



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**SIMULACION HIDROGEOLOGICA DE LA EXPLOTACION DEL
ACUIFERO FREATICO UBICADO EN LA FORMACION OPACHE,
II REGION, NORTE DE CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE GEOLOGO

FELIPE CRISTIAN FUENTES CARRASCO

PROFESOR GUIA:
SRA. SOFIA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISION:
SR. CARLOS PARRAGUEZ DECKER
SR. CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
2009

RESUMEN

La subcuenca de Calama se encuentra ubicada en la II Región de Chile, Antofagasta, específicamente en la unidad morfoestructural correspondiente a la precordillera del macizo andino.

En la zona de estudio se encuentran los ríos Loa y San Salvador y las vegas de Calama, los cuales están en una clara interacción con el acuífero freático emplazado en la Formación Opache, (May, et al 2005). Además existe la vertiente Ojos de Opache que corresponde a la naciente del río San Salvador mediante la recuperación de dicho acuífero.

El trabajo realizado se orientó a determinar los efectos que se pueden producir en el acuífero freático al explotar un caudal de 30 lt/s en la zona de Agua Pura y Las Cascadas en el río Loa, ubicada en las coordenadas UTM 502631 E y 7511261 N al suroeste de Calama.

En consecuencia a la temática planteada, el objetivo general que persiguió esta investigación fue predecir el comportamiento del acuífero freático, ante una eventual explotación del mismo.

De acuerdo a los antecedentes disponibles (geología, estratigrafía, hidrología e hidrogeología, (principalmente extraída de DGA, 2003 y CPH, 2003)), se generó una caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas existentes en la zona.

Se utilizó como base para este estudio un modelo realizado en el software Visual MODFLOW Versión.4.0 por la DGA el año 2003, el cual fue modificado para modelar el flujo subterráneo y por lo tanto conocer el comportamiento del acuífero freático sujeto a una explotación.

Los límites del modelo de simulación hidrogeológica fueron modificados, con el fin de incorporar caudales subterráneos que en el modelo original no se definen en detalle y que ingresan al sistema hidrogeológico desde el Este. Para evaluar el impacto en el acuífero freático, se modeló un primer escenario con el régimen actual de explotación, y un segundo escenario con la explotación de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas.

Los resultados que arrojó la extracción adicional en el acuífero freático fueron los siguientes:

- En el río Loa se produjo un descenso del caudal de 23.9 lt/s.
- Los caudales del río San Salvador y las vertientes del río Loa decayeron en 0.6 lt/s.
- Por último, la evapotranspiración de las vegas de Calama se redujo en 0.5 lt/s.

Concluyendo, los resultados aportados por esta modelación son relevantes debido a que una extracción de esta naturaleza (un caudal de explotación relativamente moderado) impactará considerablemente las zonas mencionadas, debido a la fragilidad de los sistemas fluviales de los ríos Loa y San Salvador. La naciente de este último, la vertiente Ojos de Opache, obtiene su recarga mediante recuperaciones del acuífero freático, y dada su clara interacción con el acuífero debe ser protegida, ya que posee características hidrogeológicas y arqueológicas de interés.

Para mí Abuela, mi Madrína,
al amor de mi vida y nuestro
futuro hijo.

Agradecimientos

A la primera persona a quien quiero agradecer es a mi novia Minka, ya que su permanente apoyo, ayuda y amor fueron el motor para sacar adelante esta memoria.

Luego quiero agradecer a mi familia, a mis Abuelos, Padres, Hermanos y a la María por ser el pilar de mi vida y haberme dado todo su cariño e incondicional afecto.

Le quiero dar las gracias a Don Carlos Parraguez por haberme dado la oportunidad de efectuar esta memoria y abrirme las puertas de su casa, por su disposición y sabias “chacharas” las cuales fueron parte fundamental de este proceso, y a toda la gente en CPH, al Gonzalo, Marío, Renzo y Fernando, por su acogida, ayuda y enseñanzas.

A mi profesora guía Sofía Rebolledo por confiar en mí, por su disposición a ayudarme en lo que fuese y por las prontas correcciones realizadas.

Al profesor integrante, Carlos Espinoza por su orientación y enseñanzas acerca del maravilloso mundo de la modelación.

Como dejar de agradecer a los funcionarios y profesores del departamento, especialmente a María Rosa, Cristina, Halyda, Verónica, Kilo, y a los Carlos y Juanes del departamento de Geología por su disposición, entrega, calidez, ayuda y muchos etcéteras.

A mis compañeros y amigos, está lista sería muy larga así que agradezco a todo aquel que compartió conmigo en mi paso por la casa de Bello, en especial a mis compañeros de banda, a la gente que estuvo en la Sonora 333, a los carnavales de la comparsa de la Rosa, a los de Cuerda Floja (más conocida como el care´pilsen y los wata e Pan), y a la banda más bacilona en mi paso por Beaucheff, la única e incomparable Sonora Yan Clos Band Dame. A todos ellos miles de gracias por los momentos compartidos, la música generada y entregada y permitir ser parte de tantas aventuras e inolvidables experiencias.

Por último agradecer a la Tierra por entregarnos todo para ser quienes somos, y ser un afortunado al poder estudiarla, comprenderla y mirarla con otros ojos.

Gracias Totales!!!

TABLA DE CONTENIDOS

N° PÁG.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Ubicación y vías de acceso	5
1.4. Metodología de trabajo	6
1.5. Estudios anteriores.8
1.6. Limitaciones	9
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	10
2.1. Climatología	10
2.1.1. Clima.....	10
2.1.2. Flora y Fauna	11
2.2. Geomorfología.....	12
2.3. Marco Geológico	16
2.3.1. Geología de Superficie.....	16
2.3.2. Geología de Subsuperficie.....	28
2.3.3. Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca de Calama.....	30
CAPITULO 3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.	35
3.1. Definición de unidades hidrogeológicas y acuíferos reconocidos.....	35
3.1.1. Unidad 1. Depósitos aluviales y Formación Opache.	35
3.1.2. Unidad 2. Formación Yalquincha.	37
3.1.3. Unidad 3. Formación Calama	38
3.1.4. Unidad 4 Roca Basal	38
3.2. Profundidad del nivel estático y gradientes hidráulicos	39
3.3. Constantes elásticas	41
3.4. Dinámica del flujo subterráneo	42
3.4.1. Mecanismos de recarga.....	42
3.4.2. Mecanismos de descarga.....	44

3.4.3. Balance hídrico.	45
3.5. Estimación de volúmenes embalsados	46
CAPITULO 4. MODELO HIDROGEOLOGICO.....	47
4.1. Acerca de Visual MODFLOW.	47
4.1.1. Fortalezas y debilidades.	47
4.2. Antecedentes requeridos para el modelo.....	48
4.2.1. Extensión del Modelo	48
4.2.2. Definición de Layers.....	50
4.2.3. Equipotenciales y Sentido de Escurrimiento	53
4.2.4. Constantes Elásticas.....	54
4.2.5. Condiciones de Borde.....	55
4.2.6. Recargas	57
4.3. Calibración del Modelo.....	58
4.4. Resultados de la calibración	60
CAPITULO 5. DISCUSIONES.....	67
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS	73
ANEXOS	77

INDICE DE FIGURAS

N° PÁG.

FIGURA 1.1. Imagen del sector Las Cascadas en el río Loa.....	2
FIGURA 1.2. Imagen google del área de estudio.....	3
FIGURA 1.3. Ubicación y vías de acceso.	5
FIGURA 1.4. Mapa de la subcuenca de Calama obtenido del modelo de la DGA, 2003.....	6
FIGURA 2.1. Imagen aérea de la ciudad de Calama, vista aproximada hacia el Noreste	10
FIGURA 2.2. Geomorfología de la II Región de Antofagasta (Börgel, 1983).....	13
FIGURA 2.3. Imagen 3-D generada con Vertical Mapper desde Mapinfo, del techo de la cuenca de Calama en el área de estudio, vista desde el Sur.....	15
FIGURA 2.4. Imagen 3-D generada con el Software VerticalMapper desde Mapinfo, mostrando la base de roca de la cuenca de Calama, vista de Sur a Norte.	15
FIGURA 2.5. Mapa Geológico de la zona de estudio.....	16
FIGURA 2.6. Leyenda del Mapa Geológico.....	17
FIGURA 2.7. Correlación Cronoestratigráfica desde el Oligoceno al Cuaternario en la cuenca de Calama. May et al, 2005.	18
FIGURA 2.8. Mapa Geológico general de la cuenca de Calama (de May et al 2005, modificado de Marinovic y Lahsen,1984).....	31
FIGURA 2.9. Columnas estratigráficas desde el Oeste al Este en la cuenca de Calama. May, 2005. La ubicación de las columnas se representa en la Figura 2.6 como puntos negros.....	32
FIGURA 2.10. Esquema evolutivo de la cuenca de Calama. (CPH, 2003).	34
FIGURA 3.1. Fotos del sector Las Cascadas del río Loa. La imagen (a) corresponde a una Paleo-cascada. La imagen (b) corresponde a un claro ejemplo de precipitación Kárstica (Travertino).	37
FIGURA 3.2. Equipotenciales y sentido de escurrimiento.	40
FIGURA 3.3. Mapa esquemático con las zonas de recargas y descargas en los límites del modelo y ubicación de estaciones fluviométricas.....	43
FIGURA 4.1. Mapa generado en Visual MODFLOW V.4.0 , mostrando la zona de estudio acotado por las coordenadas previamente mencionadas y las celdas inactivas asumidas para el modelo (en verde).	44

FIGURA 4.2. Mapa geológico del área de estudio, donde las líneas rojas representan la ubicación de los perfiles esquemáticos.....	50
FIGURA 4.3. Perfiles transversales A-A', B-B', C-C' y D-D'. Orientación Este-Oeste.....	51
FIGURA 4.4. Perfiles longitudinales, E-E', F-F', G-G' y H-H'. Orientación de Sur a Norte.....	52
FIGURA 4.5. Equipotenciales y sentido de escurrimiento en escenario sin el bombeo de 30 lt/s.....	54
FIGURA 4.6. Conductividades (Kx, Ky, Kz) asignadas a las celdas de la Layer 1.....	55
FIGURA 4.7. Celdas inactivas y de carga constante.....	56
FIGURA 4.8. Asignación de la recarga por riego y percolaciones.	57
FIGURA 4.9. A: Ajuste Layer1; B: Ajuste Layer 2.; C: Ajuste Layer 3.	58
FIGURA 4.10. Distribución de equipotenciales sin bombeo.	60
FIGURA 4.11. Distribución de equipotenciales con bombeo 30 lt/s.....	60
FIGURA 4.12. Perfil transversal sin bombeo.....	61
FIGURA 4.13. Perfil transversal con bombeo (30 lt/s).....	61
FIGURA 4.14. Descensos generados por la extracción de un caudal de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas.....	62
FIGURA 4.15. Balance del modelo sin bombeo.....	63
FIGURA 4.16. Balance del modelo con bombeo.....	63
FIGURA 4.17. Resultados del modelo sin bombeo.....	64
FIGURA 4.18. Resultados del modelo con bombeo de 30 lt/s.....	64

INDICE DE CUADROS

N° PÁG.

CUADRO 3.1.	Definición de unidades hidrogeológicas.....	35
CUADRO 3.2.	Constantes elásticas	42
CUADRO 3.3.	Datos de precipitación media (mm) estación Calama.....	44
CUADRO 3.4.	Desbalance hídrico del acuífero freático.....	45
CUADRO 3.5.	Estimación Volumen Embalsado.....	46
CUADRO 4.1.	Efecto sobre vertientes y río San Salvador.....	65
CUADRO 4.2.	Efecto sobre el río Loa.....	65
CUADRO 4.3.	Efecto sobre la Evapotranspiración.....	66
CUADRO 4.4.	Efectos de la Explotación en Componentes Hidrológicos.....	66

ANEXOS

ANEXO A	ESTACIONES DE AFORO DGA.....	
ANEXO B	PRICIPITACIONES ESTACIÓN CALAMA	
ANEXO C	ESTRUCTURA DEL MODELO MATEMATICO VISUAL MODFLOW V.4.0.	

CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Introducción

La subcuenca de Calama se encuentra ubicada en la II Región de Chile, Antofagasta, específicamente en la unidad morfoestructural correspondiente a la precordillera del macizo andino.

La geología del área de estudio indica que en la zona se reconocen dos acuíferos en profundidad. El superior, de carácter freático, alojado en las calizas de la Formación Opache (May et al, 2005), y el inferior anidado en las gravas de la Formación Calama (Naranjo y Paskoff, 1981). Ambas unidades hidrogeológicas se encuentran separadas entre sí por potentes estratos de arcillas y arcillolitas que corresponden a la Formación Yalquincha (May et al, 2005), que imprimen al acuífero reconocido en las gravas infrayacentes un importante confinamiento.

Es importante indicar que el acuífero superior emplazado en las calizas de la Formación Opache se encuentra relacionado con la escorrentía del río Loa y del río San Salvador. Son en gran parte las recuperaciones desde dicho medio permeable las que sustentan el escurrimiento de los dos ríos del área (DGA, 2003).

Específicamente las vertientes que están ubicadas cercanas al sector de La Cascada en el río Loa, y las vertientes de Ojo de Opache en el río San Salvador, son producto de la recuperación en superficie de los recursos que fluyen en el acuífero freático. Por lo tanto, se genera la necesidad de analizar los efectos de la explotación en la escorrentía superficial (Figura 1.1).



Figura 1.1. Imagen del sector Las Cascadas en el río Loa.

El avance de la tecnología ha contribuido en el área de la informática al desarrollo de algoritmos cada vez más complejos. En las ciencias de la tierra esto ha llevado a la creación de softwares que simulan condiciones, procesos y efectos de algún fenómeno natural superficial y/o subterráneo. Un caso particular es el Visual MODFLOW V.4.0 desarrollado por la U.S. Geological Survey (USGS) para la simulación de flujos subterráneos.

Esta herramienta se utilizó en el área de la cuenca de Calama, con el fin de modelar un escenario de extracción del recurso subterráneo de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas (Figura 1.2), definiendo los efectos que dicha extracción generaría en las aguas subterráneas que llegan al sector de la vertiente de Ojos de Opache, a las vegas de Calama y al río Loa. La cantidad de litros que se simularan equivalen a 30 lt/s, esta suma fue la cantidad requerida por la empresa ESSAN en un estudio solicitado a CPH Consultores Ltda.

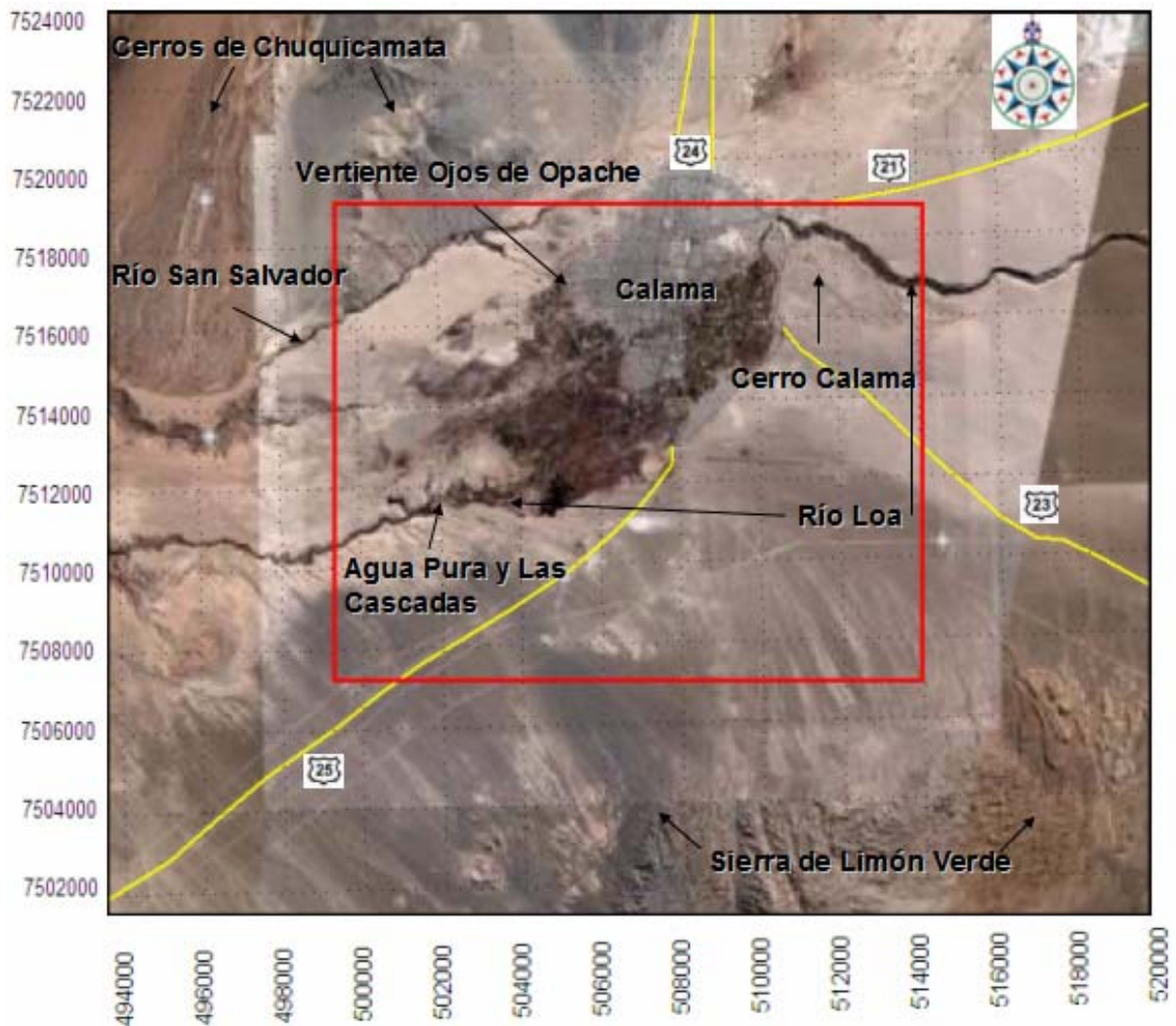


Figura 1.2. Imagen Google de la zona de estudio mostrando las principales áreas de la investigación. La zona que se modeló esta encuadrada en rojo.

Para el presente estudio se utilizó el modelo matemático incluido en el Informe Técnico: “Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea factibles de constituir en los Sectores de Calama y LLalqui, Cuenca del río Loa, II Región, elaborado por el Departamento de Administración Recursos Hídricos de la DGA (Dirección General de Aguas) (S.D.T N° 153), con fecha de agosto de 2003. Este modelo fue desarrollado por la DGA para evaluar los efectos que las extracciones de agua subterránea, planteada a través de diversos escenarios de explotación, podría provocar sobre los caudales superficiales de los ríos Loa y San Salvador y en las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y Las Cascadas.

Los límites del modelo de simulación hidrogeológica fueron modificados, con el fin de incorporar caudales subterráneos que en el modelo original no se incorporan y que ingresan al sistema hidrogeológico desde el Este. Para evaluar el impacto en el acuífero freático, se modeló un primer escenario con el régimen actual de explotación, y un segundo escenario con la explotación de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas.

Mediante la comparación de ambos escenarios, fue posible dimensionar las alteraciones que el bombeo produciría en la distribución de las aguas alojadas en el acuífero superior.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Predecir el comportamiento del acuífero freático alojado en la Formación Opache, ante una eventual explotación de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Implementar dos escenarios de explotación del acuífero freático de la Formación Opache, mediante el software Visual MODFLOW V.4.0, variando la extracción del recurso hídrico en el sector de Agua Pura y Las Cascadas.
2. Definir los caudales máximos explotables desde el acuífero, en función a los resultados obtenidos en el punto anterior.

1.3. Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio esta localizada en la II Región de Antofagasta, específicamente en la provincia de El Loa, en la comuna de Calama.

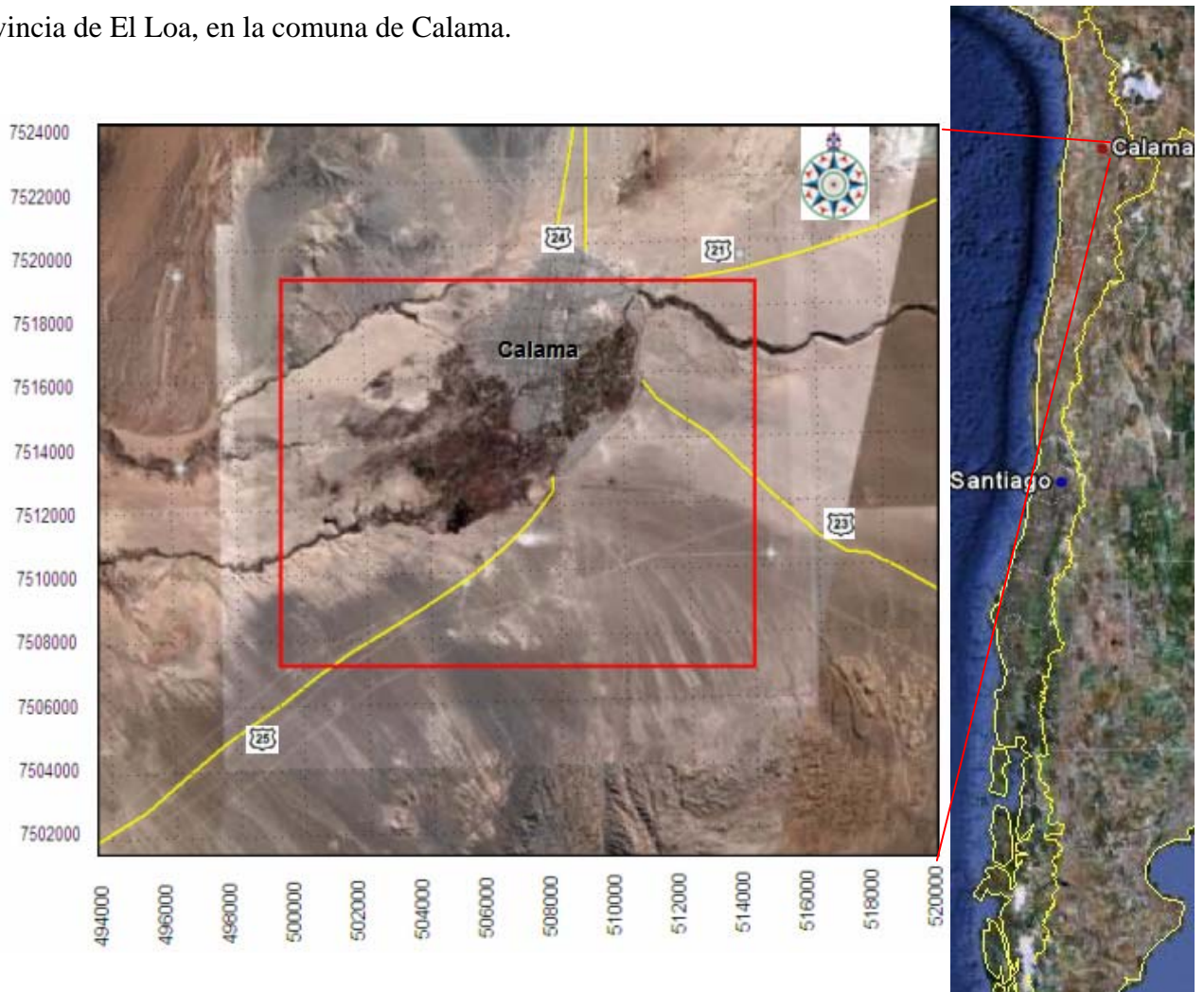


Figura 1.3. Imagen google del área de estudio (encuadrada en rojo).

Se puede acceder al área de estudio en vehículos terrestres a través de la ruta 5, desde el Sur por la ruta 25, y desde el Norte por la ruta 24, que conecta Chuquicamata con Calama.

Además Calama cuenta con un aeropuerto, que recibe vuelos diarios provenientes de distintas ciudades del país.

El área en donde se realizó el modelo, el que se observa en la Figura 1.3 dentro del rectángulo rojo, está limitado por las coordenadas UTM: 7.507.200 – 7.518.750 Norte ; 499.500 – 514.000 Este (ver Figura 1.3).

1.4. Metodología de trabajo

En una primera etapa de desarrollo se reunieron diversos antecedentes del área de estudio: geología, (Marinovic y Lahsen, 1984; May et al 2005; CPH, 2003) y hidrogeología (parámetros hidráulicos, (CPH, 2003) y niveles estáticos obtenidos desde la DGA del estudio del 2003), geomorfología, hidrología (precipitación, caudales, temperatura, evaporación, evapotranspiración, DGA, 2003), estratigrafía (May et al 2005) y topografía (IGM).

Los programas que se utilizaron principalmente para trabajar con la información recabada fueron los siguientes: Excel (*.XLS) y Mapinfo (*.TAB) con las aplicaciones Vertical Mapper y Discover.

Este estudio se basó en un modelo incluido en el informe técnico S.D.T N° 153, elaborado por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA, “Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II Región, Agosto 2003”, que fue utilizado como herramienta para predecir el comportamiento del acuífero (Figura 1.4).

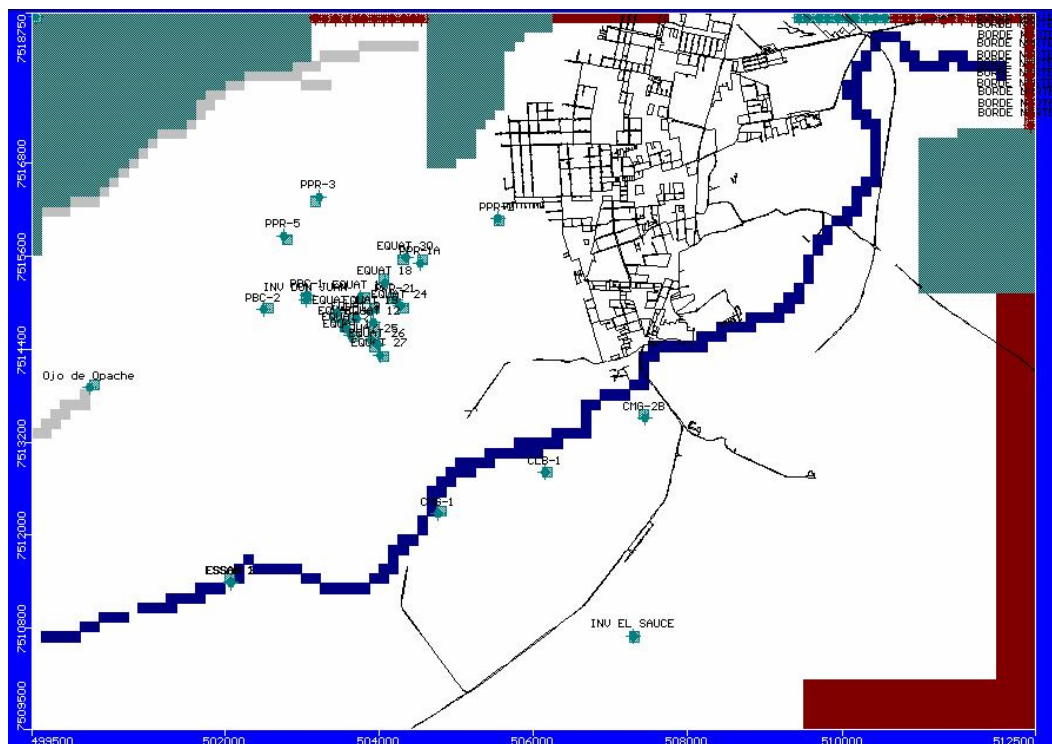


Figura 1.4. Mapa de la subcuenca de Calama obtenido del modelo de la DGA, 2003

El modelo de la DGA, 2003, está limitado por las cotas 7509700 – 7518750 N; 499500 -512400 E, y esta compuesto de 73 filas y 104 columnas, de lado aproximado 126 m. Presenta 3 “Layers” o capas con distintos parámetros hidrogeológicos y diferente geometría. El límite del borde Este (al sur del cerro Calama) está compuesto por celdas de carga constante, en las cuales se fija el nivel del agua. El borde Noreste y parte del borde Norte se compone de pozos de inyección con el fin de representar con mayor exactitud el caudal que ingresa desde esta zona al área de estudio (Figura 1.4).

Para obtener una mejor estimación del caudal subterráneo que se infiltra a la sub-cuenca de Calama desde el Este, se le agregaron 20 filas hacia el Sur, y 17 columnas hacia el Este del modelo.

En un comienzo, para poder agregar las filas y columnas, se repararon y completaron las curvas de nivel de la zona, extraídas de las cartas topográficas 1:50000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), obteniendo curvas cada 10 metros y así mejorar la interpolación de la superficie del terreno.

Con la información estratigráfica disponible (May et al, 2005), además de la geología de superficie (CPH, 2003), se procedió a interpolar los distintos estratos, para así construir la geometría de las capas en la zona donde se busca adherir información al modelo realizado por la DGA el año 2003 (SDT-153-03).

En un terreno realizado en Octubre del año 2008, se visitaron los puntos de interés (el sector de Agua Pura y Las Cascadas y el río San Salvador) y se efectuó un recorrido por el río Loa, en las cercanías de Calama.

El procedimiento utilizado en la construcción del modelo consistió en unir los nuevos datos a los antiguos, exportando estos últimos desde el Visual MODFLOW V.4.0 al Mapinfo V.8.5 en formato texto (*.TXT), completado la grilla con nueva información para ser trasladada nuevamente al software Visual MODFLOW V.4.0. Junto a lo anterior, se diseñaron las distintas filas y columnas desde el mismo programa permitiendo una mejor correlación con los datos del modelo de la DGA.

Una vez ingresados los datos al software Visual MODFLOW V.4.0, comenzó la etapa de calibración, la cual entregó un pronóstico de 2 escenarios: el estado actual y el que incluye un bombeo de 30 lt/s en la zona de Agua Pura y Las Cascadas del río Loa.

1.5. Estudios anteriores.

La subcuenca de Calama cuenta con diversos estudios, que van desde sondajes, pasando por métodos geofísicos como líneas gravimétricas, estudios de Transiente Electromagnética (TEM), hasta modelos hidrogeológicos, conceptuales y numéricos, que integran la información con el objetivo de simular la dinámica del recurso agua. Lamentablemente la mayoría de esta información pertenece a las compañías mineras que operan en el sector, siendo la principal la División Codelco Norte. Para efectos de este estudio, mucha de esa información fue referencial y no pudo ser utilizada por lo que se basó exclusivamente en los informes publicados por la DGA, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), y otros trabajos anexos efectuados en la cuenca del río Loa (por ejemplo CONAF, 1996).

Como se menciona previamente, la base del modelo realizado en esta tesis pertenece al informe técnico S.D.T N° 153, elaborado por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA, “Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II Región, Agosto 2003”

Además se consultaron estudios efectuados por la CONAMA en el año 1996 y la CONAF en el año 1997 de donde se extrajo la información del Clima, Flora y Fauna.

El marco geológico presentado en este trabajo está sustentado por investigaciones realizadas en el año 1984 por Marinovic y Lahsen, que publicaron la Hoja Calama a escala 1:250.000, y complementados además por los trabajos realizados por May, (1997-2000), en donde a la Formación El Loa se le asignó el status de grupo y se definieron sus miembros superior e inferior como las Formaciones Opache y Yalquincha respectivamente, junto con definir nuevas formaciones.

1.6. Limitaciones

Las limitaciones de esta investigación en la recolección de datos fueron las siguientes: privatización de información, inexactitud de los mismos y el tiempo necesario para construir y calibrar el modelo.

La privatización de la información es considerada como una dificultad debido a que los datos contenidos en informes y estudios privados que, o no han sido entregados a la DGA, o esta última no los ha publicado. Especial mención se puede hacer a los antecedentes relacionados con la información de los niveles de agua en los pozos existentes, puesto que hace menos precisa la calibración del modelo. A causa de esto se complica la modelación de la dinámica del recurso subterráneo, e imposibilita el avance del conocimiento general de la cuenca.

La ausencia de investigación en algunas áreas de la zona de estudio, obligó a realizar interpolaciones sujetas a supuestos y a datos que se encuentran alejados de estas áreas, específicamente en los bordes donde se expandió el modelo previo de la DGA (2003).

Los datos de aforos y de niveles estáticos, en general presentan un error aleatorio asociado, y por lo tanto los valores obtenidos deben ser considerados con cautela.

CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Climatología

2.1.1 Clima

El área de Calama tiene un clima desértico, que se caracteriza por escasez de precipitaciones, un alto gradiente de temperatura en el día, escasa humedad relativa y atmósfera limpia, lo que implica una fuerte irradiación solar que se traduce en una alta evaporación (Figura 2.1.)

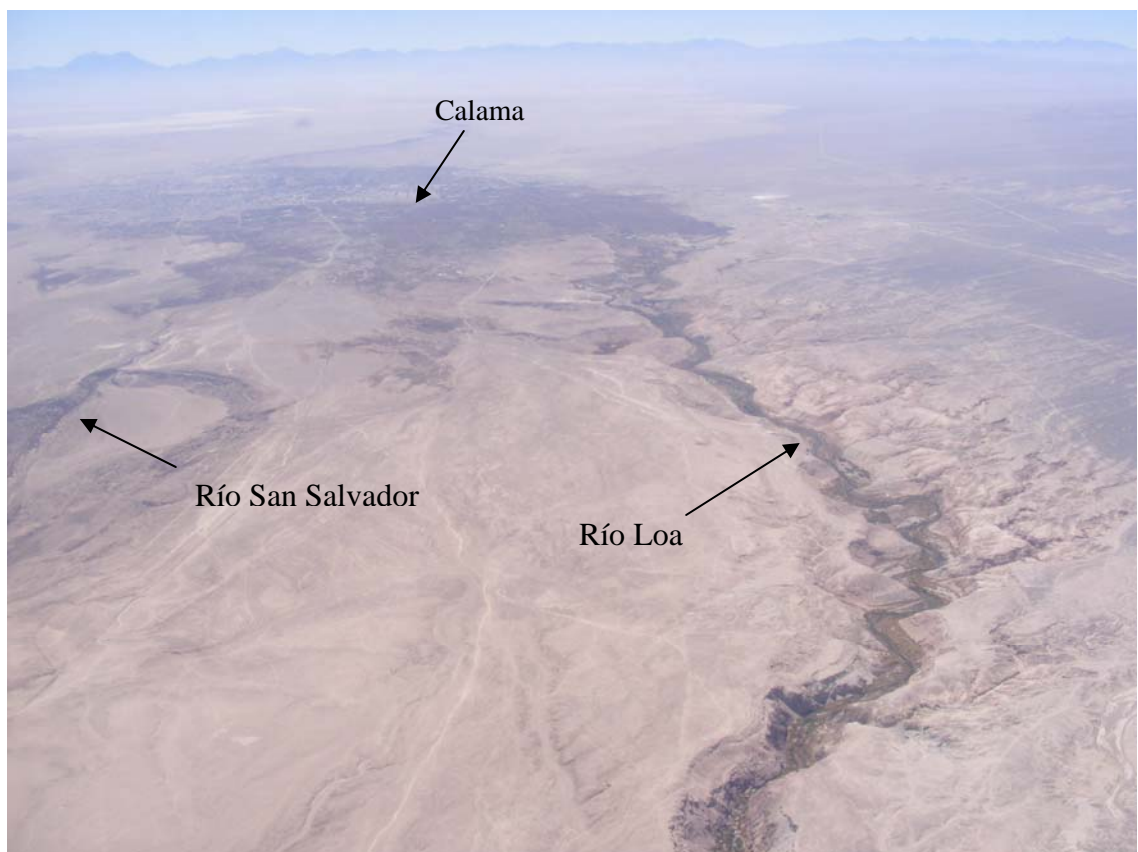


Figura 2.1. Imagen aérea de la ciudad de Calama, vista aproximada hacia el Noreste.

A la altura de Calama se registran unos 5 mm. de precipitación media anual. La mayor parte ocurre en el mes de Junio con un valor de 1,2 mm. Durante los meses de Noviembre y Diciembre las precipitaciones son nulas, y entre los meses de Enero y Febrero, producto del fenómeno del invierno boliviano, ocurren precipitaciones de aproximadamente 0,7 mm mensuales.

Excepcionalmente se registran precipitaciones pluviales y nivales de gran magnitud, como las ocurridas los días 11 y 12 de Junio de 1983 que alcanzaron en Chuquicamata un total de 43 mm.; los días 6, 7, 25 y 26 de Junio de 1984 que totalizaron 33,4 y 5,6 mm., respectivamente; los días 7 y 8 de Marzo de 1988 con 4,4 mm.; 27 y 28 de Mayo de 1992 alcanzado los 26,4 mm.; 4 de Junio de 1992 con 4,4 mm. en Calama ; el 1 y 2 de Marzo del 2001 con precipitaciones de 12 mm. y el desborde del río Loa en la ciudad de Calama y el 15 de Mayo del 2003 con un total de agua caída de 7 mm.

La temperatura media anual en Calama es de 12° C y la variación de la temperatura media entre las estaciones de verano e invierno presenta máximas que alcanzan los 6° C, (DGA, 2003).

La evaporación media a la altura de Calama es de 10 mm/día, (DGA, 2003).

2.1.2 Flora y Fauna

En la cuenca del río Loa se desarrolla una variada flora y fauna silvestre. Muchas de las especies que habitan la cuenca del río Loa y su entorno se encuentran con problemas de conservación (por ejemplo, *Copiapoa tocopillana* (en peligro de extinción), Llareta, Queñoa (vulnerables), Vicuña, Guanaco, Chinchilla, Halcón peregrino, Cóndor, Sapo espinoso (vulnerables) (CONAF, 1996; Demetrio, 1989); La fauna ictia está representada por el pejerrey chileno de agua dulce (*Basilichtys*), la trucha café, la trucha arco iris y el pez mosquito (*Gambusia sp.*). Una de las especies en el río Loa considerada de importancia comercial es el crustáceo *Cryphiops caementarius* (camarón de río), que se encuentra entre Quillagüa y la desembocadura donde existe uno de los mayores criaderos naturales para esta especie y que constituye una reserva genética fundamental de importancia para la futura implementación de cultivos CONAMA (1997). En relación a la avifauna, el 15,72 % de las 439 especies de aves clasificadas a través del territorio nacional se encuentran representadas en la cuenca del río Loa.

Especial relevancia, tiene la zona de la desembocadura del río Loa, que se caracteriza por ser un área de reclutamiento de diversas especies juveniles de vertebrados e invertebrados acuáticos, entre las cuales se encuentran peces pelágicos de importancia comercial en el sector marino y camarones de río en la zona de estuario (Román, 2000). El sector marino de la desembocadura

del río Loa es una de las principales áreas de desove de la zona norte de especies tales como anchovetas, sardina y al menos otras 20 especies de peces litorales entre las cuales destacan las corvinas, lisas, pejerreyes, sargos, corvinillas, pichilingues, etc. CONAMA (1997).

Por otra parte, en la cuenca del río Loa se desarrollan diversas actividades agropecuarias dedicadas al cultivo del maíz y tubérculos tales como zanahorias, betarragas, ajos y crianza de ganado bovino y camélidos domésticos como las llamas. Los productos agrícolas provenientes de las diferentes localidades ubicadas en la cuenca tienen distribución en el mercado regional.

2.2. Geomorfología

En la cuenca del río Loa desde el punto de vista geomorfológico, se pueden distinguir tres unidades morfoestructurales bien definidas, éstas son el Macizo Andino, la Depresión Intermedia constituida por sierras y pampas, y la Cordillera de la Costa.

El río Loa nace en la falda occidental del volcán Miño a 5.000 metros de altura. En este sector el río Loa está limitado por un relieve dominado por el Macizo Andino que alcanza importantes alturas, entre ellas el volcán Miño (5.611 m s.n.m), cerro Polán (5.425 m s.n.m.) y Cerro Gordo (5.194 m s.n.m). El escurrimiento general que sigue el cauce en este sector, posee orientación Norte – Sur hasta la confluencia con el río Salado donde cambia prácticamente en 90° hacia el poniente. El cauce del río presenta terrazas fluviales, limitadas por cordones montañosos y pampas de escarpes muy pronunciados.

Siguiendo la trayectoria Norte – Sur, el río Loa limita con la Pampa de Puno y Cordón del Millo por el poniente, y al oriente con Loma Alto de la Cueva que destaca por el cerro Chela y Polpana con alturas de 5.644 y 6.023 respectivamente. Siguiendo más al sur, destacan los volcanes de San Pedro (6.145 m s.n.m.) y San Pablo (6.092 m s.n.m.) los que constituyen el límite norte del río San Pedro, uno de los principales tributarios del río Loa en el sector alto.

Las características geomorfológicas de esta zona, cambian paulatinamente hasta el segundo de los aportes de mayor importancia del curso principal, el río Salado (Figura 2.2). En esta zona el

relieve andino comienza a descender para alcanzar cotas entre 4.000 y 5.000 m s.n.m. En este sector destaca el Cerro del León (5.760 m s.n.m.) y el Cerro Toconce (5.419 m s.n.m.). Las terrazas fluviales del río se presentan escarpadas al igual que el sector anterior, limitado por pampas de gran escarpe. Desde la confluencia del río Salado con el cauce principal de la cuenca, el escurrimiento del río presenta orientación Este – Oeste hasta la localidad de Chacance donde nuevamente cambia su trayectoria en 90° (Sur – Norte).

El valle de Calama está constituido por un amplio plano depositacional cuya mayor longitud tiene sentido Este – Oeste (Figura 2.2), siguiendo el mismo recorrido del río Loa. La pendiente general del valle en este sector varía entre 1 a 2%, en sentido Este – Oeste, en un total de 12 km.

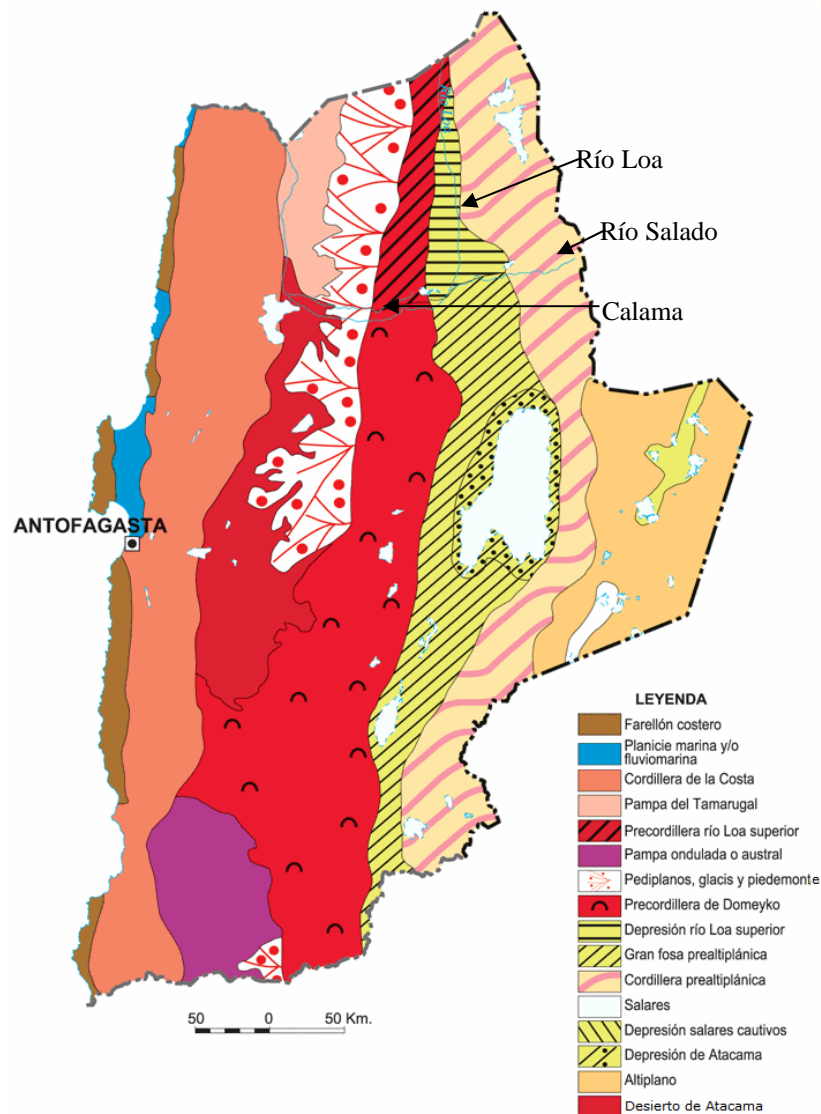


Figura 2.2. Geomorfología de la II Región de Antofagasta (Börgel, 1983).

El área del valle de Calama se encuentra en la unidad morfoestructural del macizo andino correspondiente a la precordillera, que une moderadamente la Depresión Intermedia con la Cordillera de los Andes. La Precordillera asciende lentamente desde los 1.600 a los 3.000 metros de altitud en las primeras estribaciones andinas, cubriendo con extensos pediplanos el sector oriental de la pampa del Tamarugal y el desierto de Atacama. En este sector la Cordillera de Domeyko, cordón desmembrado de la Cordillera de Los Andes, se interrumpe frente a Calama. u altura en esta zona promedia los 3.500 metros de altitud.

Estas características geomorfológicas han permitido el desarrollo de la subcuenca de Calama, cuyo espesor máximo del relleno es de 550 metros aproximadamente (Figuras 2.3 y 2.4).

En estos relieves se distinguen formas terciarias y cuaternarias, señalando que las primeras corresponden principalmente a coladas de lava riolítica, las que aparecen por debajo de los centros volcánicos cuaternarios, tomando en el sector forma de abanico. Más al sur, estas rocas aparecen en prolongados sectores del río Loa con abundantes sedimentos en superficie.

Desde la localidad de Chacance hasta la desembocadura en el mar, el escurrimiento del río sigue trayectoria Sur – Norte de tipo recto (hasta el valle de Quillagua) y con terrazas fluviales de mayor amplitud que en los tramos anteriores. Entre sus alturas más destacables se encuentran Cerro de la Joya (1.287 m s.n.m.) y Cerros de la Angostura (1.259 m s.n.m.).

La Cordillera de la Costa se presenta elevada y muy escarpada en su ladera poniente dando origen al farellón costero. Las planicies son de breve desarrollo, muy estrechas e interrumpidas por estribaciones desprendidas de la pampa alta y de la Cordillera de la Costa

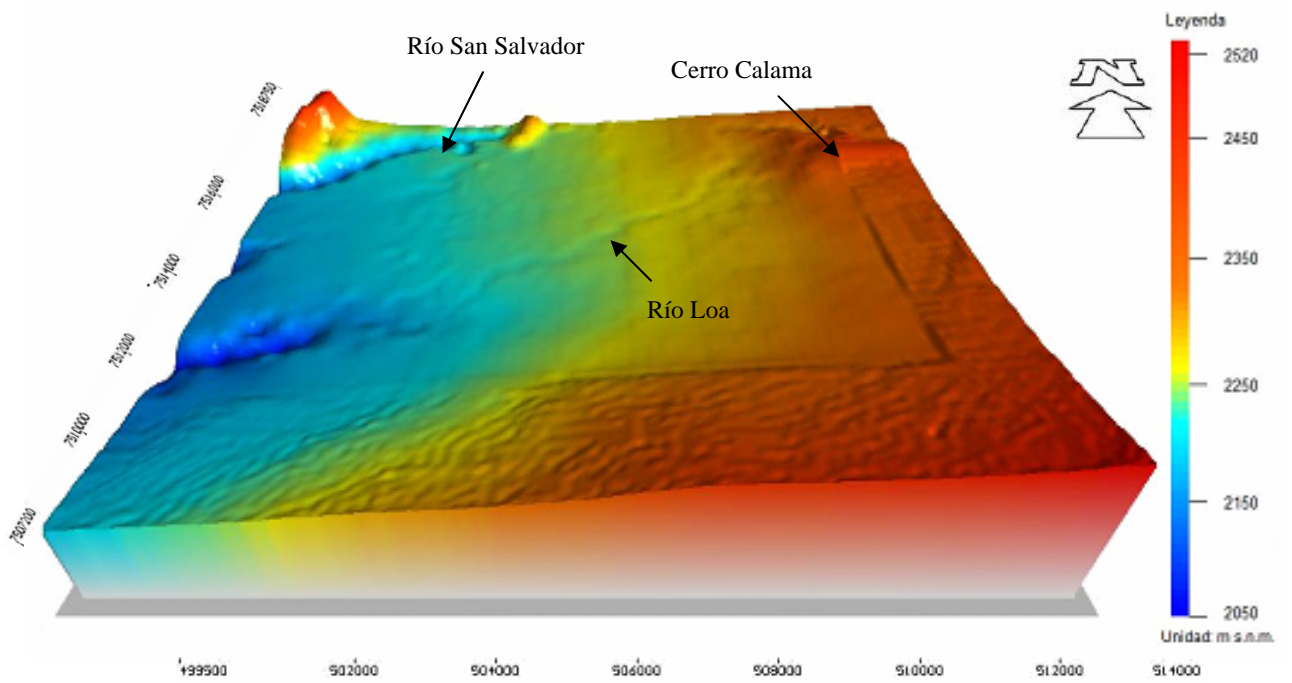


Figura 2.3. Imagen 3-D generada con Vertical Mapper desde Mapinfo, del techo de la cuenca de Calama en el área de estudio, vista desde el Sur.

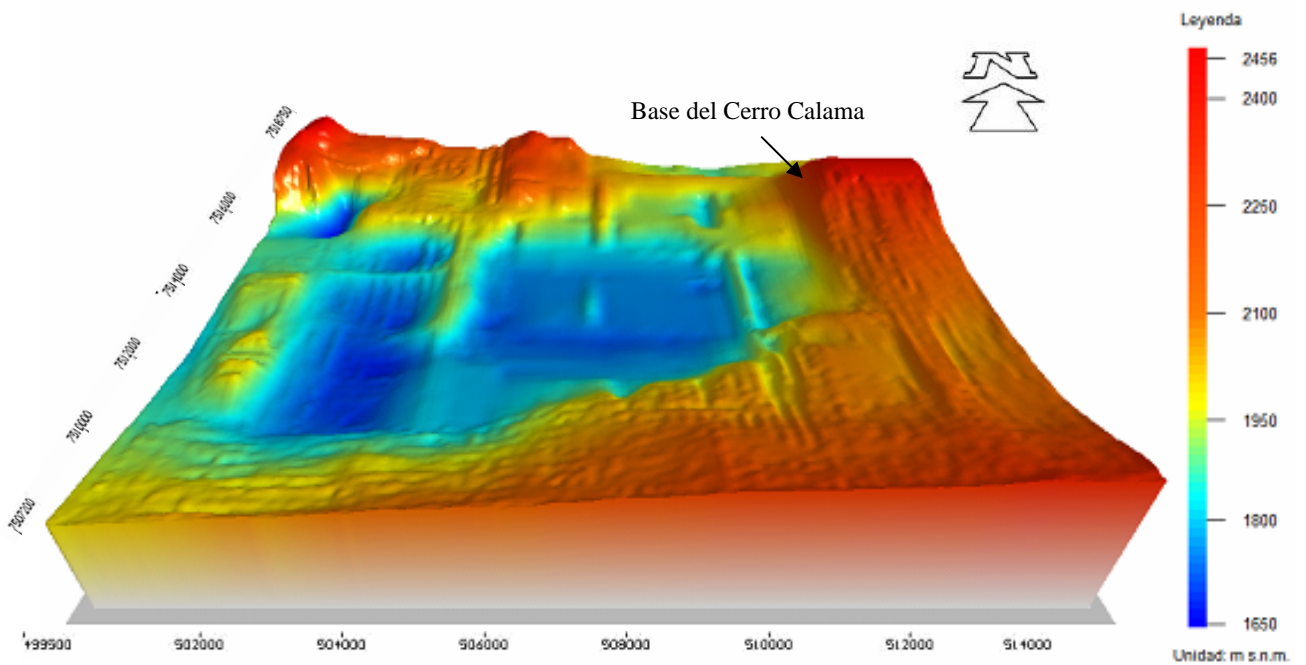


Figura 2.4. Imagen 3-D generada con el Software VerticalMapper desde Mapinfo, mostrando la base de roca de la cuenca de Calama, vista de Sur a Norte.

2.3. Marco Geológico

2.3.1. Geología de Superficie.

A continuación se presenta el mapa geológico de la zona de estudio, (Figura 2.5).

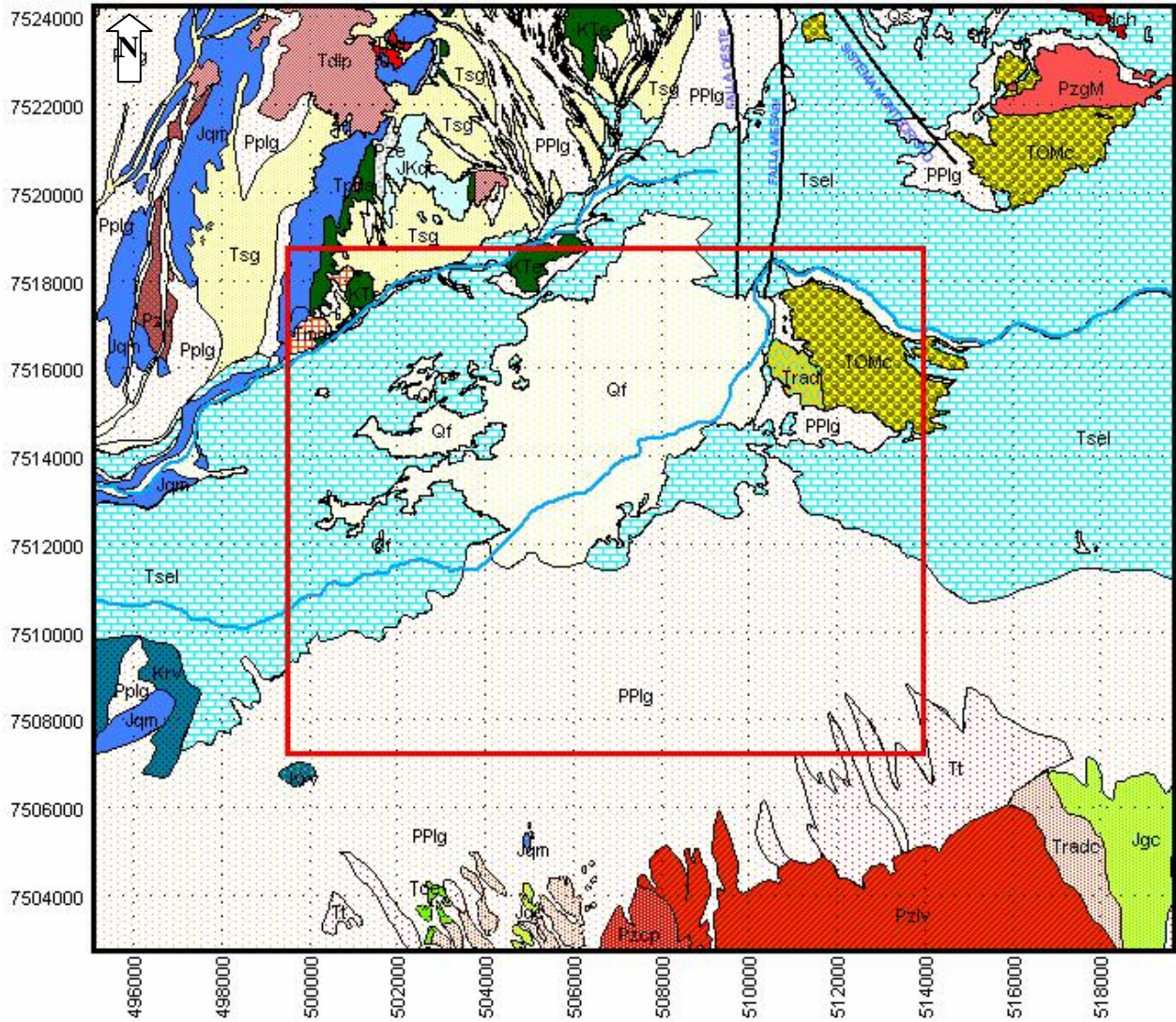


Figura 2.5. Mapa Geológico de la zona de estudio, modificado de CPH, 2003.

Leyenda

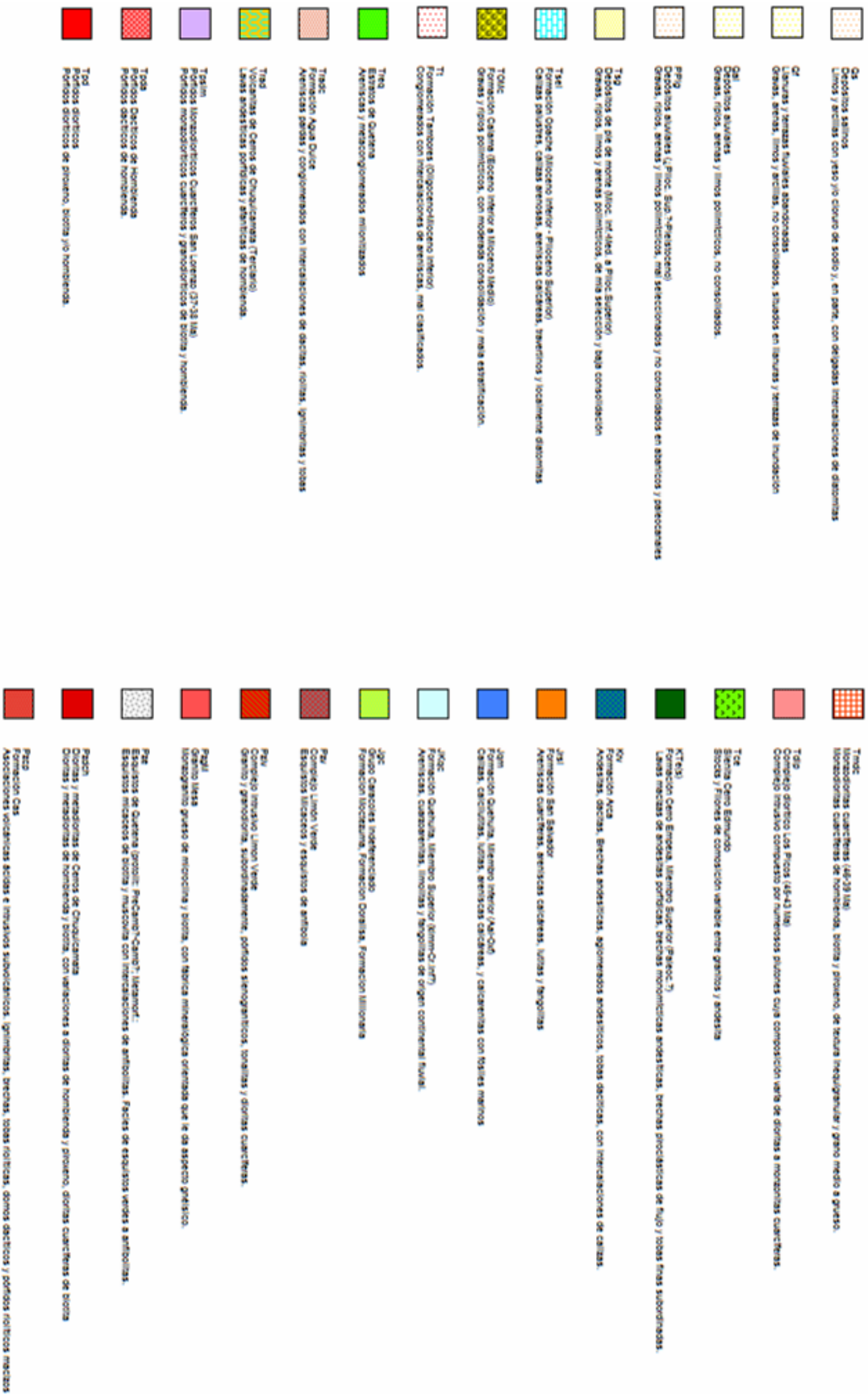


Figura 2.6. Leyenda del Mapa Geológico.

2.3.1.1. Rocas Estratificadas Paleozoicas (más de 200 Ma)

Formación Tuina (Pt), (Raczynski, 1963)

Corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria, que se dispone horizontalmente, y que ha sido dividida en tres miembros, estando presente en el sector de estudio, únicamente el miembro medio compuesto principalmente por limos y arcillas. Los afloramientos de esta unidad en la zona de estudio son escasos y están ubicados en el sector NE de Calama, en las cercanías de Chuquicamata. En este sector las rocas de esta formación se encuentran en contacto con granitos (Pzgm) y en el borde noroeste del Salar Talabre (que se encuentra ubicado al Noreste del área de estudio), afloran a modo de cerro isla. El total de afloramientos de la Formación Tuina, presentes en el sector de interés, alcanza un área de aproximadamente 1 km².

Complejo Metamórfico Limón Verde (Pzm), (Harrington, 1961) y Chuquicamata (Renzetti, 1957, in Aracena 1981).

Esta unidad informal está constituida por una asociación de metaconglomerados, metareniscas, esquistos, anfibolitas, gneises y metadioritas, expuestos en la Sierra Limón Verde y en los cerros de Chuquicamata. En parte estas rocas se presentan como roof pendant, en granitoides paleozoicos y en el borde occidental de la Sierra Limón Verde, subyaciendo a lavas andesíticas asignadas a la Formación Arca del Cretácico inferior. Sus relaciones de contacto dentro del área de estudio están dadas por falla y los afloramientos alcanzan aproximadamente una superficie de 6 km². Otros autores les han asignado una edad precarbonífera media.

2.3.1.2. Rocas Estratificadas Mesozoicas (200 a 65 Ma)

Volcanitas del cerro Chuquicamata (Trad) (Vergara, 1978)

Secuencia principalmente volcánica, compuesta por lavas andesíticas porfídicas y afaníticas, con escasos fenocristales de plagioclasas y andesitas porfíricas de hornblenda. Se le estima una edad triásica?.

Grupo Caracoles (Jgc), (Ramirez y Gardeweg, 1982)

El Grupo Caracoles está compuesto por una secuencia de rocas sedimentarias marinas constituidas por areniscas, lutitas, yeso y calizas. En el área de estudio se expone en el cerro Quetena, donde se pone en contacto mediante una falla normal, con la Formación Arca. Su distribución es en forma elongada, con sentido Noroeste-Sureste, alcanzando los afloramientos a cubrir un área de más o menos 3.5 Km².

Se le asigna una edad jurásica (Sinemuriano medio a Kimmeridgiano inferior, Marinovic y Lahsen, 1984).

Formación Moctezuma (Jmc) (Harrington, 1961)

Es una unidad constituida por una secuencia de conglomerados, areniscas, lutitas y calizas fosilíferas. Dicha secuencia se expone en el sector meridional de la zona de estudio, en reducidos afloramientos en la pampa Moctezuma. El trabajo de Marinovic y Lahsen (1984) asigna a estas rocas una edad jurásica media a inferior.

Formación Quehuita (Jqm) (Vergara, 1978)

Sucesión sedimentaria marina que incluye lutitas, areniscas, calizas y evaporitas marinas dispuesta sobre rocas del Paleozoico y el Triásico e infrayaciendo a secuencias sedimentarias

continentales del Terciario inferior. Presenta abundante fauna fósil entre la que se incluyen amonites del Jurásico Medio.

Formación Cerro Empexa (Kte), (Galli, 1975, y Galli y Dingman, 1962)

Es una unidad compuesta por secuencias continentales, constituídas por rocas sedimentarias, clásticas, andesitas, traquitas, brechas y tobas.

En el área de estudio se encuentran al noroeste de la ciudad de Calama, y donde se distinguen dos miembros. El inferior está compuesto principalmente de paraconglomerados gruesos con clastos subredondeados de composición andesítica, con intercalaciones de areniscas gruesas gris verdosas y lavas andesíticas. El miembro superior se compone mayoritariamente por lavas andesíticas de piroxeno de colores gris verdoso a gris oscuro. Se observan subordinadamente intercalaciones de niveles con intraclastos volcánicos angulosos.

El espesor de la Formación Cerro Empexa en el área de estudio es de 700 m, de los cuales 250 m corresponden al miembro inferior y 450 m al miembro superior.

La edad de la formación fue obtenida por Tomlinson et al. (2002), datando una hornblenda en 69 ± 3 Ma con el método K/Ar, en un dique del miembro inferior de la Formación Cerro Empexa, lo que la asigna al Cretácico Superior alto.

2.3.1.3. Rocas y Depósitos Estratificadas Cenozoicos (menos de 65 Ma)

Formación Tambores (Tt) (Dingman, 1963)

Esta formación, está compuesta por conglomerados, con intercalaciones de areniscas, en partes, cementados con calcita. El espesor de la formación aumenta de Norte a Sur, alcanzando un espesor de 500 m en la quebrada Tambores.

Esta unidad se dispone, en discordancia angular, sobre los Estratos El Bordo y las formaciones Agua Dulce, Tuina y Purilactis, en las vertientes oriental y occidental de la Cordillera de Domeyko, entre El Bordo y Pampa Vizcachitas.

Los conglomerados son el tipo predominante, poseen mala estratificación y aparecen en bancos de 0,1 a 2 m de potencia. Son de colores pardo-grisáceo claro a pardo-rojizo claro.

Las areniscas subordinadas e intercaladas en los conglomerados, son de grano grueso a medio, compuestas de fragmentos líticos, angulosos a subangulosos; presentan estratificación regular a buena, en capas lenticulares de 10 a 20 cm de potencia; son de colores grises a pardo-grisáceos y poseen una matriz arcillosa. Tanto los conglomerados como las areniscas presentan estratificación cruzada e imbricación de los clastos que indican paleocorrientes desde el Oeste.

Se le asigna una edad oligocena-miocena inferior.

Formación Calama (TOMc) (Naranjo y Paskoff, 1981)

Es una unidad compuesta por gravas de origen torrencial, que aflora típicamente al este de Calama (Figura 2.5). Estas gravas se disponen en discordancia de erosión y/o angular, sobre la Formación Arca en el cerro Calama. Sobre el complejo metamórfico Limón verde y Chuquicamata en Mina Sur, la Formación Calama subyace, en leve discordancia angular, al Grupo El Loa.

Los sedimentos de la Formación Calama se caracterizan por presentar una fracción clástica mayor conformada por gravas gruesas a finas y arenas gruesas con bolones subordinados, de hasta 30 cm de diámetro, que se caracterizan por presentar variados tipos litológicos. La matriz está constituida por arenas medias a finas, con fracciones de limo y arcillas escasas. El redondeamiento de la fracción clástica mayor es muy alto lo que acusa un transporte sostenido, la unidad está en general mal estratificada y mal clasificada. (Naranjo y Paskoff 1994). Los afloramientos más relevantes se encuentran al este y noreste de Calama en el cerro del mismo nombre y en las cercanías del cerro Milagro.

Los antecedentes indican que el espesor de la unidad aumenta de Norte a Sur, estimándose un promedio de 200 m. Se le asigna un rango de edad comprendido entre el Eoceno Inferior y el Mioceno Inferior.

Grupo El Loa (Mpel) (May, 2005)

Corresponde a una secuencia bien estratificada, que está dividida informalmente en las Formaciones superiores e inferiores, separadas por una discordancia angular. La potencia del Grupo varía entre los 70 -270 m.

El Grupo El Loa está expuesto bordeando el valle del río homónimo y se dispone en discordancia angular sobre la Formación Calama y sobre la Formación Arca en el sector de Conchi e infrayace, en discordancia, a la Formación Chiu-Chiu. (Figura 2.7).

Formación Yalquincha. (May, 2005)

Comprende intercalaciones de areniscas finas, conglomerados clasto-soportados y limolitas con evaporitas. Estos sedimentos representan un depósito en ambientes de marisma y llanura arenosa, atravesado ocasionalmente por canales fluviales. (May, 1997).

Se extiende desde el Cerro Milo al oeste de la subcuenca de Calama hasta 7 km al sur de Chiu-Chiu. Sobreyace en discordancia a la Fm. Calama y subyace localmente a la Fm. Opache. Se infiere que lateralmente se engrana con la Fm. Lasana (May, 2005).

Su edad queda restringida por edades radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (May, 2005). La base de la Fm. Yalquincha está limitada por una edad Mioceno inferior-medio de 16.23 ± 0.59 Ma, obtenida en una ceniza volcánica retrabajada ubicada a 83 del techo de la formación.

La edad del techo queda restringida por una edad de 7.82 ± 0.1 Ma obtenida de ceniza volcánica de la Fm de Chiquinaputo ubicada a 22 m del contacto entre ambas formaciones. El techo se considera de edad Mioceno Medio a superior.

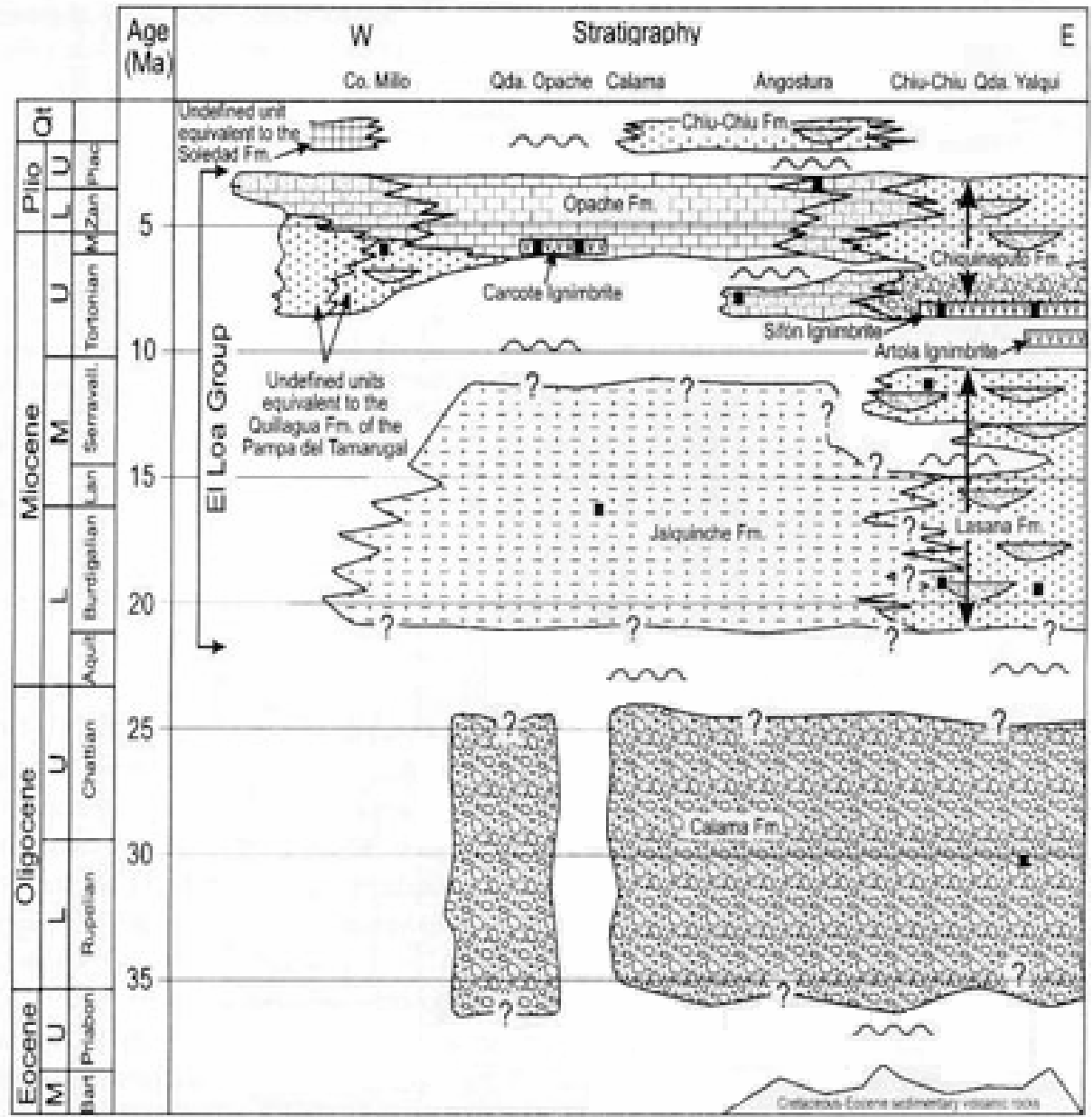


Figura 2.7. Correlación Cronoestratigráfica desde el Oligoceno al Cuaternario en la cuenca de Calama. May et al, 2005.

Formación Lasana (May, 2005)

Se ubica en la parte oriental de la cuenca del Loa y presenta un espesor total de 150 m aproximadamente y está compuesta por conglomerados rellenando paleo-canales, areniscas gruesas con estratificación laminar a cruzada y capas de arcillolitas de hasta 120 cm de espesor. Se le asigna un rango de edad Mioceno Inferior a superior.

Formación Opache (Tsel), (May, 2005)

La Formación Opache está constituida por una secuencia estratificada de calizas, areniscas calcáreas y travertino con intercalaciones de las ignimbritas expuestas en la precordillera de Los Andes. En el borde oriental de la cuenca se caracteriza por conglomerados, areniscas en paleocanales y areniscas laminares de la Formación Chiquinaputo.

Las rocas de esta formación están ampliamente expuestas en el área de estudio, distribuyéndose en la depresión del Río Loa donde cubren un área de más o menos 350 km², el espesor varía entre los 5-50m. El rango de edad asignado a esta formación está comprendido entre el Mioceno Inferior y el Plioceno Superior (May, 2005).

Formación Chiquinaputo (Piqp), (May, 2005).

Son depósitos formados principalmente por gravas mal seleccionadas que subyacen en discordancia a los depósitos aluviales y coluviales actuales. Afloran en el extremo este de la cuenca del Loa, con un área expuesta de aproximadamente 8 km². Esta formación es equivalente a la unidad informal definida como estratos quebrada de Chiquinaputo por Marinovic y Lahsen (1984), que según estos autores tendría una edad Pliocena Superior a Pleistocena (sería equivalente a la Fm. Chiu-Chiu, sin embargo, basado en edades radiométricas, May, 2005, considera que esta formación es de edad Mioceno Superior a Plioceno Inferior, y sería equivalente lateralmente a la Formación Opache.

Formación Chiu-Chiu (Plqch), (Naranjo y Paskoff, 1981).

Se denomina Formación Chiu-Chiu a una secuencia de limos y arcillas calcáreas, en capas de espesor variable entre 5 cm hasta un metro, con intercalaciones lenticulares de diatomitas, yesos y escasos niveles de conglomerados. Su localidad típica se ubica en los alrededores del cerro Chiu-Chiu, disponiéndose con leve discordancia angular sobre la Formación Opache. Está cubierta, parcialmente, por sedimentos fluviales del río Loa y por sedimentos aluviales recientes. En el sector de estudio aflora a unos 50 km al este y noreste de Calama con una extensión de 35 km². La edad asignada a esta formación es Pliocena Superior – Pleistocena.

Depósitos aluviales de los ríos Loa y Salado (Qal)

Son aquellos depósitos aluviales recientes constituídos principalmente por gravas arenosas restringidas a los cursos actuales de los ríos Loa y Salado. Presentan un grado de redondeamiento moderado a alto y son de carácter polimíctico. Se estima para estos rellenos una potencia media baja, que presumiblemente no exceda los 10 m.

Estos sedimentos se disponen discordantemente sobre la Formación Chiu-Chiu, encontrándose mayoritariamente dispuestos sobre las rocas sedimentarias de la Formación Opache.

Llanuras y terrazas fluviales abandonadas (Qf)

Corresponden a gravas, arenas, limos y arcillas, no consolidados, situados en llanuras y terrazas de inundación del río Loa y del río San Salvador.

Depósitos salinos (Qs)

Estos materiales son depósitos salinos constituídos, principalmente, por limos y arcillas que contienen altas cantidades de NaCl y CaSO₄* 2H₂O. Los sectores donde se presentan, de preferencia, este tipo de depósitos son el Salar de Indio, Salar de Talabre, Salar de Rudolph, Salar

La Esperanza, Salinos de Agua Verde, Salar Brinkerhoff y un salar sin nombre ubicado en la pampa Moctezuma. Todos estos depósitos suman un área expuesta de más o menos 45 km².

Depósitos aluviales (PPIg)

Los depósitos de origen aluvial consisten principalmente en material limo arenoso polimíctico y en menor proporción gravas de tamaños variados, que son aportados por los cursos efímeros tributarios a los ríos Loa y Salado. Estos sedimentos se presentan, por lo general, sin cementación y con compactación moderada, situándose preferentemente en la parte central de la depresión. Estos materiales cubren un área de aproximadamente 350 km². (¿Plioceno Superior alto?-Pleistoceno).

Depósitos de pie de monte (Tsg)

Corresponden a gravas, ripios, limos y arenas polimícticos, de mala selección y baja consolidación.

2.3.1.4. Rocas Intrusivas

Intrusivos Paleozoicos

Granito Mesa (Pzgm), (Vega y Bordonos, 1981)

Es un intrusivo que está descrito como un granito grano grueso, de color gris claro a rosado, con cristales bien desarrollados de feldespatos y cuarzo. En el área de estudio aflora en los cerros Chuquicamata, hacia el noroeste del salar de Talabre y hacia el sureste de este último, en contacto con la Formación Calama. Sus afloramientos en el área de interés cubren una superficie de aproximadamente 14 km² y su edad ha sido asignada al Paleozoico.

Granodiorita Este (Pzgd), (Langerseldt, 1963)

Es un intrusivo que está conformado por una granodiorita de grano medio que presenta cristales y vesículas rellenas de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, en una masa fundamental intersticial fina. Aracena, 1981, lo redefinió como un pórfido granodiorítico.

Este intrusivo, dentro del complejo Chuquicamata, es el de mayor distribución. En el extremo norte de la zona de estudio se presenta como un cuerpo elongado en dirección N-S. Sin incluir el área de Chuquicamata, este intrusivo cubre una extensión de aproximadamente 1,8 km². Se le asigna una edad mínima pérmica.

Intrusivos Cretácico-Terciarios

Diorita Los Picos (Tdlp), (Thomas, 1978, in Ambrus, 1979)

Esta unidad corresponde a una diorita equigranular, de grano medio, color gris, que aflora en el extremo noroeste del área de estudio, al este de Chuquicamata desde el cerro Atalaf, por el norte hasta el cerro Genoveva en el sur. Se presenta en contacto por falla con Tgdf y con Jgc, cubriendo un área aproximada de 18 km². Se le asigna una edad mínima eocena.

Granodiorita Fortuna (Tgdf), (Renzetti, 1957 in Aracena, 1981).

Esta roca corresponde a una granodiorita de hornblenda y biotita de color gris claro y textura porfírica de grano gruesa. Esta unidad se expone desde el norte de cerro Genoveva, en un cuerpo elongado de dirección NE-SO, conformando la Sierra San Lorenzo, hasta el norte del complejo Chuquicamata. Esta granodiorita se encuentra en contacto por falla con las rocas de la Formación Arca y con la diorita Los Picos, estas estructuras estarían asociadas a la megaestructura regional conocida como Falla Oeste.

Este plutón cubre una superficie de aproximadamente 30 km² y su edad se ha asignado al Eoceno.

2.3.1.5. Estructuras

En el dominio morfoestructural de la depresión del río Loa, las unidades miocénicas a pleistocénicas (Formación Calama, El Loa, y Chiu-Chiu), se disponen en general en forma horizontal y localmente presentan una leve deformación.

Como rasgo estructural sobresaliente se encuentra la Falla Oeste, que consiste en una estructura de gran corrida y de dirección general N-S. Esta falla se encuentra en el borde nororiental del área de estudio pero la mayoría de ella se proyecta al norte de la zona de trabajo.

Asociada a esta megaestructura se han detectado lineamientos y fallas paralelas, además de una serie de zonas de fallas secundarias (falla Mesabi y Sistema Montecristo). En el sector del Cerro Calama y Lasana, hay pequeñas fallas inversas de escaso desplazamiento, que están inclinadas hacia el este, afectando a la Formación Calama en el cerro homónimo y a la Formación Opache en Lasana.

El curso superior del río Loa señala un lineamiento N-S que se extiende por más de 200 Km y el quiebre que experimenta en el sector de Calama estaría controlado por estructuras de rumbo E-O.

2.3.2. Geología de Subsuperficie

Los antecedentes aportados por los sondajes disponibles y los datos de sondeos geoelectricos tipo transiente electromagnética, han permitido reconocer en la zona las unidades estratigráficas que a continuación se describen.

2.3.2.1. Formación Opache

En el área de estudio se reconocen dos formaciones del Grupo El Loa. La superior está constituida por una alternancia de lutitas, calizas, areniscas calcáreas, gravas arenosas calcáreas y

arenas limoarcillosas intercaladas con tufitas. Esta secuencia muestra, según los antecedentes disponibles, espesores que varían de 15 hasta 60 metros.

Estas rocas representan condiciones de depósito somero acaecidos en un extenso lago que se desarrolló en la zona entre el Mioceno Superior y el Plioceno. Precisamente la gran amplitud del paleolago fue la responsable de generar la importante continuidad que exhiben hoy estas unidades sedimentarias calcáreas.

En términos hidrogeológicos, puede afirmarse que esta unidad estratigráfica constituye un acuífero freático de pobres características tanto hidráulicas como hidroquímicas. La permeabilidad de estas rocas se remite al fracturamiento que presentan y a estructuras de disolución generadas por la infiltración de aguas superficiales. Esto define una alta anisotropía para el nivel calcáreo, lo que limita su potencial hidrogeológico.

2.3.2.2. Formación Yalquincha

Corresponde a una secuencia bien estratificada, en capas que varían desde centímetros hasta la decena de metros de espesor, constituída principalmente por arcillas con niveles limo-arenosos y escasos niveles clásticos tipo grava. El espesor reconocido de este conjunto, varía entre unos 30 m hasta 240 m. Estos finos depósitos representan facies de baja energía, que se generaron en las etapas iniciales de desarrollo del paleolago señalado anteriormente.

En algunos pozos estudiados se reconoce, además, una secuencia de arcillas con intercalaciones de niveles yesíferos, que debido a su posición estratigráfica (sobreyace directamente a la Formación Calama), puede ser considerada un nivel guía. Esta secuencia tiene un espesor promedio de 120 metros. Estos niveles yesíferos acusan períodos en que la profundidad del lago era escasa.

Este potente conjunto de sedimentos finos tiene un carácter impermeable e imprime un claro confinamiento a los depósitos gruesos infrayacentes, que corresponden a la Formación Calama. Por otra parte, los finos sedimentos en cuestión desconectan al sistema hídrico superficial del río Loa, de las gravas aluvionales de la formación señalada.

2.3.2.3. Formación Calama

Esta unidad está conformada por una potente secuencia de arenas gruesas, gravas finas, arenas gravosas con bolones, y escasos niveles delgados de arenas limosas. Estos sedimentos definen un período de importante actividad erosiva y depositacional en la cuenca, que se habría desarrollado durante el Eoceno Inferior al Mioceno Inferior, con anterioridad a los procesos que generaron las condiciones que dieron origen al extenso lago ya descrito.

De acuerdo a la información disponible, este conjunto sedimentario presenta espesores variables entre 50 y 240 metros con un espesor medio de aproximadamente 150 m.

La gruesa granulometría de estos depósitos debiera condicionar rangos de permeabilidad elevados, sin embargo los antecedentes de pruebas de bombeo disponibles señalan que la permeabilidad presenta valores bastante bajos (entre 0,5 y 1 m/día) (CPH, 2003). Esta disminución de la permeabilidad se debe a los grados incipientes de cementación que presenta este paquete sedimentario. La antigüedad de este nivel, unido al hecho de que durante largos lapsos de tiempo, existió un lago sobreyacente que aportó no sólo agua, sino soluciones enriquecidas en sales al entonces acuífero freático, explican la reducida permeabilidad que presenta hoy el conjunto detrítico.

La cobertura subsuperficial de estos depósitos aluviales es alta, de preferencia hacia el oriente y sur de Calama. A juzgar por la extensión presentada en superficie por el Grupo El Loa y asumiendo que estas rocas se depositaron, de preferencia, sobre los sedimentos de la Formación Calama, ésta última debiera tener una gran continuidad a lo largo y ancho de la cuenca del río Loa.

2.3.3. Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca de Calama.

El análisis litoestratigráfico y cronoestratigráfico del relleno eoceno a pleistoceno de la cuenca de Calama, permite el reconocimiento de tres paquetes sedimentarios discordantes entre ellos, que corresponden a las Formaciones Calama, Yalquincha y Opaque. Se observan en las Figuras 2.8 y 2.9 la distribución de estas formaciones en la cuenca y las columnas estratigráficas levantadas en distintos puntos de la misma por May, 2005.

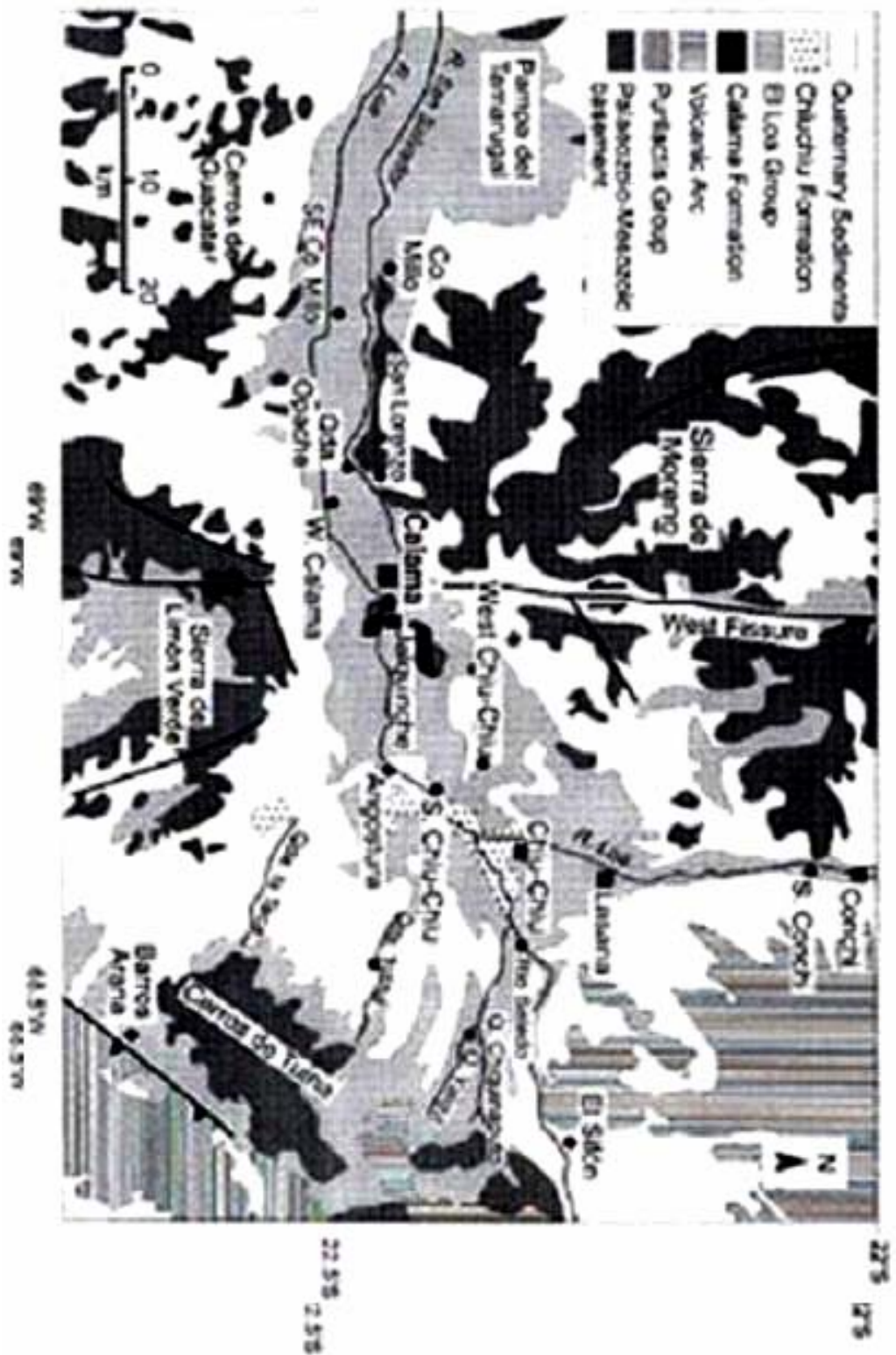


Figura 2.8. Mapa Geológico general de la cuenca de Calama (de May et al 2005, modificado de Marinovic y Lahsen, 1984).

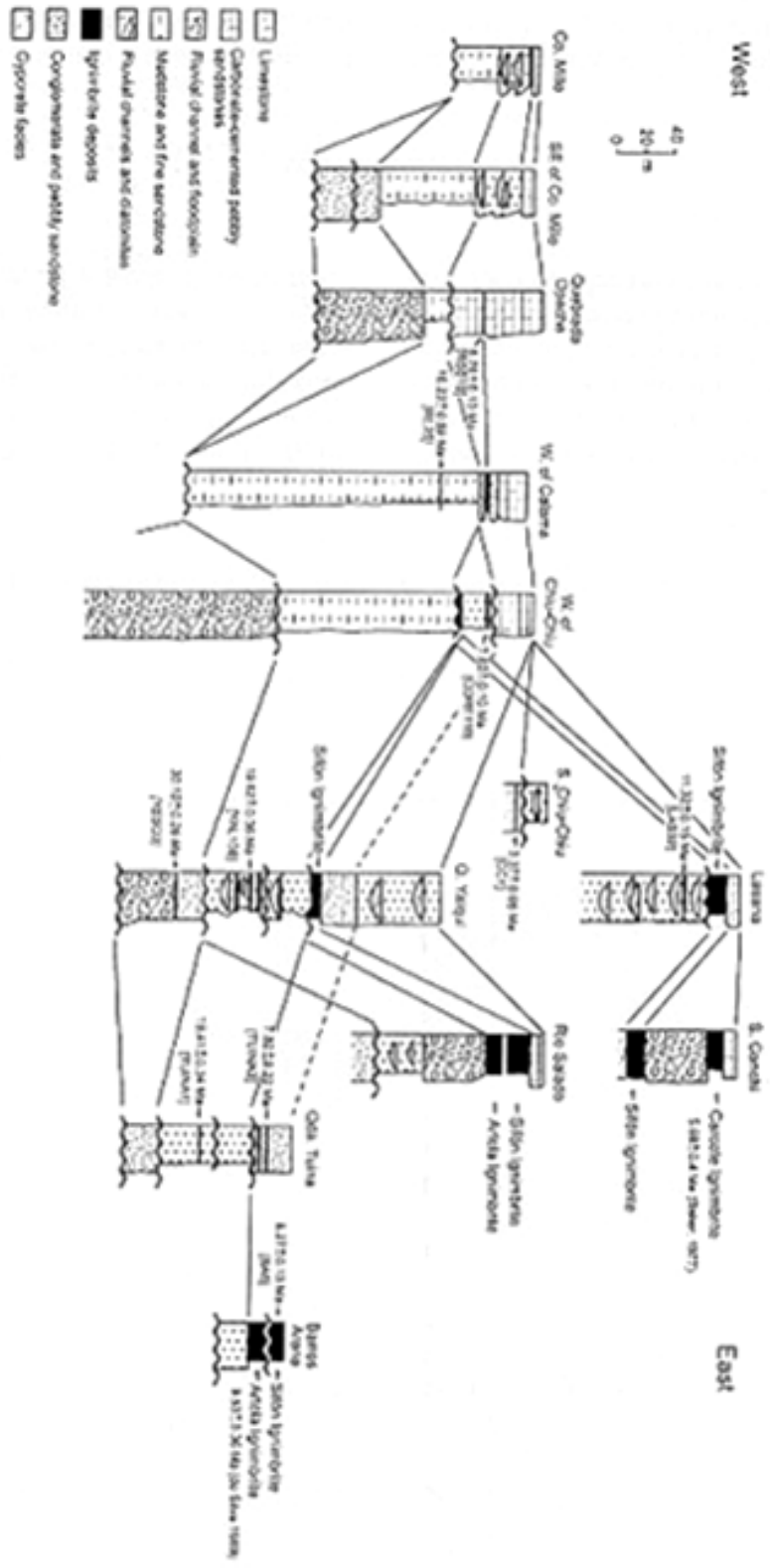


Figura 2.9. Columnas estratigráficas desde el Oeste al Este en la cuenca de Calama. May et al, 2005. La ubicación de las columnas se representa

Se describe a continuación la evolución que ha sufrido la cuenca de Calama y los distintos eventos de depósito que han ocurrido desde el Eoceno a la fecha (Figura 2.10).

Eoceno-Oligoceno

La sedimentación en la cuenca de Calama comenzó en el Eoceno temprano (Blanco et al. 2003) con el depósito de sedimentos de una llanura aluvial trenzada (Formación Calama), discordantemente sobre un basamento pre-Eoceno. Este estilo de sedimentación ocurrió en toda la cuenca a través del Eoceno y el Oligoceno (aprox. 25 M.a.) y pueden haberse extendido hasta el Mioceno temprano. El depósito se realizó en un clima árido a semi-árido en una cuenca endorreica. Presenta un tamaño de grano grueso, lo que sugiere la presencia de un relieve alto en la periferia de la cuenca en el Eoceno y Oligoceno. Alzamiento y plegamiento se asocian con el desarrollo de una disconformidad en toda la cuenca marcando el fin del depósito de la Formación Calama en el Mioceno temprano.

Mioceno temprano a medio.

Desde aproximadamente los 22 Ma a los 10 Ma la sedimentación fue continua tanto en el centro de la cuenca de Calama (Fm. Yalquincha) como en margen este de la cuenca (Fm. Lasana). Los sedimentos fluviales efímeros de la Fm. Lasana serían equivalentes a los depósitos finos de playa (sandflat y mudflat) de la Fm Yalquincha. La naturaleza de grano fino de los sedimentos de la Fm. Yalquincha evidencia una sedimentación periódica y la ausencia de evidencias de sistemas fluviales de gran escala (como depósitos de relleno de canales con estratificación cruzada) sugiere que la cuenca de Calama tuvo un sistema de drenaje endorreico en este período de tiempo.

Mioceno tardío a Plioceno tardío

Desde aproximadamente los 8 Ma una sedimentación de una llanura aluvial tuvo lugar en el borde Este de la cuenca (Fm. Chiquinaputo). No hay registro de una sedimentación entre Calama y el límite oeste de la cuenca representado por los Cerros de Guacata y Cerro Millo (ambos son un alzamiento de basamento pre-Eoceno mediante plegamiento, (May, 1997)). Al oeste de estos cerros la sedimentación continuó en el Plioceno. En contraste, en el centro de la cuenca de Calama

la sedimentación se detuvo y los estratos fueron plegados localmente antes del reinicio de la sedimentación cerca de los 6 ma. En el borde oriental de la cuenca, la sedimentación fue continua hasta el Plioceno.

Una fase tectónica de deformación en el Mioceno tardío (entre los 7 ma y los 6 ma) se restringió al centro de la cuenca.

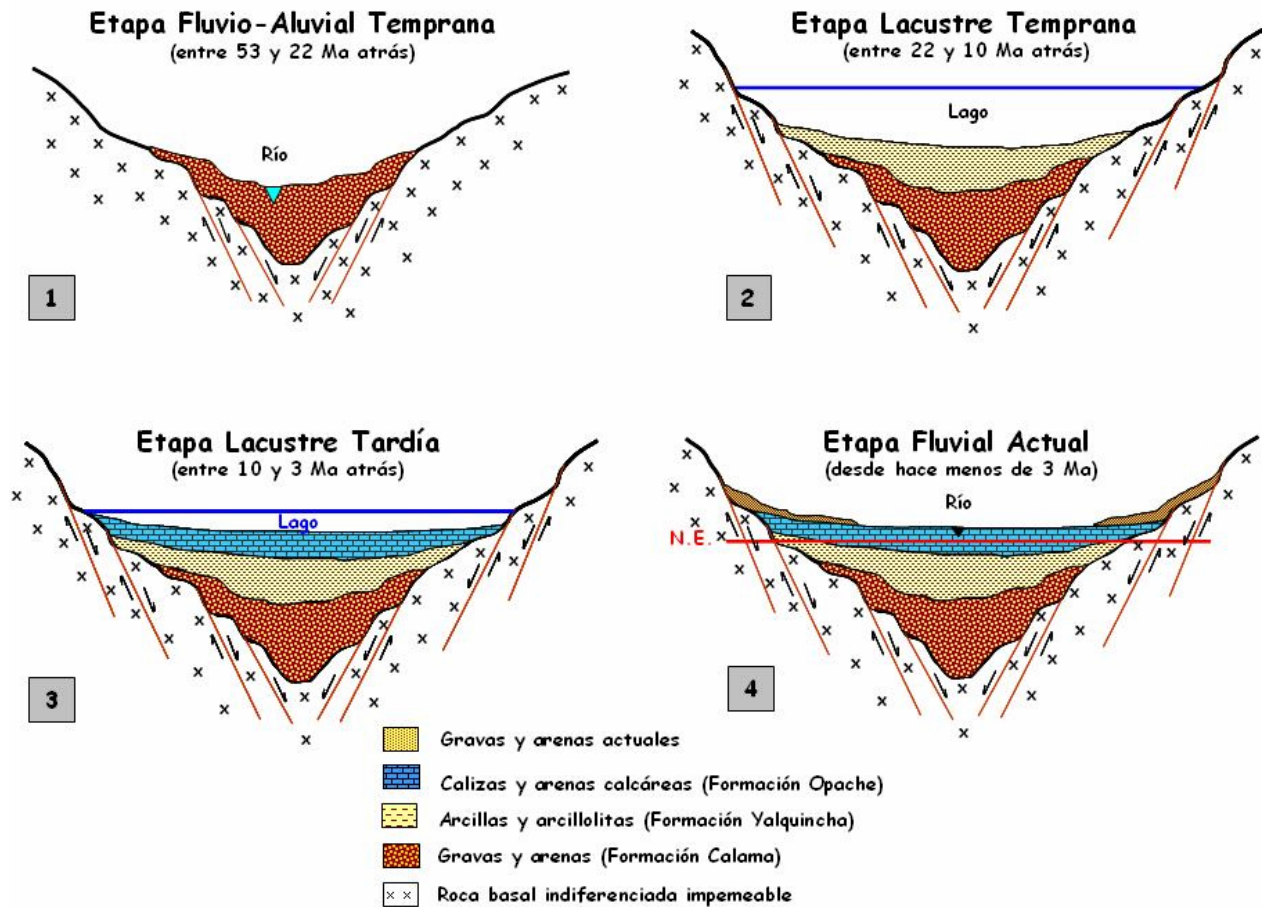


Figura 2.10. Esquema evolutivo de la subcuenca de Calama. (CPH Consultores Ltda, 2003).

Una sedimentación carbonatada palustre prevaleció en la parte central de la cuenca de Calama entre los 6 y los 3 ma (Fm. Opache) con depósitos fluviales y de llanuras aluviales en los flancos de la cuenca (Fm. Chiquinaputo). Después de los 3 Ma el relleno de la cuenca fue sujeto a un plegamiento leve seguido de un encajonamiento de los ríos Loa y San Salvador a través de estratos Miocenos y Pliocenos tempranos. Un depósito de diatomitas ocurrió en el centro de la cuenca de Calama (Fm. Chiu-Chiu) restringido a depresiones localizadas (bajos paleotopográficos) generados por plegamiento de estratos antiguos.

CAPITULO 3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

3.1. Definición de unidades hidrogeológicas y acuíferos reconocidos.

En el marco de la subcuenca Calama-Chuquicamata se reconoce un total de 4 unidades estratigráficas de relevancia hidrogeológica. El cuadro siguiente muestra dichas unidades y el Mapa Geológico (Figura 2.5) presenta la cobertura que exhiben en la zona.

CUADRO 3.1.				
Definición de unidades hidrogeológicas.				
Unidad	Litología Predominante	Potencia	Formación	Edad
1	Arenas y gravas no consolidadas con Calcarenitas y Calizas	5 a 50 m	Opache y depósitos aluviales	Actual a Mioceno Superior.
2	Arcillolitas	15 a 60 m	Yalquincha	Mioceno Superior a Medio
3	Gravas y arenas de cementación moderada	50 a 240 m	Calama	Mioceno Medio a Eoceno Inferior
4	Basamento rocoso	-	-	Terciario a Paleozoico

A continuación se indican las características geométricas y sedimentológicas de cada una de ellas, partiendo de arriba hacia abajo en la columna estratigráfica

3.1.1. Unidad 1. Depósitos aluviales y Formación Opache.

Asociados a los cauces de los ríos Loa y San Salvador existen depósitos sedimentarios recientes (Qal) constituídos principalmente por gravas arenosas caracterizadas por un redondeamiento moderado a alto y de carácter polimíctico. Se estima para estos rellenos una potencia media baja,

que presumiblemente no excede los 10 m. Estos sedimentos se disponen, de forma concordante, preferentemente sobre las unidades calcáreas de la Formación Opache.

Por otra parte, cubriendo extensas áreas de la zona de estudio, se advierte la presencia de depósitos aluviales, posiblemente plio-pleistocénicos (PPlg), que han sido originados por la acción erosiva y depositacional intermitente de gran número de cursos superficiales. El Mapa Geológico (Figura 2.5), muestra la cobertura de estos rellenos, que tienen especial relevancia en la subcuenca Chuquicamata-Calama, en las cabeceras del río San Salvador, hacia el suroriente del yacimiento de Chuquicamata y muy especialmente hacia el sur de Calama donde cubren una ancha franja asociada a la Sierra Limón Verde.

Estos rellenos (PPlg) están constituidos principalmente por gravas arenosas de variado tamaño y limos arenosos polimícticos, que presentan escasa compactación y baja a nula cementación.

Además de los depósitos descritos, se reconocen en la zona sedimentos del tipo pie de monte conformados por gravas, ripios, limos y arenas polimícticas (Tsg). Estos rellenos presentan mala selección y baja consolidación. Estas se habrían originado durante un amplio rango de tiempo (Mioceno Inferior a Plioceno Superior).

Este amplio conjunto de sedimentos (Qal, PPlg y Tsg) presumiblemente presentan permeabilidades entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/seg (CPH, 2003).

La Formación Opache (Tsel) está constituida por una alternancia de lutitas, calizas, areniscas calcáreas, gravas arenosas calcáreas y arenas limoarcillosas intercaladas con tufitas. Esta secuencia muestra, según los antecedentes disponibles, espesores variables entre 15 y 60 m aproximadamente.

En términos hidrogeológicos, puede afirmarse que esta unidad estratigráfica, constituye un acuífero freático de características tanto hidráulicas como hidroquímicas muy variables. La permeabilidad de estas rocas se remite al fracturamiento que presentan y a estructuras de disolución generadas por la infiltración de aguas superficiales (fenómeno Cárstico, Figura 3.1). Esto define una alta anisotropía para este nivel calcáreo.



Figura 3.1. Fotos del sector Las Cascadas del río Loa. La imagen (a) corresponde a una Paleo-cascada. La imagen (b) corresponde a un claro ejemplo de precipitación Cárstica (Travertino).

Las formaciones Qa, PPlg, Tsg y Tsel conforman el sistema acuífero freático del valle del río Loa, el que sería responsable de la escorrentía del río San Salvador, mediante recuperaciones en las cabeceras de la cuenca de dicho río.

3.1.2. Unidad 2. Formación Yalquincha.

Corresponde a la secuencia de estratos definida previamente como la Formación Yalquincha que se constituye principalmente por arcillas.

No se han encontrado antecedentes acerca de ensayos o estudios efectuados exclusivamente en esta capa, sin embargo, de acuerdo a sus características hidráulicas es posible afirmar que actúa como una barrera impermeable que separa a los acuíferos superior e inferior, debido a que esta unidad posee las propiedades de un Acuífijo, es decir, almacena agua hasta la saturación de sus poros y no permite la transmisión de la misma.

A esta unidad se le asigna un espesor promedio de 40 m

3.1.3. Unidad 3. Formación Calama

Esta unidad se compone de los estratos pertenecientes a la Formación Calama, definida anteriormente, y está representada por las gravas características de esta formación.

La potencia reconocida de este conjunto, varía entre 50 m hasta 240 m y presenta un espesor promedio de 150 m.

Hidrogeológicamente, esta unidad se encuentra confinada por la Formación Yalquincha, adquiriendo el status de acuífero confinado, lo cual será corroborado al presentar la información correspondiente a las constantes elásticas (Capítulo 3.3).

El grado incipiente de cementación de este paquete sedimentario, empobrece aún más las características hidráulicas impuestas por su confinamiento.

3.1.4. Unidad 4 Roca Basal

Se ha definido como Unidad 4 al amplio conjunto litológico pre-miocénico conformado por rocas de variada petrografía y edad. Estas rocas, para efectos hidrogeológicos, pueden considerarse como impermeables y en consecuencia su importancia radica en que constituyen las barreras del escurrimiento subsuperficial, de preferencia para los recursos hídricos de la Unidad 3.

Generalmente está constituida por rocas intrusivas y andesitas terciarias. Hacia el noroeste de la subcuenca, se reconocen principalmente rocas intrusivas y metamórficas pertenecientes al basamento paleozoico y a rocas huésped de mineralización, de edades terciarias.

Sin embargo, hacia el sur y hacia oeste de la cuenca se han descrito rocas sedimentarias clásticas (conglomerados y areniscas de las Formaciones Agua Dulce y Tambores).

En conclusión se reconocen dos acuíferos en la zona estudiada. En los detritos aluviales actuales y en las rocas calcáreas de la Formación Opache existe un acuífero freático de modestas características hidráulicas en clara conexión con la escorrentía superficial.

Por su parte, en los sedimentos aluviales de la Formación Calama se anida un acuífero que en gran parte de la cuenca tiene un claro carácter confinado y que representa el mayor potencial hidrogeológico del área. Esta unidad hidrogeológica tiene amplia cobertura y se encuentra desconectada del sistema de escurrimiento superficial por los fuertes espesores de arcillas y arcillolitas, que constituyen la Formación Yalquincha.

3.2. Profundidad del nivel estático y gradientes hidráulicos

Los datos de cota del nivel estático se mantuvieron del modelo previo de la DGA (2003).

El gradiente hidráulico de la superficie equipotencial en el área de estudio varía entre los 1.1% y 2.6%, este incremento se debe principalmente al aumento del gradiente topográfico en las zonas Norte y Sur del modelo, que provocan el acuñaamiento de las unidades estratigráficas y por lo tanto un aumento del gradiente hacia los pies de la Sierra Limón Verde y hacia los cerros de Chuquicamata.

De acuerdo a las equipotenciales trazadas, el sentido de escurrimiento sería principalmente Este-Oeste, teniendo una componente que va desde el Noreste al Suroeste. (Figura 3.2).

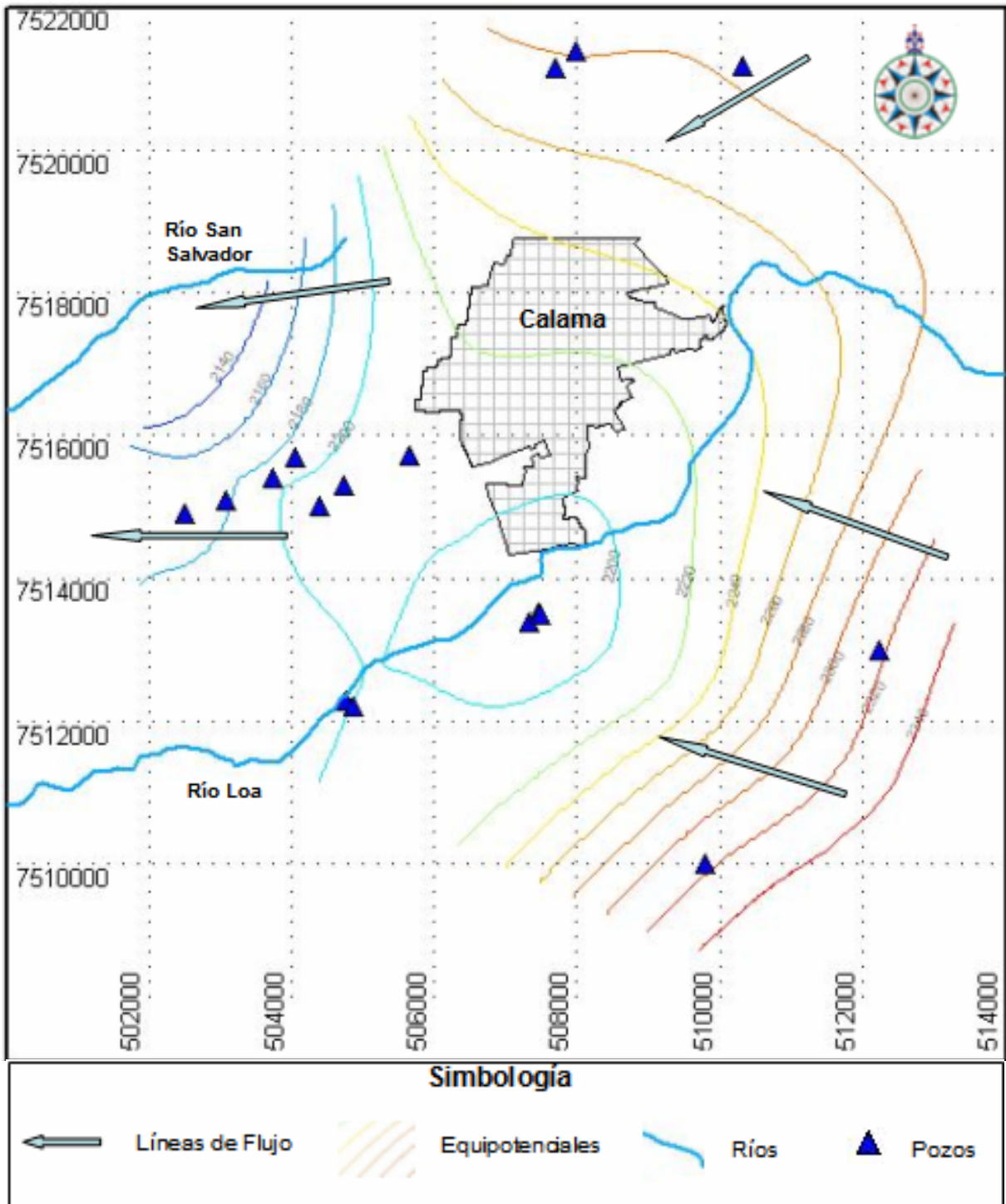


Figura 3.2. Equipotenciales y líneas de flujo. Los triángulos azules corresponden a pozos de los cuales se obtuvieron los niveles estáticos (tomados del archivo técnico de CPH Consultores Ltda.).

3.3. Constantes elásticas

Las constantes elásticas son una medida de la potencialidad del acuífero y corresponden a los coeficientes de transmisividad (T) y almacenamiento (S). El primero se refiere a la facilidad del acuífero para transmitir agua a través de su espesor (b) y está directamente relacionado con la permeabilidad (k) de los rellenos que conforman el acuífero ($T = k \cdot b$). El segundo se refiere a la capacidad que tiene el acuífero de almacenar y/o liberar agua. En el caso de un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento se denomina porosidad efectiva o coeficiente de rendimiento específico (Specific Yield, S_y) y corresponde a la capacidad del acuífero para liberar o almacenar agua en el largo plazo por efecto de la gravedad.

3.3.1 Acuífero Freático. (Unidad 1)

Los antecedentes hidráulicos de esta unidad hidrogeológica provienen del pozo PBMM-1 (CPH, 2003). En éste se estimó la transmisividad de este acuífero en un rango variable entre 200 y 400 $m^2/día$ y la permeabilidad a partir de la transmisividad calculada de las pruebas de bombeo es equivalente a $4,5 \times 10^{-3}$ cm/s.

Por otra parte, debido a la nula o deficiente respuesta de los pozos de observación durante los ensayos de bombeo, no se determinó en dicho estudio (CPH, 2003) el coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, en virtud al carácter freático del acuífero es posible estimar esta variable en un rango entre **5% y 8%** como respuesta del medio permeable en el largo plazo.

3.3.2 Acuífero Confinado (Unidad 3)

Respecto a este acuífero no se encontró mucha información disponible; en el archivo técnico de CPH Consultores Ltda, existen antecedentes de varios pozos, que si bien no se encuentran en la subcuenca, sino al sur de Calama, indican valores entre 80 y 100 $m^2/día$ para este acuífero. Este rango de transmisividad es coherente con los caudales subterráneos que deberían estar fluyendo aguas abajo de la ciudad de Calama, con los caudales extraídos de dichos pozos y coincide con las características sedimentarias del medio permeable.

Al igual que en el caso del acuífero libre, no existen datos de pozos de observación que permitan determinar el coeficiente de almacenamiento de esta unidad hidrogeológica, sin embargo es posible estimar que el valor de dicho parámetro se encontraría en un rango entre 10^{-4} y 10^{-5} , (CPH, 2003), lo que ratifica el grado de confinamiento de este acuífero.

A modo de síntesis se presenta a continuación el Cuadro 3.2.

CUADRO 3.2.			
Constantes elásticas			
Acuífero	Transmisividad (m ² /día)	Permeabilidad (cm/s)	Coeficiente de almacenamiento
Superior (Opache)	200-400	$4,5 \times 10^{-3}$	0,05 - 0,08
Inferior (Calama)	80-100	$2,4 \times 10^{-4}$	$10^{-4} - 10^{-5}$

3.4. Dinámica del flujo subterráneo

Los antecedentes de niveles estáticos de la zona permiten aseverar que el escurrimiento subterráneo tiene una dirección general Este-Oeste coincidente con el escurrimiento del río Loa, y con aportes noreste-suroeste, desde la parte norte del cerro Calama.

Con el objeto de estimar los datos de entrada al modelo se recopiló la información de diversas publicaciones de la DGA.

3.4.1. Mecanismos de recarga

Escorrentía superficial: De la estación fluviométrica Yalquincha (Figura 3.3) en el río Loa se conoce una escorrentía superficial de 1429 lt/s, (Anexo A). De esta escorrentía se extrae el recurso para efectos de riego, por ende se le restará a este caudal los derechos entregados para riego para el largo plazo que equivalen a 523,1 lt/s (DGA, 2003), obteniendo así una escorrentía superficial igual a 905.9 lt/s.

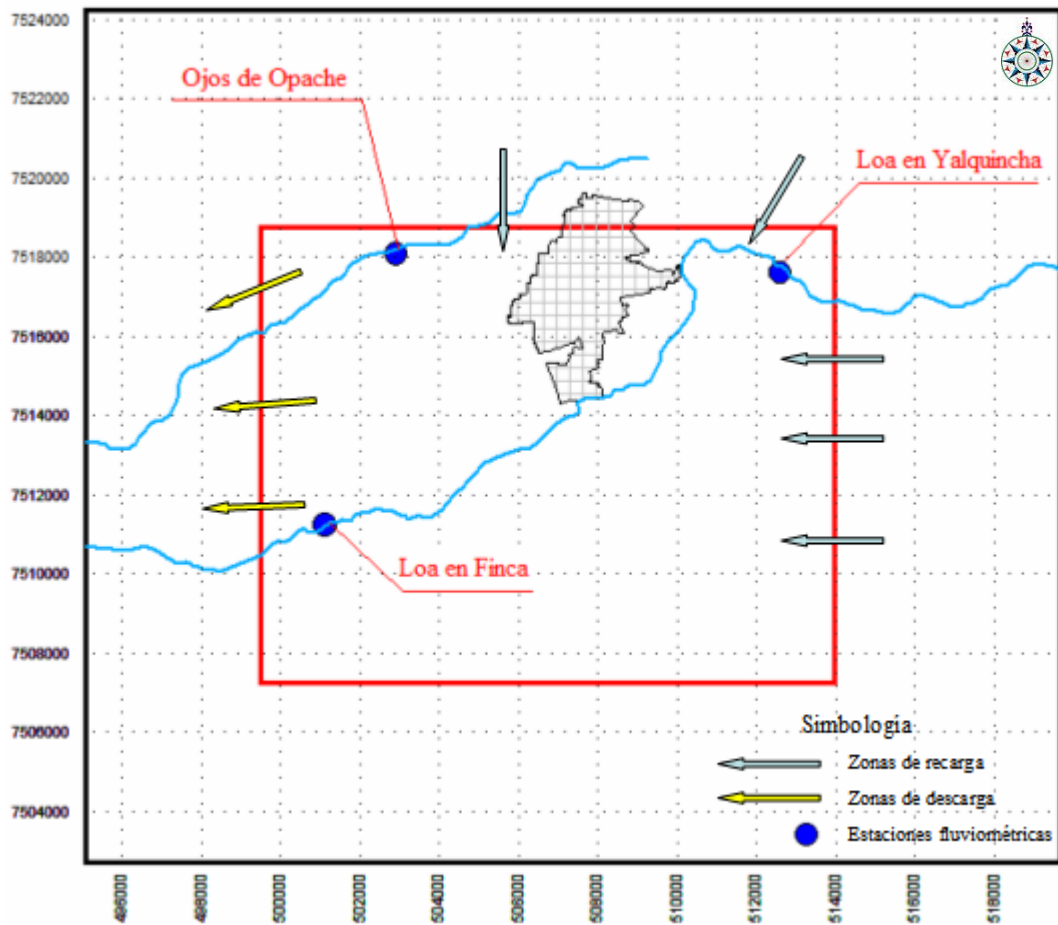


Figura 3.3. Mapa esquemático con las zonas de recargas y descargas en los límites del modelo y ubicación de estaciones fluviométricas.

Caudal subterráneo: Se estima que la recarga desde el noreste del modelo es de 302 lt/s (DGA,2003), y desde el este provendrían 292 lt/s, dando un total de 594 lt/s (DGA,2003)

Precipitaciones: Los datos de precipitaciones registrados en la estación Calama (Anexo B), permiten calcular que el valor promedio anual de éstas alcanza sólo a 4,7 mm. (Cuadro 3.3). Por otra parte, las precipitaciones máximas en 24 horas, indican que en un lapso de 20 años, ha habido solamente 5 días en que la lluvia caída ha superado el valor medio señalado, de los cuales en 3 de ellos la lluvia ha tenido una intensidad comprendida entre 5,2 y 7,0 mm y dos que muestran 9,5 y 13,5 mm/día.

Si se tiene en cuenta que, para que se produzca infiltración de agua proveniente de las precipitaciones, es necesario que el suelo se encuentre con algún grado de humedad inicial y que el agua caída durante 24 horas debe ser de un monto superior a la evaporación diaria, es posible

concluir que la recarga al acuífero como consecuencia de este fenómeno climático, de producirse, sería despreciable.

CUADRO 3.3				
Datos de precipitación media (mm) estación Calama				
Estación	Altura (m s.n.m.)	Invierno	Verano	Anual
Calama	2.260	2,3	2,0	4,3

Retornos de riego: Se han estimado estos últimos como equivalentes al 51% del recurso utilizado, ya que la metodología de irrigación generalizada en la zona es por tendido. Los derechos otorgados para riego alcanzan a 1025,7 lt/s, (DGA, 2003) de forma que los retornos, considerando que ascienden al 51%, se elevan a unos 523 lt/s aproximadamente.

3.4.2. Mecanismos de descarga.

Evaporación: A la altura de Calama la evaporación media es de 10 mm/día. (DGA, 2003). El tramo del río Loa en el área de estudio corresponde aproximadamente a 20 km, considerando un ancho promedio de 1 metro, obtenemos un área mojada de 200.000 m². Adicionalmente el tramo del río San Salvador en el área de estudio equivale a 6 km aprox., tomando un ancho promedio de 1 metro se obtiene un área mojada de 60.000 m², totalizando junto al río Loa un área húmeda de 260.000 m². Con estos datos se obtiene una evaporación igual a 30.1 lt/s.

Recuperaciones: Las vertientes conocidas como Ojos de Opache, son las que dan origen al río San Salvador y la estación de aforo que se ubica en el sector, señala que el caudal medio de éstas alcanza a 461 lt/s, que se consideran como descarga desde el acuífero freático.

Evapotranspiración: Alcanza un valor de 4.9 mm/año (DGA, 2003), para toda la cuenca del río Loa, considerando que la zona de las vegas de Calama corresponde a un 40 % de la vegetación de la cuenca se estima una evapotranspiración de 1.96 mm/año, lo que expresado como caudal continuo asciende a 336 lt/s.

Escorrentía superficial: Estimada a partir de los datos de la estación fluviométrica Finca en el Loa obteniendo un valor de 575 lt/s, (Anexo A).

Extracciones: Las descargas asociadas a las extracciones efectuadas desde el acuífero freático se pueden dividir en 2 partes. Se han otorgado 29 lt/s (DGA, 2007) en derechos que van desde 1 a 2 lt/s, si se considera que un 75% de estos derechos se están extrayendo esto equivale a 22 lt/s.

Adicionalmente existen 594 lt/s (DGA, 2007), otorgados a empresas mineras del sector, y aunque la mayoría de estas extracciones se están efectuando desde el acuífero confinado, (y existe la orden desde la DGA a que las extracciones desde el acuífero freático sean profundizadas al acuífero confinado), se estima que las extracciones desde el acuífero freático por empresas mineras ascienden a 150 lt/s, totalizando una extracción de 172 lt/s para el acuífero en comento.

Caudal subterráneo: Se estimó el caudal subterráneo que sale por el borde Oeste del modelo considerando una transmisividad de 300 m²/día, un gradiente hidráulico de un 1,5% y un largo de 9 km, obteniendo un caudal equivalente a 468,5 lt/s.

3.4.3. Balance hídrico preliminar.

Con los antecedentes presentados previamente se efectuó el balance hídrico preliminar que se observa en el Cuadro 3.4.

CUADRO 3.4.			
Desbalance hídrico del acuífero freático			
Recargas	lt/s	Descargas	lt/s
Escorrentía Superficial	906	Escorrentía superficial	575
Caudal Subterráneo	594	Caudal Subterráneo	469
Riego	523	Evaporación	30
		Recuperación río San Salvador	461
		Evapotranspiración	226
		Extracciones	172
Total recargas	2023	Total descargas	1933
Error de cierre (recargas-descargas) = 90 lt/s			

En consideración a lo expuesto anteriormente, se observa que el desbalance hídrico corresponde a un 4.5% de las recargas del sistema, valor más que satisfactorio.

3.5. Estimación de volúmenes embalsados

Para el área de estudio se consideró una superficie de acuífero de 155 km², un espesor medio de 50 m y un coeficiente de almacenamiento de un 6%, resultando un volumen de agua subterránea embalsada equivalente a 465.000.000 m³. Cuadro 3.5.

CUADRO 3.5	
Estimación Volumen Embalsado	
Área del acuífero	155.000.000 m ²
Espesor promedio	50 m
Volumen del acuífero	7.750.000.000 m ³
Coeficiente de almacenamiento	0,06
Volumen embalsado	465.000.000 m ³

Los valores asumidos son en general bastante conservadores, (la cobertura superficial del acuífero por ejemplo), de manera que es muy probable que el monto determinado presumiblemente sea menor al real. En el caso del coeficiente de almacenamiento se ha supuesto un valor intermedio del rango estimado en el capítulo 3.3.

Este volumen, expresado como caudal continuo durante 50 años, asciende a 35.37 lt/s, lo que obviamente resulta muy modesto. A modo de ejemplo, si se aplica la expresión propuesta en el Manual de Normas y Procedimientos de la Dirección General de Aguas, que señala que eventualmente se pueden conceder derechos de aprovechamiento consuntivos y permanentes, contra el almacenamiento, equivalentes al 5% de éste (expresado como caudal continuo para 50 años), se determina por este concepto un caudal de explotación de tan sólo 1.77 lt/s.

CAPITULO 4. MODELO HIDROGEOLÓGICO

4.1. Acerca de Visual MODFLOW.

Visual MODFLOW V.4.0 es un producto comercial, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic, Inc. Este programa permite resolver el problema de flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones, el cual fue desarrollado por McDonald y Harbaugh pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988).

El programa presenta una interfaz gráfica que permite el ingreso de información visualmente, asignando dentro del mismo modelo las propiedades del sistema que se requiere simular.

4.1.1. Fortalezas y debilidades.

El modelo de flujo Visual MODFLOW V.4.0 corresponde a uno de los modelos más utilizados internacionalmente para el estudio de flujo de aguas subterráneas, siendo un modelo ampliamente probado y de comprobada eficacia en la resolución y representación de problemas de flujo en tres dimensiones.

Por lo anterior, la utilización de Visual MODFLOW v 4.0 es favorablemente aceptada por los sectores industriales y gubernamentales de distintos países.

El esquema de resolución numérico empleado por el modelo corresponde a un esquema de diferencias finitas, el cual entrega soluciones aceptables a los problemas modelados, a través de una metodología numéricamente sencilla.

La representación gráfica de la modelación facilita el ingreso y el manejo de los datos, la visualización de resultados, y la interpretación de estos, entre varias facilidades.

Al ser un modelo cuasi-tridimensional, Visual MODFLOW V.4.0 está capacitado para representar de una manera más realista los problemas modelados.

Una de las debilidades de Visual MODFLOW V.4.0 es producto de su formulación numérica, la imposibilidad de llenar celdas secas las que se vacían durante el proceso de cálculo. Esto lleva a cometer errores al momento de cuantificar caudales de extracción o direcciones de flujos.

La resolución numérica al utilizar el método de diferencias finitas trabaja mejor con acuíferos rectangulares o prismáticos y de composición uniforme, por lo que la modelación de acuíferos irregulares o curvos, con propiedades de anisotropía y heterogeneidad es difícil de resolver mediante esta metodología.

4.2. Antecedentes requeridos para el modelo

4.2.1. Extensión del Modelo

El modelo se encuentra limitado por las coordenadas 7507200 y 7518750 Norte y por 499500 y 514000 Este (ver Figura 4.1).

El área que comprende el modelo corresponde a 167,5 km².

Esta extensión del modelo se definió agregando columnas y filas nuevas a un modelo realizado por la DGA (2003), en total se agregaron 13 columnas hacia el Este y 20 filas hacia el Sur, resultando un modelo de 93 filas y de 117 columnas, con un total de 10881 celdas cuadradas cuyo lado es de 126 m.

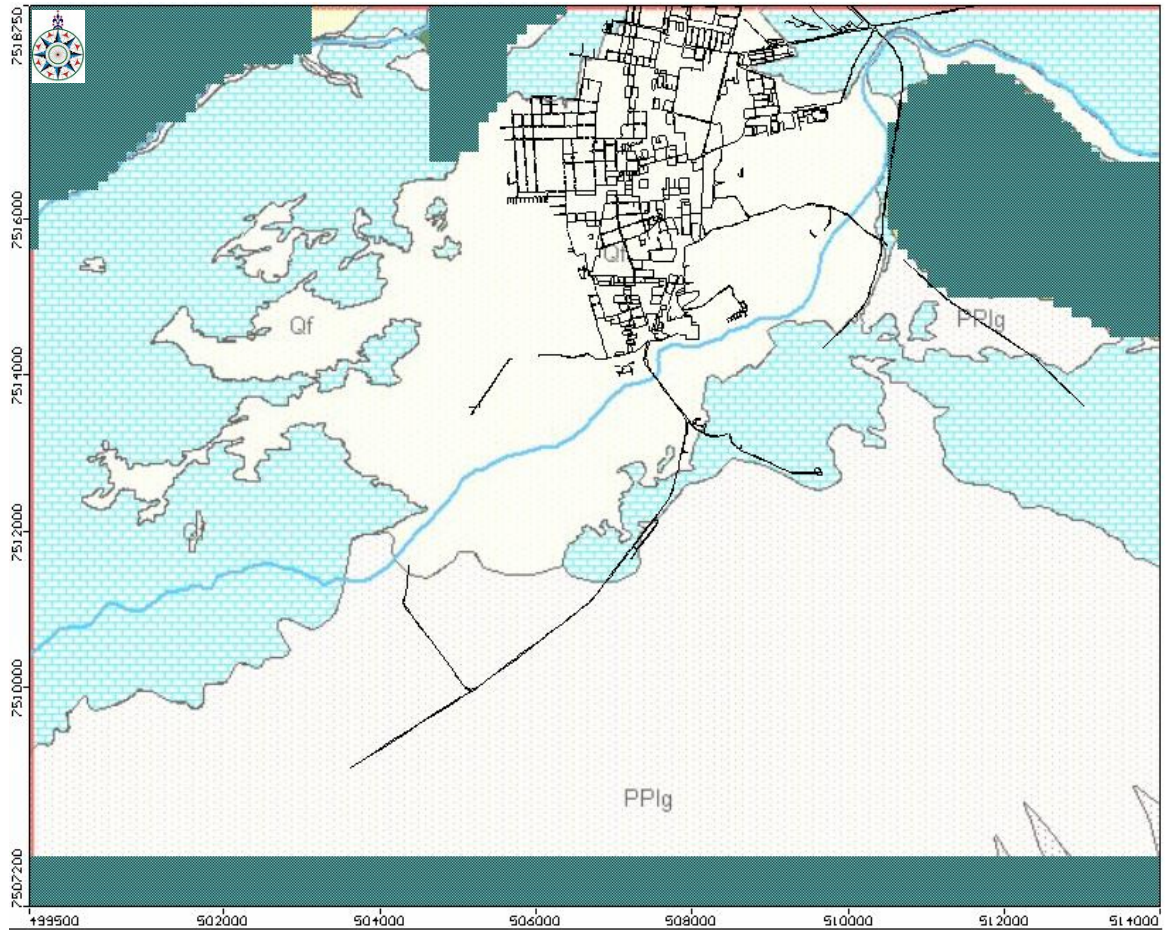


Figura 4.1. Mapa generado en Visual MODFLOW V.4.0 , mostrando la zona de estudio acotado por las coordenadas previamente mencionadas y las celdas inactivas asumidas para el modelo (en verde).

El agregar columnas hacia el Este permitió modelar con un mayor detalle el caudal que está entrando desde la zona oriental hacia la sub-cuenca de Calama.

Además con las filas agregadas hacía el Sur se busca una mejor interpolación de las unidades hidrogeológicas al acuñarlas a los afloramientos de las formaciones que componen la Sierra de Limón Verde.

4.2.2. Definición de Layers

El modelo hidrogeológico se construyó considerando 3 estratos (layers) característicos, extendidos sobre todo el dominio, y en algunos sectores particulares controlados por fallas de carácter local o de carácter regional. Estos estratos identificados son (desde la superficie hacia abajo): Layer 1, compuesto por depósitos cuaternarios y las calizas de la Formación Opache; Layer 2, serie de arcillas, limos y arenas denominado Formación Yalquincha; Layer 3, gravas, ó Formación Calama; el piso de la Layer 3 es el basamento rocoso indiferenciado. Se observan en los perfiles de los límites del modelo (Figuras 4.2 a 4.4).

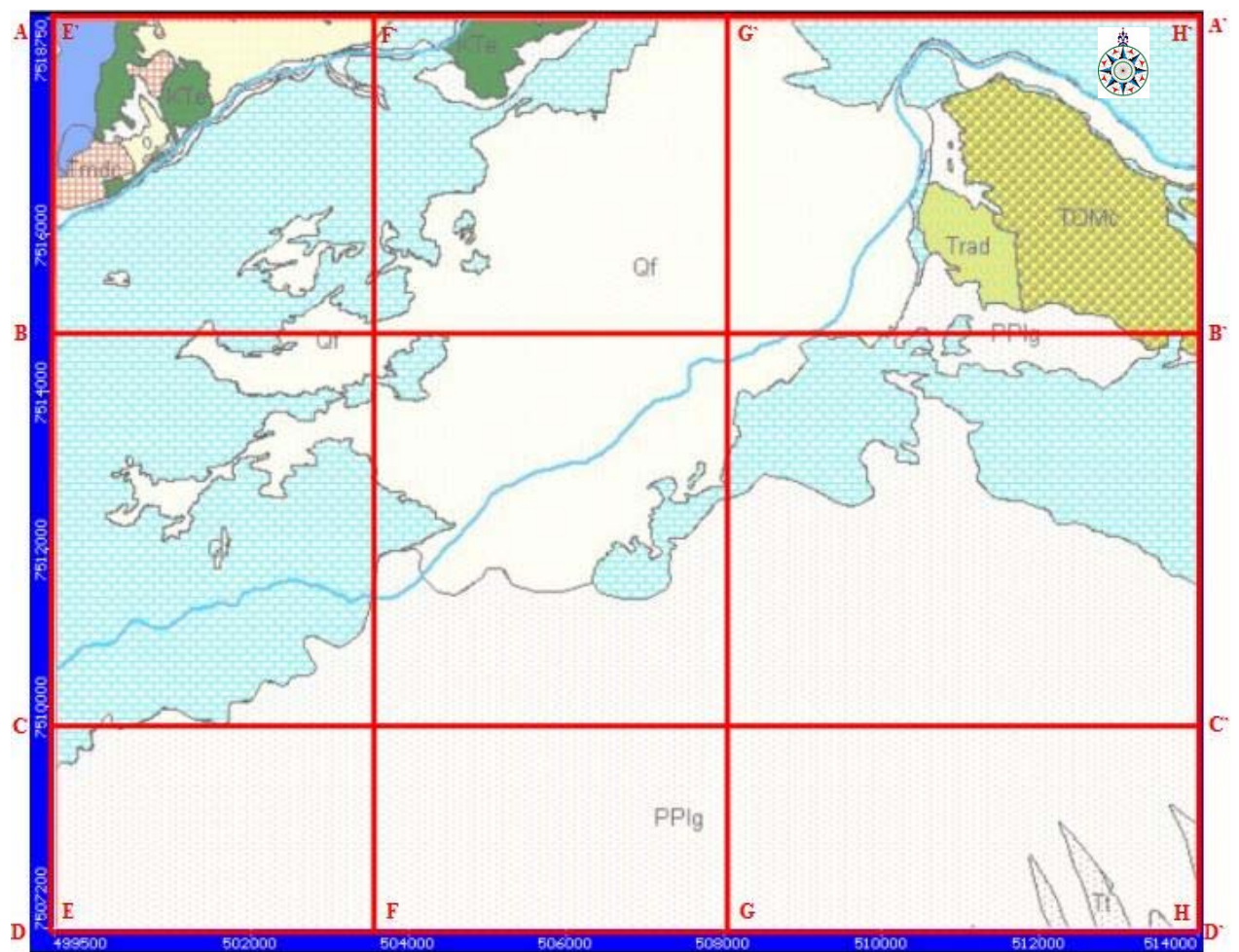


Figura 4.2. Mapa geológico del área de estudio, donde las líneas rojas representan la ubicación de los perfiles esquemáticos.

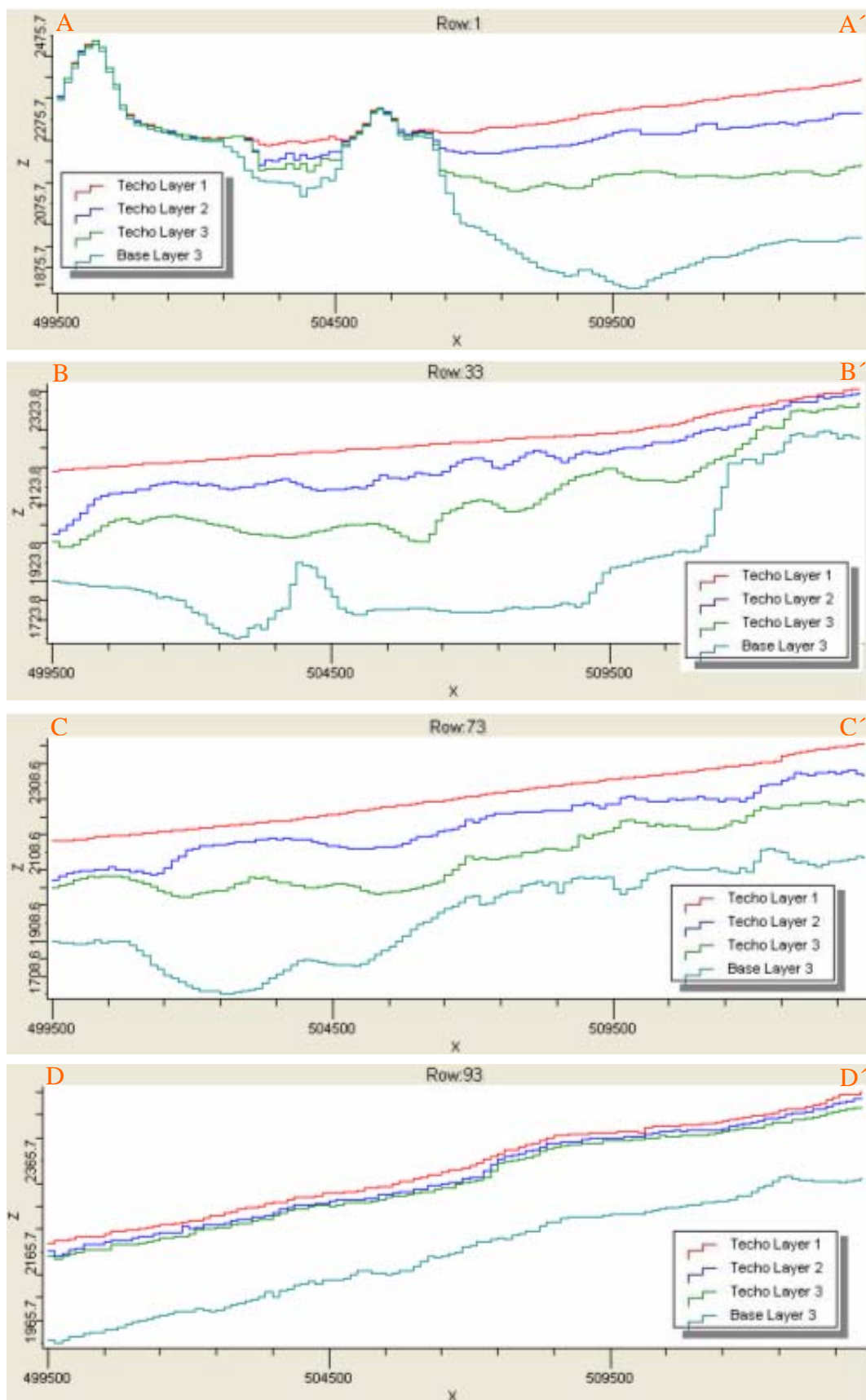


Figura 4.3. Perfiles transversales A-A', B-B', C-C' y D-D'. Orientación Este-Oeste.

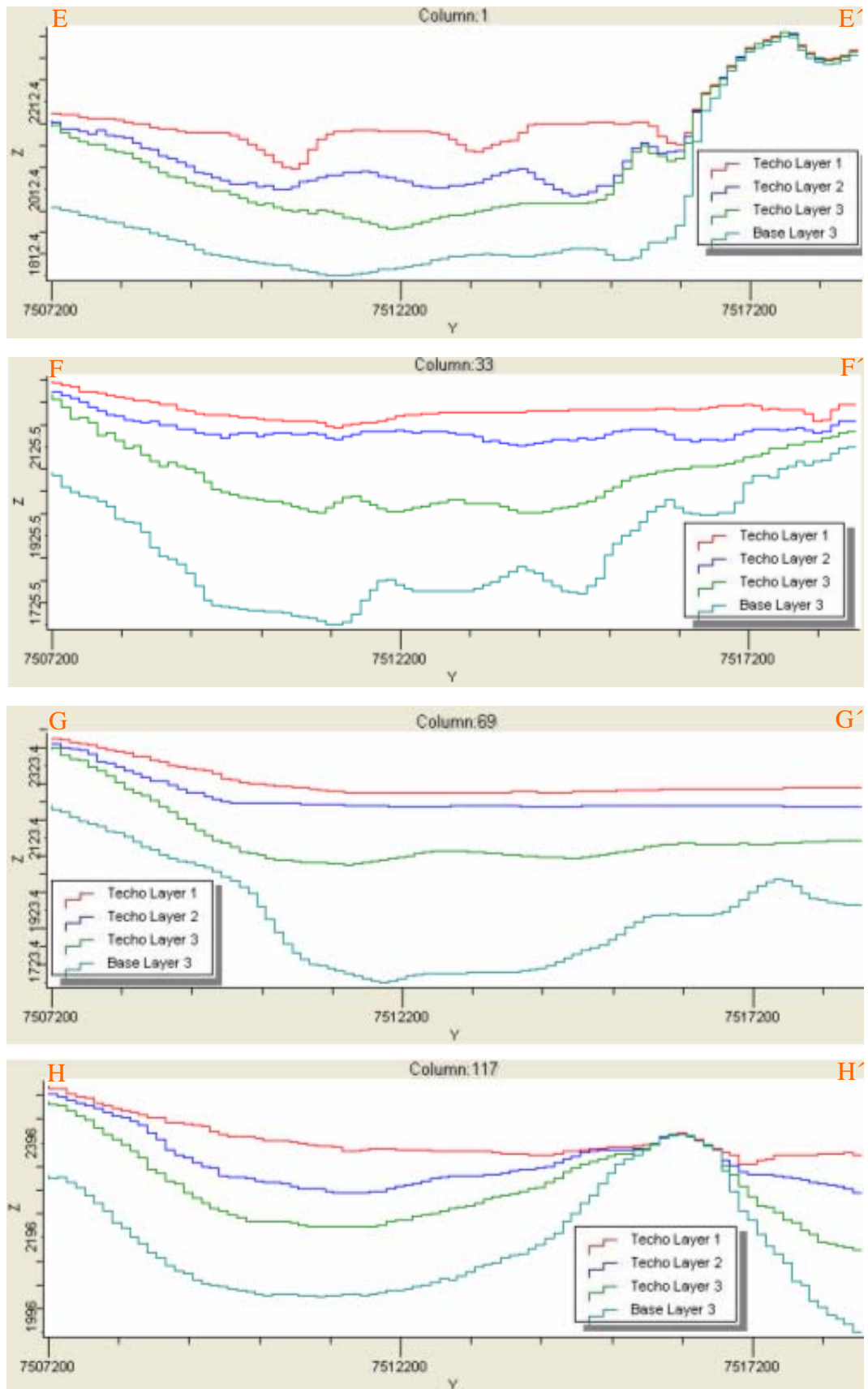


Figura 4.4. Perfiles longitudinales, E-E', F-F', G-G' y H-H'. Orientación de Sur a Norte.

En relación a la discretización temporal de los datos, contempla 1 período de stress de 50 años (18250 días) de modelación, para los dos escenarios que se describirán mas adelante.

4.2.3. Equipotenciales y Sentido de Esguerrimiento

El modelo necesita para su funcionamiento los niveles estáticos al inicio del periodo de calibración, estos fueron ingresados a través de los pozos de observación contenidos en el modelo de la DGA (2003), obteniendo así las equipotenciales de las cuales se extrae el sentido de esguerrimiento de las aguas (Figura 4.5).

Para la asignación de los niveles de agua iniciales (Initial Heads) y las alturas de carga constante en los límites del modelo (Constant Heads) se utilizó como criterio el gradiente hidráulico que se obtuvo a partir de la información existente para cada zona.

El sentido de esguerrimiento es en términos generales Este-Oeste, pero existe un ingreso de agua desde el Noreste inclinando el sentido levemente Noreste-Suroeste, que coincide con la morfología del río Loa en el área de estudio.

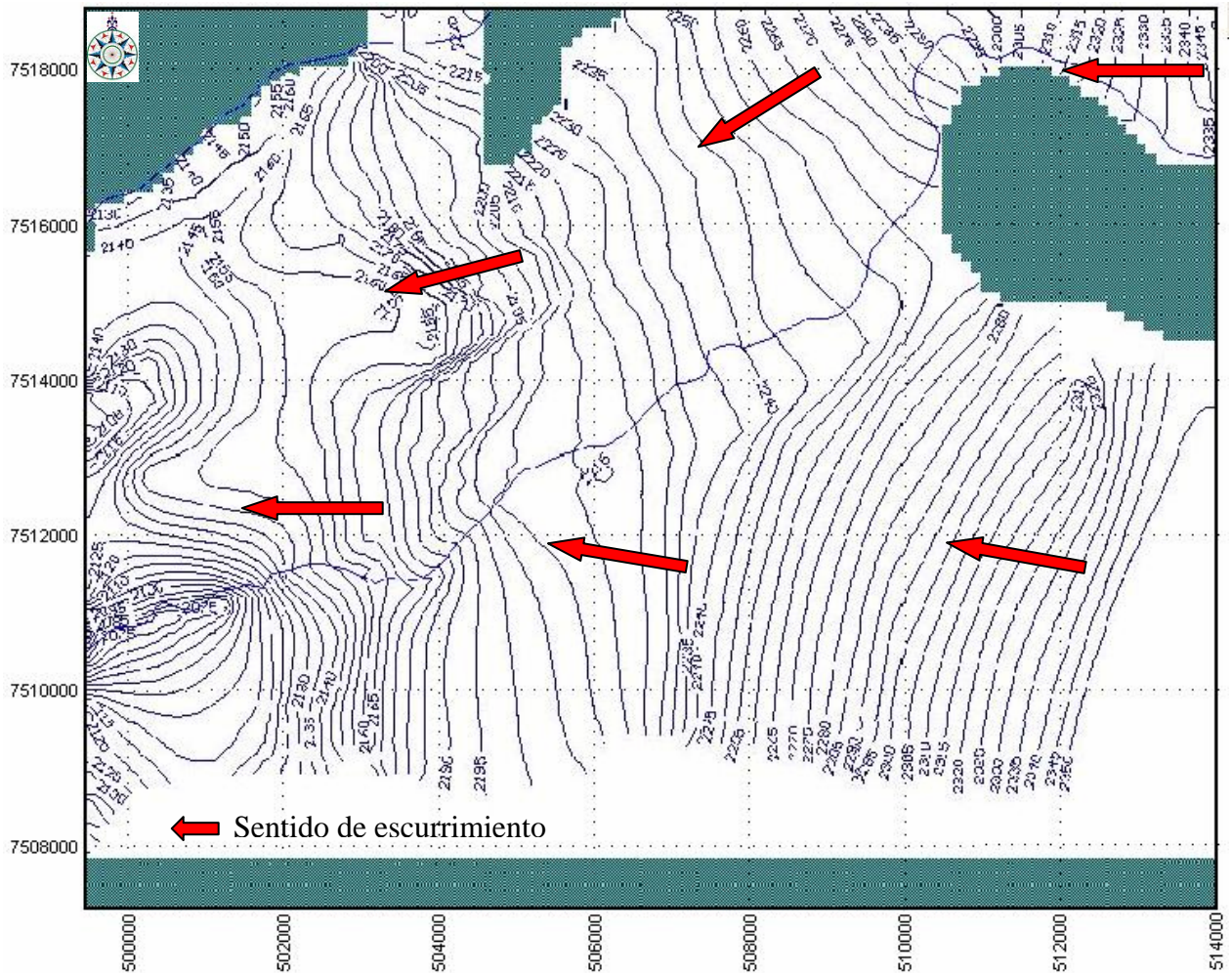


Figura 4.5. Equipotenciales y sentido de escurrimiento en escenario sin el bombeo de 30 lt/s. Las flechas rojas indican el sentido de escurrimiento.

4.2.4 Constantes Elásticas.

Con el propósito de generar la geometría del acuífero freático en las celdas agregadas al modelo, se digitalizaron mapas con Mapinfo que contenían la geología, la topografía, ubicación de pozos, afloros y río; para posteriormente obtener interpolaciones de las superficies de las distintas capas con la aplicación Vertical Mapper; luego en visual MODFLOW V.4.0 se importaban en formato texto (.TXT en Excel) obteniendo los espesores y la morfología que el software necesita para calcular el nivel piezométrico al final de cada periodo, al calcular el valor de la transmisividad (m^2/s) de cada una de las celdas activas. Este lo obtiene multiplicando la altura del espesor saturado (m) en cada celda, por la conductividad (m/s), para cada periodo de tiempo.

Con la ayuda de los mapas y de la información de las celdas del modelo de la DGA se definieron las zonas con celdas inactivas (sin flujo) y activas, a estas últimas se le asignaron 3 valores de conductividad (x, y, z) (Figura 4.6) y su almacenamiento (Ss, almacenamiento específico (1/m) y Sy, rendimiento específico).

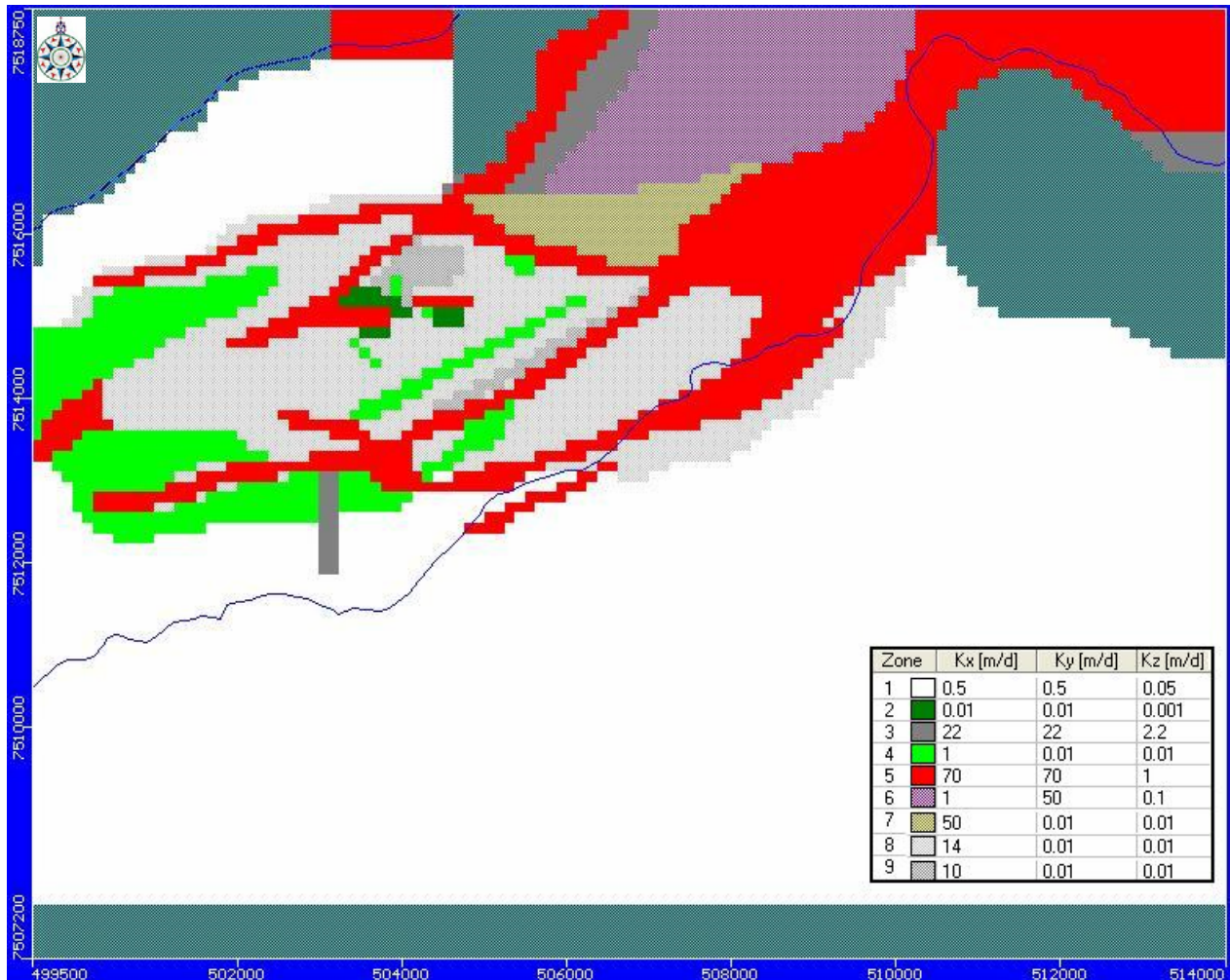


Figura 4.6. Conductividades (Kx, Ky, Kz) asignadas a las celdas de la Layer 1.

4.2.5. Condiciones de Borde

En el modelo matemático que nos ocupa, se definieron dos tipos de condiciones de borde.

La primera de ellas corresponde a celdas inactivas, las que representan los sectores donde no existe acuífero y, por consiguiente, áreas donde el proceso hidrodinámico subterráneo no se

verifica por tratarse de sectores donde existe roca impermeable. Con respecto a las celdas inactivas del borde Sur del modelo, estas fueron definidas debido a que no existen aportes de agua desde el Sur hacia la zona de estudio y se asume que no existen recargas hacía el Sur, desde el área de estudio, puesto que los sedimentos se acuñan hacia los afloramientos rocosos de la Sierra de Limón Verde.

La segunda condición de borde corresponde a las “alturas de carga constante” (Constant Heads) que fueron incorporadas en cuatro secciones, una sección al nororiente de la ciudad de Calama, la segunda al norponiente de la misma y las últimas al oriente y al poniente de la zona de estudio. Ambas condiciones de borde se ilustran en la Figura 4.7. La altura de carga asignada a cada celda, está determinada por el valor del gradiente hidráulico obtenido para las distintas zonas del modelo

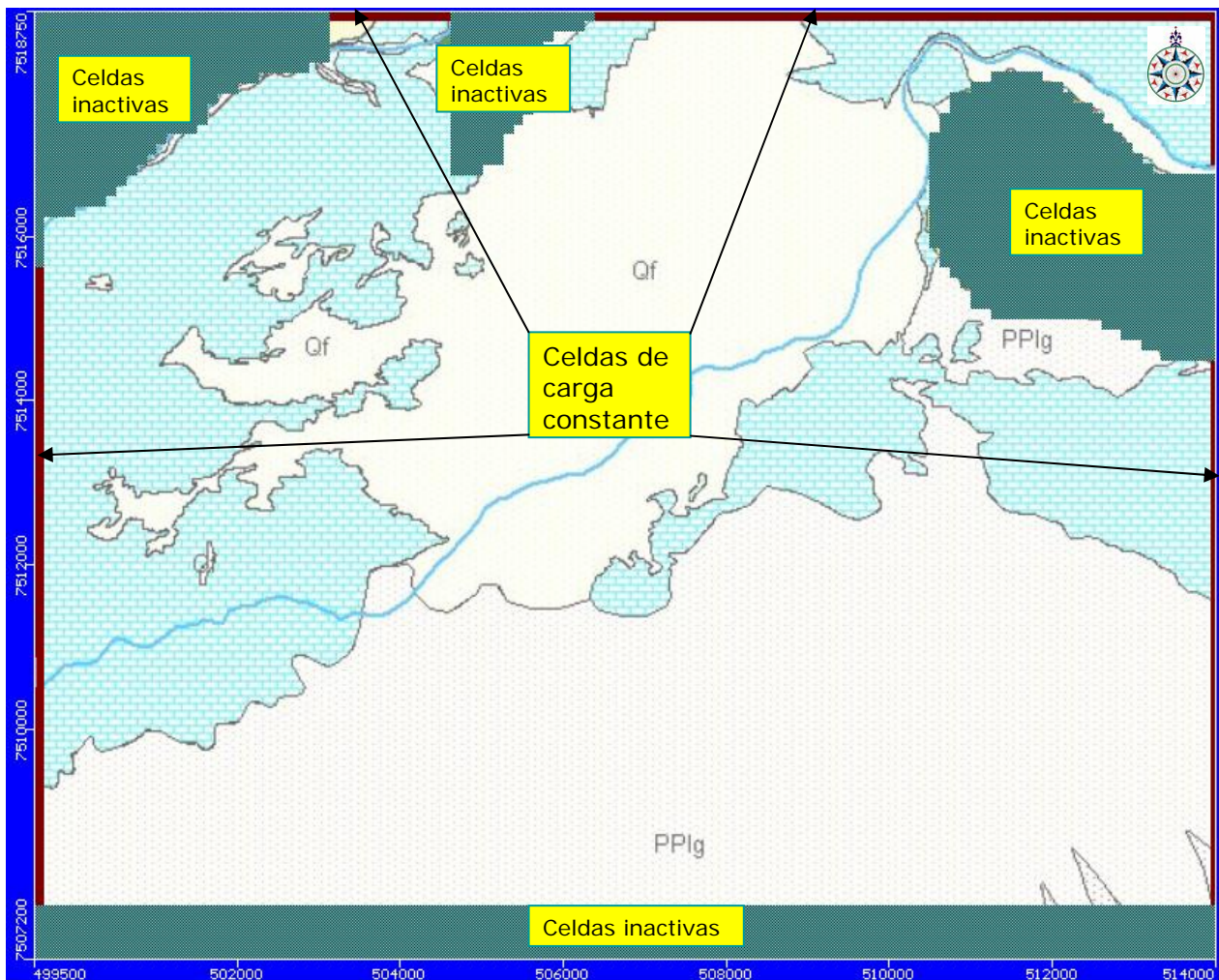


Figura 4.7. Celdas inactivas y de carga constante.

4.2.6. Recargas

Corresponden a recargas del sistema subterráneo. Están definidas como entradas al sistema provenientes de percolaciones profundas en áreas de riego y probablemente provenientes de pérdidas generadas desde las redes de agua potable.

Podrá advertirse que se han definido dos áreas de recarga. La más extensa, que se muestra en la Figura 4.8 con celdas en azul, correspondería a un área con una recarga constante equivalente a 1,374 mm/día; y la segunda, que en la misma figura se presenta con celdas color verde olivo (en el centro de la figura rodeada de las celdas de color azul), corresponde a un sector con una recarga equivalente a 0,423 mm/día.

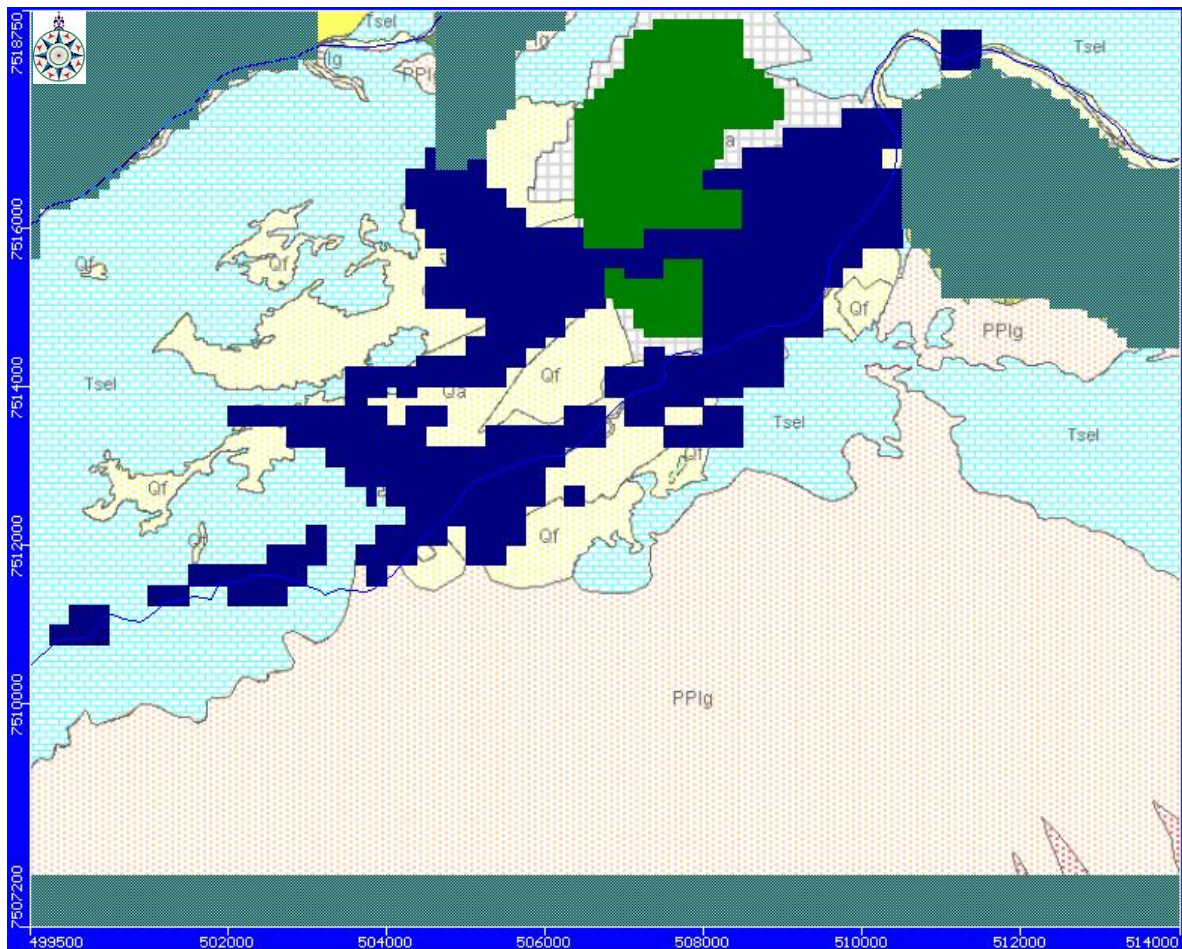
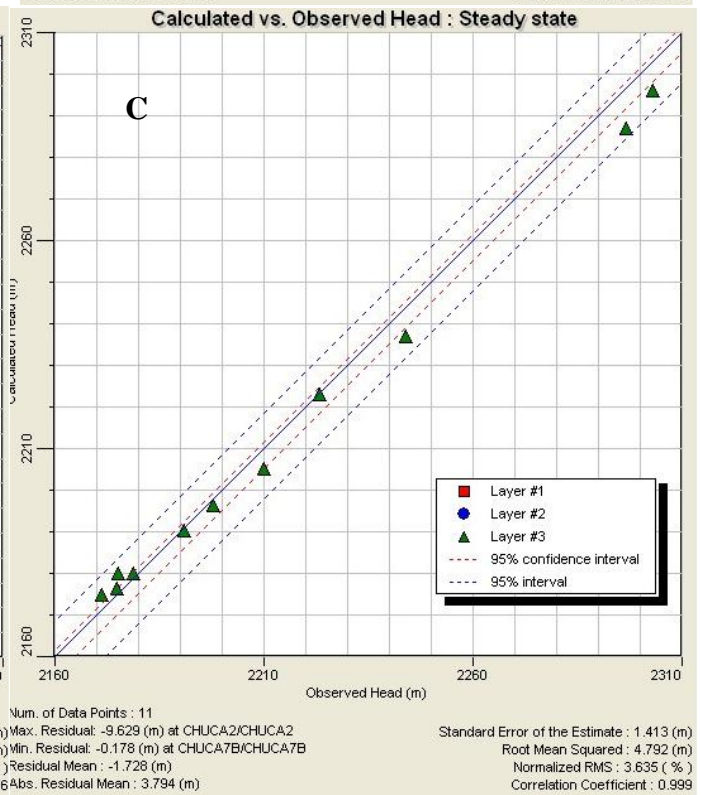
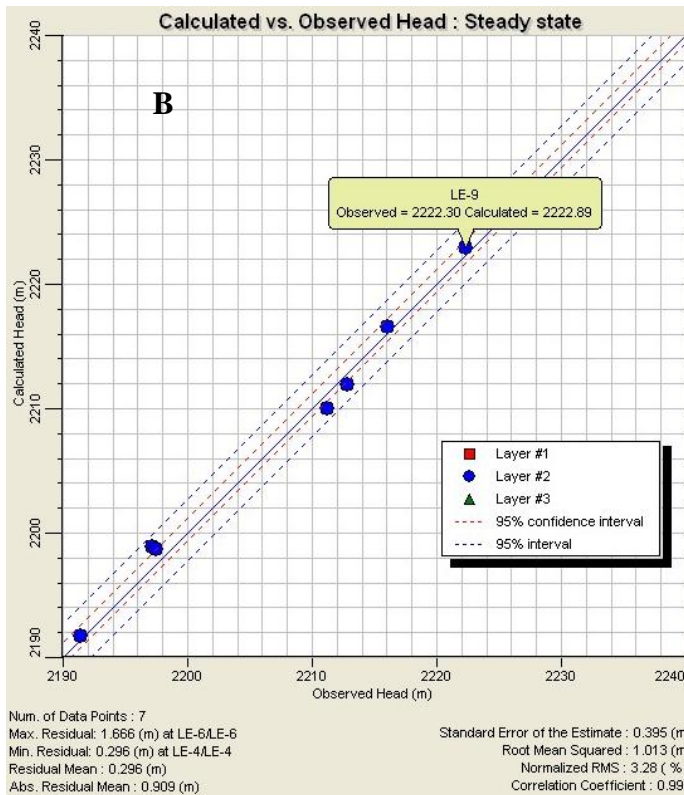
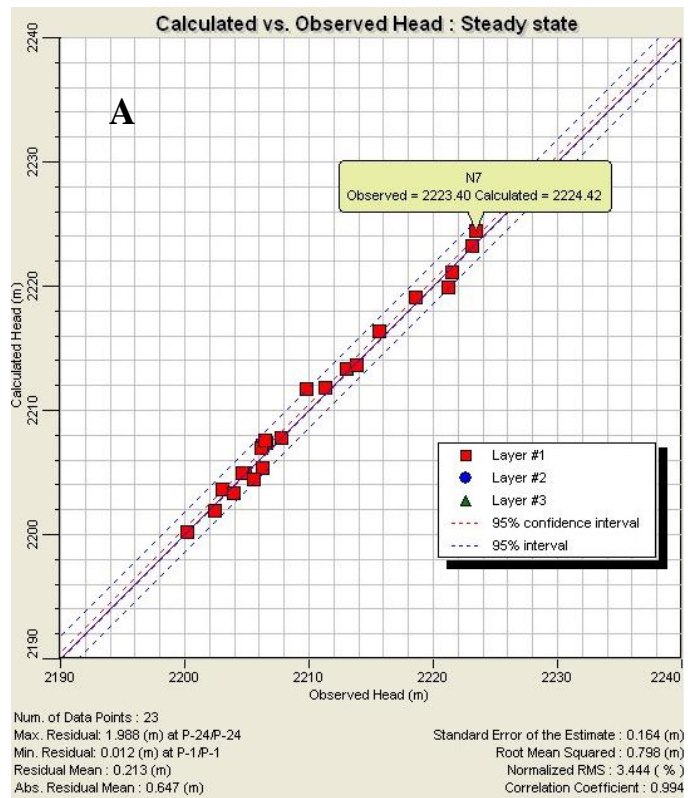


Figura 4.8. Asignación de la recarga por riego y percolaciones.

4.3. Calibración del Modelo

Se procedió en la primera etapa a correr el modelo en régimen permanente, sin efectuarle ninguna extracción. Se verifica entonces que los valores de calibración (Normalizad RMS) para cada layer fluctúan entre 3 a 4 % lo que se considera un buen ajuste (Figura 4.9)

Figura 4.9. A: Ajuste Layer1; B: Ajuste Layer 2.; C: Ajuste Layer 3.



Para el proceso de calibración en régimen Permanente, se utilizó el solucionador numérico SIP5 (Strongly Implicit Procedure Package), con los siguientes parámetros y criterios de convergencia:

- Iteraciones máximas (MXITER) 5.000
- Variables de iteración (NPARM) 10
- Variable de aceleración (ACCL) 0,1
- Criterio de cambio de HEAD (HCLOSE) 0,01
- Intervalo de impresión (IPRSIP) 10
- Iteración variable de SEED (WSEED) 0,01

En la calibración del modelo en régimen permanente, los valores de carga constante en los bordes del modelo se utilizaron para obtener una mejor estimación de los caudales subterráneos de entrada al modelo y además para generar equipotenciales que sean consecuentes con las direcciones de flujo previamente estimadas. Se ajustaron los valores asignados de conductividad y almacenamiento de las celdas con el objeto de asemejar los valores de niveles de agua medidos con los que calcula el modelo y así disminuir el error asociado a la modelación y por lo tanto aumentar la confiabilidad del modelo.

No se realizó la calibración en régimen transiente debido a la ausencia de los datos de niveles estáticos necesarios para efectuar dicha calibración.

4.4. Resultados de la calibración

Las dos figuras que se incorporan a continuación permiten advertir el descenso de los niveles producto de la extracción programada (30 lt/s). La primera lámina (Figura 4.10) muestra el sistema en equilibrio, libre de bombeo, y la segunda (Figura 4.11) presenta la superficie equipotencial generada producto de la explotación señalada.

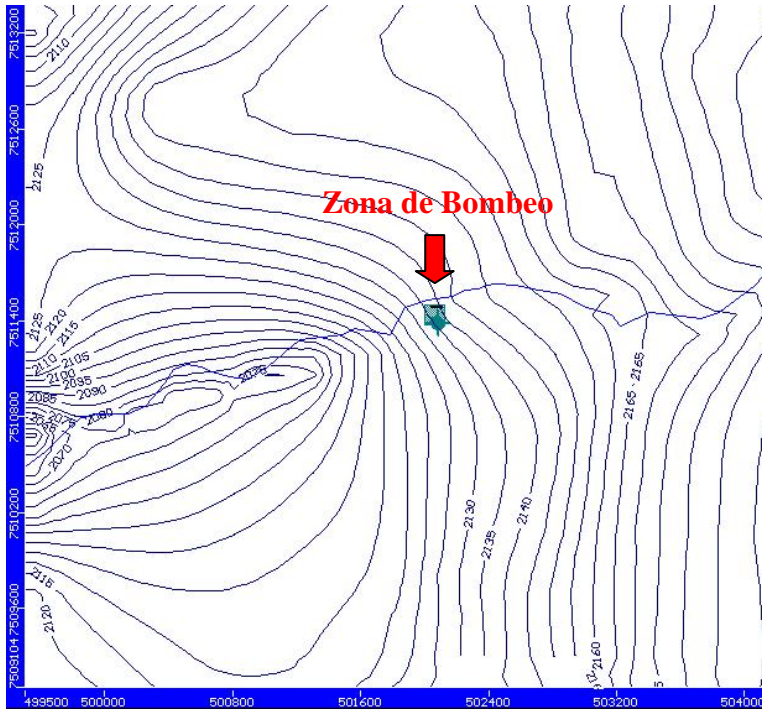
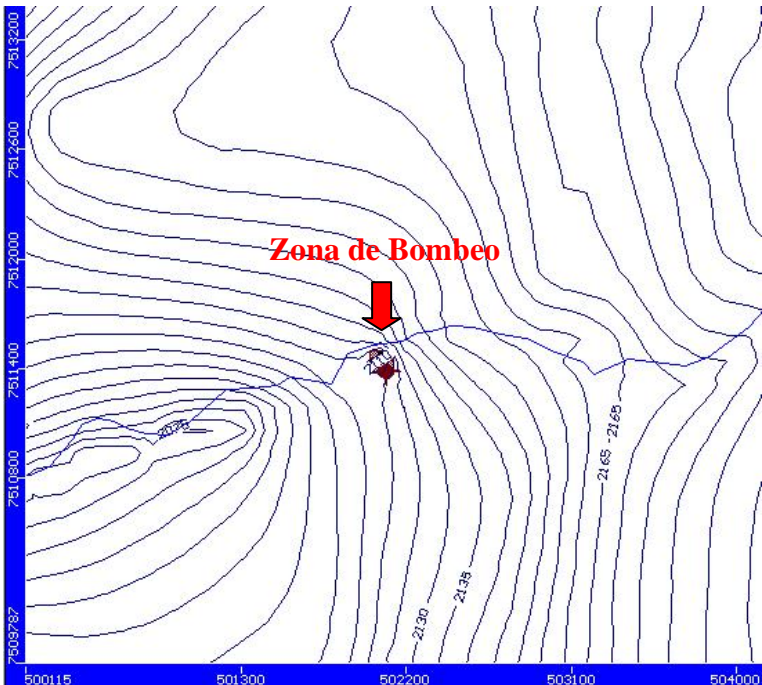


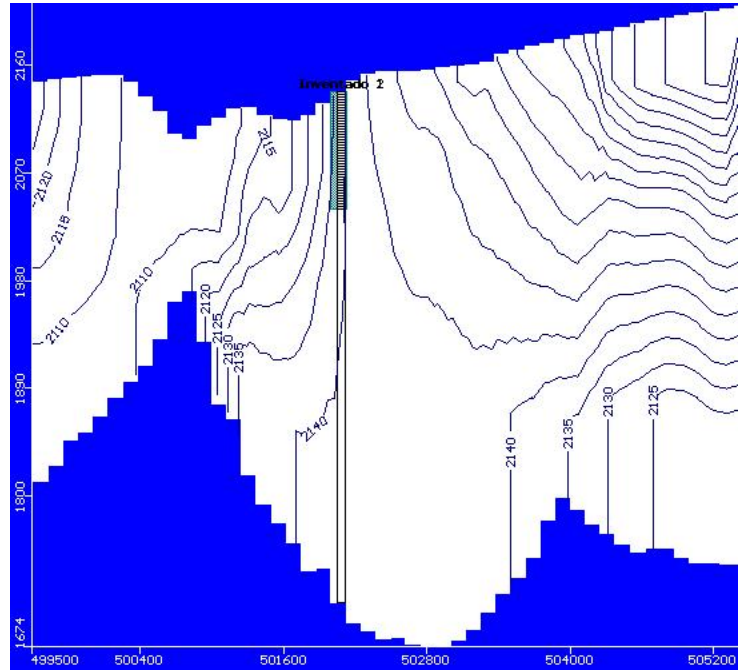
Figura 4.10. Distribución de equipotenciales sin bombeo.



En la Figura 4.10 podrá observarse que la equipotencial que atraviesa la zona de La Cascada sin bombear corresponde a 2.135 m s.n.m. y que aquella que lo hace al explotar los 30 lt/s (Fig. 4.11) es la equivalente a 2.120 m s.n.m.

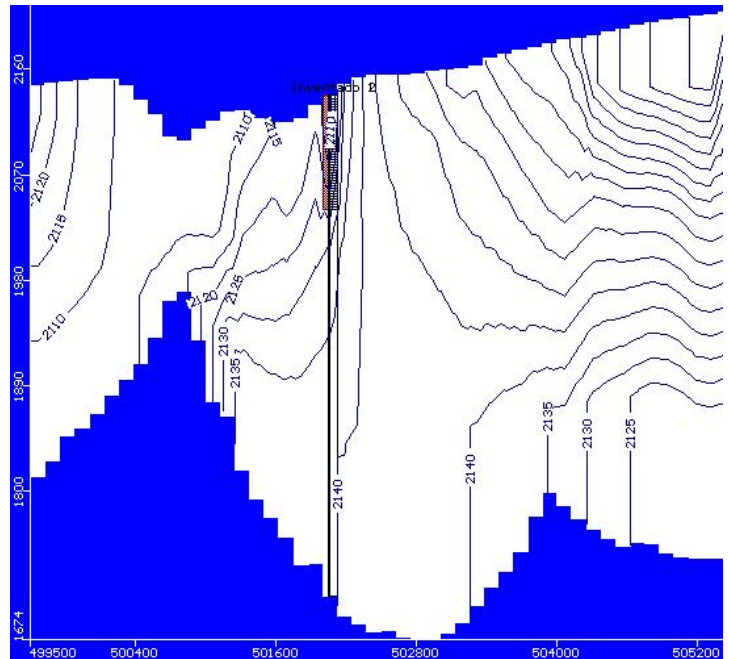
Figura 4.11. Distribución de equipotenciales con bombeo 30 lt/s

Figura 4.12. Perfil transversal sin bombeo.



Como complemento a lo anterior se incorporan las Figuras 4.12 y 4.13 que muestran, en un perfil transversal, la disposición de la superficie equipotencial para los dos escenarios, con y sin explotación. El perfil corresponde a la fila 59 de la grilla constitutiva del modelo. (Esta orientado de Oeste-Este).

Figura 4.13. Perfil transversal con bombeo (30 lt/s)



Finalmente se obtuvieron los descensos generados por el bombeo al restar las equipotenciales vinculadas a ambos escenarios. Para hacer esto se interpolaron los valores de ambas superficies de equipotenciales y luego fueron restadas con el software Vertical Mapper.

Se observa en la Figura 4.14. que el radio de influencia asociado al bombeo de 30 lt/s es de aproximadamente 2 Km.

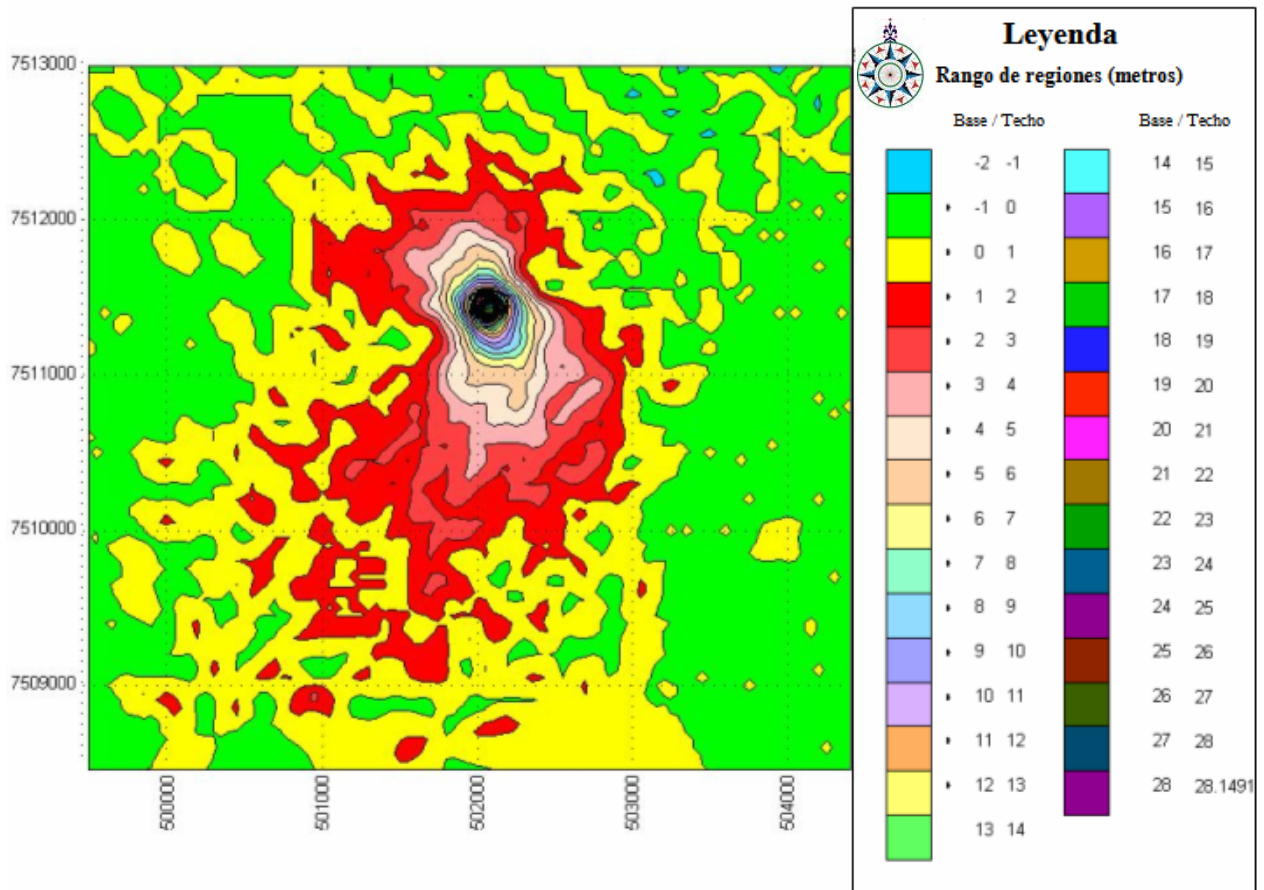


Figura 4.14. Descensos generados por la extracción de un caudal de 30 lt/s desde el sector de Agua Pura y Las Cascadas.

Por otra parte, los balances de masa, utilizado para cuantificar las variaciones de los caudales de entrada y salida para los ríos San Salvador (caracterizado como un Dren (Drain)) y Loa (representado por el River Leakage) que entrega el modelo para las alternativas sin y con bombeo, son los que se presentan en las Figuras 4.15 a 4.18.

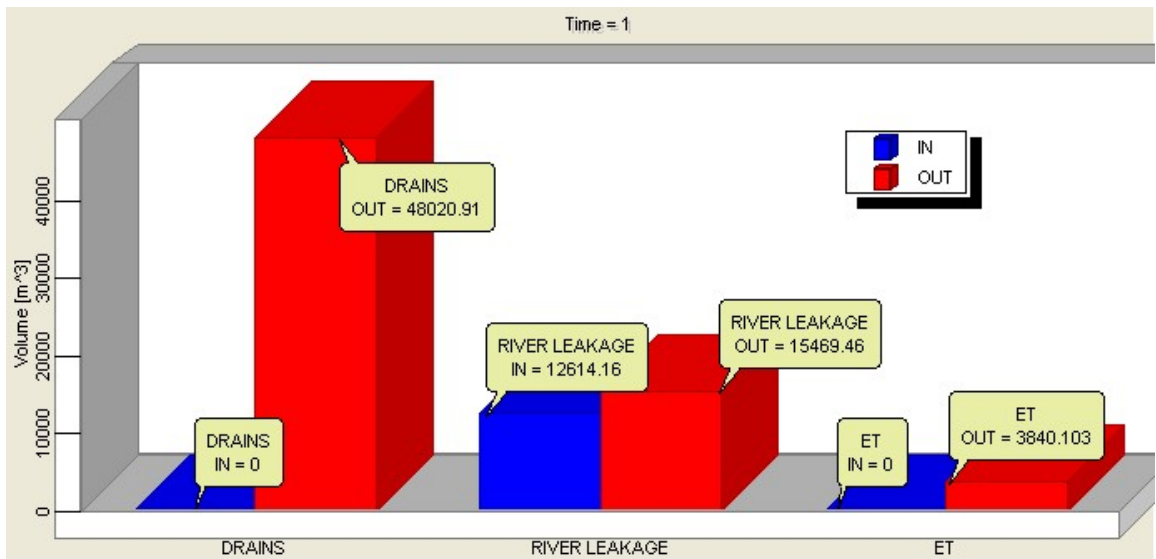


Figura 4.15. Balance del modelo sin bombeo

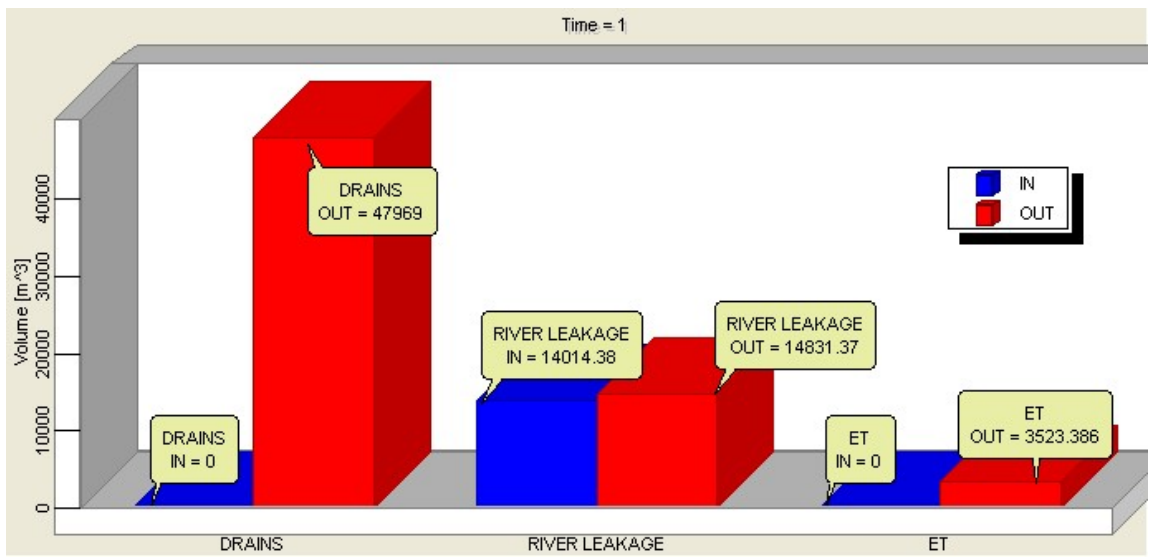


Figura 4.16. Balance del modelo con bombeo

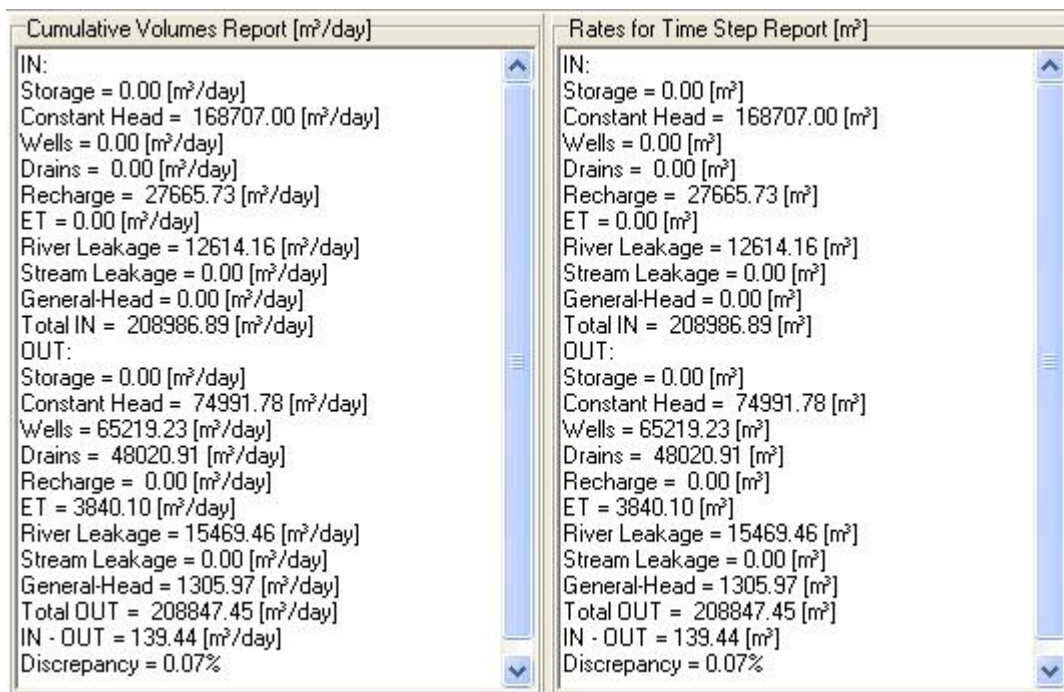


Figura 4.17. Resultados del modelo sin bombeo

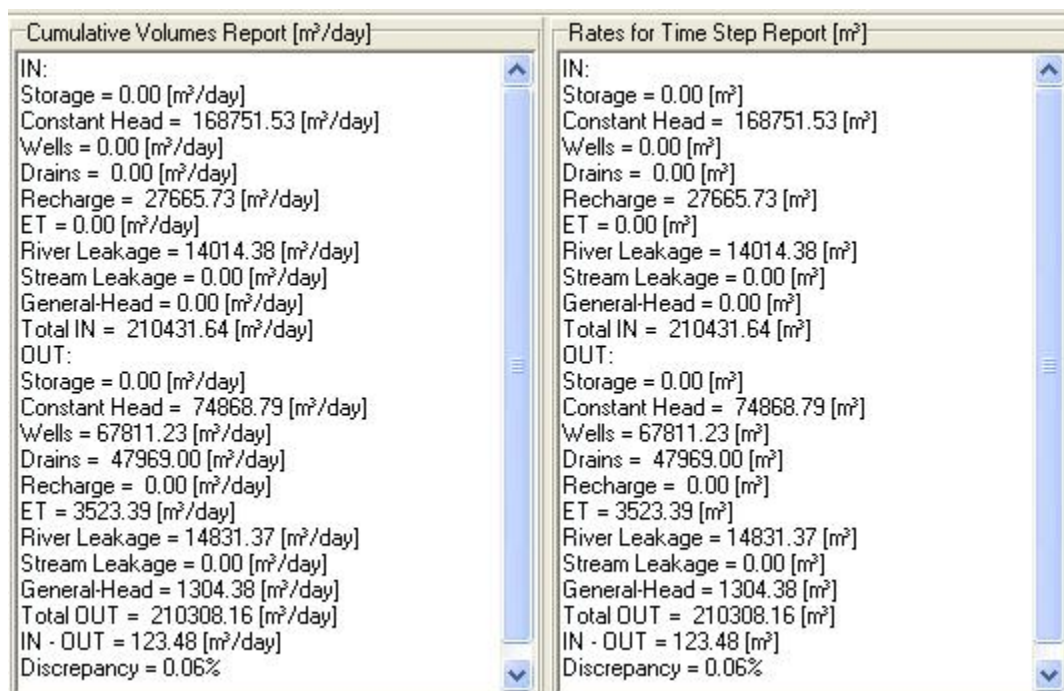


Figura 4.18. Resultados del modelo con bombeo de 30 lt/s

De las Figuras 4.17 y 4.18 se observa que la discrepancia del balance de masa, para el escenario sin bombeo es de 0,07% y para el escenario con extracción, asciende sólo a 0,06%. Estos valores son más que satisfactorios, puesto que indica una muy buena calibración en régimen permanente.

Además, a partir de los resultados exhibidos en las figuras recién citadas, es posible determinar el efecto del bombeo en los otros términos del balance.

El impacto sobre las vertientes y río San Salvador, se obtiene a partir de los valores entregados para los términos “drain in” y ”drain out”, en ambas alternativas, tal como se indica en el Cuadro 4.1.

CUADRO 4.1.		
Efecto sobre vertientes y río San Salvador		
Término	Sin bombeo	Con bombeo
Drain in (m ³ /día)	0	0
Drain out (m ³ /día)	48020,91	47969
Recuperación (m ³ /día)	48020,91	47969
Recuperación (lt/s)	555,79	555.2
Disminución (lt/s)	0.59	

El efecto sobre el río Loa, puede determinarse con los valores entregados de los términos “river leakage in” y “river leakage out”, para ambas alternativas (Cuadro 4.2).

CUADRO 4.2.		
Efecto sobre el río Loa		
Término	Sin bombeo	Con bombeo
River leakage in (m ³ /día)	12614,16	14014,38
River leakage out (m ³ /día)	15469,46	14831,37
Recuperación (m ³ /día)	2855,3	816,99
Recuperación (lt/s)	33,05	9,46
Disminución (lt/s)	23,59	

Finalmente, el efecto sobre la evapotranspiración, puede calcularse con los valores entregados de los términos “ET in” y “ET out”, en ambas alternativas, tal como se indica en el Cuadro 4.3.

CUADRO 4.3.		
Efecto sobre la Evapotranspiración		
Término	Sin bombeo	Con bombeo
ET in (m ³ /día)	0	0
ET out (m ³ /día)	3840,1	3523,9
ET (m ³ /día)	3840,1	3523,9
ET (lt/s)	44,45	40,79
Disminución (lt/s)	3,66	

En conformidad a lo señalado, se puede aseverar que la explotación programada necesariamente generará efectos en los componentes señalados en este estudio.

A modo de resumen se adjunta el Cuadro 4.4 que señala lo mencionado.

CUADRO 4.4.		
Efectos de la Explotación en Componentes Hidrológicos		
Componente	Efecto	Monto (lt/s)
Caudales vertientes y río S. Salvador	Disminuye el caudal	0,59
Caudal río Loa	Disminuye el caudal	23,59
Evapotranspiración en el oasis de Calama	Disminuye	3,66
Total		27,84

CAPITULO 5. DISCUSIONES.

- El primer resultado interesante es la posibilidad de modificar un modelo, al cambiar dos de sus bordes, y modificar la grilla con la geometría de los acuíferos y las condiciones de borde, puesto que permite la evolución de los modelos efectuados, tanto como en la actualización e incorporación de nueva información, como en la ampliación de sus límites.
- Para la construcción de las nuevas áreas del modelo se utilizaron las cartas topográficas 1:50.000 del IGM para la superficie del terreno (con una previa corrección y completación de las curvas) y luego se extrapolaron las unidades tomándose en cuenta la Sierra de Limón Verde hacia el Sur, acuñando hacia ella las distintas capas del modelo.
- Los valores de las constantes elásticas se extrapolaron de la información del modelo de la DGA, (2003), y algunas sufrieron modificaciones por motivos de calibración.
- Las diferencias entre los modelos difieren principalmente, porque los valores de entrada del recurso subterráneo fueron puestos como niveles de carga constante a diferencia del modelo antiguo, cuyo borde Noreste presenta pozos de inyección para simular el caudal entrante. Al modelo se le incorporaron las explotaciones autorizadas por la DGA desde el 2003 a la fecha.
- De las líneas equipotenciales de ambos escenarios se observa que se produce un descenso de las cotas del nivel estático en dirección aprox. Noreste-Suroeste, en las cercanías del área de bombeo. Y en el sector de Las Cascadas presentan un descenso de 10 m.
- Para cualquier modelo, la bondad de sus resultados está en directa relación con la fidelidad de la información. En este trabajo se estimó que eso no ocurrió para la geometría de las secciones agregadas al modelo, puesto que sólo se contaba con la información publicada por la DGA, el IGM y la geología de superficie.

- Los valores de los niveles estáticos se actualizaron en los puntos donde existe información pública y para cada celda se extrapoló mediante el gradiente hidráulico estimado para los bordes del modelo variando entre un 1 a 1.6 % hacia el Este y entre un 1.1% y un 2.2% hacia el Sur.
- El software no puede modelar el comportamiento hidráulico de una falla, pero sí se puede asignar la geometría de las celdas en la traza de ésta, asignando valores favorables a las constantes elásticas (conductividad, permeabilidad, etc.) de las celdas en el caso de que actué como una estructura hidráulica alimentadora o desfavorecer los valores de las constantes para simular una barrera hidráulica.
- El valor obtenido para el balance hídrico preliminar expuesto en el capítulo 3.4.5, que corresponde a 90 lt/s, equivale a un 4.45% del caudal obtenido para la recarga del sistema hídrico, valor altamente satisfactorio que permite validar el balance efectuado.
- Existe una diferencia de 2,16 lt/s, entre el caudal en comento (30 lt/s) y los 27,84 lt/s que entrega el balance. Esto se debe a que faltó considerar la diferencia de caudales que se generó en las salidas subterráneas del modelo en las celdas de carga constante de salida.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el presente trabajo se ha utilizado como herramienta un modelo hidrogeológico de la subcuenca de Calama, II Región, realizado por la DGA, el año 2003, con la intención de aportar una simulación ante un escenario de explotación del recurso que permita identificar las posibles variaciones de áreas en las cuales depende de este como son, Las Cascadas del río Loa y Las Vertientes de Ojo de Opache en el río San Salvador.

A partir de la modelación realizada, se desprenden las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a las características hidrogeológicas se definen 3 unidades: el acuífero inferior alojado en la Formación Calama, el acuífijo o nivel impermeable en la Formación Yalquincha, y el acuífero freático que presenta características Cársticas alojado en la Formación Opache y los depósitos de superficie no consolidados.
- A partir de los datos de niveles estáticos fue posible determinar la existencia de un gradiente hidráulico lateral Este-Oeste al Sur del cerro Calama y otro sub-vertical noreste-suroeste al Norte del mismo cerro.
- Los recursos del medio permeable, fracturado y Cárstico (acuífero alojado en las calizas), se encuentran en clara interacción con el río Loa en varios sectores. Existen vertientes en el flanco derecho de la caja del río, aguas arriba de Calama, que evidencian esta vinculación y hacia aguas abajo de la misma ciudad, existen también indicios claros de aportes del acuífero al río. Esto significa que si se aumenta la descarga del sistema subterráneo mediante explotación, se afectan los caudales superficiales. Esta situación es relevante debido a que existe una precisa instrucción de parte de la DGA que apunta a que las explotaciones de agua subterránea en la cuenca no deben afectar, de forma alguna, a los ríos Loa y San Salvador.
- El principal descenso producto de la extracción del caudal simulado de 30 lt/s se produce en el río Loa (27,84 lt/s, que corresponde a un 92,8% de los 30 lt/s), esto se debe a la cercanía de éste a la zona donde se simularon los pozos virtuales de extracción,

observándose una mayor incidencia sobre el río Loa del radio de influencia asociada al bombeo. Esta relación directa entre la extracción y el descenso del caudal del río Loa, debe ser considerada al momento de evaluar posibles derechos de agua a otorgar en las cercanías a éste río.

- El descenso de caudal asociado a la Evapotranspiración (3,66 lt/s, 12,2%), afectaría considerablemente la zona de Las Vegas de Calama, debido principalmente a la fragilidad de estas zonas de recuperación del acuífero freático.
- En el caso del río San Salvador, los descensos en su caudal fueron de 0,59 lt/s, equivalente a un 1,97% de los 30 lt/s simulados. Aunque la depresión de los niveles de agua sean menores a los que se producen en las otras zonas, se debe tener en consideración principalmente por los antecedentes que muestran descensos sostenidos, en los últimos años, del caudal de la Vertiente Ojos de Opache, que obligan a adquirir una mayor cautela en la otorgación de derechos de agua superficial priorizando el cuidado y protección de esta zona.
- Cualquier tipo de explotación siempre tendrá un efecto en un acuífero, y por lo tanto vulnera los derechos otorgados en el radio de influencia de la explotación, el cual se estimó en 2 Km al restar las equipotenciales de ambos escenarios (Figura 4.14).
- En función al segundo objetivo específico, es posible concluir que no se recomienda otorgar nuevos derechos de agua, en el acuífero freático, hasta que no se observe una estabilización de los niveles estáticos medidos en las Vertientes de Ojos de Opache.
- Se considera que el mayor aporte de esta memoria es la inclusión y mayor definición de los flujos que ingresan al modelo desde la zona oriental de éste, debido a la desestimación de la recarga que se genera a la subcuenca de Calama desde ese lugar, a algunos modelos previamente implementados.

De acuerdo a las conclusiones mencionadas, se generan las siguientes recomendaciones:

- Mucha de la información se puede complementar, puesto que este trabajo se realizó solamente con datos publicados e ingresados a la DGA. Considero de gran relevancia que los futuros trabajos de exploración que sean efectuados en la zona puedan hacerse públicos con el objetivo de lograr un manejo sustentable del recurso subterráneo.
- Es necesario para una mejor definición de las zonas de infiltración y captura de agua por parte del río Loa, el aforo a lo largo de éste en la subcuenca de Calama, mediante alguna metodología (molinete, conductividad v/s tiempo, estaciones de aforo, etc.), que permitan obtener resultados más certeros.
- Se recomienda para posibles investigaciones que puedan surgir de este trabajo, un estudio detallado de la interacción que existe entre los acuíferos, enfocado en la condición de estrato impermeable de la Formación Yalquincha, y como sujeto a largos periodos de bombeo, esta capa puede perder su carácter de estrato confinante, en las zonas aledañas a los puntos de bombeo.
- Con el objetivo de generar un sistema de protección para los sectores vulnerables mencionados en este estudio, se propone una investigación que simule diversos escenarios que determinen un radio de influencia de extracciones (correlacionando distancia de la explotación a la zona protegida y caudal bombeado), que genere la información necesaria con el fin de resguardar las zonas de Las Cascadas del río Loa y las Vertientes de Ojos de Opache.
- Es importante precisar la cantidad de agua que está ingresando desde el Oriente a la subcuenca de Calama, es por eso que se propone efectuar en la zona, una campaña de perforación de pozos habilitados en el acuífero freático, junto a una campaña de TEM, mejorando así la información de la geometría de la cuenca junto a las constantes hidráulicas del acuífero. Se puede aprovechar y habilitar un pozo en las arcillas, efectuando un ensayo de Lefranc, que permita dilucidar la permeabilidad de este acuífijo.

Para concluir finalmente el trabajo representa en forma general, tanto el comportamiento como la geometría de las formaciones acuíferas. Constituyéndose en una herramienta que puede ser utilizada con posterioridad, en la medida que aumente o se divulgue el conocimiento del área, para predecir con mayor certeza cual es su evolución futura. Es importante señalar que a pesar de las limitaciones, se logró determinar de que manera las extracciones afectan al recurso disponible para la manutención del río San Salvador y el sector de Las Cascadas en el río Loa.

Referencias

Ambrus, J. 1979. Emplazamiento y mineralización de los pórfidos cupríferos de Chile. Tesis de Doctorado, Univ. Salamanca, Fac. Ciencias, Depto. Cristalogr. y Mineral., 314 p. España.

Aracena, I. 1981. Geología y alteración del Complejo Plutónico del sector norte del yacimiento de Chuquicamata, Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 83 p. Santiago.

Blanco, N.; Tomlinson, A.J.; Mpodozis, C.; Pérez de Arce, C.; Matthews, Y. 2003. Formación Calama, Eocene, II Región de Antofagasta (Chile): Estratigrafía e implicancias tectónicas. *In Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas*. Concepción.

Börgel, R. 1983. Geomorfología. *In: Geografía de Chile*. Santiago, Instituto Geográfico Militar. 182 p. Vol. 11.

Brüggen, J. 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Inst. Geogr. Militar (Chile), 374 p. Santiago.

CONAF, 1996. Libro Rojo de los Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica en Chile. Muñoz M., Núñez H., Yáñez J. Editores.

CONAMA, 1997. Informe Episodio de Contaminación Río Loa Marzo 1997. Equipo multisectorial convocado por CONAMA para discutir y analizar los informes sectoriales relacionados con el episodio de contaminación ocurrido en el Río Loa en el mes de Marzo de 1997. Redacción y Edición: Sacha A.M., U. de Chile; Grass N. y Cordero E., CCHEN; y Cáceres M., CONAMA.

CPH Consultores Ltda. 2003. Estudio Hidrogeológico preliminar en los entornos de Calama.

Demetrio L., 1989. Estado Actual de las Aves Observadas en la Zona de Calama y Sectores Adyacentes del Río Loa, documento no publicado que se puede encontrar en la Biblioteca de la Unión de Ornitólogos de Chile (UNORCH).

DGA, 2003. S.D.T N° 153, elaborado por el Dpto. de administración de recursos hídricos de la DGA, “Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II Región.

DGA, 2007. Catastro de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas.

Dingman, R. J. 1963. Cuadrángulo Tular. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, N° 11, 35 p.

Galli, C., 1957. Las formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, Sector de Pica, Tarapacá. Revista Minerale, Año 12, N° 56, p. 14-26, Santiago.

Galli, C. y Dingman, R., 1962. Cuadrángulos Pica, Alca Matilla y Chacarilla. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Carta Geológica, Vol. 3, N° 2-5, 125 p.

Harrington, H. 1961. Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces of northern Chile. Am. Assoc. Pet. Geol., Bull., Vol. 45, N° 2, p. 169-197.

Hollingsworth, S. E.; Rutland, R. 1968. Post-Cretaceous evolution of the San Bartolo area, North Chile. Geol. J., N° 6, p. 49-62.

Langerseldt, H. 1963. Tres Amigos Mine. SERNAGEOMIN (inédito), 5 p. Santiago.

Maksaev, V. 1978. Cuadrángulo Chitigua y sector occidental del Cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, N° 31, 55 p.

Marinovic, N.; Lahsen, A. 1984. Geología de la Hoja Calama. Escala 1:250.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, No. 58, 140 p. Santiago.

May, G. 1997. Oligocene to Recent Evolution of the Calama Basin, Northern Chile. Ph.D Thesis (Unpublished), *University of Aberdeen*, 230 p. UK.

May, G.; Chong, G.; Hartley, A.J.; Stuart, F.; Turner, P. 1997. Estratigrafía de la cuenca de Calama, Norte de Chile. *In Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas, Vol. 1*, p. 539-544. Antofagasta.

May, G.; Chong, G.; Hartley, A.J.; Stuart, F.; Turner, P.; Kape, S. 2005. Litoestratigrafía y cronoestratigrafía durante el Eoceno al Pleistoceno y evolución tectono-sedimentaria de la Cuenca de Calama, Norte de Chile. *Revista Geológica de Chile* v.32 n.1 Santiago, Enero 2005.

Mortimer, C. 1980. Drainage evolution of the Atacama Desert of northernmost Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 11, p. 3-28.

Naranjo, J.A.; Paskoff, R.P.; Ramírez, C.F. 1994. Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°S-68°W). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 21, p. 91-103.

Quezada, R. 1998. Análisis comparativo del comportamiento del modelo Visual MODFLOW para simular sistemas de agua subterránea en 2 y 3 dimensiones. Aplicación al acuífero de la desembocadura del río Aconcagua. Memoria para optar al título de Ing. Civil. Univ. de Chile.

Ramírez, C. F.; Gardeweg, M. 1982. Hoja Toconao, Región de Antofagasta. SERNAGEOMIN, Carta Geol. Chile, N° 54, 122 p.

Raczynski, A. 1963. Geología del distrito minero de Tuina. Memoria de Título, Univ. de Chile, Depto. Geol., 117 p. Santiago.

Román H., Valdovinos C., 2000; Una aproximación al estudio integral de la contaminación del río Loa, II región, Chile. Periodo marzo 1997 – febrero 2000.

Tomlinson, A.; Blanco, N.; MaksaeV, V.; Dilles, J.; Grunder, A.; Ladino, M. 2001. Geología de la Cordillera Andina de Quebrada Blanca - Chuquicamata, Regiones I y II [20°30'-22°30'S], SERNAGEOMIN, 2 v.il; 20 mapas pleg + 5 h.pleg.

Vega, J.; Bordones, L. 1981. Geología del Cuadrángulo Cerros de Paqui y parte oeste del Cuadrángulo Conchi, Provincia El Loa, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título, Univ. Católica del Norte, Depto. Geociencias 136 p. Antofagasta.

Vergara, H.A. 1978. Cuadrángulo Quehuita y sector occidental del Cuadrángulo Volcán Miño. Región de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 32: 44 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

Villanueva, M.; Iglesias, A. 1984. Pozos y acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España.

ANEXOS

ANEXO A

ESTACIONES DE AFORO DGA

AFOROS SISTEMATICOS PERIODO 10/10/1997 - 10/12/2003

Estación : VERTIENTES OJOS DE OPACHE

Código BNA : 02111001-9

Altitud : 2135 msnm

Cuenca : RIO LOA

Latitud S : 22 28 00

Longitud W : 69 00 00

SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada I Area de Drenaje:

UTM Norte : 7515485 mts

UTM Este : 512313 mts

0 km2

N°	Fecha	Altura Lm Media (m)	Brazo N°	Caudal (m3/s)	Area (m2)	Veloc. Media (m/s)	Ancho Superf. (m)	Profun. Media (m)	Perim. Mojado (m)	Radio Hidr. (m)	Factor		Hidra.	
											Ar 2/3	Ar 1/2	Manning	Crezy
	0 10/10/1997	0.00	1	0.46	0.73	0.64	2.30	0.32	2.92	2.92	0.37	0.29	1.59	1.26
	0 14/11/1997	0.26	1	0.53	0.62	0.85	2.30	0.27	2.82	2.82	0.29	0.22	2.34	1.82
	0 20/12/1997	0.27	1	0.48	0.60	0.80	2.20	0.27	2.70	2.70	0.28	0.22	2.19	1.70
	0 16/01/1998	0.27	1	0.48	0.64	0.75	2.30	0.28	2.82	2.82	0.31	0.24	1.99	1.56
	0 18/02/1998	0.28	1	0.48	0.67	0.72	2.30	0.29	2.82	2.82	0.33	0.26	1.85	1.46
	0 11/03/1998	0.27	1	0.44	0.68	0.64	2.30	0.29	2.80	2.80	0.33	0.26	1.67	1.32
	0 08/04/1998	0.28	1	0.39	0.72	0.54	2.30	0.31	2.86	2.86	0.36	0.28	1.38	1.09
	0 14/05/1998	0.28	1	0.43	0.68	0.64	2.30	0.29	2.86	2.86	0.33	0.26	1.71	1.34
	0 12/06/1998	0.28	1	0.40	0.70	0.56	2.30	0.30	2.81	2.81	0.35	0.28	1.43	1.14
	0 22/07/1998	0.28	1	0.51	0.66	0.77	2.20	0.30	2.74	2.74	0.32	0.26	2.00	1.57
	0 19/08/1998	0.26	1	0.46	0.69	0.67	2.30	0.30	2.80	2.80	0.35	0.28	1.68	1.33
	0 08/09/1998	0.30	1	0.50	0.70	0.72	2.30	0.30	2.88	2.88	0.34	0.27	1.86	1.46
	0 15/10/1998	0.30	1	0.51	0.72	0.70	2.30	0.31	2.84	2.84	0.36	0.28	1.79	1.42
	0 13/11/1998	0.31	1	0.48	0.73	0.65	2.30	0.32	2.81	2.81	0.37	0.30	1.60	1.28
	0 11/12/1998	0.31	1	0.46	0.73	0.64	2.30	0.32	2.83	2.83	0.37	0.30	1.55	1.24
	0 13/01/1999	0.32	1	0.45	0.75	0.60	2.30	0.33	2.88	2.88	0.38	0.31	1.46	1.16
	0 11/02/1999	0.33	1	0.49	0.75	0.65	2.30	0.33	2.93	2.93	0.37	0.30	1.65	1.31
	0 13/03/1999	0.24	1	0.44	0.56	0.78	2.30	0.25	2.68	2.68	0.26	0.20	2.20	1.69
	0 14/04/1999	0.24	1	0.48	0.58	0.83	2.30	0.25	2.70	2.70	0.27	0.21	2.36	1.82
	0 11/05/1999	0.24	1	0.45	0.56	0.80	2.30	0.24	2.69	2.69	0.25	0.19	2.37	1.81
	0 17/06/1999	0.23	1	0.47	0.56	0.84	2.30	0.24	2.74	2.74	0.25	0.19	2.44	1.86
	0 15/07/1999	0.24	1	0.43	0.55	0.78	2.20	0.25	2.64	2.64	0.24	0.19	2.30	1.76
	0 17/08/1999	0.24	1	0.49	0.58	0.84	2.30	0.25	2.74	2.74	0.27	0.21	2.37	1.83
	0 24/09/1999	0.23	1	0.49	0.56	0.87	2.30	0.24	2.70	2.70	0.25	0.19	2.56	1.96
	0 05/10/1999	0.24	1	0.53	0.55	0.96	2.30	0.24	2.74	2.74	0.25	0.19	2.79	2.13
	0 16/12/1999	0.26	1	0.47	0.57	0.83	2.20	0.26	2.72	2.72	0.26	0.20	2.33	1.80
	0 12/01/2000	0.26	1	0.50	0.60	0.83	2.30	0.26	2.80	2.80	0.28	0.21	2.33	1.79
	0 04/02/2000	0.25	1	0.48	0.55	0.88	2.20	0.25	2.69	2.69	0.25	0.19	2.57	1.97
	0 24/03/2000	0.24	1	0.50	0.59	0.85	2.30	0.26	2.74	2.74	0.27	0.21	2.41	1.86
	0 20/04/2000	0.24	1	0.46	0.57	0.80	2.20	0.26	2.64	2.64	0.27	0.21	2.20	1.71
	0 19/05/2000	0.24	1	0.44	0.59	0.75	2.30	0.26	2.78	2.78	0.27	0.21	2.12	1.64
	0 16/06/2000	0.26	1	0.43	0.58	0.73	2.20	0.26	2.70	2.70	0.27	0.20	2.09	1.61
	0 12/07/2000	0.26	1	0.51	0.64	0.80	2.30	0.28	2.78	2.78	0.31	0.24	2.13	1.67
	0 11/08/2000	0.26	1	0.51	0.64	0.80	2.30	0.28	2.76	2.76	0.31	0.24	2.11	1.65

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS

PAGINA : 2
FECHA : 15/07/2004

AFOROS SISTEMATICOS PERIODO 10/10/1997 - 10/12/2003

Estación : VERTIENTES OJOS DE OPACHE

Código BNA : 02111001-9

Altitud : 2135 msnm

Cuenca : RIO LOA

Latitud S : 22 28 00

Longitud W : 69 00 00

SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada l Area de Drenaje:

UTM Norte : 7515485 mts

UTM Este : 512313 mts

0 km2

Nº	Fecha	Altura Lm Media (m)	Brazo Nº	Caudal (m3/s)	Area (m2)	Veloc. Media (m/s)	Ancho Superf. (m)	Profun. Media (m)	Perim. Mojado (m)	Radio Hidr. (m)	Factor Ar 2/3	Geome. Ar 1/2	Factor Manning	Hidra. Crezy
	0 15/09/2000	0.28	1	0.50	0.67	0.75	2.30	0.29	2.76	2.76	0.33	0.26	1.94	1.53
	0 19/10/2000	0.24	1	0.51	0.54	0.94	2.20	0.25	2.60	0.21	0.25	0.19	2.66	2.05
	0 17/11/2000	0.25	1	0.52	0.56	0.92	2.20	0.25	2.60	0.22	0.26	0.20	2.53	1.97
	0 20/12/2000	0.16	1	0.49	0.35	1.40	2.20	0.16	2.48	0.14	0.13	0.09	5.19	3.74
	0 25/01/2001	0.18	1	0.43	0.34	1.27	2.20	0.15	2.42	0.14	0.13	0.09	4.71	3.40
	0 22/02/2001	0.16	1	0.45	0.34	1.31	2.20	0.15	2.42	0.14	0.13	0.09	4.88	3.51
	0 22/03/2001	0.16	1	0.41	0.31	1.31	2.20	0.14	2.42	0.13	0.11	0.08	5.12	3.64
	0 26/04/2001	0.16	1	0.44	0.34	1.29	2.20	0.15	2.47	0.14	0.13	0.09	4.78	3.44
	0 24/05/2001	0.16	1	0.45	0.35	1.28	2.20	0.16	2.48	0.14	0.13	0.09	4.74	3.41
	0 14/06/2001	0.17	1	0.48	0.37	1.31	2.20	0.17	2.50	0.15	0.14	0.10	4.63	3.38
	0 13/07/2001	0.18	1	0.54	0.39	1.37	2.20	0.18	2.51	0.16	0.16	0.11	4.65	3.43
	0 14/09/2001	0.20	1	0.54	0.44	1.23	2.20	0.20	2.59	0.17	0.18	0.14	4.02	2.99
	0 20/10/2001	0.21	1	0.42	0.46	0.91	2.20	0.21	2.62	0.18	0.20	0.15	2.86	2.15
	0 25/11/2001	0.24	1	0.39	0.52	0.75	2.20	0.24	2.68	0.19	0.23	0.17	2.27	1.72
	0 13/12/2001	0.25	1	0.43	0.55	0.79	2.20	0.25	2.70	0.20	0.25	0.19	2.30	1.76
	0 28/01/2002	0.24	1	0.40	0.55	0.72	2.20	0.25	2.70	0.20	0.25	0.19	2.11	1.61
	0 19/02/2002	0.17	1	0.47	0.38	1.24	2.20	0.17	2.52	0.15	0.15	0.11	4.41	3.21
	0 16/03/2002	0.17	1	0.48	0.38	1.26	2.20	0.17	2.53	0.15	0.15	0.11	4.46	3.25
	0 19/04/2002	0.16	1	0.44	0.35	1.26	2.20	0.16	2.51	0.14	0.13	0.09	4.68	3.38
	0 08/05/2002	0.16	1	0.45	0.35	1.27	2.20	0.16	2.51	0.14	0.13	0.09	4.72	3.40
	0 12/06/2002	0.16	1	0.44	0.35	1.26	2.20	0.16	2.51	0.14	0.13	0.09	4.67	3.37
	0 25/07/2002	0.17	1	0.48	0.38	1.26	2.20	0.17	2.53	0.15	0.15	0.11	4.46	3.25
	0 26/08/2002	0.18	1	0.51	0.39	1.30	2.20	0.18	2.54	0.15	0.15	0.11	4.60	3.36
	0 27/09/2002	0.19	1	0.51	0.42	1.22	2.20	0.19	2.58	0.16	0.17	0.12	4.13	3.04
	0 24/10/2002	0.19	1	0.54	0.42	1.29	2.20	0.19	2.57	0.16	0.17	0.12	4.37	3.22
	0 18/11/2002	0.18	1	0.39	0.39	0.99	2.20	0.18	2.55	0.15	0.15	0.11	3.50	2.55
	0 19/12/2002	0.21	1	0.40	0.46	0.87	2.20	0.21	2.62	0.18	0.20	0.15	2.73	2.05
	0 15/01/2003	0.23	1	0.40	0.51	0.78	2.20	0.23	2.66	0.19	0.22	0.17	2.37	1.79
	0 26/02/2003	0.24	1	0.39	0.52	0.75	2.20	0.24	2.68	0.19	0.23	0.17	2.26	1.72
	0 10/03/2003	0.24	1	0.36	0.52	0.69	2.20	0.24	2.68	0.19	0.23	0.17	2.10	1.59
	0 11/04/2003	0.16	1	0.44	0.35	1.27	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.69	3.38
	0 15/05/2003	0.16	1	0.43	0.35	1.22	2.20	0.16	2.51	0.14	0.13	0.09	4.54	3.27
	0 09/06/2003	0.16	1	0.43	0.35	1.22	2.20	0.16	2.51	0.14	0.13	0.09	4.51	3.25
	0 24/07/2003	0.16	1	0.43	0.35	1.23	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.56	3.28
	0 07/08/2003	0.16	1	0.45	0.35	1.28	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.76	3.43
	0 04/09/2003	0.16	1	0.44	0.35	1.27	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.69	3.38
	0 10/10/2003	0.16	1	0.45	0.35	1.28	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.74	3.41
	0 11/11/2003	0.16	1	0.45	0.35	1.28	2.20	0.16	2.52	0.14	0.13	0.09	4.75	3.42
	0 10/12/2003	0.15	1	0.47	0.33	1.41	2.20	0.15	2.50	0.13	0.12	0.08	5.50	3.92

CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s)
PERIODO: 1977 - 2000

Estación : RIO LOA EN FINCA

Año	Meses												Promedio Promedio anual ponderado anual
	31 enero	28 febrero	31 marzo	30 abril	31 mayo	30 junio	31 julio	31 agosto	30 sept	31 octubre	30 noviemb	31 diciemb	
1977									1.31	1.25	1.34	1.5	
1978	0.34	0.38	0.36	0.55	0.58	0.75	0.96	1.12	0.85 %	0.57	0.52	0.46 *	0.62
1979	0.5	0.5	0.55	0.5	0.69 %	0.78	0.80 %	0.78	0.79 %	0.38 *	0.35	0.33 %	0.58
1980	0.35	0.44	0.38 *	0.51 %		2.67 @	1.42	0.95	0.49	0.46 %	0.33	0.31 %	0.69
1981	0.34	0.77	0.53	0.6 %	1.28 *	1.89 *	1.32	1.04 %		0.41 *	0.44	0.33	0.75
1982	0.42	0.41	0.66	0.56	0.99	1.08	0.91	0.78	0.63	0.56	0.57	0.74	0.69
1983	0.6 %	0.47	0.35	0.5 %	0.88	0.93	1.23	0.80	0.51	0.34	0.32	0.34	0.61
1984	2.84	1.9	1.41	0.77	0.8	1.23	1.40	1.10	0.96	0.78	0.59	0.57	1.19
1985	0.67	0.85 %	1.41 %	0.83 *	0.9 *	0.95	1.01	0.75	0.75	0.57	0.48	0.54	0.81
1986	0.89	1.02	0.77	0.5	0.79	1.07	1.23	1.08	0.78	0.61	0.32	0.47	0.79
1987	1.42	0.99	1.55	1.23	0.85	0.81	0.70	0.86	0.33	0.27	0.29	0.46	0.81
1988	0.45 %	0.59	0.48	0.47	0.57	0.68	0.76	0.66	0.45	0.29	0.25	0.26	0.49
1989	0.37	1.91	0.35	0.31	0.63	1.12	1.09	0.88	0.54	0.23	0.22	0.25	0.65
1990	0.36	0.43	0.3	0.33	0.53	0.74	0.76	0.76	0.29	0.28	0.28	0.17	0.44
1991	0.55	0.22	0.5	0.35	0.43	0.78	0.70	0.57	0.31	0.29	0.26	0.29	0.44
1992	0.51	0.57	0.43	0.28	0.37	1.01	0.82	0.52	0.43	0.30	0.24	0.23	0.47
1993	0.28	0.32	0.38	0.39	0.49	0.50	0.70	0.70	0.40	0.26	0.20	0.22	0.40
1994	0.25	0.21	0.26	0.31	0.43	0.58	0.63	0.60	0.43	0.38 %	0.22 %	0.23	0.38
1995	0.36	0.36	0.35	0.42	0.52	0.39	0.41	0.43	0.45	0.43	0.29	0.23	0.39
1996	0.25	0.21	0.28	0.29	0.36	0.42	0.48	0.44	0.46	0.41	0.20	0.26 @	0.34
1997	0.47 @	1.01	0.7	0.39	0.28	0.42	0.60	0.80	0.20	0.17	0.14	0.13	0.44
1998	0.17	0.45	0.31	0.18	0.25	0.52	0.36	0.32	0.27	0.23	0.15	0.15	0.28
1999	0.17	0.31	0.56	0.38	0.69	0.79	0.90	0.46	0.36	0.26	0.17	0.18	0.44
2000	2.21	2	0.35	0.32	0.87	1.03	0.71	0.58	0.34	0.23	0.22	0.29	0.76

* : 1 - 10 Días con Informacion en el Mes
 @ : 11 - 20 Días con Informacion en el Mes
 % : Más de 20 Días con Informacion en el Mes

Promedio total : 0.575

CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s)
PERIODO: 1977 - 2000

Estación : RIO LOA EN YALQUINCHA

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	octubre	noviemb	diciemb	Promedio ponderado anual
1977									1.31	1.25	1.34	1.5	
1978	1.61	1.34	1.31	1.58	1.19	1.3	1.5	1.4	1.29	1.29 %	1.771 R	1.34	1.41
1979	1.6	1.47	1.62	1.51	1.56 @	1.58	1.58	1.42	1.46	1.4	1.47	1.46	1.51
1980	1.55	1.57	1.71	1.76	1.89 %	1.96	1.85	1.67	1.64	1.73	1.64	1.72	1.73
1981	1.76	1.88	1.493 R	1.378 R	1.699 R	1.734 R	1.45 *	1.48	1.53	1.45	1.63	1.75	1.60
1982	1.6	1.68	1.51	1.3	1.31	1.34	1.39	1.38	1.43	1.5	1.73	2	1.51
1983	1.86	1.6	1.67	1.59	1.73	1.59	1.57	1.47	1.58	1.18	1.15	1.19	1.51
1984	2.45 @	2.45 %	1.86	1.53	1.52	1.71	1.64	1.68	1.82	1.93	2.03	2.15	1.89
1985	2.31	2.48	1.98	1.32 %	1.38	1.34	1.36	1.28	1.59	1.66	1.71	1.94	1.69
1986	2.3	1.87	1.4	1.3	1.46	1.59	1.65	1.67	1.21	1.40	1.47	2.03	1.61
1987	2.48	2.02	2.23	1.52	1.39	1.35	1.35	1.34	1.49	1.39	1.38	1.81	1.65
1988	2.24	2.48 %	1.7 *	1.72	1.76	1.68	1.59	1.44	1.34	1.36	1.54	1.77	1.71
1989	1.115 R	3.09 @	1.53	1.27 *	1.27	1.30	1.32	1.18	1.22	1.00	0.96	1.22	1.36
1990	1.47	1.62	1.12	1.12	1.26	1.32	1.34	1.22	1.13	1.03	1.05	1.31	1.25
1991	1.54	1.25	1.22	1.03	1.14	1.25	1.29	1.20	1.14	1.08	1.07	1.53	1.23
1992	1.68	1.49	1.23	1.12	1.16	1.17	1.18	1.13	1.07	1.12	1.27	1.48	1.26
1993	1.64	1.62	1.26	1.13	1.2	1.17	1.13	1.10	1.08	1.24	1.25 @	1.12	1.24
1994	1.47	1.57	1.43	1.25	1.24	1.31	1.20	1.08	1.02	1.16	1.40	1.54	1.30
1995	2.3	2.36	1.55	0.98	1	0.81	0.84 %	0.76 %	0.83	0.89	1.12	0.95	1.19
1996	1.16	1.39	1.29	1.17 @	1.32 *	1.31	1.17	1.09	1.05	1.04	1.13	0.99	1.17
1997	1.29	1.41 @	0.9 %	0.88 %	1.23	1.15	1.21	1.22	1.19	1.08	0.89	1.07	1.13
1998	1.47	1.59	1.2	1.05	1.02	1.12	1.00	0.89	0.87	0.89	1.08	1.17	1.11
1999	1.26	1.63	1.98	1.24 %	1.2 @	1.28	1.31	1.22	1.18	1.16	1.20	1.36	1.33
2000	1.01 %	1.71 *	1.66 %	1.59	1.57 @	1.30 @	1.28	1.30	1.30	1.40	1.17	1.32	

* : 1 - 10 Días con Informacion en el Mes
 @ : 11 - 20 Días con Informacion en el Mes
 % : Más de 20 Días con Informacion en el Mes

Promedio total : 1.429

ANEXO B

PRECIPITACIONES ESTACIÓN

CALAMA

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
 PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
 Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
 Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
 Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	AÑO MAY	1,965 JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	-	0	0	0	0	0	0	0	1.4	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15		0	0	0	0	0	0	0	6.7	0	0	0
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
 PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
 Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
 Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
 Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	AÑO MAY	1,966 JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0				0	0	0	0	0	0	0
3	0	0				0	0	0	0	0	0	0
4	0	0				0	0	0	0	0	0	0
5	0	0				0	0	0	0	0	0	0
6	0	0				0	0	0	0	0	0	0
7	0	0				0	0	0	0	0	0	0
8	0	0				0	0	0	0	0	0	0
9	0	0				0	0	0	0	0	0	0
10	0	0				0	0	0	0	0	0	0
11	0	0				0	0	0	0	0	0	0
12	0	0				0	0	0	0	0	0	0
13	0	0				0	0	0	0	0	0	0
14	0	0				0	0	0	0	0	0	0
15	0	0				0	0	0	0	0	0	0
16	0	0				0	0	0	0	0	0	0
17	0	0				0	0	0	0	0	0	0
18	0	0				0	0	0	0	0	0	0
19	0	0				0	0	0	0	0	0	0
20	0	0				0	0	0	0	0	0	0
21	0	0				0	0	0	0	0	0	0
22	0	0				0	0	0	0	0	0	0
23	0	0				0	0	0	0	0	0	0
24	0	0				0	0	0	0	0	0	0
25	0	0				0	0	0	0	0	0	0
26	0	0				0	0	0	0	0	0	0
27	0	0				0	0	0	0	0	0	0
28	0	0				0	0	0	0	0	0	0
29	0	0				0	0	0	0	0	0	0
30	0	0				0	0	0	0	0	0	0
31	0	0				0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	AÑO											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21		0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0
22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	AÑO											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
 PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
 Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
 Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
 Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITACION DIARIA (m.m)
 PERIODO: 1901 - 2002

Estación : CALAMA
 Código BNA : 02110013-7 Latitud S : 22 28 00 UTM Norte : 7515483 (m)
 Altitud : 2,260 msnm Longitud W : 68 55 00 UTM Este : 508573 (m)
 Cuenca : RIO LOA SubCuenca : Rio Loa Medio (entre Rio Salado y Quebrada De Barrera, Area de Drenaje : 0 (km2)

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
2	0	0	0	0	0	0	0	0				
3	0	0	0	0	0	0	0	0				
4	0	0	0	0	0	0	0	0				
5	0	0	0	0	0	0	0	0				
6	0	0	0	0	0	0	0	0				
7	0	0	0	0	0	0	0	0				
8	0	0	0	0	0	0	0	0				
9	0	0	0	0	0	0	0	0				
10	0	0	0	0	0	0	0	0				
11	0	0	0	0	0	0	0	0				
12	0	0	0	0	0	0	0	0				
13	0	0	0	0	0	0	0	0				
14	0	0	0	0	0	0	0	0				
15	0	0	0	0	0	0	0	0				
16	0	0.5	0	0	0	0	0	0				
17	0	2	0	0	0	0	0	0				
18	0	0	0	0	0	0	0	0				
19	0	0	0	0	0	0	0	0				
20	0	0	0	0	0	0	0	0				
21	0	0	0	0	0	0	0	0				
22	0	0	0	0	0	0	0	0				
23	0	0	0	0	0	0	0	0				
24	0	0	0	0	0	0	0	0				
25	0	0	0	0	0	0	0	0				
26	0	0	0	0	0	0	0	0				
27	0	0	0	0	0	0	0	0				
28	0	0	0	0	0	0	0	0				
29	0	0	0	0	0	0	0	0				
30	0	0	0	0	0	0	0	0				
31	0	0	0	0	0	0	0	0				

ANEXO C

ESTRUCTURA DEL MODELO MATEMÁTICO
VISUAL MODFLOW V.4.0.

El programa se basa, en calcular diferencias finitas para modelar los flujos al interior de los acuíferos (Quezada, 1998).

La ecuación en derivadas parciales, que describe el flujo en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante, a través de un material poroso, heterogeneo y anisotropo es:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + F = Ss \cdot e \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{ec.1})$$

donde:

- Kxx : conductividad en dirección X(unidad de longitud/tiempo)
- Kyy : conductividad en dirección Y(unidad de longitud/tiempo)
- Kzz : conductividad en dirección Z(unidad de longitud/tiempo)
- h : nivel piezométrico (unidad de longitud)
- F : recargas exteriores (unidad de longitud/tiempo)
- Ss : almacenamiento específico del material poroso (1/unidad de longitud)
- e : espesor del acuífero (unidad de longitud)
- t : tiempo

La interpretación física de la ecuación 1, representa la suma de entradas y salidas de agua por las caras de un cubo poroso elemental, producto de la diferencia en el gradiente hidráulico ($\nabla^2 h$) entre el cubo y el entorno de este, más las entradas de agua exteriores (F) al sistema, es igual a la variación en el tiempo, del almacenamiento ($Ss \cdot e \cdot \partial h / \partial t$)(Villanueva, 1984).

El sistema hídrico es continuo, pero para su resolución numérica, se diseña una malla con un número finito de puntos (uno por cada celda, para cada instante de tiempo). El proceso de discretización conduce a un sistema de ecuaciones lineales cuya solución entrega los valores del nivel piezométrico calculado en el centro de cada celda, como así también su variación a través del tiempo. Estos valores constituyen una aproximación de la solución analítica de la ecuación 1.

La ecuación de diferencias finitas que describe el sistema tiene la siguiente forma para una celda particular (i, j, k). Esta ecuación se obtiene del proceso de discretización antes mencionado (ec.2).

$$\begin{aligned} & CR_{ij-1/2,k} \cdot (h^2_{ij-1,k} - h^2_{ij,k}) + CR_{ij+1/2,k} \cdot (h^2_{ij+1,k} - h^2_{ij,k}) + \\ & CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^2_{i-1,j,k} - h^2_{ij,k}) + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^2_{i+1,j,k} - h^2_{ij,k}) + \\ & CV_{ij,k-1/2} \cdot (h^2_{ij,k-1} - h^2_{ij,k}) + CV_{ij,k+1/2} \cdot (h^2_{ij,k+1} - h^2_{ij,k}) + \\ & P_{ij,k} \cdot h^2_{ij,k} + Q_{ij,k} = SS_{ij,k} \cdot (\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k) \cdot \frac{(h^2_{ij,k} - h^1_{ij,k})}{t^2 - t^1} \quad (\text{ec.2}) \end{aligned}$$

donde:

- CR_{i,j-1/2,k} : Conductancia según eje Y entre la celda (i,j,k) y la (i,j-1,k) (long²/tiempo)
- CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} · Δc_i · Δv_k / Δr_{j-1/2}
- CR_{i,j+1/2,k} : Conductancia según eje Y entre la celda (i,j,k) y la (i,j+1,k)(long²/tiempo)
- CR_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} · Δc_i · Δv_k / Δr_{j+1/2}
- CC_{i-1/2,j,k} : Conductancia según eje X entre la celda (i,j,k) y la (i-1,j,k) (long²/tiempo)
- CC_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} · Δr_j · Δv_k / Δc_{i-1/2}
- CC_{i+1/2,j,k} : Conductancia según eje X entre la celda (i,j,k) y la (i+1,j,k)(long²/tiempo)
- CC_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} · Δr_j · Δv_k / Δc_{i+1/2}
- CV_{i,j,k-1/2} : Conductancia según eje Z entre la celda (i,j,k) y la (i,j,k-1) (long²/tiempo)
- CV_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} · Δc_i · Δr_j / Δv_{k-1/2}
- CV_{i,j,k+1/2} : Conductancia según eje Z entre la celda (i,j,k) y la (i,j,k+1) (long²/tiempo)
- CV_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} · Δc_i · Δr_j / Δv_{k+1/2}
- KR_{i,j-1/2,k} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje Y, entre la celda (i,j,k) y la celda (i,j-1,k) (long/tiempo)
- KR_{i,j+1/2,k} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje Y, entre la celda (i,j,k) y la celda (i,j+1,k) (long/tiempo)
- KC_{i-1/2,j,k} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje X, entre la celda (i,j,k) y la celda (i-1,j,k) (long/tiempo)
- KC_{i+1/2,j,k} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje X, entre la celda (i,j,k) y la celda (i+1,j,k) (long/tiempo)
- KV_{i,j,k-1/2} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje Z, entre la celda (i,j,k) y la celda (i,j,k-1) (long/tiempo)
- KV_{i,j,k+1/2} : Coeficiente de Permeabilidad, según el eje Z, entre la celda (i,j,k) y la celda (i,j,k+1) (long/tiempo)
- h¹_{ijk} : Nivel piezométrico en la celda (i,j,k) en el instante t¹
- H²_{ijk} : Nivel piezométrico en la celda (i,j,k) en el instante t²
- P_{ijk} : Agrupa a los coeficientes que ponderan a los niveles piezométricos en la componente que depende del nivel, en los términos que describen los flujos externos
- Q_{ijk} : Agrupa a los valores constantes de las expresiones que describen los flujos externos
- SS_{ijk} : Almacenamiento específico, que corresponde al cociente entre el coeficiente de almacenamiento y la variación de nivel que ocurre entre t² y t¹ (1/long)
- Δr_i : Dimensión según Y de la celda (long)
- Δr_{j-1/2} : Distancia entre los nodos i,j-1,k y el i,j,k. (long)
- Δc_i : Dimensión según X de la celda (long)
- Δv_k : Dimensión según Z de la celda (long)
- t² : Instante de tiempo 2
- t¹ : Instante de tiempo 1

Entonces se tiene para cada celda una ecuación y siete incógnitas por cada ecuación (el nivel piezométrico de la celda misma y de las seis celdas que la rodean). Si hay n celdas activas, hay n ecuaciones y n incógnitas. Por lo tanto el sistema puede ser resuelto para cada intervalo de

tiempo, a partir de los datos obtenidos en la iteración anterior, los que al momento de correr el programa son las condiciones iniciales del acuífero.

El sistema que se obtiene luego de unir la contribución de las N celdas (nodos) tiene la siguiente forma:

$$[A]_{N \times N} \cdot \{h\}_{N \times 1} = \{q\}_{N \times 1}$$

[A] = matriz de coeficientes que ponderan los niveles piezométricos

{h} = vector con los niveles piezométricos al final de cada intervalo de tiempo

{q} = vector que agrupa a todos los términos constantes

El sistema se resuelve mediante algún programa iterativo (SOLVER), hasta que la solución satisfaga el sistema de ecuaciones con un cierto error previamente definido (criterio de cierre o convergencia). En el modelo, el criterio de convergencia resulta de un orden de magnitud menor que el grado de precisión requerido en los resultados, por ejemplo, si se quiere obtener niveles del cm, el modelo termina de iterar cuando la diferencia en valor absoluto, entre los niveles de dos pasos sucesivos, el error es menor a un mm.