradiente de concentración provocado por la reducción de la fuente, se retrasa al transmitirse hacia aguas abajo.

En la Figura 6-17 se observa el avance de la pluma de mercurio sin el efecto de contención hidráulica, de manera que esta abandona el área de interés prácticamente por completo a los 25 años. Este resultado es importante al considerar un objetivo de restauración local del acuífero, de manera que se deja pasar la pluma y el control se realiza aguas abajo.

Al comparar las Figura 6-18 y Figura 6-19, que presentan los resultados del E1-7 y E1-8 respectivamente, se observa que al reducir el caudal total de extracción e inyección, la pluma de mercurio se contiene en menor magnitud en la extracción primaria, de manera que el efecto de la reducción de concentración de la fuente, se traspasa de manera más rápida hacia aguas abajo, generando menores concentraciones.

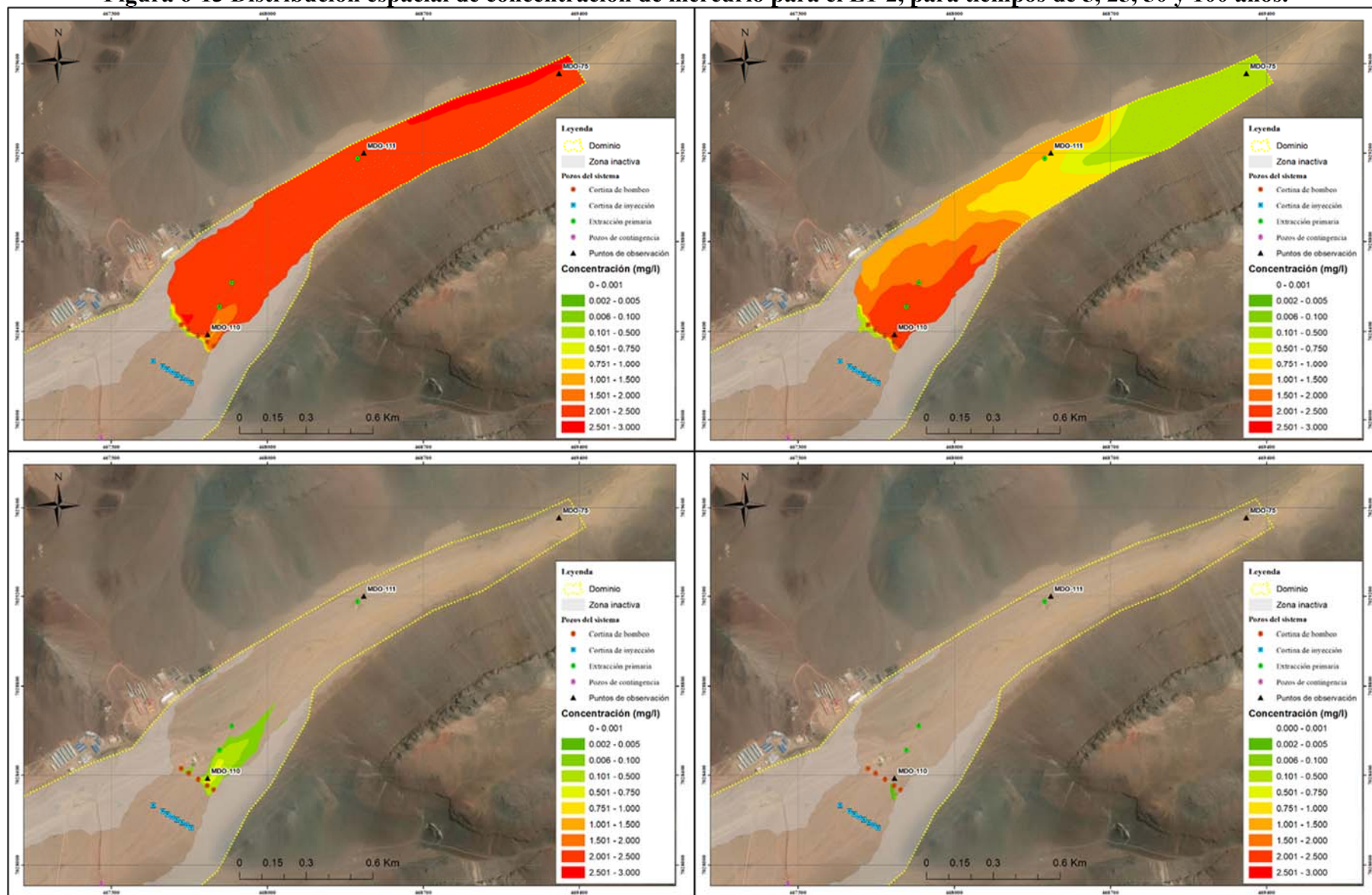
En la Figura 6-20 se presenta el resultado para la configuración alternativa de pozos de bombeo, en donde se ubican en línea a lo largo de un eje longitudinal a través de la quebrada La Coipa. En términos de distribución de concentración, se observa una división generada por la extracción de los pozos, en donde en el sector norte de estos, se alcanzan concentraciones mayores que en el sector sur.

Figura 6-12 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-1, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



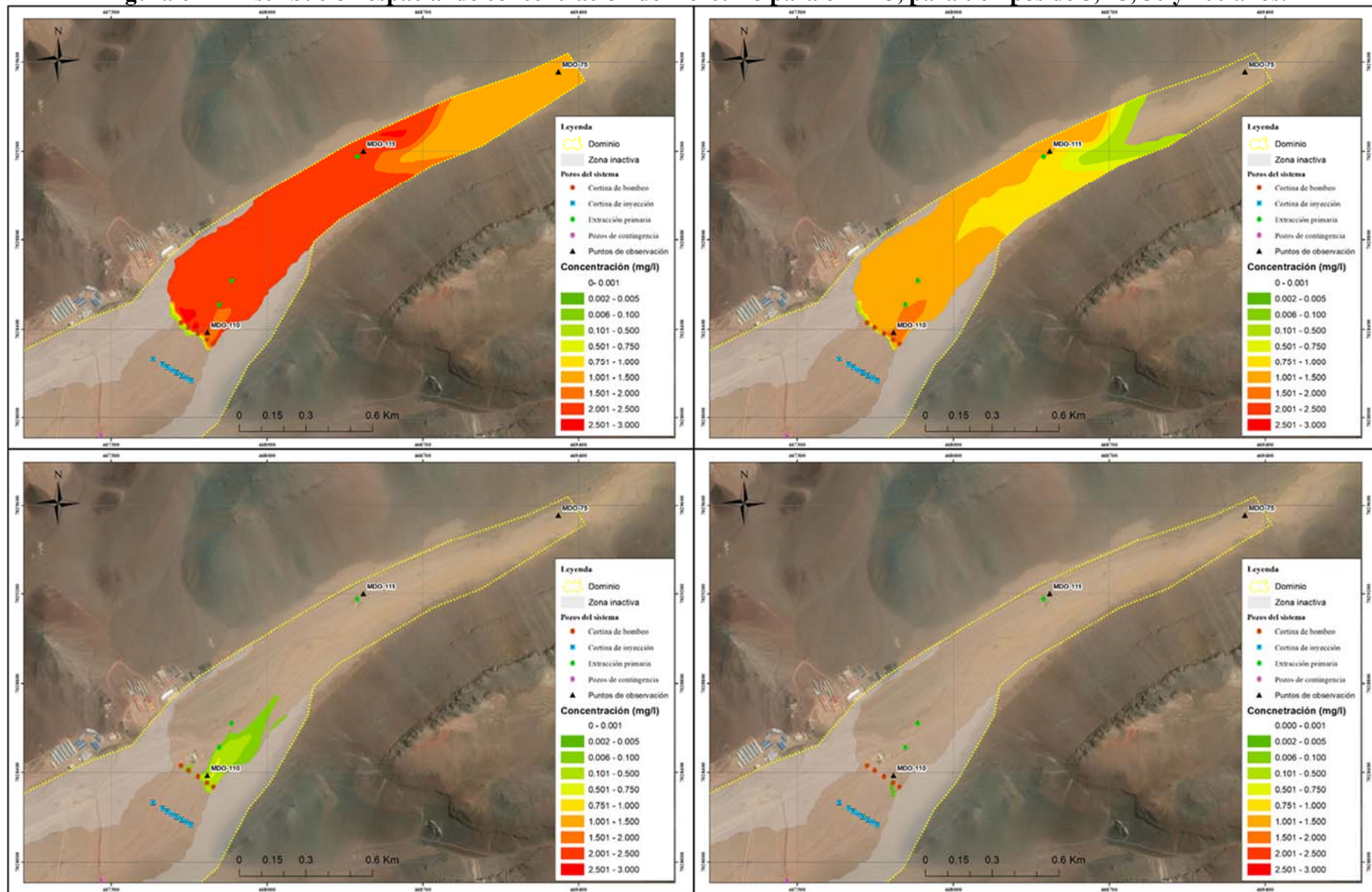
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-13 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-2, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



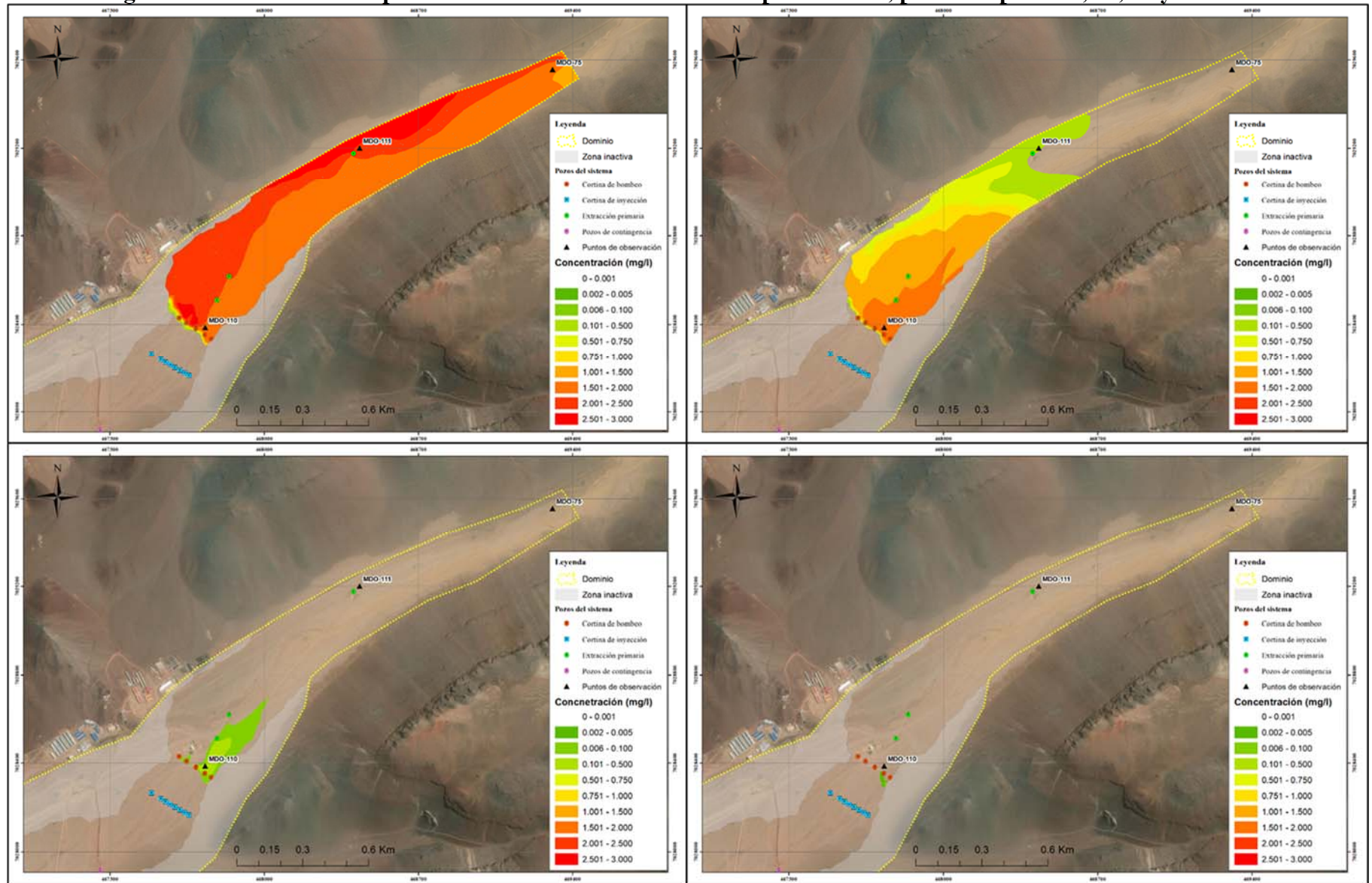
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-14 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-3, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



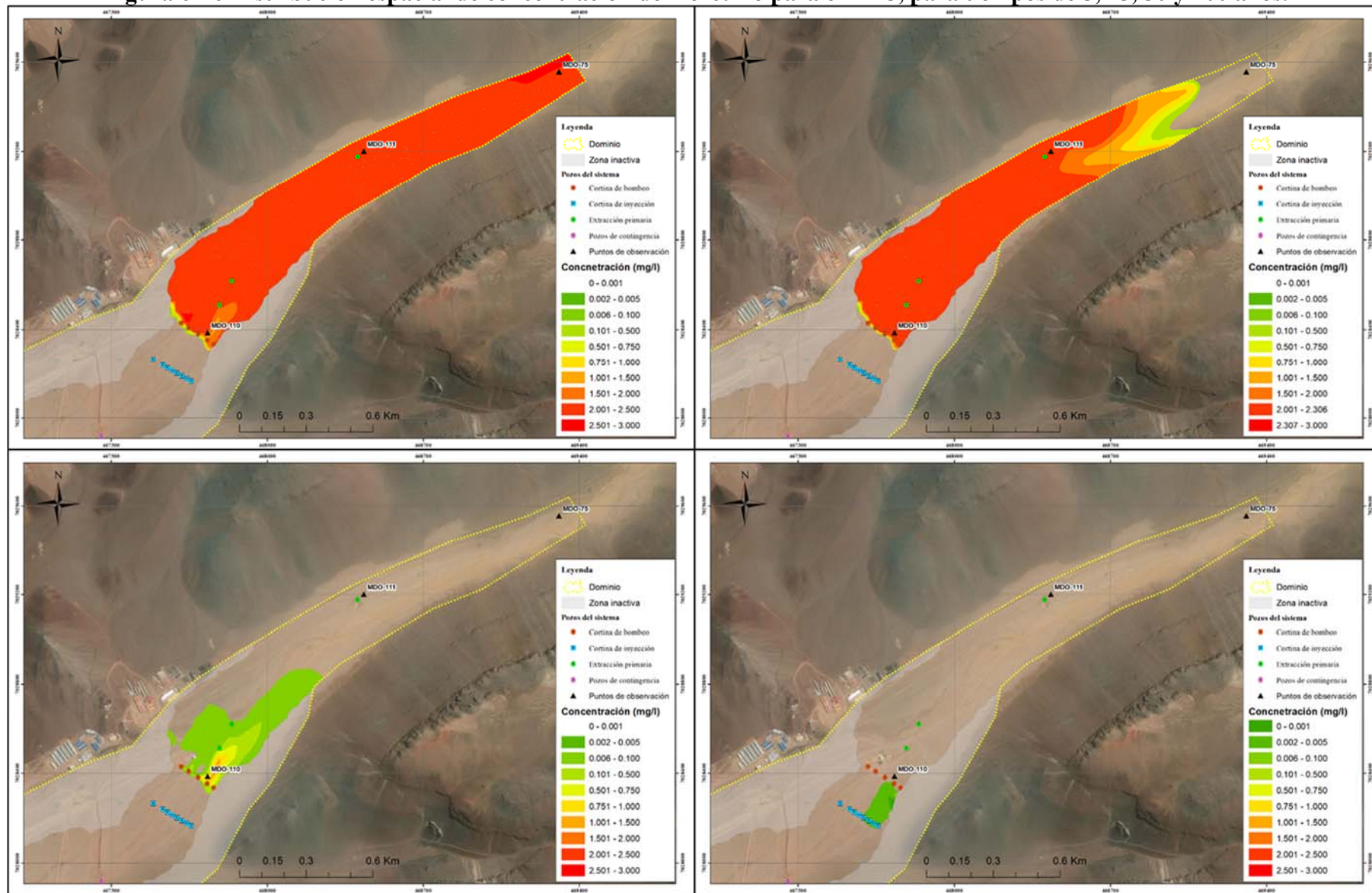
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-15 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-4, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



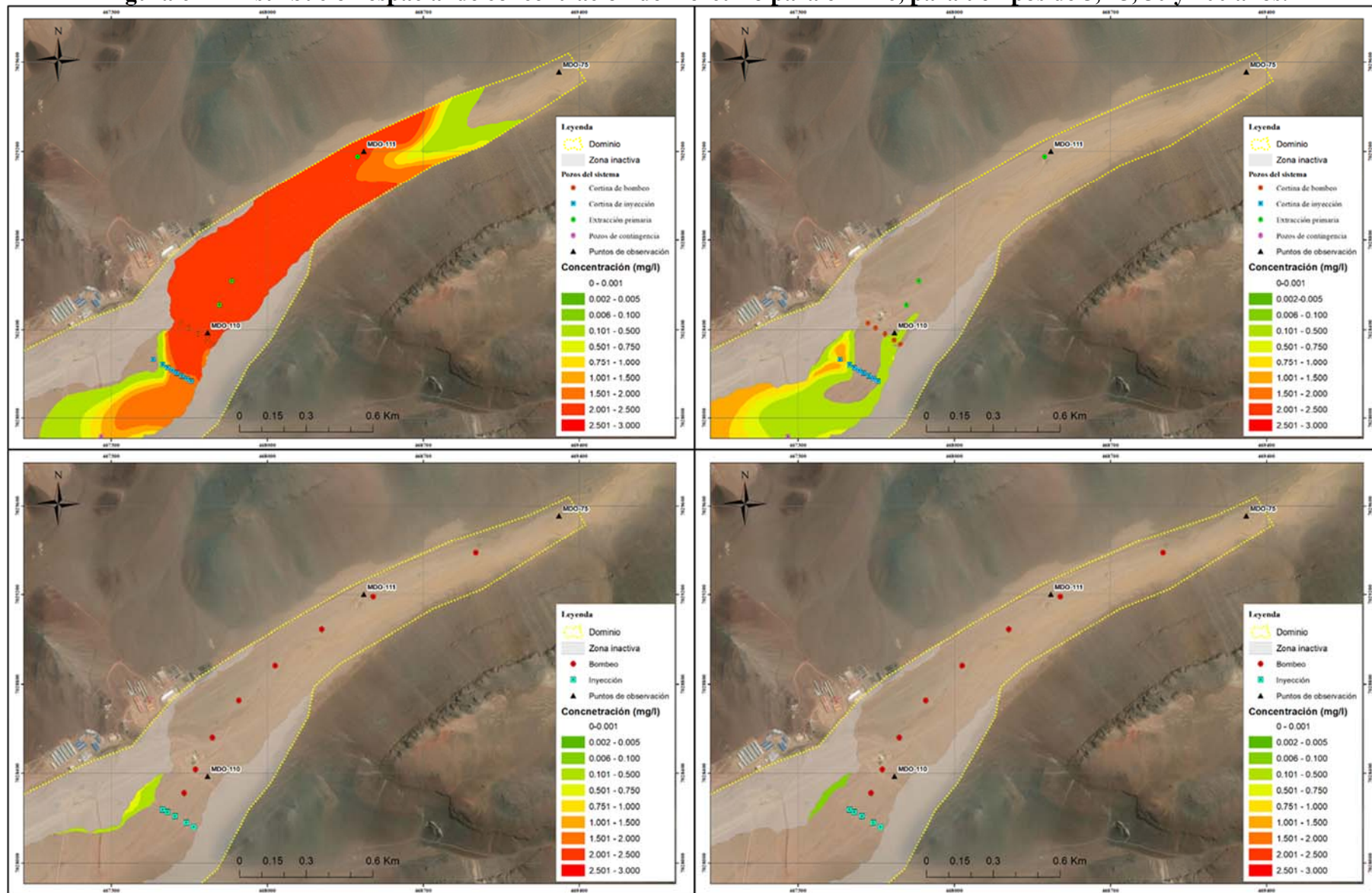
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-16 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-5, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



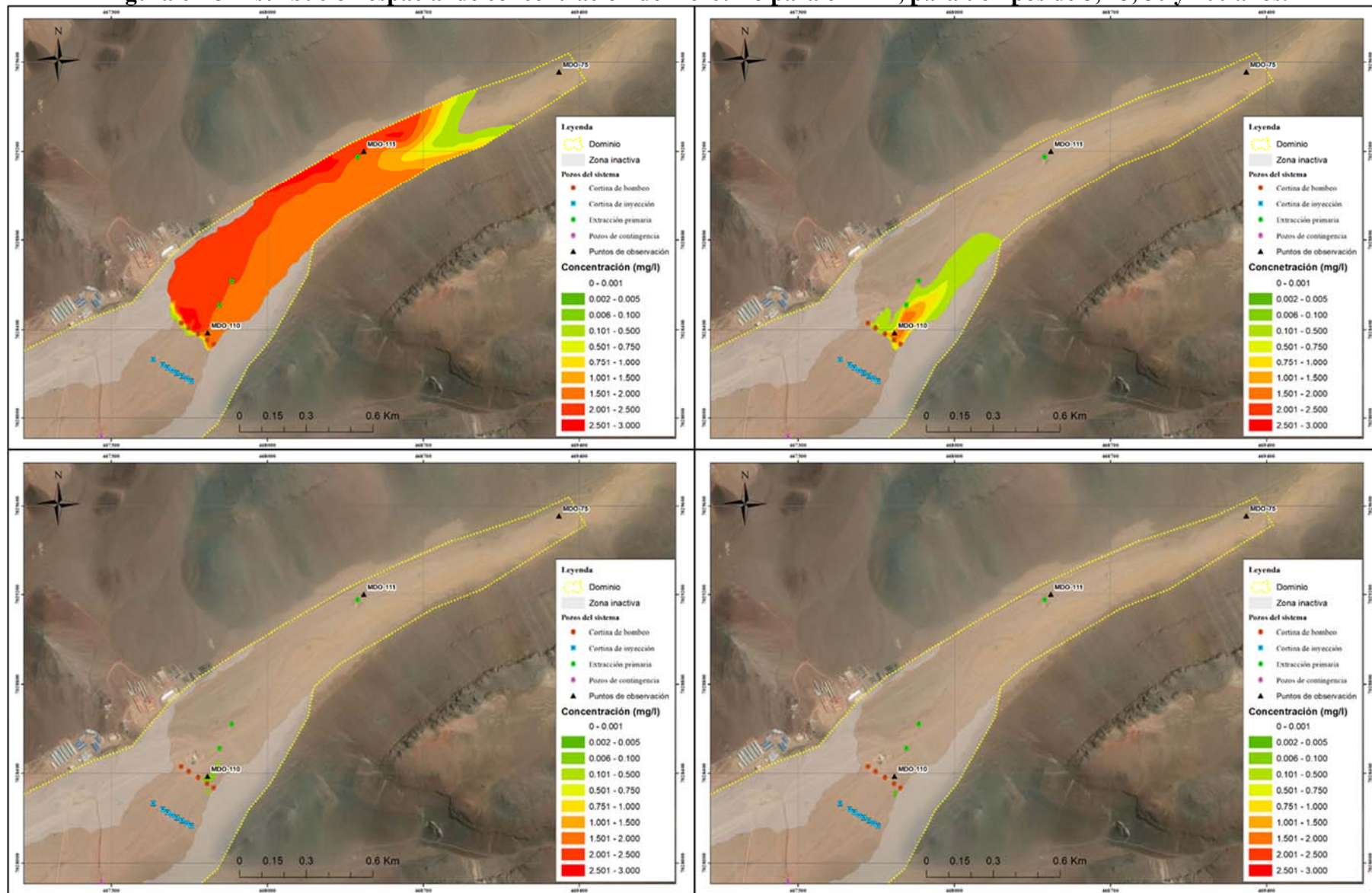
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-17 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-6, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



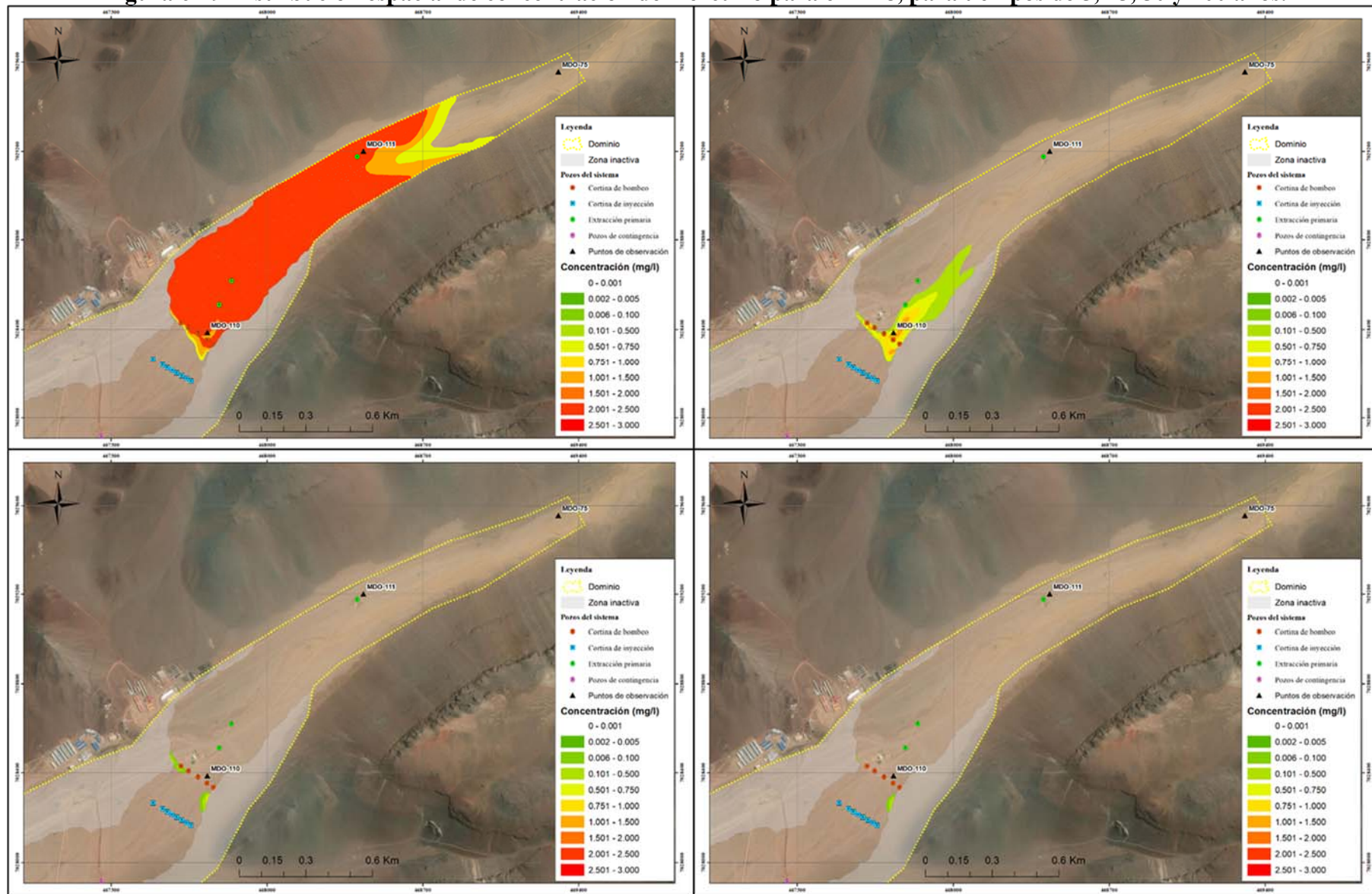
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-18 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-7, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



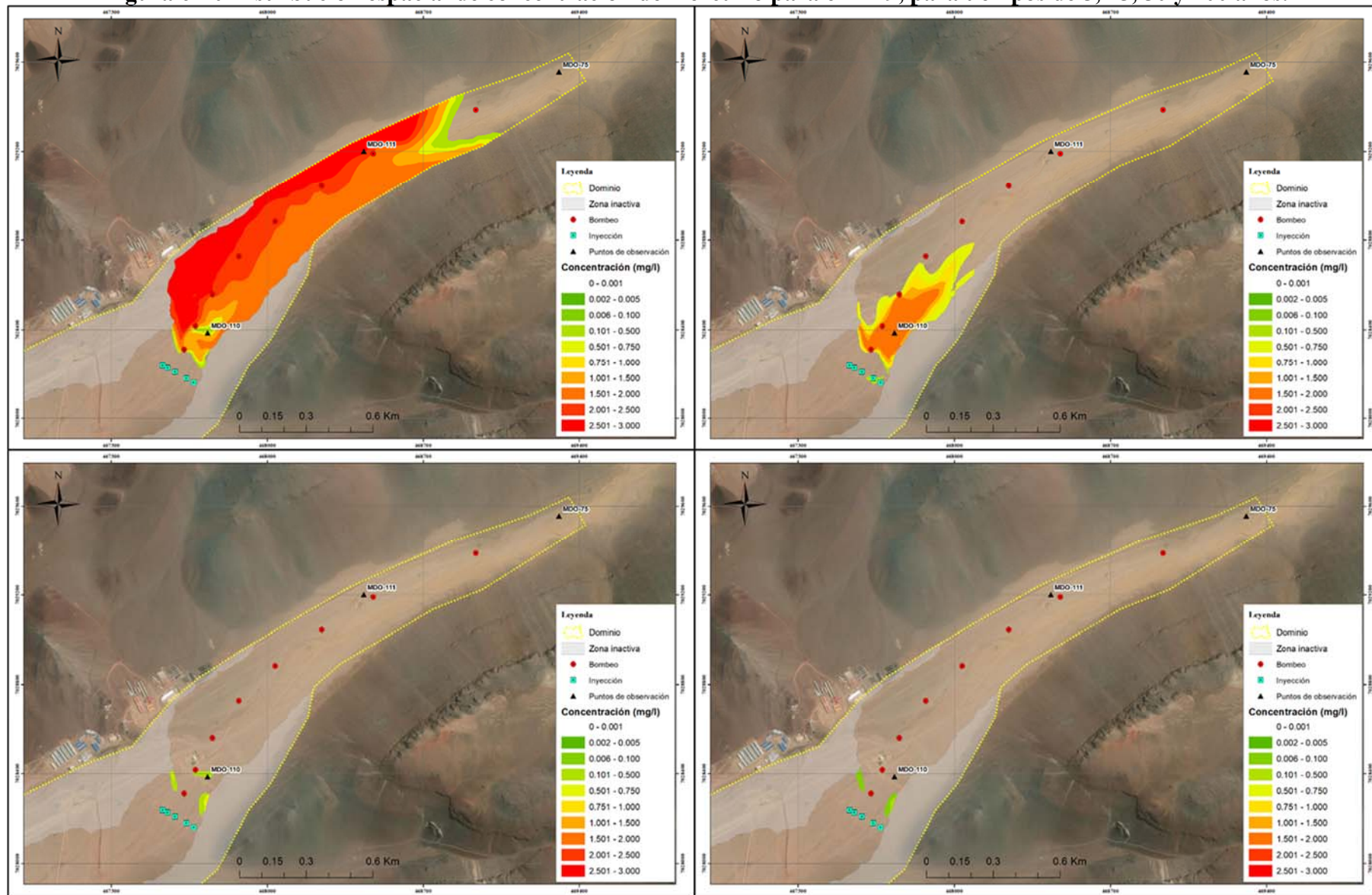
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-19 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-8, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-20 Distribución espacial de concentración de mercurio para el E1-9, para tiempos de 5, 25, 50 y 100 años.



Fuente: Elaboración Propia

6.4. Resultados Conjunto de Escenarios 2

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos a partir de la modelación numérica de los escenarios de simulación correspondientes al conjunto de Escenarios 2. Los resultados apuntan al objetivo de análisis de la eficiencia en términos de la contención hidráulica del sistema de bombeo e inyección, de esta forma el análisis se centra en la trayectoria de las partículas y capacidad de captura de los pozos de bombeo y los gradientes hidráulicos obtenidos a partir de las modificaciones en el patrón de bombeo e inyección.

En la Figura 6-21 se presenta el avance de partículas provenientes desde la entrada del modelo numérico para el escenario E2-1. Como se observa en la figura, al utilizar solamente los pozos de extracción primaria del sistema, una gran cantidad de partículas logran avanzar hacia aguas abajo de la barrera hidráulica, alcanzando a llegar hasta la confluencia con la quebrada Codoceo.

Es importante señalar, que el caudal total extraído es de 5,9 l/s, magnitud menor que el caudal subterráneo pasante por la quebrada.

En la Figura 6-22 se presenta el avance de partículas ingresadas en la entrada del modelo numérico para los escenarios E2-2, E2-3 y E2-4, en donde se observa que, en ningún caso, las partículas sobrepasan la barrera hidráulica. De esta forma se puede concluir que para las configuraciones del E2-2, E2-3 y E2-4, el sistema de contención hidráulica mantiene su eficiencia con respecto al modelo base simulado.

Adicionalmente, es posible analizar el efecto de estas distintas configuraciones de la operación en la extracción de los pozos, en el gradiente hidráulico inverso generado en el sector entre la cortina de inyección y la de bombeo. En la Tabla 6-7 se presentan los valores del gradiente hidráulico medio simulado en esa zona, en donde el signo negativo corresponde al gradiente hidráulico inverso que se opone a la dirección natural del flujo, generado por los pozos de inyección y extracción.

Tabla 6-7. Gradiente hidráulico inverso en zona de contención hidráulica

Escenario	Gradiente hidráulico en sistema de bombeo e inyección
E2-1	0,3%
E2-2	-2,7%
E2-3	-0,9%
E2-4	-1,4%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 6-7 se presenta el resultado del gradiente hidráulico simulado entre la cortina de pozos y la cortina de inyección. Para el caso del E2-1, donde la extracción es menor que el flujo pasante y no se cumple el balance hídrico en el sistema, se observa que el gradiente hidráulico posee signo positivo, en este caso implica que el nivel piezométrico aguas arriba es mayor que hacia aguas abajo, de manera que no se genera el efecto de contención hidráulica requerida en el diseño de estos sistemas.

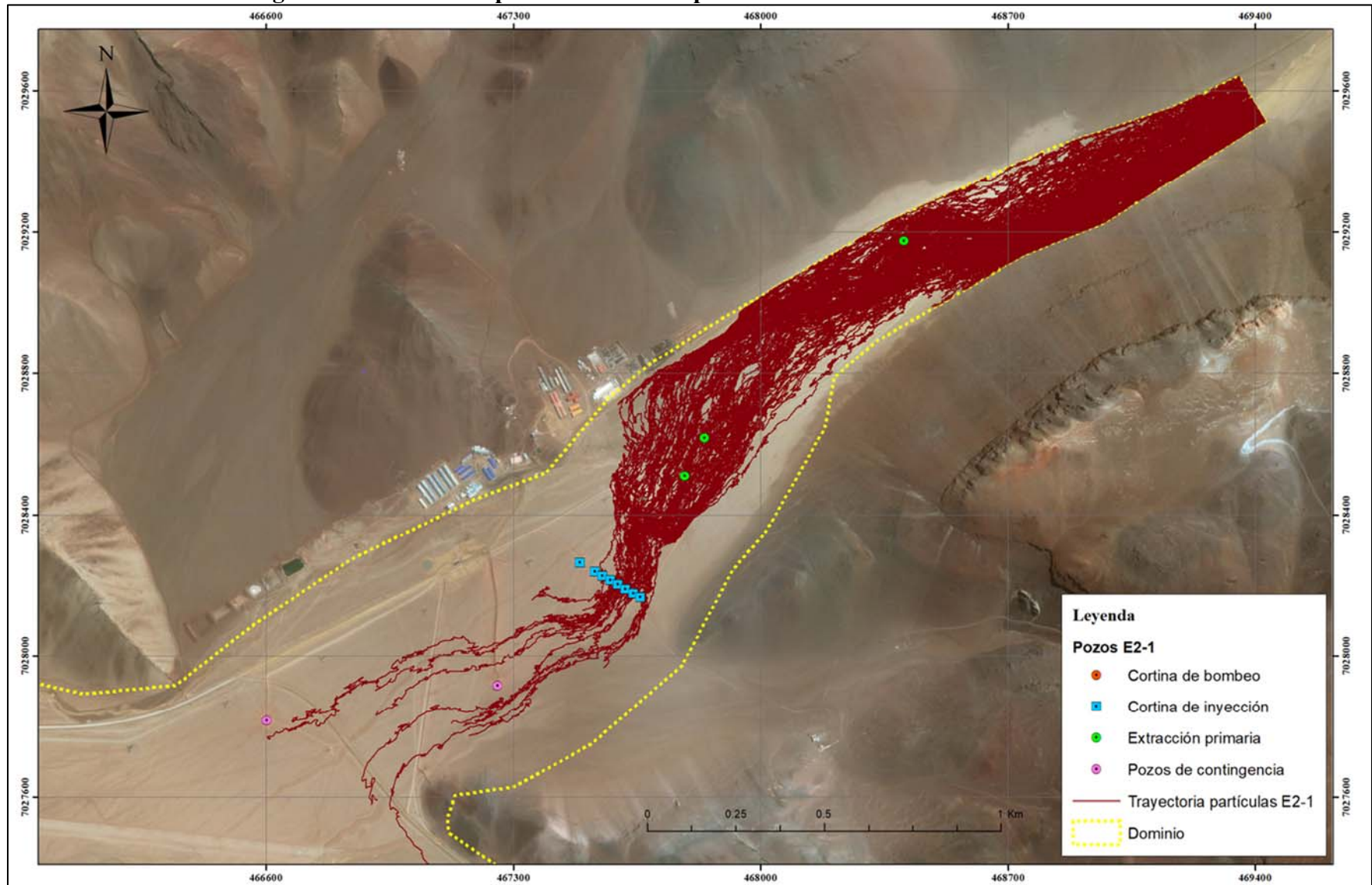
Para los otros escenarios, se obtiene que el sistema logra generar el efecto de gradiente hidráulico inverso (signo negativo), estos resultados coinciden con el análisis de la trayectoria y captura de partículas descrito anteriormente, en el que se logra una contención del 100% del avance de las partículas.

A partir de estos resultados, se puede concluir que es necesario imponer un caudal de inyección y extracción tal que, se genere el efecto de gradiente hidráulico inverso de manera que sea eficaz el efecto de contención del sistema.

De los resultados obtenidos del conjunto de escenarios 2, se destaca que es posible reducir la cantidad de pozos de operación mientras se genere el gradiente hidráulico inverso en el sector de aguas arriba de la cortina de inyección.

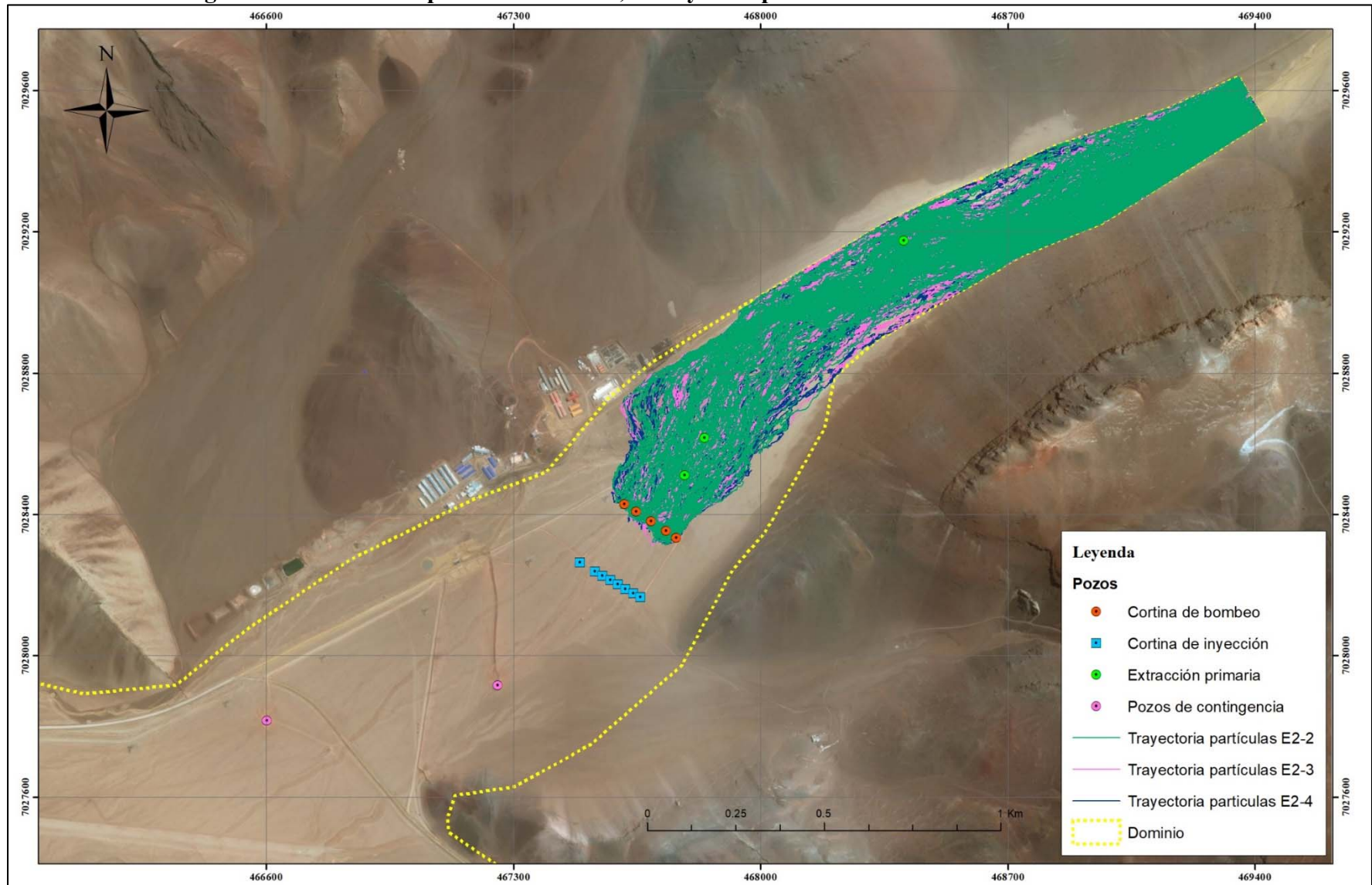
A partir de las simulaciones realizadas, se obtuvo una configuración con una cantidad mínima de pozos (E2-4) que permite contener por completo el avance de la pluma de mercurio en el tiempo modelado. Sin embargo, se debe considerar que no se considera una capacidad máxima de caudal que puede extraer cada uno, ya que, si bien se redujo el número total de pozos, el caudal extraído se mantuvo.

Figura 6-21 Avance de partículas en E2-1 provenientes desde la entrada del sistema



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-22 Avance de partículas en E2-2, E2-3 y E2-4 provenientes desde la entrada del sistema



Fuente: Elaboración Propia

6.5. Resultados Conjunto de Escenarios 3

En esta sección se presentan los principales resultados de la modelación numérica de los escenarios del conjunto 3. El análisis se enfoca principalmente en la función de contención hidráulica del sistema de bombeo e inyección.

En las Figura 6-23 a 6-27 se presenta la distribución final de concentración para cada uno de los cinco escenarios simulados.

Como se observa en las Figura 6-23, 6-12 y 6-13, que representan los casos E3-1, E3-2 y E3-3 respectivamente, la pluma de mercurio no logra sobrepasar la barrera de inyección del sistema.

Por otro lado, en las Figuras 6-14 y 6-15, que representan los casos E3-4 y E3-5, se observa que la pluma de mercurio avanza hacia aguas abajo de la barrera hidráulica.

De esta forma, se observa la correlación entre la relación entre la eficiencia en la contención de la pluma de mercurio y la razón entre el caudal total extraído con el caudal total pasante. Para los casos en donde el caudal total extraído es mayor a un 90% del caudal subterráneo pasante, el sistema logra contener el avance de la pluma.

Del mismo modo en la Figura 6-28 se analiza el efecto de eficiencia de captura de los pozos mediante el seguimiento de la trayectoria de partículas provenientes desde la entrada del modelo numérico. Tal como se señaló previamente, en los escenarios E3-1 y E3-2 se observa que existe una contención total de las partículas provenientes de la fuente de contaminación, sin embargo, en los escenarios E3-3, E3-4 y E3-5 se observa que la barrera hidráulica de pozos no cumple con su objetivo de detener el avance de las partículas contaminadas.

En particular se observa que al captar un caudal total equivalente a un 90% o más del caudal total pasante, es posible contener por completo el avance de la pluma de contaminación. Según las simulaciones realizadas, con una captación menor a un 90% del caudal total pasante, la cortina hidráulica y el sistema de bombeo e inyección, no son 100% efectivos en la contención de la pluma, incrementando el número de partículas que traspasan la barrera a medida que se disminuye el caudal total de extracción.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que es relevante conocer y cuantificar el caudal pasante de entrada al sistema, ya que este es un componente fundamental que permite poder diseñar la capacidad total a instalar del sistema de bombeo e inyección.

Del mismo modo, los resultados indican que existe un nivel de confianza en el cual se puede permitir el captar un caudal menor al flujo total pasante, este umbral se cuantifico en torno a un 10%, es decir que bajo la configuración actual de operación en la quebrada La Coipa, es necesario captar al menos un 90% del caudal total pasante mediante los pozos de extracción, y luego inyectar la misma cantidad de agua limpia, para mantener un sistema completamente eficiente en el control del avance de la pluma de mercurio.

Figura 6-23 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-1



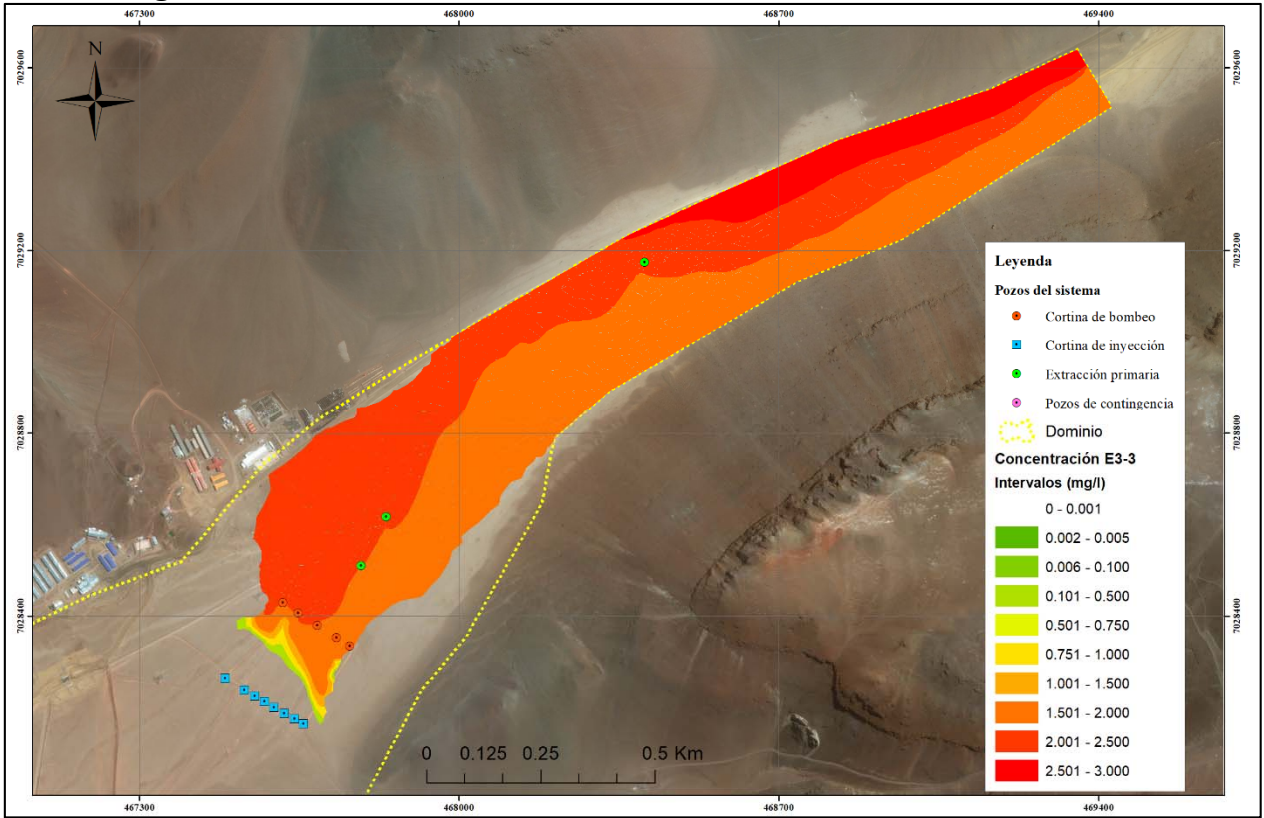
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-24 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-2



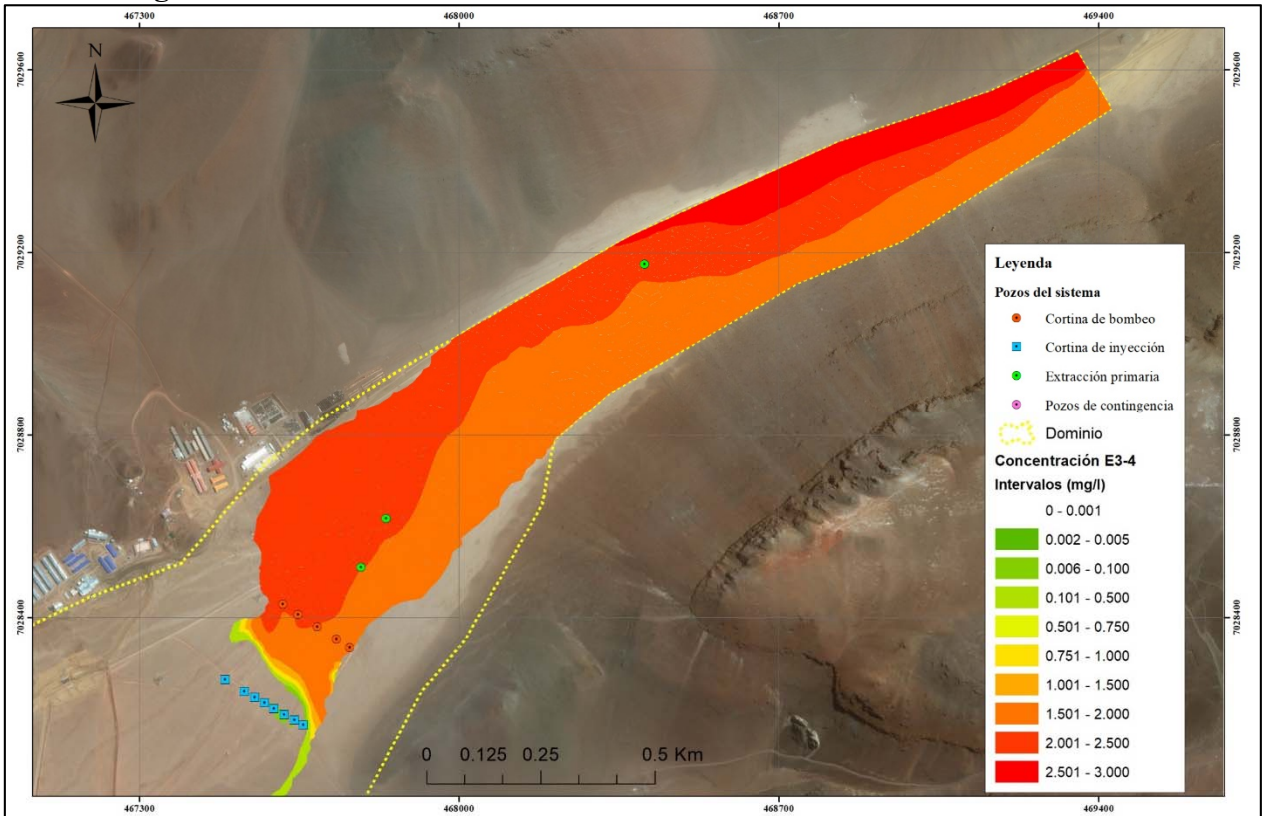
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-25 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-3



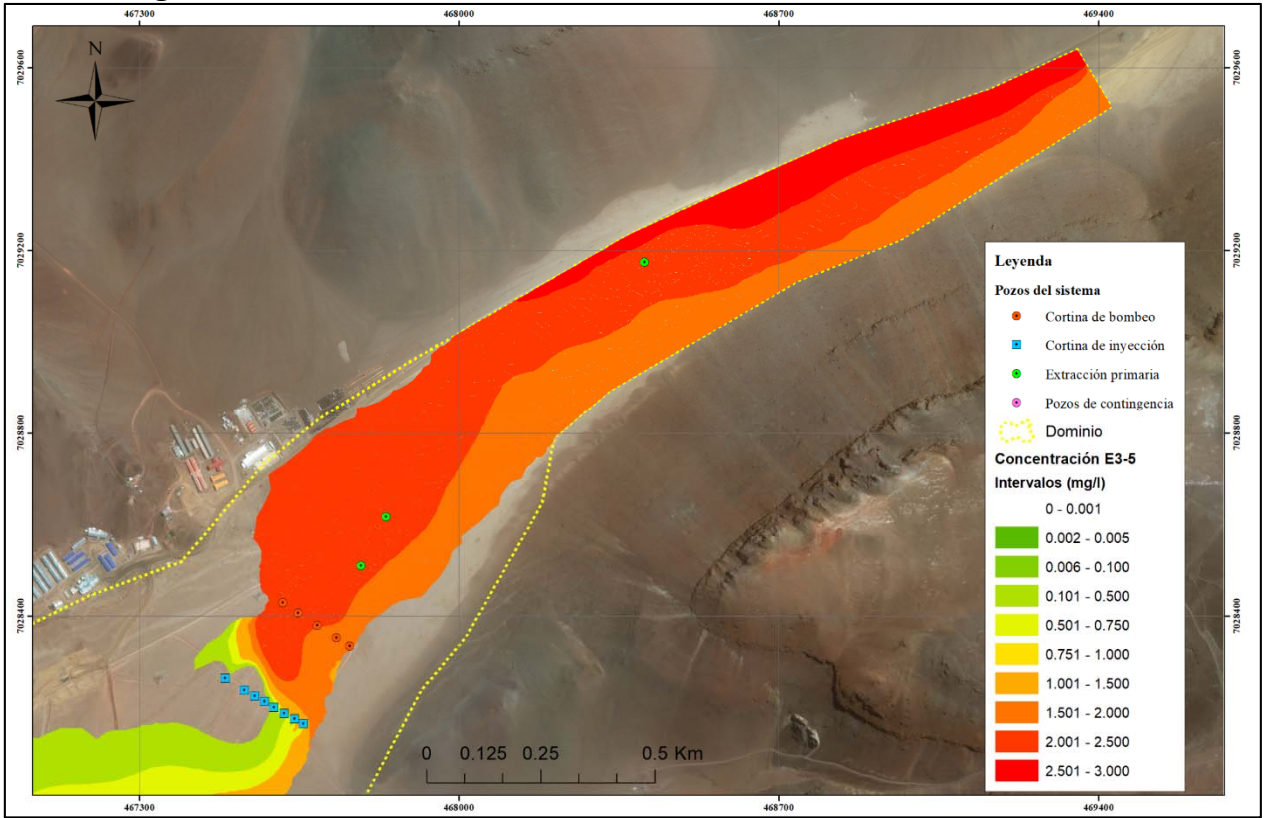
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-26 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-4



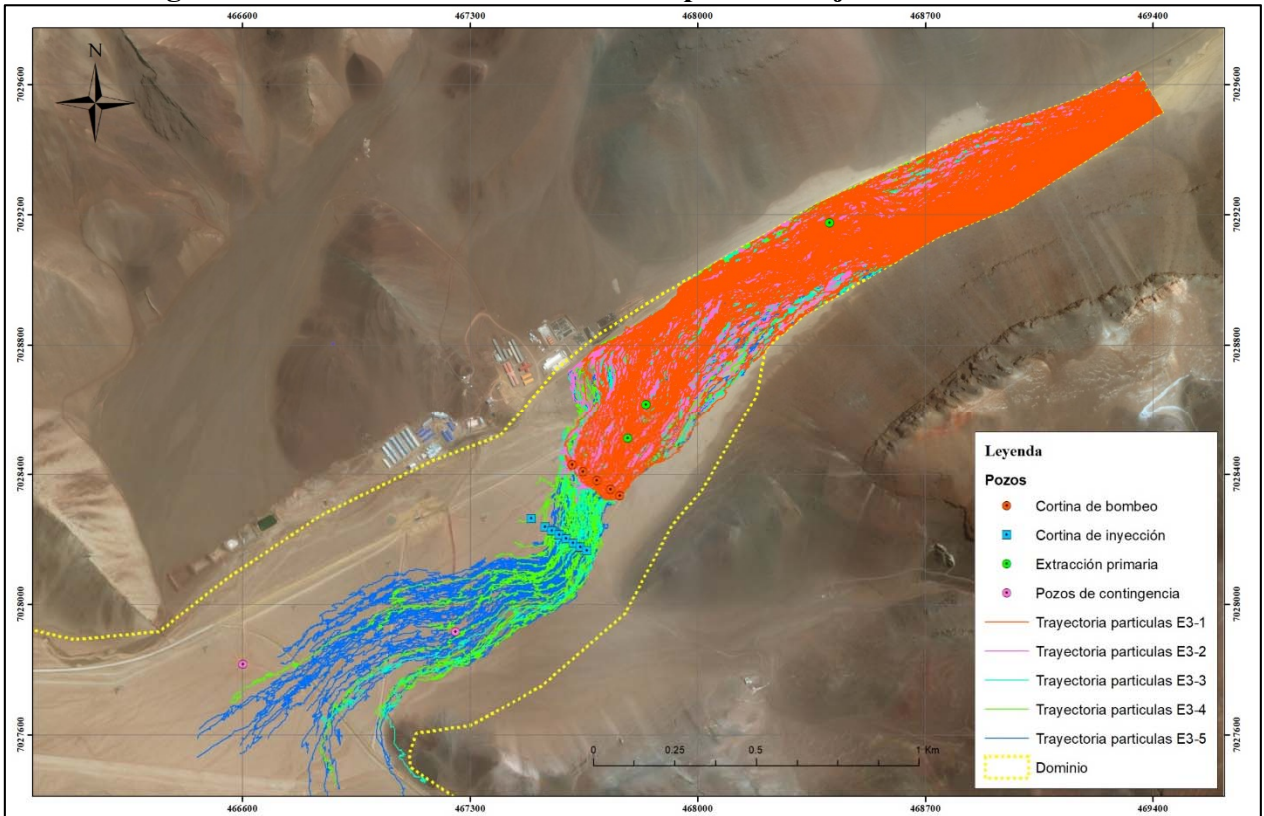
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-27 Resultado de concentraciones en dominio de modelación E3-5



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-28 Partículas desde la entrada para el conjunto de escenarios 3



Fuente: Elaboración Propia

6.6. Resultados Conjunto de Escenarios 4

En esta sección se presentan los principales resultados de la modelación numérica de los escenarios del conjunto 4. El análisis se enfoca principalmente en la función de contención hidráulica de los distintos diseños de sistemas de bombeo e inyección.

En la Figura 6-29 se presenta la distribución de concentración de mercurio obtenida de la simulación del escenario E4-1. Como se puede observar, este diseño de dos sistemas de bombeo e inyección ubicados en paralelo entre sí, y transversalmente a la dirección del flujo del acuífero, no logra contener el avance de la pluma de mercurio.

Con respecto al gradiente hidráulico obtenido para esta configuración, en ambas cortinas de bombeo e inyección no se logra generar un gradiente hidráulico inverso a la dirección natural del flujo.

Esta condición se verificó al simular en distintas ubicaciones el sistema de bombeo e inyección, en ningún caso se logra revertir el gradiente hidráulico natural, de manera que el efecto de contención hidráulica no aplica. Esta situación se debe al separar la cantidad de flujo extraído e inyectado en dos cortinas, al imponer un caudal de 4,25 l/s (50% del caudal pasante) en cada una, no es posible obtener el efecto suficiente de alzamiento (por la inyección) y reducción (por bombeo) del nivel piezométrico para revertir el gradiente hidráulico natural.

Del mismo modo se analizaron los resultados obtenidos para el E4-2, en donde en la Figura 6-30 se presenta la distribución final de concentración en el sistema operando con la configuración descrita para el respectivo escenario, la cual consiste en la ubicación de los ocho pozos de extracción en serie, seguidos por una cortina ubicada transversalmente a la quebrada.

Como se observa en la figura anterior, la pluma de mercurio queda contenida por el sistema de bombeo e inyección planteado. En este escenario de análisis, se logró revertir el gradiente hidráulico natural en el sector de aguas arriba de la cortina de inyección, con una magnitud de un -2%, bajo esta condición el sistema continúa actuando como una barrera hidráulica de contención.

Finalmente, en el escenario E4-3, en donde la configuración de pozos sigue una estructura triangular o en “V”, el sistema planteado logra contener completamente el avance de la pluma de mercurio. En la Figura 6-31 se presenta la distribución final de concentración en el espacio.

En este escenario, el bombeo e inyección inducen las características necesarias para revertir el gradiente hidráulico natural del sistema, obteniendo así un gradiente inverso de -0,4% entre la barrera de inyección y la última fila de pozos de bombeo. Si bien este gradiente es menor que el conseguido tanto para la actual configuración del modelo base y del escenario E4-2, logra cumplir con el objetivo de ejercer como una barrera hidráulica de contención.

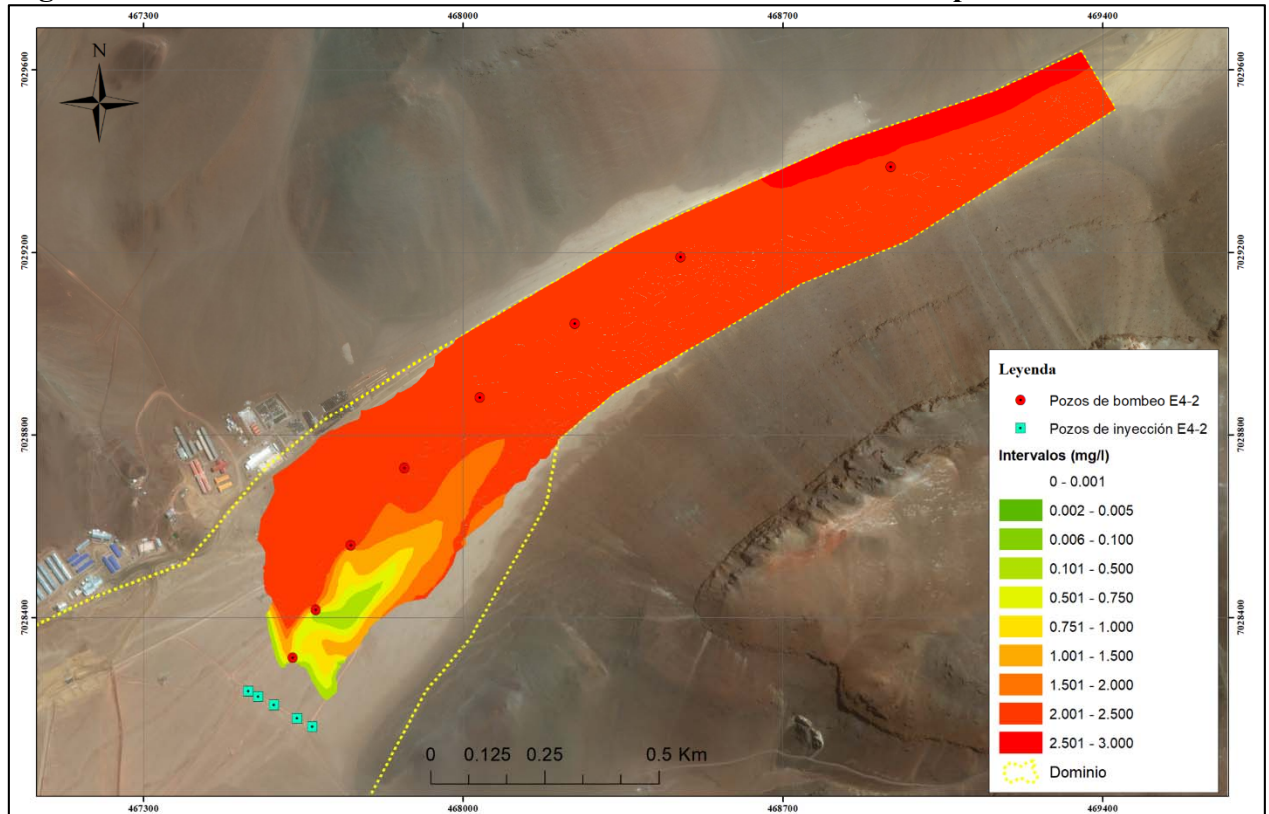
En las Figura 6-32 a 6-23 se presenta el resultado del análisis de la trayectoria de partículas ingresadas en la sección de entrada del modelo numérico. Como se observa en la figura, los resultados obtenidos avalan lo descrito anteriormente, en donde el diseño del sistema de bombeo e inyección planteado en el E4-1 no es capaz de contener el avance de la pluma de mercurio, por el otro lado los diseños planteados tanto en el E4-2 y E4-3, cumplen con el objetivo de contener la contaminación.

Figura 6-29 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-30 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-2



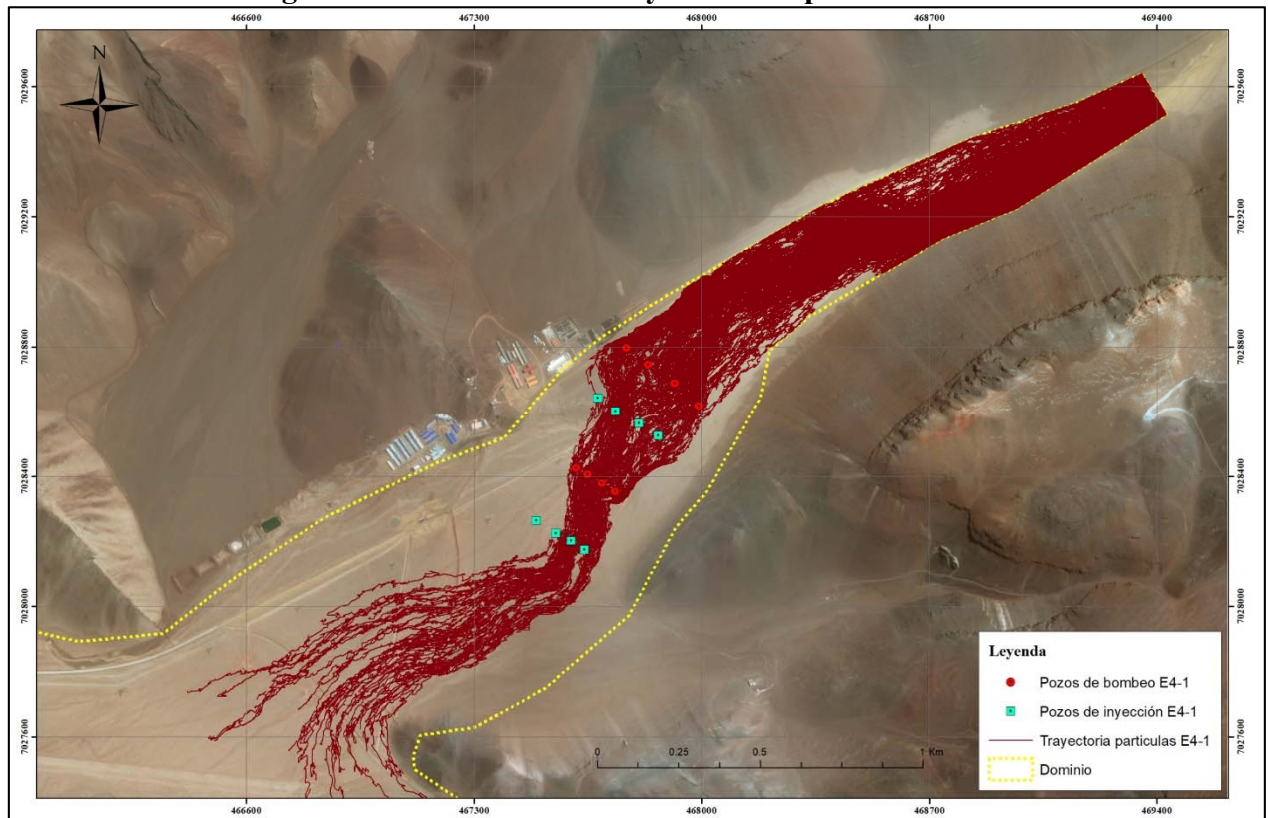
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-31 Resultado de concentraciones en dominio de modelación para el escenario E4-3



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-32 Resultado de trayectoria de partículas E4-1



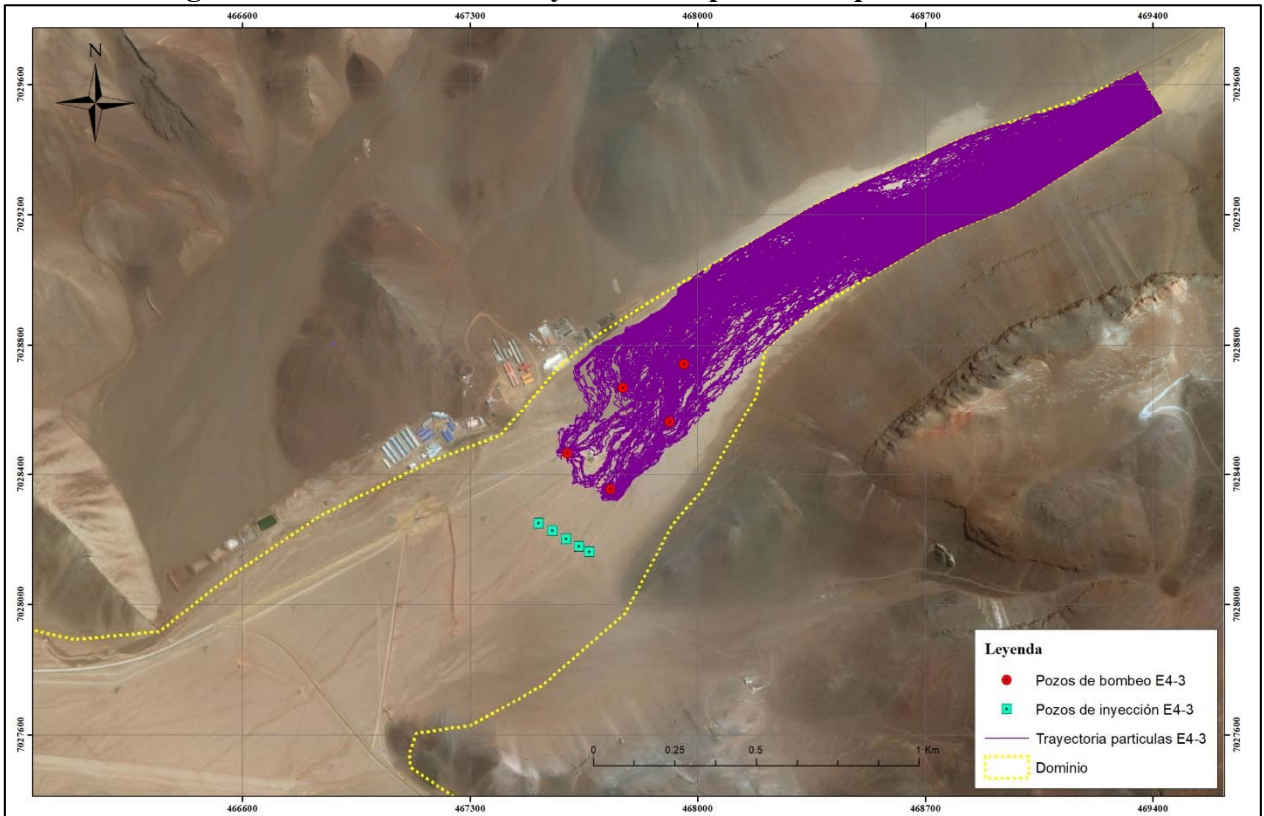
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-33 Resultado de trayectoria de partículas E4-2



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6-34 Resultado de trayectoria de partículas provenientes E4-3



Fuente: Elaboración Propia

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones Generales

A partir de lo presentado en este trabajo de tesis, se presentan las conclusiones diferenciadas según la temática respectiva.

Conclusiones respecto al enfoque de modelación:

Con respecto a los enfoques de modelación numérica para resolver el transporte de soluto por medio poroso, tanto diferencias finitas como elementos finitos pueden resolver de manera adecuada este problema, siendo ambos ampliamente utilizados en problemas de tipo ambientales, de ingeniería o de investigación.

En términos comparativos, los elementos finitos permiten trabajar con geometrías más complejas y poder hacer un análisis más refinado en elementos particulares de un modelo hidrogeológico, como en pozos de bombeo, por ejemplo. Este refinamiento específico, no genera un aumento general en la cantidad de elementos del modelo total, de manera que computacionalmente es más eficiente que el enfoque de diferencias finitas.

Las simulaciones preliminares permitieron establecer algunas diferencias con respecto a la modelación del transporte de soluto mediante diferencias finitas o elementos finitos. En primer lugar, el mallado en elementos finitos presenta una mayor flexibilidad a la hora de representar ciertos elementos, que para las simulaciones de casos reales es una herramienta importante. En segundo lugar, los tiempos de simulación para un régimen transiente, en diferencias finitas exceden notablemente los tiempos empleados mediante elementos finitos, obteniendo soluciones prácticamente iguales.

A partir de estos resultados, se establece los elementos finitos en su software FEFLOW versión 7.1, como base para la modelación del sistema real en estudio.

Conclusiones con respecto a representación del sistema La Coipa.

Tal como establece la EPA (1999), para un correcto funcionamiento de un sistema de bombeo e inyección para la remediación de sistemas contaminados, es importante contar con un modelo numérico adecuado, capaz de reproducir correctamente los fenómenos físicos presentes.

De esta forma se construye un modelo numérico utilizando elementos finitos, en base al software FEFLOW versión 7.1, el cual fue calibrado tanto el flujo (niveles) como para las concentraciones, a partir de mediciones realizadas en distintos puntos de monitoreo. El ajuste obtenido se considera adecuado, ya que, en términos de flujo, los errores medios absolutos (MAE) y error cuadrático medio (RMS), son del orden de 1 m, que en términos normalizados representan errores bajo el 1%.

A partir de este ajuste obtenido, se puede concluir que el modelo numérico construido en el presente trabajo de tesis, representa de manera adecuada el sistema acuífero de la quebrada La Coipa, con el sistema de remediación operando. De manera, que es posible utilizar este modelo como base para el desarrollo de escenarios de simulación.

Al evaluar el sistema actual implementado en la quebrada La Coipa, es posible observar que el mecanismo de bombeo e inyección es capaz de controlar el avance de la pluma de mercurio, del mismo modo, un análisis de las zonas de captura de los pozos de bombeo, muestran que estos abarcan toda la extensión lateral del acuífero, de manera que es posible de captar cualquier partícula proveniente desde aguas arriba.

La operación de la barrera de pozos de inyección y bombeo, generan las alteraciones de carga piezométrico suficientes como para invertir el gradiente hidráulico del sistema en ese sector. Este efecto es considerado de suma importancia para el control hidráulico de la pluma de mercurio. En particular, la inyección de agua limpia ubicada inmediatamente aguas abajo del bombeo, logra el efecto hidráulico de alzamiento del nivel piezométrico, que permite lograr el objetivo de contención del avance de la pluma de mercurio.

Además, se observa que existe una zona de captura que proviene desde aguas abajo asociada al flujo, inducido por los pozos de inyección, de manera que se genera un efecto de dilución en los pozos de bombeo, debido a la captación de esta agua ya tratada.

El sistema actual implementado en la quebrada La Coipa, cumple eficientemente con el objetivo de contención y control hidráulico del avance de la pluma de mercurio, sin embargo, no es posible concluir que se logre una limpieza de acuífero, ya que no se encuentra controlada por completo la fuente de contaminación y el ingreso continuo de mercurio al sistema, no hace factible restaurar el acuífero.

La caracterización de la geología y propiedades hidrogeológicas del medio juegan un rol fundamental a la hora de definir la ubicación del sistema de bombeo e inyección, ya que estas propiedades determinan direcciones preferenciales por las que el flujo puede adquirir una mayor velocidad y a su vez transportar una mayor cantidad de masa.

Conclusiones respecto a los Escenarios de simulación

De los resultados obtenidos del Escenario 1, se puede concluir que el sistema acuífero de la quebrada La Coipa es posible de ser restaurado, aplicando medidas de control en la fuente de contaminación. Esta medida, más la contención hidráulica generada por el sistema de bombeo e inyección, actúan en conjunto para controlar y disminuir las concentraciones de mercurio en el sistema.

Al aplicar diferentes medidas de control en la fuente, los tiempos de restauración son relativamente parecidos, con una restauración completa entre los 70 y 80 años. Al reducir de forma paulatina la concentración de la fuente de contaminación, provoca reducciones de hasta 6 años en los tiempos de limpieza del acuífero. Todas estas soluciones apuntan a que, para lograr una limpieza del acuífero es fundamental aplicar un control absoluto de la fuente de contaminación, que se encuentra ubicada aproximadamente 2 km aguas arriba del dominio de modelación.

Otra conclusión importante a señalar, se obtuvo a partir de las simulaciones del conjunto de escenarios 2, en donde se constató que es posible lograr el objetivo de contención de la pluma de contaminante con un menor número de pozos en operación, sin embargo, es necesario mantener los caudales extraídos en la situación actual. Este escenario hipotético, si bien se obtuvo como resultado que con tan solo dos pozos de la cortina de bombeo era posible contener el avance de la pluma, en la realidad es necesario diseñar en base a las capacidades máxima de bombeo de cada pozo. Otro aspecto relevante, es en términos de margen de seguridad, ya que, al operar con tan solo dos pozos, en caso de eventualidades de falla de uno de estos, mantención o limpieza, el sistema quede susceptible al avance de la pluma de mercurio.

A partir de los resultados obtenidos de los escenarios de simulación 3, la magnitud total de extracción de los pozos de bombeo, debe ser al menos un 90% del caudal total pasante como flujo subterráneo. De esta forma, esta variable adquiere mayor relevancia en el proceso de diseño de un sistema de bombeo e inyección, siendo la magnitud que definirá las capacidades de instalación de los pozos. Debido a esto, es importante contar con mediciones y trabajos de campo que permitan

estimar esta variable con la menor incertidumbre posible, realizando pruebas de bombeo para conocer los parámetros hidrogeológicos locales, realizar ensayos geofísicos de manera de conocer la geometría del acuífero, instalar pozos de observación con mediciones de nivel, de manera de poder conocer el gradiente hidráulico.

La distribución de concentraciones en el espacio, calculadas a partir del modelo base realizado, sirven para definir diseños alternativos de remediación. En particular, para un correcto diseño es necesario contar con una barrera de inyección ubicada inmediatamente aguas abajo del sistema de bombeo, con una magnitud equiparable al flujo subterráneo pasante por el acuífero, de manera de generar el gradiente hidráulico inverso que actúa como un sistema de contención hidráulico eficiente.

Conclusiones con respecto a las recomendaciones en diseño de sistemas de remediación basados en bombeo e inyección

A partir del análisis del modelo numérico del caso real interpretado de la quebrada La Coipa, considerando el Modelo Base calibrado y las posteriores simulaciones de escenarios, es posible establecer las siguientes recomendaciones con respecto a la implementación de un sistema de remediación y la limpieza de un acuífero contaminado.

- La solución en termino de distribución de los pozos de bombeo, no es única y la ubicación óptima requiere un estudio en profundidad de distintos factores que dependen de la cantidad de agua que transporta el sistema, la magnitud de las concentraciones y propiedades
- Se debe asegurar la generación de un gradiente hidráulico inverso en la zona de la cortina de bombeo e inyección.
- Se requiere de una captura desde los pozos de extracción, de al menos un 90% del total del flujo pasante del acuífero contaminado. Esta extracción permite la contención hidráulica del avance de la pluma.

Es importante contar con mediciones en terreno que permitan caracterizar de manera adecuada parámetros hidrogeológicas y geométricas del acuífero, y así poder caracterizar de forma más adecuada el balance hídrico dentro del sistema hidrogeológico, para luego estimar el flujo pasante.

- De manera de lograr una limpieza del acuífero y reducir el tiempo para lograr rangos de línea base del sector contaminado, es necesario realizar medidas de contención en la fuente de contaminante, ya que ésta, corresponde al aspecto más relevante para lograr los objetivos de restauración del acuífero contaminado.

De esta forma, se requiere caracterizar de manera adecuada la fuente de contaminación, realizar los estudios necesarios para conocer las concentraciones, distribución espacial y vertical de las concentraciones, entre otros.

7.2. Recomendaciones para Trabajos Futuros

Este trabajo de tesis aborda el problema de contaminación de acuíferos con los objetivos principales de analizar un caso real contaminado por una pluma de mercurio, y mediante simulaciones numéricas analizar distintas soluciones para la limpieza del acuífero, como también la capacidad de contención de un sistema de bombeo e inyección.

Sin embargo, surgen una serie de recomendaciones para ser consideradas para el desarrollo de trabajos futuros de manera de profundizar en temas de limpieza y contención en sistemas contaminados.

- En primer lugar, es recomendable contar con estudios geológicos más detallados, que permitan caracterizar estructuras o sistemas de fallas, ya que estas pueden tener un rol hidrogeológico importante en términos de transporte de contaminante por vías preferenciales.
- Contar con información de concentraciones en el tiempo, de forma de poder caracterizar la dinámica del movimiento de la pluma. Además de utilizar los datos para calibrar de manera más adecuada los distintos parámetros numéricos asociados a la ecuación del transporte de soluto.
- Se recomienda analizar la fuente de contaminante, realizar un modelo numérico de manera de que pueda ser acoplado a sectores hacia aguas abajo para analizar el movimiento de la pluma de mercurio.
- Considerar efectos en los términos reactivos en la ecuación de transporte y en el modelo numérico, y así analizar la sensibilidad de los resultados ante la incorporación de estos parámetros.

BIBLIOGRAFÍA

- CID, D. (2014). MODELAMIENTO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO DEL RAJO ANDACOLLO. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Cohen, R. M., Mercer, J. W., Greenwald, R. M., & Beljin, M. S. (1997). *Design guidelines for conventional pump-and-treat systems*. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Cunningham, J. A., & Reinhard, M. (2002). Injection-extraction treatment well pairs: An alternative to permeable reactive barriers. *Groundwater*, 40(6), 599-607.
- Diersch, H. J. G. (2013). *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.
- EPA, 1999. *Hydraulic Optimization Demonstration for Groundwater Pump and Treat Systems Volume I: Pre-Optimization Screening (Method and Demonstration)*
- EPA, 2001. A citizen's guide to pump and treat.
- FEFLOW, 2017. Manual para el usuario. Tutorial demostrativo.
- Fetter, C. W. (2000). *Applied hydrogeology*. Prentice hall.
- Fetter, C. W., Boving, T., & Kreamer, D. (2017). *Contaminant hydrogeology*. Waveland Press.
- Fitts, C. R. (2013). *Groundwater science*. Elsevier.
- MYMA, 2007. Declaración de impacto ambiental perteneciente a Compañía Minera Mantos de Oro. Proyecto “Tratamiento de Aguas Quebrada La Coipa” RCA n°171, 3 de agosto de 2007.
- Schulze-Makuch, D. (2005). Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Groundwater*, 43(3), 443-456.
- SEA, 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.
- SERNAGEOMIN, 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en la cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.
- SMA, 2018. Informe técnico actualización del análisis de calidad de aguas en sector Fase III.
- Vargas, D. E. (2013). Aplicación de la herramienta de modelación de aguas subterráneas FEFLOW para la evaluación de impactos y medidas de mitigación de obras mineras. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Wang, Q., Kim, D., Dionysiou, D. D., Sorial, G. A., & Timberlake, D. (2004). Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems—a literature review. *Environmental pollution*, 131(2), 323-336.
- Zheng, C., & Wang, P. P. (1999). *MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection*

ANEXO A
SIMULACIONES PRELIMINARES

1. CASO A: MODELACIÓN 1-D EN UN CAMPO DE FLUJO UNIFORME

1.1. Aspectos generales del modelo

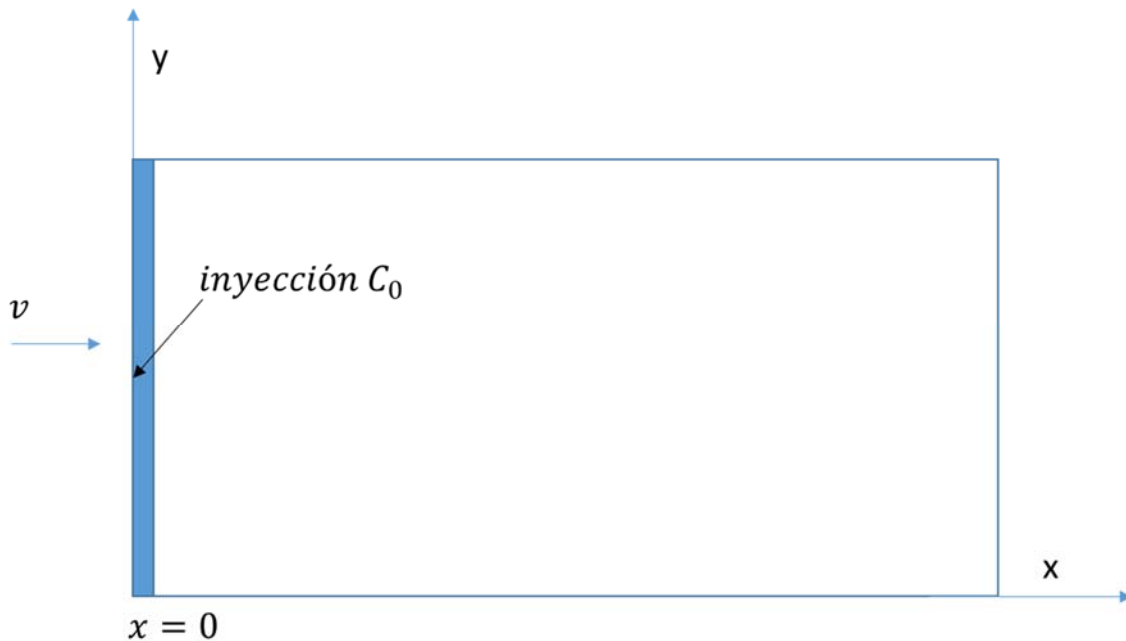
El presente caso de simulación, consiste en modelar la inyección continua de masa en un campo de flujo uniforme unidimensional. Esta situación se puede dar en la naturaleza como una filtración de un depósito con material contaminado, cuya infiltración descarga como una fuente lineal hacia un sistema subterráneo.

Específicamente, el caso A corresponde a una columna en 1D de un medio poroso homogéneo, en donde los efectos radiactivos no se consideran, con un flujo de entrada constante y una difusión-dispersión uniforme, de esta forma, la ecuación de advección-dispersión en una dimensión se escribe como (Fetter, 2001):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Donde “c” corresponde a la concentración del soluto, D es el coeficiente de dispersividad, v es la velocidad constante de entrada al sistema y x es la variable espacial que represente la distancia a lo largo de la columna. En la Figura 1-1 se presenta un esquema de la situación a modelar.

Figura 1-1 Esquema Esquemático del Caso A



Fuente: Elaboración propia

La condición inicial del problema establece que el acuífero posee agua limpia, es decir la concentración de soluto en el medio es cero, matemáticamente lo anterior se expresa como:

$$c(x, t < 0) = 0$$

En cuanto a las condiciones de borde del problema, se considera que el soluto corresponde a una inyección continua en el tiempo de magnitud constante. Además, se considera que el sistema es lo suficientemente extenso de manera que no exista un efecto real sobre la condición de borde en el

extremo del dominio. Estas condiciones se expresan algebraicamente con las expresiones descritas a continuación:

$$c(x = 0, t = 0) = C_0$$

$$c(x = +\infty, t) = 0$$

Para la primera etapa de modelación, no se consideran los efectos de reacciones de adsorción en el modelo de transporte, de manera que el parámetro R tiene un valor de cero. Así la ecuación advección-dispersión corresponde una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes, cuya solución analítica posee la siguiente forma (Fetter, 1993):

$$c(x, t) = \frac{c_0}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4Dt}} \right) + \exp \left(\frac{xv}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{\sqrt{4Dt}} \right) \right)$$

1.2. Configuración general de modelación

Se considera un dominio rectangular, lo suficientemente extenso en la dirección longitudinal de manera de cumplir con las condiciones expuestas en el acápite anterior. Se considera una malla con elementos de 1 m de largo y 1 m de ancho.

El flujo será modelado con una velocidad uniforme de 0,24 m/d, la cual será impuesta a partir de condiciones de borde de carga constante en la entrada y salida del sistema, de manera de obtener un gradiente hidráulico que satisfaga la velocidad mencionada.

En términos del transporte, se considerará una inyección continua de un soluto con una concentración fija C_0 , lo que corresponde a una condición de borde de tipo dos (Dirchlet). Esta será ingresada en la posición de entrada al modelo, es decir, para $x=0$. La simulación se realiza en régimen transiente, considerando un tiempo de modelación de 500 días totales.

A partir de esta información, se construyó un modelo numérico basado en el enfoque de diferencias finitas (DF) y de elementos finitos (EF), contrastando la solución obtenida con la solución analítica (SA) presentada anteriormente.

1.3. Resultados de la simulación del caso base A

De manera de contrastar las soluciones obtenidas mediante diferencias finitas y elementos finitos, se construyeron gráficos de la variación de la concentración a lo largo de la columna unidimensional simulada numéricamente, analizando la solución para distintos periodos de tiempo.

En las Figuras 1-2 a 1-5 se presenta el perfil de concentraciones relativas a la concentración C_0 de entrada al sistema, a lo largo del eje longitudinal de la columna que define el dominio de modelación.

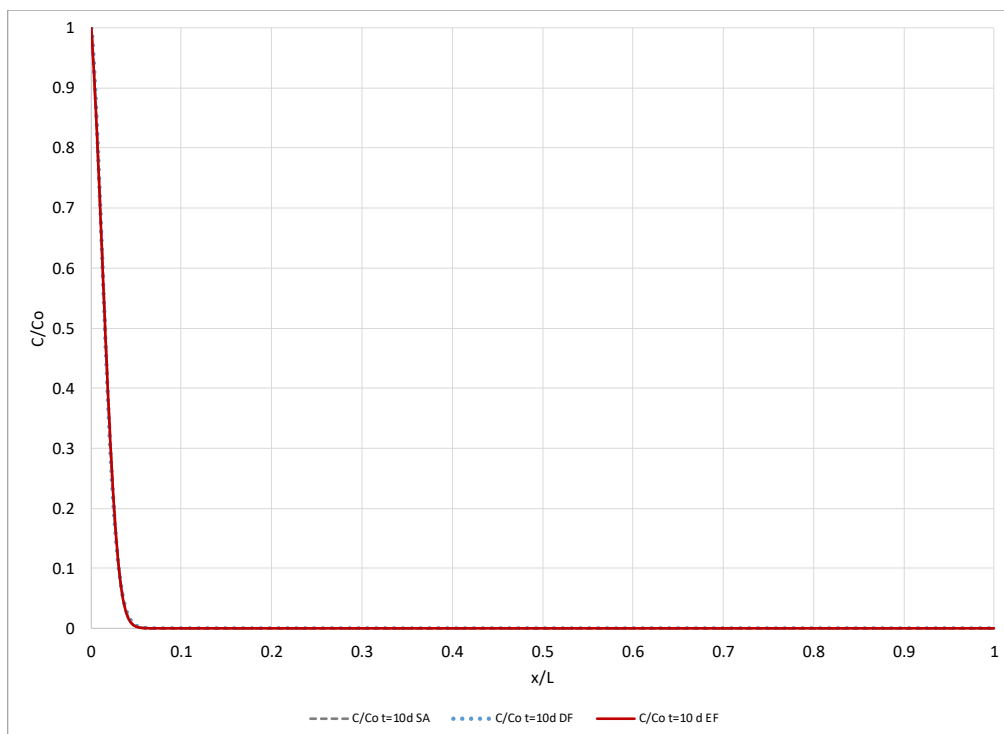
Como se observa en las figuras mencionadas anteriormente, tanto para diferencias finitas como para elementos finitos, se logra reproducir la evolución temporal de la pluma de soluto, en donde la máxima concentración alcanza mayores distancias a medida que se avanza en el tiempo, en

donde para un tiempo de 500 d, se alcanza un máximo una distancia longitudinal de aproximadamente 25% del total, con una concentración equivalente a la de la fuente.

En términos comparativos entre las soluciones de diferencias finitas (DF) y elementos finitos (EF) con respecto a la solución analítica (SA), es posible observar que, para menores tiempos, existen menores diferencias entre los métodos, obteniendo prácticamente los mismos resultados. Sin embargo, para el tiempo final de 500 d, es posible observar una mayor diferencia entre el enfoque de diferencias finitas y la solución analítica.

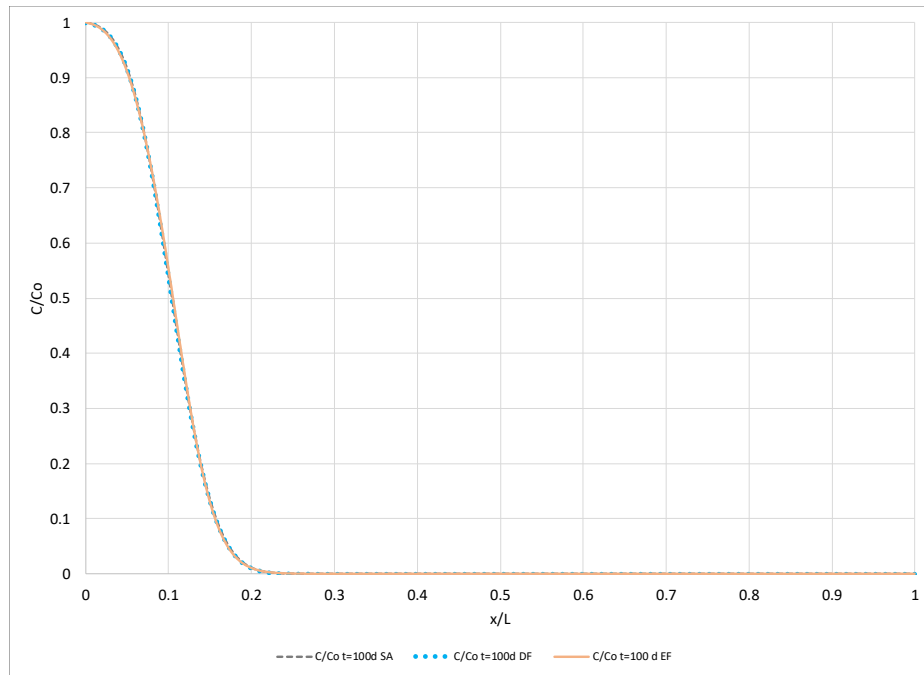
Del mismo modo, en la Figura 1-6, se presenta el ajuste entre los datos calculados mediante el enfoque de diferencias finitas y elementos finitos, en función de la solución analítica. Como se observa en la figura, la serie obtenida por elementos finitos muestra un mejor ajuste con la solución analítica que la serie calculada mediante diferencias finitas.

Figura 1-2: Serie de concentración a lo largo del eje longitudinal para tiempo igual a 10 días



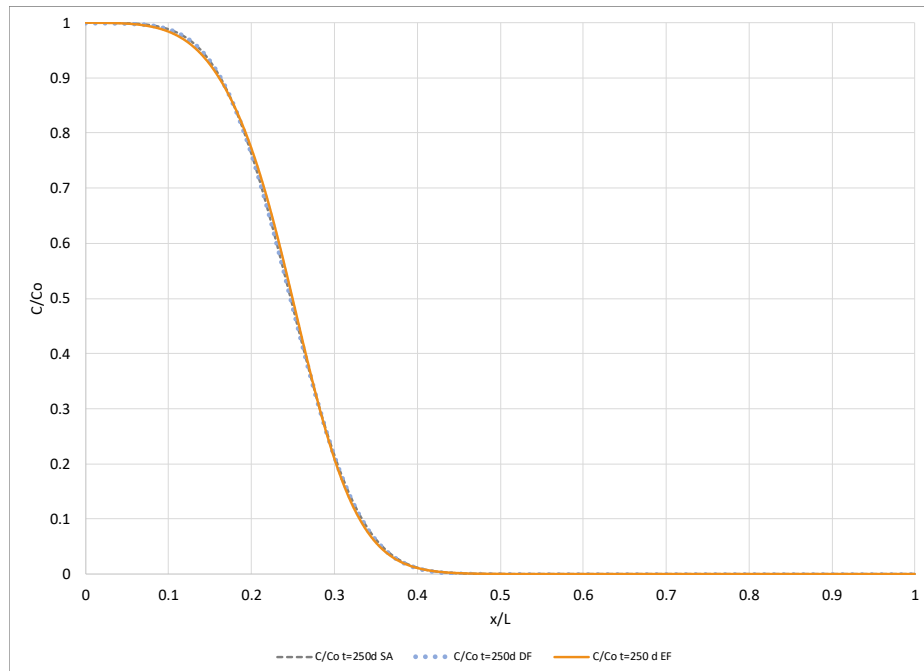
Fuente: Elaboración propia

Figura 1-3: Serie de concentración a lo largo del eje longitudinal para tiempo igual a 100 días



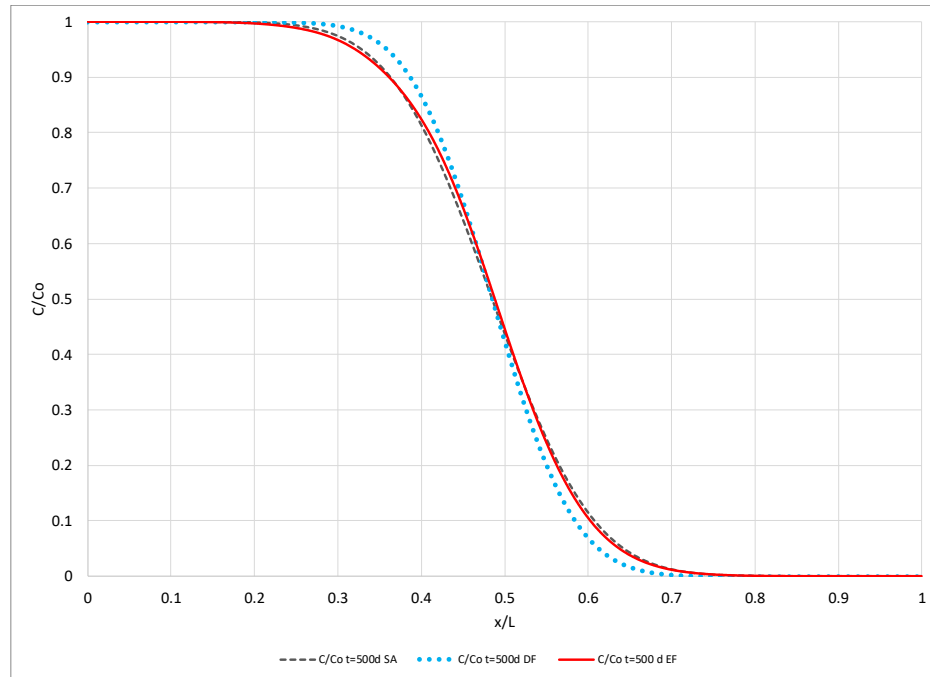
Fuente: Elaboración propia

Figura 1-4: Serie de concentración a lo largo del eje longitudinal para tiempo igual a 250 días



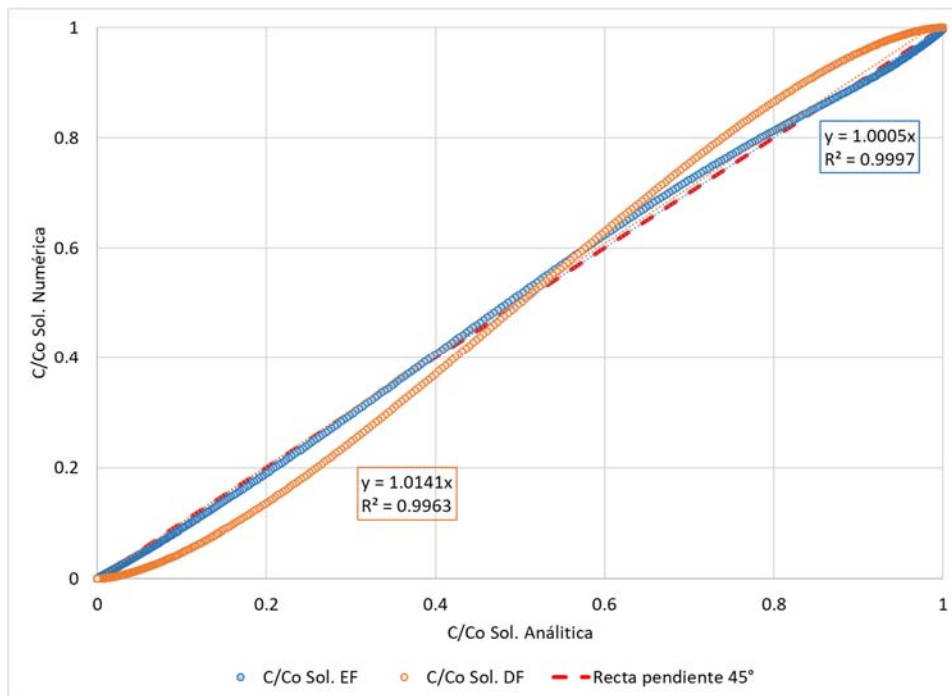
Fuente: Elaboración propia

Figura 1-5: Serie de concentración a lo largo del eje longitudinal para tiempo igual a 500 días



Fuente: Elaboración propia

Figura 1-6: Serie de concentración a lo largo del eje longitudinal para tiempo igual a 500 días



Fuente: Elaboración propia

2. CASOS BASE “B”, SISTEMA BI-DIMENSIONAL ACUÍFERO TIPO “CAJA”.

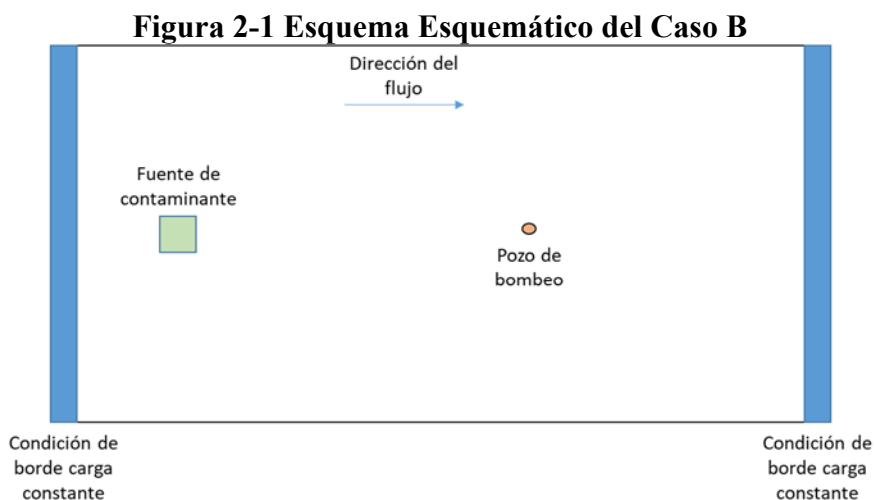
2.1. Aspectos Generales

Del mismo modo que en el caso A, se realizara una simulación base para contrastar los efectos de un enfoque con diferencias finitas (paquete MT3DMS de GMS) y elementos finitos (FEFLOW).

El caso B consiste en la representación de un acuífero mediante un “modelo de caja”, en donde mediante dos condiciones de borde de carga constante se forzará un gradiente hidráulico permitiendo el flujo de agua subterránea.

El sistema cuenta con una fuente contaminante con una concentración dada, de esta manera se podrá observar en dos dimensiones como se distribuye la pluma de contaminación en distintos tiempos de simulación.

Finalmente, se analizará el efecto del bombeo de un pozo en las cercanías de la fuente de contaminación. En los casos de la simulación se analizará el efecto de una malla refinada en el sector del pozo de bombeo. En la Figura 2-1 se presenta un esquema del caso B a simular.



Fuente: Elaboración propia

2.2. Configuración general de la modelación

El dominio del modelo es un rectángulo de 1000 m x 1000 m, todas las modelaciones serán realizadas en dos dimensiones, de manera que el espesor no es relevante para el modelo.

La dirección de flujo es de izquierda a derecha, y está dado por el gradiente hidráulico impuesto por las condiciones de borde de tipo Dirichlet, correspondiente a una carga constante en los bordes del dominio. Para el propósito de este ejercicio, se fijó una carga hidráulica de 30 m en el borde izquierdo, y de 29,85 m en el borde derecho. A partir de estos valores, se calculó un gradiente hidráulico de 0,015% en el dominio de estudio.

En cuanto a las propiedades hidrogeológicas del modelo, se consideró un acuífero homogéneo, con un valor de transmisividad de 170 m²/d. Otra condición de borde considerada, corresponde a la de un pozo de bombeo, ubicado en el sector cercano a la salida del dominio, a 250 m aguas abajo de la fuente de contaminante, el caudal de extracción considerado es de 500 m³/d.

El problema de flujo fue simulado en régimen permanente, mientras que el modelo de transporte se simuló en régimen transiente, con una duración total de 2 y 3 años según el escenario simulado.

Con respecto a la fuente de contaminante, se considera una región de 50 x 50 m ubicada aguas arriba del pozo de bombeo, cercano a la entrada del dominio. La condición de borde asociada, se define como concentración conocida, la cual varía según el escenario de simulación. La condición inicial del resto del sistema, se asume como agua limpia con 0 mg/l de concentración.

Para la modelación del transporte de la primera etapa, se deben definir los coeficientes necesarios para resolver el transporte de masa, estos corresponden a los de dispersividad longitudinal y transversal. Según Schulze-Makuch (2005), el coeficiente de dispersividad longitudinal posee una relación con la escala del modelo a considerar, para este caso en particular el valor de este parámetro varía entre 1 y 100 m aproximadamente. De esta forma se considerará un valor de dispersividad longitudinal de 10 m.

Para el término asociado a la dispersividad transversal, se considera que este parámetro corresponde a un diez por ciento de la dispersividad longitudinal (Fetter, 2001). De esta forma se adoptó un valor de 1 m para la dispersividad transversal.

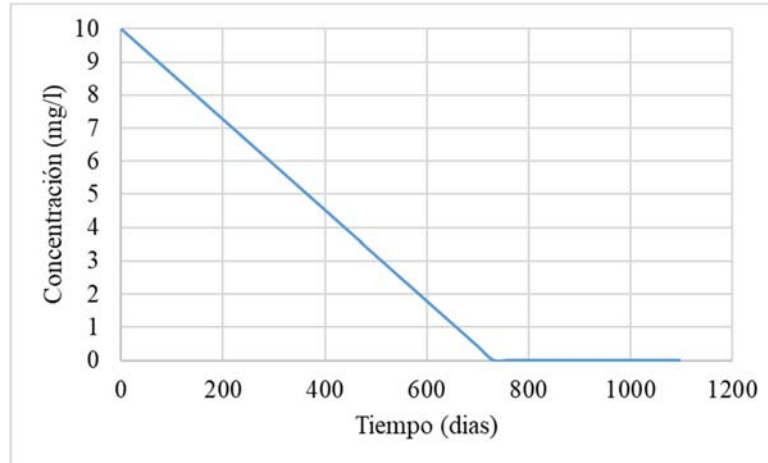
A partir de los objetivos planteados para el presente escenario, se han realizado cuatro simulaciones para diferencias y elementos finitos, en las cuales se busca analizar el efecto de un refinamiento local en la malla en los resultados y variaciones en la serie de concentración liberada por la fuente de contaminación. Los escenarios mencionados comparten los mismos parámetros de flujo y transporte, como lo son: transmisividad, porosidad, coeficiente de dispersividad longitudinal y transversal, las características específicas de cada uno se presentan en la Tabla 2-1 mientras que la Figura 2-2 se presenta la serie transiente de la concentración de entrada.

Tabla 2-1 Configuración de los modelos del caso B

Parámetro	Unidad	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tiempo de simulación transporte	d	730	730	1095
Concentración de entrada	mg/l	5	5	Serie transiente
Tamaño malla/elementos	m	10	Con refinamiento	Con refinamiento

Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-2 Serie transiente de concentración de fuente de masa modelos 3 y 4



Fuente: Elaboración Propia

2.3. Resultados escenario caso B

En el presente acápite, se muestran los principales resultados del modelo de caja planteado en la sección anterior, analizando las principales diferencias obtenidas al realizar el modelo en diferencias finitas y elementos finitos.

En la Figura 2-3 se presenta la distribución de concentración en superficie dentro del dominio de modelación, para la configuración del “Modelo 1”, tanto para el enfoque de diferencias finitas (DF) como para elementos finitos (EF). Como se observa en ambos casos, el pozo de bombeo actúa como una barrera hidráulica que logra contener el avance de la pluma. Con respecto a las diferencias entre ambos métodos, se debe destacar que, los resultados obtenidos por el enfoque de elementos finitos, generó curvas de isoconcentración más suaves, que permiten delimitar de mejor forma la zona de efecto o el área en la cual se posee una determinada concentración. Del mismo modo, se observa que estableciendo un umbral de 0,01 mg/l, en el caso de los elementos finitos, el pozo de bombeo contiene completamente el avance de la pluma, mientras que, en el resultado obtenido mediante diferencias finitas, muestra un efecto de dispersión hacia aguas abajo del pozo de bombeo, mismo efecto se replica hacia aguas arriba de la fuente de contaminación.

En la Figura 2-4 se presenta el resultado de distribución de concentración en superficie, para la configuración del “Modelo 2”, que corresponde al Modelo 1, pero con un refinamiento en la zona de la fuente y el pozo de bombeo. En contraste con el resultado del modelo 1, se observa una mejor definición de las curvas de isoconcentración para la modelación utilizando diferencias finitas, sin embargo, el efecto de dispersión de la concentración se mantiene, aumentando incluso hacia aguas arriba de la fuente.

En términos de los tiempos de ejecución del Modelo 2 con la malla refinada, para elementos finitos el tiempo total fue cercano a los 3 minutos, mientras que, para diferencias finitas, el tiempo de ejecución fue aproximadamente de 20 minutos. Los parámetros de convergencia de cada enfoque son iguales, de manera que la resolución mediante elementos finitos utiliza más eficientemente los recursos para obtener la solución del problema.

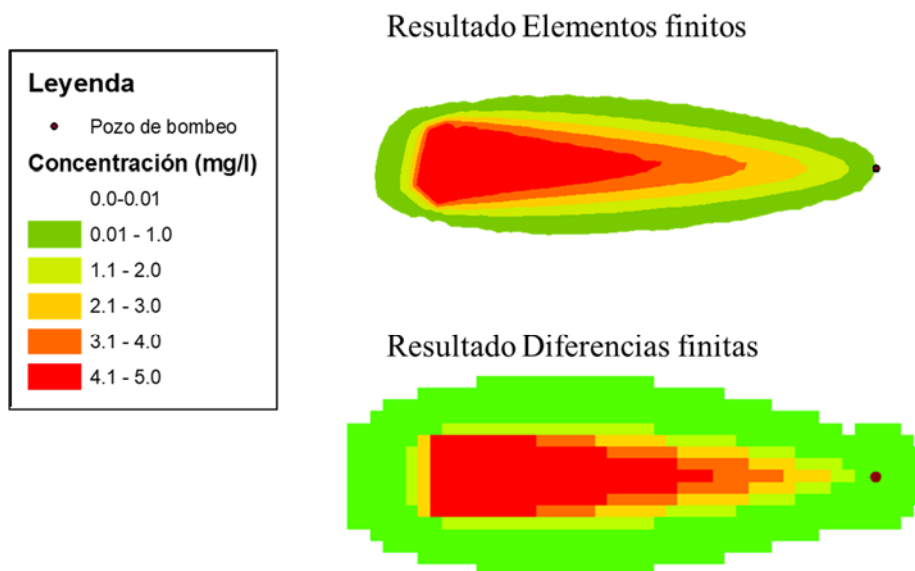
En la Figura 2-5 se presenta el resultado de la distribución de concentraciones para el Modelo 3, tanto para el enfoque de diferencias finitas como para elementos finitos, evaluados para el tiempo de 365 días. Como se en la figura mencionada, el resultado obtenido por diferencias finitas, muestra

un mayor efecto de dispersión de la concentración, expandiéndose una gran distancia hacia aguas arriba de la pluma de contaminante.

En la Figura 2-6 se presenta para distintos tiempos, la variación a lo largo del eje longitudinal por donde se encuentra el pozo de bombeo. Como se observa en la figura mencionada anteriormente, los resultados obtenidos tanto con diferencias finitas como con elementos finitos, permiten concluir que ambos enfoques logran reproducir de manera adecuada una concentración variable en la fuente de contaminación. A pesar de que se observan diferencias entre ambos enfoques, en términos generales, la evolución de la pluma de contaminación sigue el mismo comportamiento.

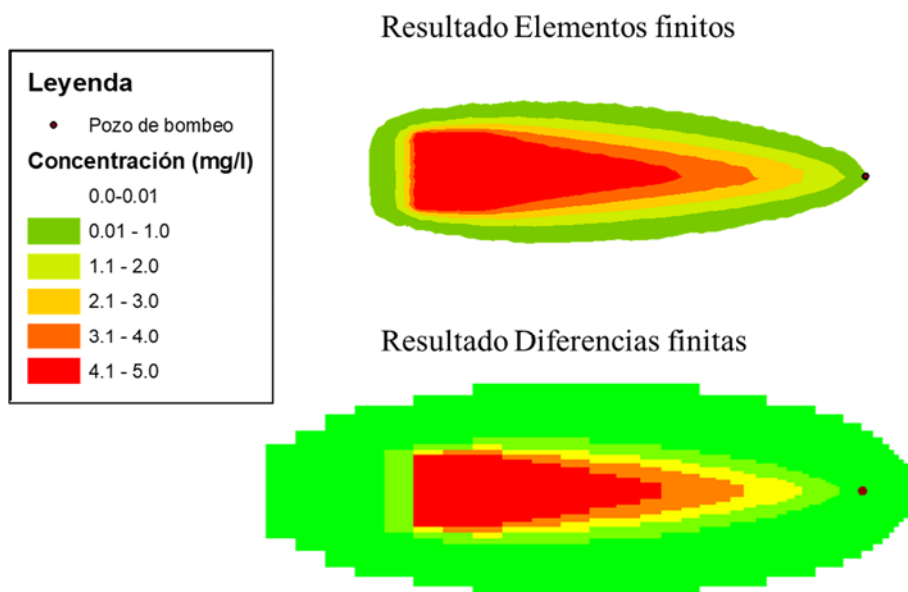
La mayor diferencia se observa para el tiempo final de simulación, en donde la serie de concentración calculada mediante diferencias finitas, se encuentra por sobre la calculada con elementos finitos cuyo resultado muestra concentraciones prácticamente nulas, al cabo de 3 años de simulación.

Figura 2-3 Distribución de la pluma de contaminante para el modelo 1, resultados elementos finitos (EF) y diferencias finitas (DF)



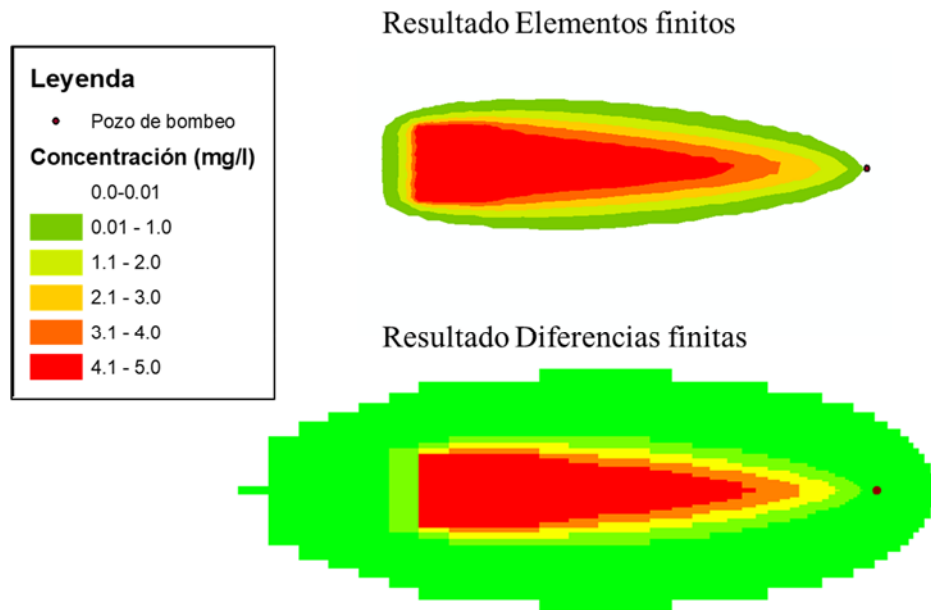
Fuente: Elaboración propia

Figura 2-4 Distribución de la pluma de contaminante para el modelo 2, resultados elementos finitos (EF) y diferencias finitas (DF)



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-5 Distribución de la pluma de contaminante para el modelo 3, resultados elementos finitos (EF) y diferencias finitas (DF)



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-6 Resultado del comportamiento temporal de la pluma de contaminante al aplicar una concentración de entrada variable en el tiempo

