



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

**“EVALUACION Y PROPUESTA DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO MODELACION
HIDROGEOLOGICA Y NUMERICA DEL VALLE CENTRAL DE
COSTA RICA, AMERICA CENTRAL.”**

Nº 2014LI-000001-OC

***Proyecto en Ejecución en el Marco del Programa de Gestión
Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH)***

Informe de Avance III (9 Meses)

29 de Noviembre, 2016



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla de contenido

CAPÍTULO I	Introducción	11
1.1	Equipo técnico.....	13
1.2	Alcance e objetivos	14
1.3	Generalidades	15
CAPÍTULO II	Metodología	19
2.1	Introducción	21
2.2	Principios físicos de los métodos empleados.....	21
2.3	Modelo numérico.....	23
2.4	Información necesaria para implementación del modelo	24
2.5	Pasos para la implementación del modelo	25
2.5.1	Pruebas preliminares del modelo conceptual	25
2.5.2	Calibración.....	26
2.5.3	Validación.....	27
2.5.4	Predicción.....	28
CAPÍTULO III	Construcción y Calibración del Modelo de Flujo.....	29
3.1	Modelo Matemático.....	31
3.2	Información Necesaria para Implementación del Modelo	32
3.2.1	Descripción de la geometría del medio hidrogeológico del dominio de flujo	32
3.2.2	Las condiciones en los límites	50
3.2.3	Balance hídrico	52
3.2.4	Descripción de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo	57
3.2.5	Distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado.....	58
3.3	Implementación y desarrollo del Modelo.....	62
3.3.1	Análisis de coherencia entre el modelo conceptual y las condiciones de frontera impuestas en el modelo numérico	62
3.3.2	Calibración estacionaria, transitoria y validación del modelo.....	73
3.4	Análisis de escenarios	77

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

3.4.1 Análisis de la dinámica del agua subterránea bajo diferentes condiciones de explotación.....	78
3.4.2 Análisis del balance para estimar la sustentabilidad de las extracciones presentes y futuras.....	88
CAPÍTULO IV Consideraciones Finales.....	94
6.1 Consideraciones finales.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	101
ANEXO I – UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	109
ANEXO II - CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA ACUÍFERO MULTICAPA DEL VALLE CENTRAL	113
ANEXO II.A - PERFORACIONES ESTRATIGRÁFICAS EMPLEADAS PARA LA DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA ACUÍFERO	115
ANEXO II.B - IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DONDE SE CONOCEN LOS LÍMITES ENTRE LAS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	123
ANEXO II.C - CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO INTERPOLADAS ENTRE LAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS.....	141
ANEXO II.D – INTERPOLACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO ENTRE LAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS IMPLEMENTADAS EN EL MODELO NUMÉRICO	159

Tabla de Figuras

Figura 1 - Pasos secuenciales para la calibración del modelo (Gable et al., 1996).....	27
Figura 2 – Modelo conceptual geológico base utilizado para la construcción de la estratigrafía tridimensional de la red de elementos finitos del modelo.....	34
Figura 3 – Supermesh con la ubicación de los elementos de destaque para construcción de la red de elementos finitos del modelo de flujo subterráneo tridimensional multicapa del Vale Central.....	35
Figura 4 – Representación visual de las “slices” (amarillo) y “layers” (azul) en el software de modelación Feflow.....	36
Figura 5 – Vista de planta del techo de la red de elementos finitos del modelo de flujo subterráneo tridimensional multicapa del Vale Central.....	37
Figura 6 – Ubicación de los principales perfiles hidroestratigráficos utilizados para validar la estratigrafía tridimensional de la red de elementos finitos.....	39

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Figura 7 – Sección transversal Perfil BGS1 (modificado de BGS & SENARA, 1985) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 40

Figura 8 – Sección transversal Perfil BGS2 (modificado de BGS & SENARA, 1985) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 40

Figura 9 – Sección transversal Perfil P01 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 41

Figura 10 – Sección transversal Perfil P04 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 42

Figura 11 – Sección transversal Perfil P05 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 43

Figura 12 – Sección transversal Perfil P06 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 44

Figura 13 – Sección transversal Perfil P09 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 45

Figura 14 – Sección transversal Perfil P10 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 46

Figura 15 – Sección transversal Perfil P13 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 47

Figura 16 – Sección transversal Perfil P16 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo). 48

Figura 17 – Vista panorámica de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual. 49

Figura 18 – Vista orientada a Norte de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con las formaciones acuíferas identificadas con color verde. 49

Figura 19 – Puntos utilizados para imposición de condiciones de frontera (ríos, manantiales y pozos de extracción), correspondientes a nodos en la red de elementos finitos del modelo numérico. 51

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Figura 20 – Distribución del área urbana en el área de estudio basado en la ocupación del suelo incluida en el Atlas de Costa Rica (2004). 55

Figura 21 – Distribución temporal de la recarga en los acuífero del Valle Central discriminada por superficie de afloramiento geológico. 62

Figura 22 – “Scatter plot” entre la piezometría observada y la piezometría calculada por el modelo. 65

Figura 23 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. de la “slice” correspondiente a la superficie de la variante inicial del modelo. 66

Figura 24 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. del “slice” siete, correspondiente a la formación Colima Superior de la variante inicial del modelo. 67

Figura 25 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. de la superficies de la variante inicial del modelo, conjuntamente con los nodos influentes (azul) y efluentes (rojo) de los ríos y respectivo caudal. 68

Figura 26 – Aforos diferenciales identificados en la cuenca del Valle Central (Elaboración propia basada en información brindada en Losilla et al., 1982 y Ramírez, 2015)..... 69

Figura 27 – Residuo piezométrico del modelo sin y con condiciones de frontera en los manantiales para el slice siete, que representa la formación Colima Superior. 70

Figura 28 –Vista orientada a Norte de la rede de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con la representación de la piezometría calculada por la variante inicial del modelo. 71

Figura 29 - Vista panorámica de la rede de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con la representación de la piezometría calculada por la variante inicial del modelo. 72

Figura 30 – “Scatter plot” entre la piezometría observada y la piezometría calculada por el modelo para la versión sin recarga proveniente del retorno de pérdidas de abastecimiento urbano (izquierda) y con recarga proveniente del retorno de pérdidas de abastecimiento urbano (derecha). 75

Figura 31 – Ubicación de los 991 puntos de observación utilizados en la calibración de los modelos numéricos..... 77

Figura 32 – Esquema descriptivo de escenarios de aumento de extracción y alteraciones climáticas simulados por el modelo numérico. 78

Figura 33 – Ubicación de los puntos de extracción añadidos a los previamente existentes en el escenario de situación invariable (Cen0) para la simulación de los escenarios de aumento de explotación (Cen1, Cen2 y Cen3). 80

Figura 34 – Ubicación de los locales considerados para el aumento de explotación y de los puntos de observación seleccionados para la análisis del potencial hidráulico local conjuntamente con su respectivas designación y residuo (m) calculado para el modelo en el escenario más exigente de aumento de explotación (Cen3) comparado con el escenario de situación invariable. 83

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Figura 35 – Variación del descenso piezométrico en los puntos de observación seleccionados de acuerdo con los escenarios simulados relativamente al escenario de situación invariable (Cen0)..... 84

Figura 36 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el Slice 7 para los escenarios de explotación simulados de la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano..... 86

Figura 37 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 para los escenarios de explotación simulados de la de la versión del modelo con recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano..... 87

Figura 38 – Variación del descenso piezométrico en los puntos de observación seleccionados de acuerdo con los escenarios simulados relativamente al escenario de situación invariable (Cen0)..... 91

Figura 39 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 (Colima Superior) para el escenario climático de reducción de 10% de recarga y el escenario de situación invariable de explotación (Cen0) para la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano..... 92

Figura 40 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 (Colima Superior) para el escenario climático de reducción de 15% de recarga y el escenario de situación invariable de explotación (Cen0) para la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano..... 93

Figura 41 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Barba y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 144

Figura 42 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Tiribi y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 145

Figura 43 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación La Libertad y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 146

Figura 44 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación indiferenciada de Tobas situada entre las formaciones de La Libertad y Colima Superior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 147

Figura 45 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Colima Superior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 148

Figura 46 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Puente Mulas y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. 149

Figura 47 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Colima Inferior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. La información referente al piso de esta formación es definida segundo la información conocida, aunque su piso nunca hay sido ultrapasado en pozos estratigráficos. 150

Figura 48 - Espesor interpolado de la Formación Barba..... 151

Figura 49 - Espesor interpolado de la Formación Tiribi. 152

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Figura 50 - Espesor interpolado de la Formación La Libertad.....	153
Figura 51 - Espesor interpolado de la formación indiferenciada de Tobas situada entre las formaciones La Libertad e Colima Superior.	154
Figura 52 - Espesor interpolado de la Formación Colima Superior.....	155
Figura 53 - Espesor interpolado de la Formación Puente Mulas.	156
Figura 54 - Espesor interpolado de la Formación Colima Inferior. Como hay sido referido anteriormente, esta formación nunca hay sido ultrapasada en los pozos estratigráficos aunque el espesos presentado se ha basado en la profundidad máxima conocida de Colima Inferior.	157
Figura 55 - Límites de afloramiento (coincidentes con los límites del piso) de la formación Cráter - Tobas sobre el Barva Superior.	161
Figura 56 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación Miembro Cráter - Tobas sobre el Barva Superior.	162
Figura 57 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Barva Superior.	163
Figura 58 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de del Barva Superior.....	164
Figura 59 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Porrosatí y Carbonal - Tobas sobre el Barva Inferior.	165
Figura 60 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Tobas sobre el Barva Inferior.	166
Figura 61 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Barva Inferior.	167
Figura 62 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación del Barva Inferior.	168
Figura 63 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Tiribi.	169
Figura 64 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Tiribi.	170
Figura 65 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación La Libertad.	171
Figura 66 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de La Libertad.....	172
Figura 67 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Colima Superior.	173
Figura 68 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Colima Superior.....	174
Figura 69 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Puente Mulas.	175
Figura 70 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Puente Mulas.	176
Figura 71 - Límites del piso de la formación Colima Inferior.	177

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla de Tablas

Tabla 1 – Equipo técnico del proyecto “Evaluación y propuesta de la explotación de las aguas subterráneas, utilizando Modelación Hidrogeológica y Numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central”	13
Tabla 2 – Correspondencia entre “layers” del modelo y formaciones hidrogeológicas del área de estudio.	37
Tabla 3 – Recarga neta potencial de las unidades geológicas (SENARA, 1980).	53
Tabla 4 – Distribución espacial de recarga en mm/año y conversión de este valor para m ³ /s, considerando el área de cada formación en el modelo numérico del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central.	53
Tabla 5 – Valores del balance hídrico impuestos en el modelo.	56
Tabla 6 – Datos de extracciones y descarga de manantiales obtenidos en diferentes instituciones y en el ámbito del presente proyecto.	57
Tabla 7 – Variación temporal de precipitación basado en las medias plurianuales mensuales presentadas en Fernández (2010).	60
Tabla 8 – Variación mensual de recarga en mm/año calculada para las diferentes geologías de afloramiento en el área de estudio.	61
Tabla 9 – Balance hídrico resultante de las variantes iniciales del modelo.	73
Tabla 10 – Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (K _{xx} =K _{yy}) calibrada para cada una de las unidades hidrogeológicas consideradas en los modelos numéricos desarrollados.	76
Tabla 11 – Detalles de los escenarios de aumento de extracción	80
Tabla 12 – Variables de recarga, retorno y explotación impuestas en las versiones calibradas del modelo y la salida en los manantiales calculada por el modelo en los diferentes escenarios de explotación simulados.	81
Tabla 13 – Potencial hidráulico calculado por el modelo para los puntos de observación seleccionados.	82
Tabla 14 - Variables de recarga, retorno y explotación impuestas en las versiones del modelo calibradas y la salida en los manantiales calculada por el modelo en los diferentes escenarios de alteración climática simulados para el de situación invariable de explotación (Cen0).	89
Tabla 15 – Potencial hidráulico calculado por el modelo para los puntos de observación seleccionados para los escenarios climáticos simulados y para el escenario de explotación de situación invariable (Cen0).	90
Tabla 16 – Información sobre secciones y perforaciones estratigráficas empleadas para la definición de la geometría del sistema acuífero multicapa del Valle Central	117
Tabla 17 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tobas sobre Barva Superior.	125
Tabla 18 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Barva Superior.	125
Tabla 19 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tobas sobre Barva Inferior.	125

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 20 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Barva Inferior.....	126
Tabla 21 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tiribi.....	128
Tabla 22 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica La Libertad.....	131
Tabla 23 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Colima Superior.....	132
Tabla 24 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Puente Mulas.....	135
Tabla 25 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Colima Inferior.....	137



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

1.1 Equipo técnico

El Informe de Avance III ha sido desarrollado por NEMUS, Lda. La composición del equipo técnico, así como la profesión de cada profesional se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 – Equipo técnico del proyecto “Evaluación y propuesta de la explotación de las aguas subterráneas, utilizando Modelación Hidrogeológica y Numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central”

Nombre	Profesión	Cargo a desempeñar
Equipo Clave		
Pedro Bettencourt	Geólogo, Director General y de proyecto	Gerente del contrato y Director de proyecto
José Paulo Monteiro	Hidrogeólogo	Coordinador
Rui Hugman	Ingeniero Ambiental	Ingeniero Ambiental, especialista en modelación Hidrogeológica
Luís Costa	Ingeniero Ambiental	Ingeniero Ambiental, especialista en modelación Hidrogeológica
Ricardo Martins	Ingeniero Ambiental, especialista en gestión de los recursos hídricos y sistemas de información geográfica	Ingeniero Ambiental, especialista en gestión de los recursos hídricos y sistemas de información geográfica
César Jesus	Geólogo	Geólogo, con conocimientos de rocas volcánicas
Maria Grade	Ingeniero Ambiental, especialista en gestión de los recursos hídricos y sistemas de información geográfica	Especialista en sistemas de información geográfica (SIG)
Equipo de apoyo		
Sónia Alcobia	Geóloga	Geóloga, especialista en geología ambiental

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

1.2 Alcance e objetivos

El presente informe, ha sido desarrollado en el marco de la adquisición de “Evaluación y propuesta de la explotación de las aguas subterráneas, utilizando Modelación Hidrogeológica y Numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central”, en el marco del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH) del contrato préstamo N.º 1709, suscrito con el Gobierno y aprobado por la Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica y puesto en vigencia con la publicación en la Gaceta N.º 240 del 11 de diciembre del 2008 (Ley N.º 8685).

El organismo ejecutor y contratante del proceso de concurso ha sido el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), entidad de Derecho Público con independencia administrativa, creada según Ley N.º 6877 del 4 de julio de 1983.

La empresa NEMUS, Lda. hay sido seleccionada de acuerdo con los procedimientos del Banco Centroamericano de Integración Económica establecidos en la Política para la Obtención de Bienes, Obras, Servicios y Consultorías con Recursos del BCIE y sus Normas para la Aplicación.

Los objetivos principales del proyecto consisten en: 1) definir un modelo hidrogeológico conceptual del funcionamiento de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica; 2) elaborar y calibrar un modelo matemático de flujo en 3D para analizar la dinámica del agua subterránea bajo diferentes condiciones de recarga, descarga (pozos y manantiales); 3) estimar los escenarios más favorables de extracción de agua subterránea sin afectación del entorno ambiental y estructural del acuífero, en las condiciones actuales y en diferentes escenarios futuros.

Este tercer informe resulta de la descripción de la evolución de los trabajos durante los segundo y tercer semestres de ejecución del proyecto. La información obtenida y tratada durante este periodo se añade a la anteriormente brindada y descrita en el primero y segundo informes de la contratación (NEMUS & SENARA, 15 de Junio de 2016; NEMUS & SENARA, 15 de Septiembre de 2016).

El análisis e interpretación de toda la información disponible ha permitido al equipo del proyecto establecer un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Multicapa del Valle Central de Costa Rica. Después de la discusión de este modelo conceptual con SENARA, durante las citas de Junio de 2016, se inició la implementación del modelo numérico cuya versión preliminar se describió en el segundo informe. Este segundo informe fue discutido y validado por SENARA durante reuniones ocurridas durante Noviembre de 2016. Un aspecto de mayor importancia con respecto a las decisiones tomadas consiste en la inclusión de todas las unidades estratigráficas existentes en el área de la cuenca hidrográfica del Río Virilla ($\approx 917,7\text{km}^2$) como dominio de flujo del modelo numérico implementado, y no solamente una parte de la cuenca como inicialmente se tenía decidido. Con este modelo, después de su calibración y validación se concretó el análisis de escenarios de explotación para proponer estrategias de gestión de los recursos hídricos subterráneos en el Valle Central de Costa Rica que se presenta en este tercer informe del presente proyecto.

1.3 Generalidades

Los recursos hídricos subterráneos del Valle Central de Costa Rica están asociados a un sistema acuífero multicapa de gran importancia estratégica a la escala nacional. Estos recursos constituyen el origen del abastecimiento público urbano de agua de San José, capital de la República de Costa Rica, en cuya área metropolitana viven cerca de un millón de habitantes. Las áreas urbanas que se encuentran en los alrededores de San José incluyen Heredia, Alajuela, Santo Domingo, San Joaquín, San Antonio de Belén y otros centros de población de rápido desarrollo.

De entre las numerosas contribuciones técnicas y científicas disponibles para la realización de este proyecto, las etapas más importantes del desarrollo del conocimiento sobre la hidrogeología del Valle Central, desde las últimas décadas del siglo pasado hasta el presente, pueden ser descritas de forma muy completa en los trabajos de síntesis presentados por Naciones Unidas (1975); Losilla *et al.* (1982); SENARA & BGS (1988); Soliz *et al.* (2012) y Ramírez (2015).

Según el estadio actual del conocimiento sintetizado en estas referencias, el acuífero del Valle Central consiste en varias formaciones geológicas, y entre ellas se destacan la formación Colima Superior, Colima Inferior, La Libertad y Barva. En este proyecto se hace una caracterización de

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

estas unidades hidroestratigráficas a tornar así posible un análisis de su funcionamiento hidrogeológico conjunto en un sistema acuífero regional multicapa, utilizando un modelo numérico tridimensional en elementos finitos.

Los diferentes estudios, desarrollados en distintas épocas, sobre las unidades hidroestratigráficas que constituyen el sistema acuífero multicapa del Valle Central no se enfocan simultáneamente sobre todas las áreas en las cuales existen las litologías que soportan el sistema hidrogeológico regional. En las circunstancias actuales se está analizando el conjunto de información disponible sobre la geología de las distintas unidades hidroestratigráficas presentes, de manera a caracterizar la geometría del dominio de flujo del sistema acuífero regional lo más rigurosa posible. A lo largo del desarrollo de este proyecto se ha comprendido que la denominación de las unidades hidroestratigráficas ha cambiado a lo largo del período histórico por lo que es necesaria una atención especial a la relación entre los cambios de denominación ocurridos para describir las diferentes capas del Sistema Acuífero. Se ha consultado una cantidad de información gigantesca que permite considerar que la red de elementos finitos construida presentada en este informe consiste en la representación geométrica más completa y actual existente a respecto de las unidades hidroestratigráficas del Valle Central de Costa Rica.

A esta información geométrica se añadió igualmente la información necesaria para sintetizar el estadio actual del conocimiento sobre el balance hídrico de la región estudiada y sus condiciones de frontera. Se estableció, en la presente etapa del proyecto un modelo conceptual que se suele considerar lo más adecuado para simular el funcionamiento hidrodinámico del sistema de flujo, de acuerdo con el estadio actual del conocimiento hidrogeológico del área en estudio. El modelo matemático que se presenta en este informe se ha desarrollado de acuerdo con el modelo este mismo modelo conceptual.

La información necesaria para implementar el modelo numérico se agrupa en las siguientes tareas:

- (1) descripción de la geometría del medio hidrogeológico que constituye el dominio de flujo;

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

- (2) definición de las condiciones en los límites;
- (3) cuantificación del balance hídrico;
- (4) determinación de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo;
- (5) investigación de la coherencia entre la información disponible y simulación de la distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado.

Una vez caracterizada la información requerida para caracterizar estos 5 aspectos se ha establecido una secuencia de operaciones adaptada a las características del presente proyecto de modelación. No existe una manera única de describir las tareas necesarias para desarrollar un modelo numérico hidrogeológico ya que este tipo de modelos puede ser construido con objetivos muy diversos y con distintas metodologías. En el caso de un proyecto con las características definidas para el Valle Central de Costa Rica se ha establecido la siguiente secuencia metodológica:

- (1) Pruebas preliminares del modelo conceptual;
- (2) calibración;
- (3) validación;
- (4) predicción.

Para que sea clara la lectura de este informe se presenta un desarrollo de los puntos identificados en el párrafo precedente en los capítulos dedicados a la descripción de la metodología y a la caracterización de la información necesaria para implementación del modelo. Estos capítulos sintetizan la información brindada en el primer y segundo informes del proyecto (NEMUS & SENARA, Junio de 2016; NEMUS & SENARA, Septiembre de 2016). En lo segundo informes del proyecto se describen y discuten resultados relacionados con las dos primeras etapas de estas etapas, o sea, las pruebas preliminares del modelo conceptual y la calibración del modelo numérico. La validación y predicción de escenarios se presenta y discute en el actual tercer informe del proyecto, en conjunto con la discusión de escenarios de gestión de los recursos hídricos subterráneos.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

CAPÍTULO II METODOLOGÍA



nemus •

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan, de forma breve, los fundamentos científicos empleados en el desarrollo del proyecto. En primer lugar se presentan los principios físicos de los métodos empleados y del modelo numérico desarrollado. Posteriormente se describen las etapas necesarias para la implementación técnica del modelo.

2.2 Principios físicos de los métodos empleados

La forma más explícita de la ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo grado que describe el balance y el movimiento de las aguas subterráneas de densidad constante, en un medio poroso está basada en la Ley de Darcy que expresa las leyes de conservación de energía, acoplada con la ecuación de continuidad que exprime la conservación de la masa del fluido.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.1)$$

En donde:

- K_{xx} , K_{yy} and K_{zz} son los valores de conductividad hidráulica [LT^{-1}] a lo largo de x , y , z , ejes cartesianos que se asumen como siendo paralelos a los ejes de mayor conductividad hidráulica; h es el potencial hidráulico [L]; Q es un flujo volumétrico por unidad de volumen del medio poroso [$L^3T^{-1}L^{-3}$], representando las entradas y/o salidas de fluido; e S_s es el almacenamiento específico del medio poroso [L^{-1}].

La conductividad hidráulica se exprime por medio de la ecuación siguiente:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (1.2)$$

En donde ρ es la densidad del agua [ML^{-3}]; g es la aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}]; k es la permeabilidad intrínseca o geométrica [L^2] y μ es la viscosidad dinámica [$ML^{-1}T^{-1}$].

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Se añade que la conductividad hidráulica K , [$L T^{-1}$] es un parámetro conductivo tridimensional, relacionado con el término “transmisividad” T [$L^2 T^{-1}$] por la relación $T=K \cdot b$, en donde b es el espesor saturado del acuífero. T es un parámetro conductivo bidimensional que se refiere frecuentemente a lo largo de este informe con relación a la expresión de los resultados de ensayos de bombeo que, al contrario del modelo matemático tridimensional expresa la conductividad del dominio de flujo solamente en dos dimensiones del espacio.

El potencial hidráulico [L] corresponde a la energía por unidad de volumen del fluido, despreciando la energía cinética. Es expresado como la suma de la elevación del punto de medida a un nivel de referencia o energía de posición z [L] y la energía de presión p [$M L^{-1} T^{-2}$] y se define como:

$$h = \left(\frac{p}{\rho g} \right) + z \quad (1.3)$$

El almacenamiento específico [L^{-1}] se define como:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (1.4)$$

En donde α es la compresibilidad del medio geológico [$L T^2 M^{-1}$]; n es la porosidad efectiva (adimensional) y β es la compresibilidad del agua [$L T^2 M^{-1}$].

Se añade que el almacenamiento específico [L^{-1}] es un parámetro conductivo tridimensional, relacionado con el término S “Coeficiente de Almacenamiento” [-] por la relación $S=S_s \cdot b$, en donde b es el espesor saturado del acuífero. S es un parámetro capacitivo bidimensional que se refiere frecuentemente, a lo largo de este informe, con relación a la expresión de los resultados de ensayos de bombeo que, al contrario del modelo matemático tridimensional, expresa el almacenamiento del dominio de flujo solamente en dos dimensiones del espacio.

La ecuación 1.1 se escribe frecuentemente de forma más compacta utilizando los operadores de gradiente y de divergencia como se sigue:

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div} \left(-[\mathbf{K}] \overrightarrow{\text{grad}} h \right) = Q \quad (1.5)$$

En régimen permanente las variables son independientes del tiempo. En este caso la ecuación 1.5 es reducida a la forma 1.6:

$$\text{div} \left(-[\mathbf{K}] \overrightarrow{\text{grad}} h \right) = Q \quad (1.6)$$

2.3 Modelo numérico

La ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo grado que describe el flujo del agua subterránea puede ser solucionada para condiciones de frontera particulares (definidas en los límites del dominio de flujo), considerando también los parámetros y variables de estado (en su interior), utilizando el método de los elementos finitos.

Este método es especialmente adecuado para integrar ecuaciones diferenciales en el espacio y, por eso, simular fenómenos de flujo y transporte en dominios de flujo heterogéneos de geometría compleja. A lo largo de las últimas décadas el método de los elementos finitos se ha transformado en una metodología *standard* para resolver problemas hidrogeológicos complejos como es el caso del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central de Costa Rica. La descripción de este método se hace en detalle en publicaciones de referencia, de las cuales se destacan las siguientes: Huyakorn and Pinder (1983), de Marsily (1986), Kinzelbach (1986), Wang and Anderson (1982) y Bear and Verruijt (1987).

El programa FEFLOW ha sido elegido para la implementación del modelo a desarrollar en el caso específico del Valle Central de Costa Rica. La descripción detallada de este código informático es hecha de forma muy completa y desarrollada en Diersch (2014).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

2.4 Información necesaria para implementación del modelo

Los modelos numéricos basados en la solución de la ecuación diferencial que describe el flujo del agua subterránea son clasificados como “modelos de parámetros distribuidos”. Esta clase de metodologías necesita como datos de entrada la información que se sigue:

- (1) La descripción de la geometría del medio hidrogeológico que constituye el dominio de flujo;
- (2) Las condiciones en los límites;
- (3) El balance hídrico;
- (4) La descripción de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo;
- (5) La distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado;
- (6) Las condiciones iniciales de las variables de estado (en el caso de una simulación en régimen transiente).

Todos los aspectos considerados en estos seis puntos tienen que ser caracterizados con base en criterios elegidos de manera cuidadosa y basados en un modelo conceptual adecuado. Al final el desempeño del modelo numérico depende fuertemente de la conceptualización a partir de la cual fue originado. De esta forma, mientras más robusto sea el modelo conceptual, los resultados de las simulaciones tendrán asociada una mayor credibilidad (Labbé, 2012).

Una parte importante de este informe se dedicará a la descripción de estos aspectos más detallada que la presentada en el informe anterior de este proyecto (NEMUS & SENARA, 2016a,b) como base de fundamentación para las decisiones en las cuales se basó la construcción de la red de elementos finitos que soportan el modelo matemático preliminar ya implementado y presentado en el presente informe. De manera a tornar más claro el significado de la expresión “modelo conceptual” en hidrogeología se presentan dos definiciones generalistas introducidas por dos autores que han contribuido de manera muy importante para esta área científica:

- (1) un modelo conceptual es la primera etapa en el desarrollo de un modelo de flujo y consiste en determinar las relaciones causa-efecto que expresen el funcionamiento del sistema (Mercer and Faust, 1980);

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

- (2) un modelo conceptual adecuado debe ser suficientemente simple para permitir su resolución matemática, pero no demasiado simple para que excluya las características involucradas en la investigación en curso. Debe existir información disponible para calibrar el modelo y el modelo debe ser lo más económico posible para resolver el problema en estudio (Bear & Verruijt, 1987).

Estas consideraciones de carácter general se consideran importantes para justificar la forma elegida de organizar la información contenida en este informe.

2.5 Pasos para la implementación del modelo

No existe una manera única de describir las tareas necesarias para desarrollar un modelo numérico hidrogeológico ya que este tipo de modelos puede ser construido con objetivos y metodologías muy distintas. En el caso de un proyecto con las características definidas para el Valle Central de Costa Rica es posible establecer la siguiente secuencia metodológica:

- (1) Pruebas preliminares del modelo conceptual;
- (2) Calibración;
- (3) Validación;
- (4) Predicción.

2.5.1 Pruebas preliminares del modelo conceptual

Con base en el modelo conceptual (o modelos conceptuales alternativos) se hacen pruebas de coherencia entre las observaciones resultantes de la monitoreo de las variables de estado y las respuestas del modelo preliminar, mediante las simulaciones del estado actual del conocimiento hidrogeológico de la región en estudio.

En esta fase, los flujos aforados en salidas naturales y artificiales (bombeos) registrados en la red de monitoreo del acuífero (sistema real) son confrontados con los resultados de las simulaciones. Esta comparación permitirá verificar la coherencia entre la geometría de las unidades hidroestratigráficas y condiciones en los límites sugeridos por el estado actual del

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

conocimiento de la hidrogeología de Valle Central. Aunque no se espera lograr una reproducción muy fiel de la distribución espacial de las variables de estado en esta fase, hay información que tendrá que ser confirmada, como:

- (1) las direcciones principales del flujo regional y
- (2) el balance medio de entradas (recarga) y salidas en las áreas donde están identificadas las zonas de descarga conocidas con relevancia regional.

2.5.2 Calibración

La calibración consiste en realizar la caracterización de los parámetros hidráulicos de manera a que sus valores permitan que las simulaciones hechas por el modelo reproduzcan, de la forma más fiable posible, la distribución espacial e evolución temporal de las variables de estado.

Esta fase de los trabajos conlleva normalmente grande parte del tiempo disponible de un proyecto de modelización de un sistema acuífero complejo, como es el caso del acuífero multicapa del Valle Central de Costa Rica.

Se añade que el efecto de escala no permite que se hagan estimaciones realistas de todos los materiales geológicos presentes a partir de datos de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento a partir de pruebas de laboratorio y pruebas de bombeo en pozos. Este tipo de datos es importante como contribución para estudiar el rango de valores inferiores de los parámetros. Sin embargo, se puede afirmar que los parámetros regionales presentarán siempre valores superiores a los máximos determinados en pruebas realizadas a la escala de laboratorio o a la escala de los pozos.

Por esta razón la calibración del modelo regional se hará por modelización inversa con recurso al algoritmo no lineal (lo que significa que los valores de las variables afectan los valores de los parámetros) automático de estimación conocido como “método de Gauss-Marquardt-Levenberg method”, implementado en el programa PEST (Doherty, 2002, 2003). Sucesivas corridas del modelo FEFLOW se harán de manera a reducir el error cuadrático medio de las variables de estado simuladas por el modelo y los valores de las mismas variables conocidas por

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

medio del monitoreo del sistema acuífero. En la Figura 1 se presenta la secuencia de pasos para la calibración del modelo a partir del modelo conceptual.

La distinción entre el proceso de calibración y de validación (discutido enseguida) no son distinguibles con claridad. La secuencia de operaciones ilustrada en la Figura 1 puede involucrar la “validación”, pero también la etapa que se sigue (predicción). Además, toda la investigación que se desarrolle en el futuro puede obligar a empezar una vez más este ciclo de pasos.

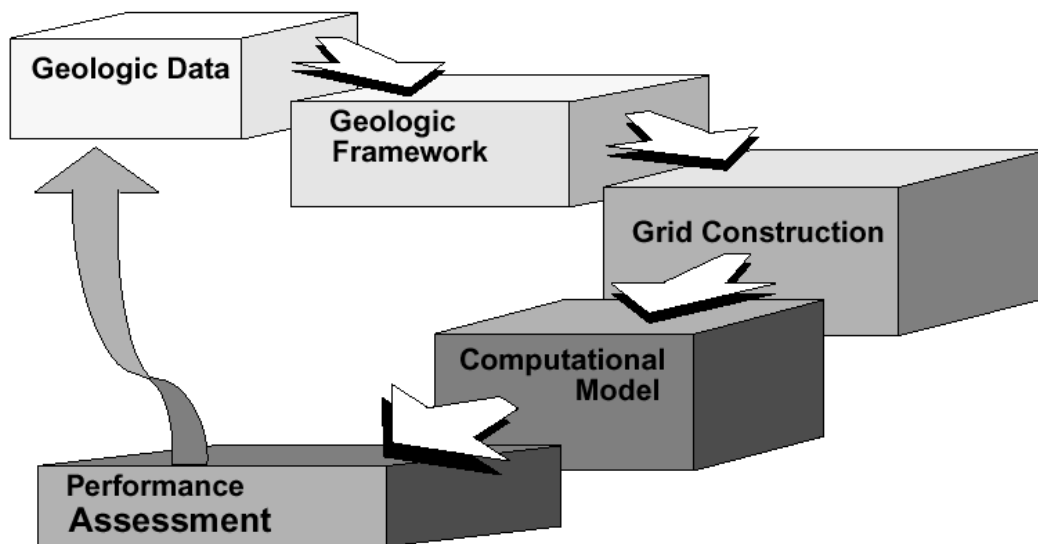


Figura 1 - Pasos secuenciales para la calibración del modelo (Gable et al., 1996)

2.5.3 Validación

La validación del modelo se relaciona con el hecho de que la calibración no es garantía de que el modelo calibrado, para determinadas condiciones climáticas, de explotación y de uso del suelo, sea necesariamente eficaz en la predicción de fenómenos climáticos extremos, cambios climáticos o, simplemente, de opciones de gestión del uso del agua y del suelo muy diferentes de aquellas que han sido consideradas en la calibración.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

El trabajo de validación del modelo no debe terminar en el momento de entrega del informe técnico final resultante del presente trabajo de consultoría. Deberá continuar por medio de un proceso en el cual la institución responsable por la gestión de los acuíferos desarrolle rutinas de utilización del modelo como herramienta predictiva y, a cada paso, ir mejorando su capacidad de aumentar su fiabilidad de simulación del comportamiento hidráulico del “acuífero real”.

2.5.4 Predicción

Una vez validado un modelo bajo “stress conditions” diferentes de aquellas que han sido utilizadas para su calibración es razonable aceptar que sea válido analizar escenarios hipotéticos de gestión con recurso a simulaciones hechas con el modelo numérico.

El uso del modelo en esta etapa puede contribuir de manera muy efectiva para elegir medidas de optimización de la gestión del agua y de disminución de riesgos asociados a su explotación. Sin embargo, la toma de decisiones basada en simulaciones deberá siempre ser acompañada de un monitoreo riguroso. Este permitirá evaluar el comportamiento del sistema real en las áreas en que el conocimiento de la hidrología/ hidrogeología y los resultados de las simulaciones lo aconsejen.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

CAPÍTULO III CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO DE FLUJO



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

3.1 Modelo Matemático

En este tercer informe se describen las etapas de construcción del modelo matemático en elementos finitos, la etapa de calibración del modelo y el análisis a los escenarios de aumento de extracción y escenarios de cambio climático. Se empieza este capítulo por la descripción de las principales etapas de la construcción que ya han sido referidas en el apartado 4.2.2 del segundo informe. En seguida se presenta las variantes iniciales del modelo que permitirán definir la estrategia de calibración que se sigue. Posteriormente se presentan los resultados de los escenarios de aumento de explotación de agua y los escenarios de cambio climático. Basado en los resultados y análisis de los escenarios simulados, se presentan por fin los escenarios más favorables de extracción de agua subterránea en las condiciones actuales y en diferentes escenarios futuros para proponer estrategias de gestión de los recursos hídricos subterráneos en el Valle Central de Costa Rica.

La construcción del modelo numérico hay sido implementada de acuerdo con el establecido en los apartados 2.4 (Información necesaria para implementación del modelo) y 2.5 (Pasos para la implementación del modelo) e incluyen los siguientes pasos:

Información necesaria para implementación del modelo:

- 1) La descripción de la geometría del medio hidrogeológico que constituye el dominio de flujo;
- 2) Las condiciones en los límites;
- 3) El balance hídrico;
- 4) La descripción de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo;
- 5) La distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado;
- 6) Las condiciones iniciales de las variables de estado (en el caso de una simulación en régimen transiente).

Pasos para la implementación del modelo:

- 1) Pruebas preliminares del modelo conceptual;
- 2) Calibración;
- 3) Validación;

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

4) Predicción.

Algunos de los puntos referidos en el apartado 2.4 (Información necesaria para implementación del modelo) tienen una descripción detallada de estos pasos que podrá ser consultados en los informes 1 y 2 de este proyecto. Todavía en este informe se presenta esa información de una forma concisa y resumida.

En lo que respecta a los pasos incluidos en el apartado 2.5 (Pasos para la implementación del modelo), Las pruebas preliminares del modelo conceptual ya han sido testadas y presentadas en el informe 2 del proyecto. Los restantes puntos serán abordados en este informe.

3.2 Información Necesaria para Implementación del Modelo

3.2.1 Descripción de la geometría del medio hidrogeológico del dominio de flujo

La descripción de la geometría del medio hidrogeológico y su implementación en el modelo ha sido descrita con detalle en los apartados 4.2.1, 4.2.2 (Descripción de los dominios hidrogeológicos de flujo subterráneo) y 5.2 (implementación de los límites hidrogeológicos en el modelo numérico) del informe 2 de este proyecto (NEMUS & SENARA, Septiembre de 2016).

En una primera etapa del proceso se preparó toda la información geográfica sobre la geometría de las unidades hidroestratigráficas del sistema acuífero (apartado 4.2.1 y 4.2.2 del informe 2 de este proyecto) cuyo resultado permitió la definición del modelo conceptual hidrogeológico que se presenta en la Figura 2. Las capas Puente Mulas y Colima Inferior están incluidas en el modelo pero no son visibles en el mapa de la Figura 2 una vez que no existen afloramientos conocidos de estas unidades hidroestratigráficas referenciados en la bibliografía consultada. La estratigrafía con la ubicación de esas capas y todos los demás elementos para la construcción de la geometría tridimensional hidrogeológica puede ser consultada en los Anexos II.A, II.B, II.C y II.D. La ejecución del modelo conceptual y de los límites de las capas hidrogeológicas es resultado de la interpretación del equipo de trabajo del presente proyecto basado en información disponible en el Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica (Losilla, 1986) y las contribuciones de Naciones Unidas (1975), (Losilla et al., 1982), BGS & SENARA (1985), SENARA (2008), Schosinsky & Vargas (1999), Fernández (2010), Soliz et al. (2012) y Ramírez (2015).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

La construcción de los límites tridimensionales de las unidades hidroestratigráficas para generar la red de elementos finitos, se ha hecho en tres etapas:

- 1) Definición del límite de superficie del piso y del límite de superficie de afloramiento de cada formación con base en los datos de perforaciones estratigráficas;
- 2) Interpolación del espesor y de la superficie del piso de cada formación, utilizando kriging como método de interpolación;
- 3) Cruzar los límites definidos en 1) con los datos de interpolación definidos en 2). Así, se considera que el techo de una formación es la superficie topográfica en las zonas que esa formación aflora y el piso de la formación que se sobrepone a ella, en la restante área.

Para las zonas de afloramiento hay sido atribuido el valor de elevación del Modelo Digital de Elevación. Para las formaciones siguientes, la interpolación de la elevación del Piso de una formación "A" coincide con el techo de la formación "B", siendo que la formación A se sobrepone a la formación B. Por otro lado, hay sido necesario extrapolar valores de elevación e espesor de varias formaciones para zonas en las cuales no hay información hidroestratigráfica.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

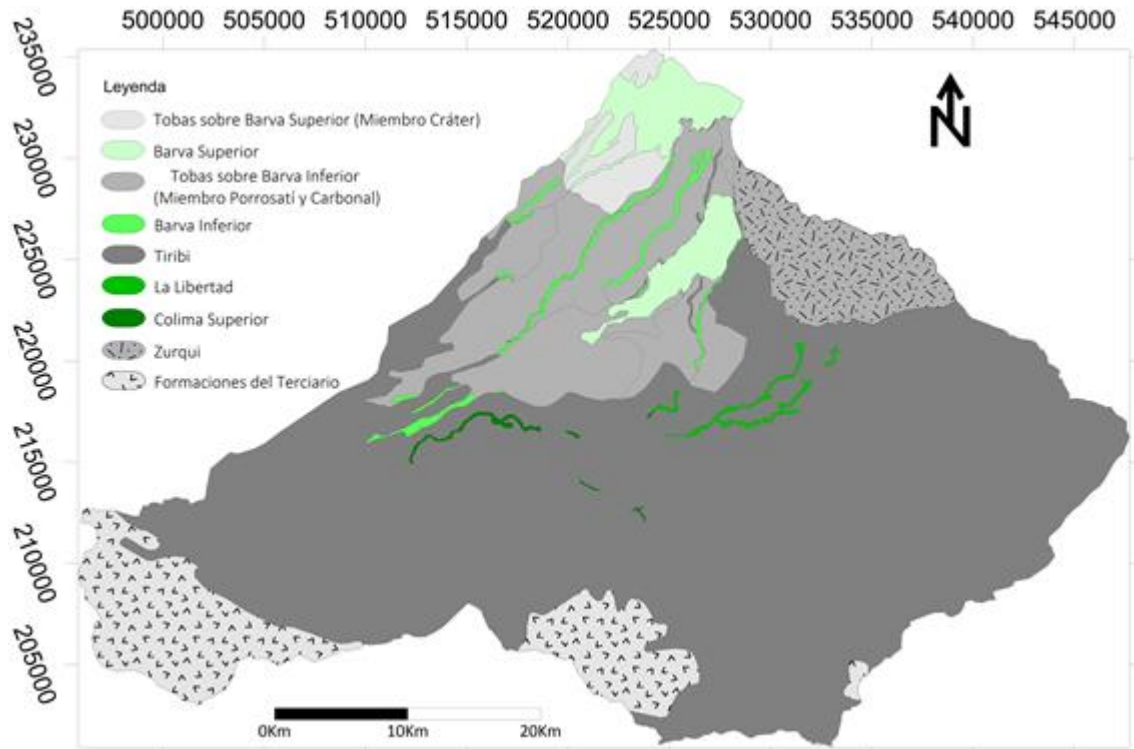


Figura 2 – Modelo conceptual geológico base utilizado para la construcción de la estratigrafía tridimensional de la red de elementos finitos del modelo.

Después del pre-procesamiento de esta información esta se trasladó de la plataforma de Sistema de Información Geográfica (SIG) a un formato específico del software Feflow™, que permite incorporar los elementos geométricos necesarios a la generación de la red. Este formato específico del software se denomina "Supermesh" y, para su construcción, se ha considerado la ubicación de los ríos, los límites geológicos del piso y afloramiento de cada formación incluida en el modelo, los pozos importantes y los manantiales para construcción de elementos finitos (Figura 3).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

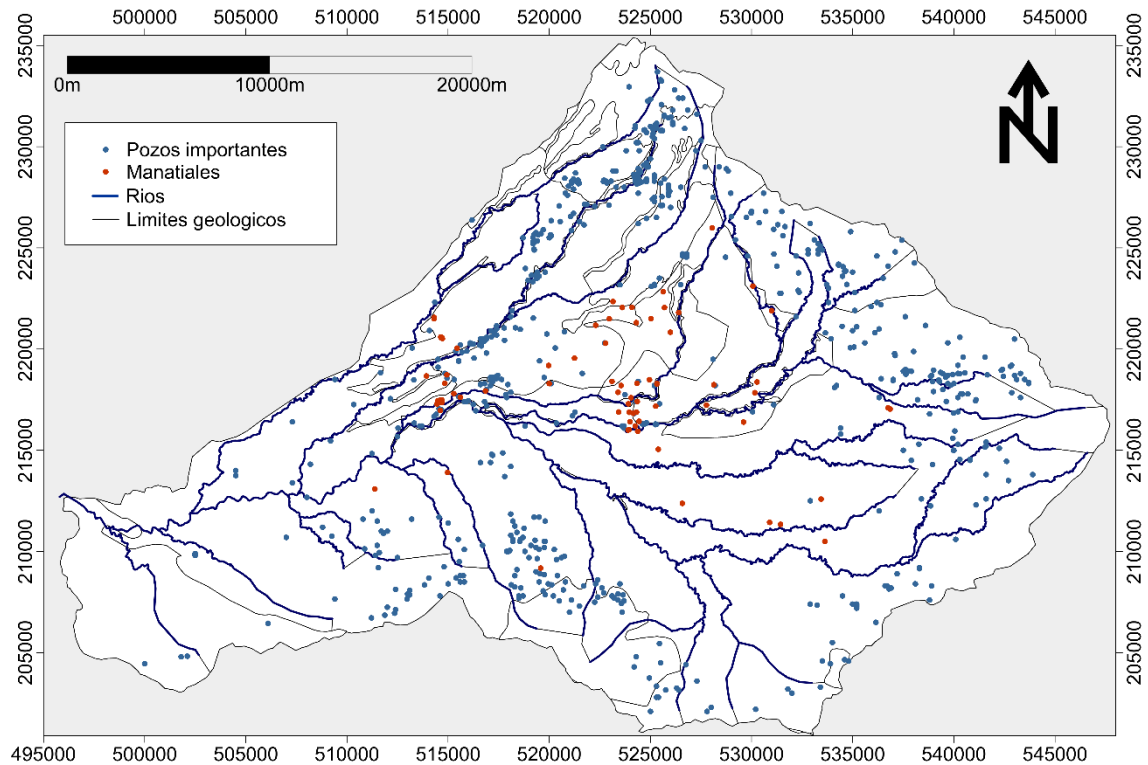


Figura 3 – Supermesh con la ubicación de los elementos de destaque para construcción de la red de elementos finitos del modelo de flujo subterráneo tridimensional multicapa del Vale Central.

La información almacenada en esta “supermesh” permite la transferencia de los datos sobre la geometría del sistema, necesarios para activación del programa de generación de elementos finitos.

Existen varios generadores de red integrados en el software Feflow, de los cuales el "Triangle" es lo que presenta mejores resultados con geometrías e “supermeshes” más complejas, como es el caso del modelo actual. El algoritmo del generador fue desarrollado por Jonthan Richard Schewchuck en la Universidad de California (Schewchuck, 1996; Schewchuck, 2002), y permite generar redes triangulares que respetan al criterio de Delaunay.

La condición de Delaunay asegura que los ángulos del interior de los triángulos tengan el mayor valor posible, de manera a que se eviten erros numéricos asociados a las interpolaciones de las

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

variables en el interior de los elementos, a partir de las funciones isoparamétricas en los nodos. O sea, además de generar una red estéticamente más apelativa, esta condición permite una mejor estabilidad numérica en la solución de las ecuaciones generales de flujo y transporte, reduciendo el error y reduciendo la carga computacional de la simulación.

El procedimiento y las características técnicas del formato de la “supermesh” e información adicional sobre el método Delaunay pueden ser obtenida en los manuales del software Feflow, disponibles gratuitamente en el endereço electrónico del software (Diersch, 2014). En la Figura 4 se discriminan los diferentes dominios de la red de elementos finitos segundo la nomenclatura utilizada por el software Feflow.



Figura 4 – Representación visual de las “slices” (amarillo) y “layers” (azul) en el software de modelación Feflow.

La primera red de elementos finitos generada fue constituida por elementos triangulares, cada uno de los cuales es constituido por tres nodos que pertenecen igualmente a los elementos vecinos, excepto en el caso en que una arista de un triángulo defina la frontera con el límite exterior a lo dominio de flujo. Esta red inicial es una capa bidimensional (slice) con 117878 elementos y 59315 nodos. En el paso siguiente la red de elementos finitos fue convertida en una red 3D con base en los límites geológicos tridimensionales definidos en el apartado 4.2.2 del informe 2 de este proyecto. La red de elementos finitos resultante final eres compuesta por 10 slices (2D) y 9 layers (3D), con un total de 1060902 elementos (prismas triangulares) y 593150 nodos (59315 nodos por slice), cuya configuración se presenta en la Figura 5.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

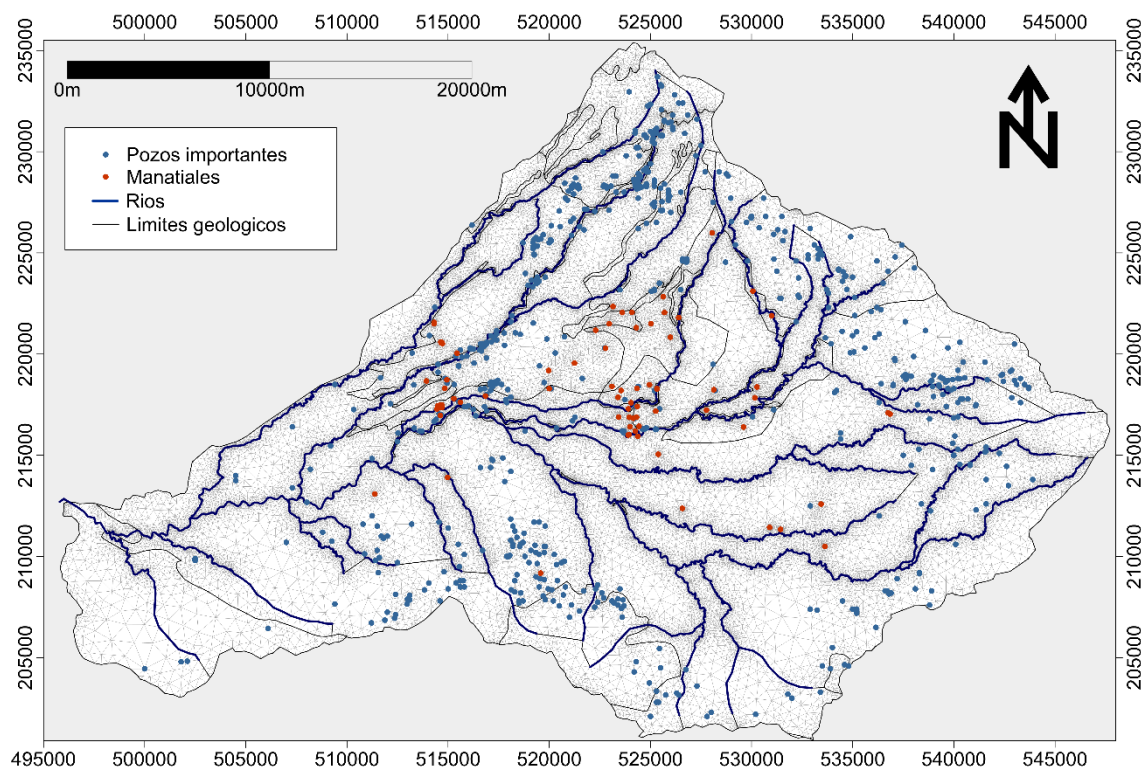


Figura 5 – Vista de planta del techo de la red de elementos finitos del modelo de flujo subterráneo tridimensional multicapa del Vale Central.

En general, las 9 layers configuradas en el modelo dicen respecto a las unidades hidroestratigráficas interpoladas, con la primera layer a corresponder a la formación de Tobas sobre Barva Superior (Miembro Cráter) e la layer 9, del piso del modelo, a corresponder al Colima Inferior (Tabla 2).

Tabla 2 – Correspondencia entre “layers” del modelo y formaciones hidrogeológicas del área de estudio.

Layer	Formación correspondiente
Layer 1	Tobas sobre Barva Superior (Miembro Cráter)
Layer 2	Barva Superior
Layer 3	Tobas sobre el Barva Inferior (Miembro Porrosatí y Carbonal)
Layer 4	Barva Inferior
Layer 5	Tiribi

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Layer	Formación correspondiente
Layer 6	La Libertad
Layer 7	Colima Superior
Layer 8	Puente Mulas
Layer 9	Colima Inferior

Perfiles estratigráficos de la red de elementos finitos

La estratigrafía tridimensional de la red de elementos finitos construida fue confrontada con los perfiles estratigráficos geológicos consultados en la bibliografía. La comparación entre ambos permite considerar que la red de elementos finitos representa correctamente el estadio actual del conocimiento sobre las unidades hidroestratigráficas de sistema acuífero del Valle Central. De seguida, entre la Figura 6 y la Figura 16 se presentan la comparación entre algunos perfiles estratigráficos consultados en la bibliografía y los perfiles estratigráficos resultantes de la red de elementos finitos del modelo y respectiva ubicación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

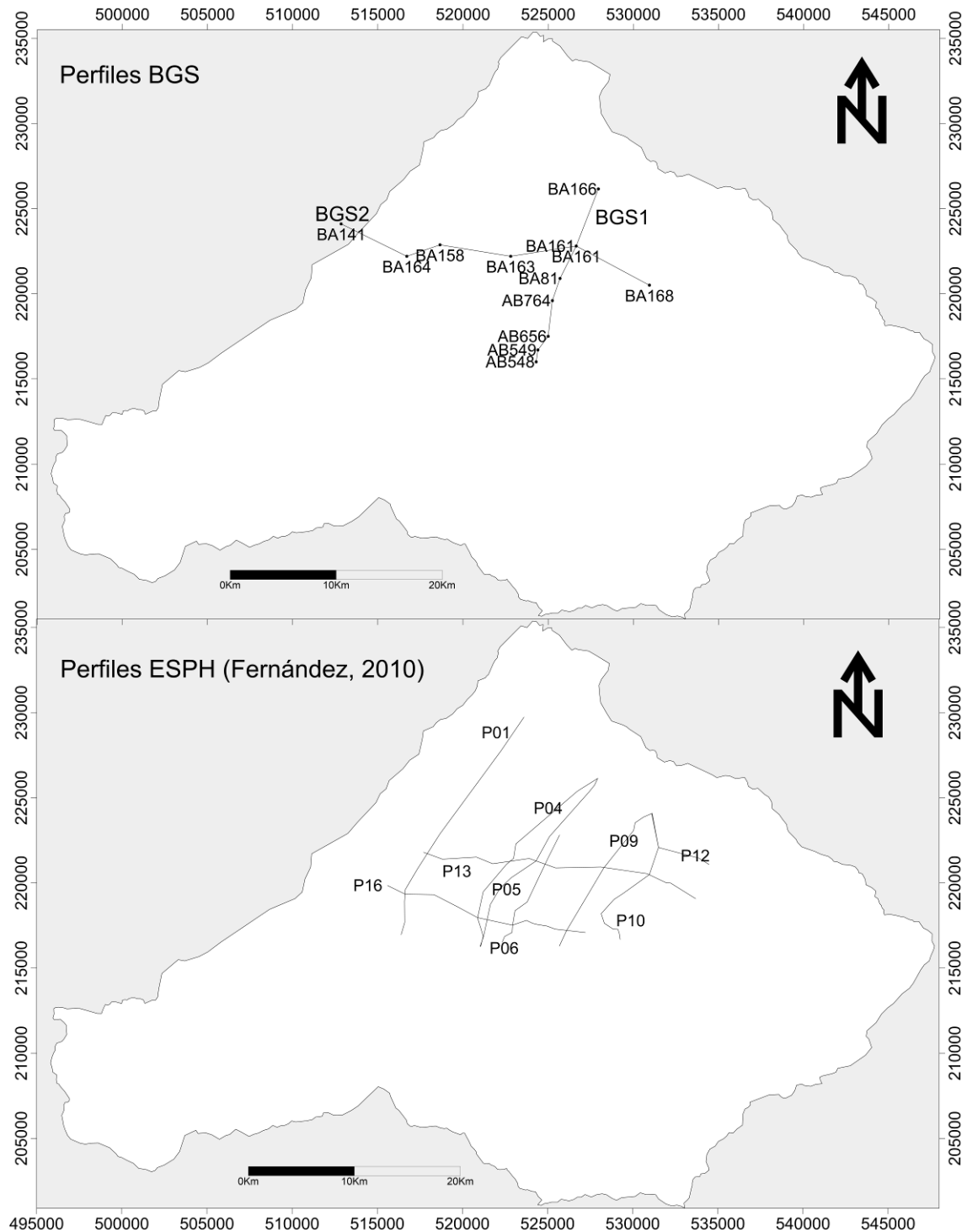


Figura 6 – Ubicación de los principales perfiles hidroestratigráficos utilizados para validar la estratigrafía tridimensional de la red de elementos finitos.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

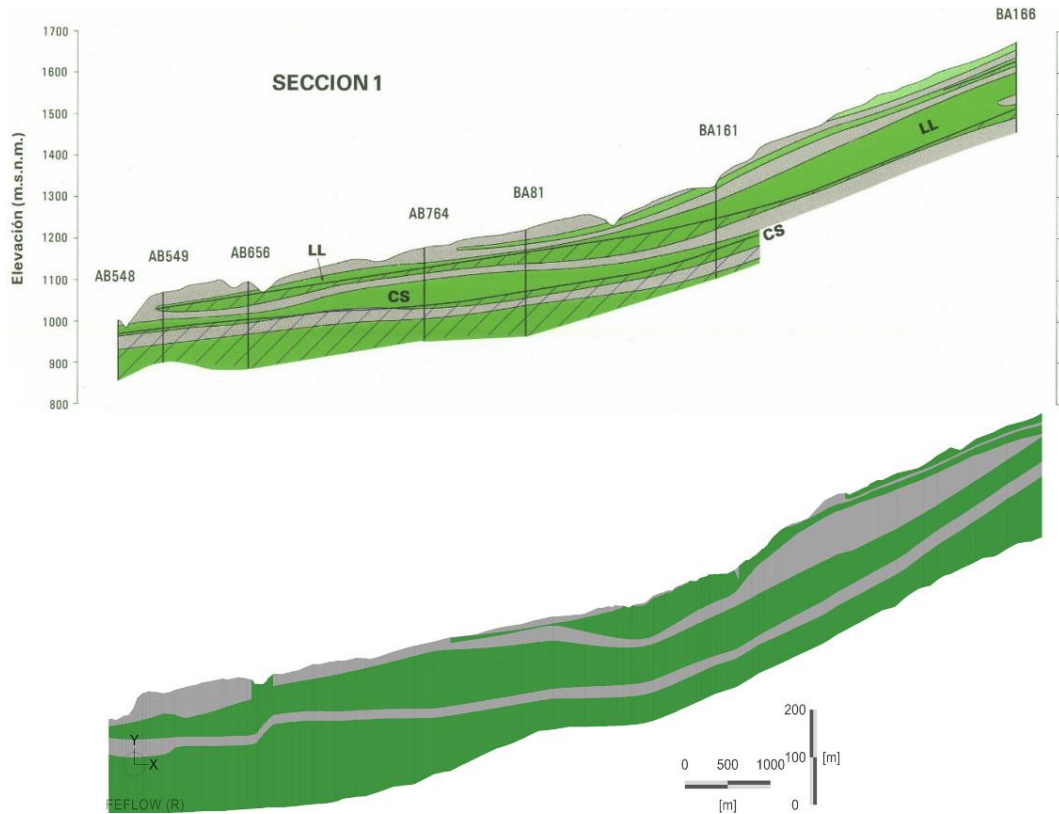


Figura 7 – Sección transversal Perfil BGS1 (modificado de BGS & SENARA, 1985) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

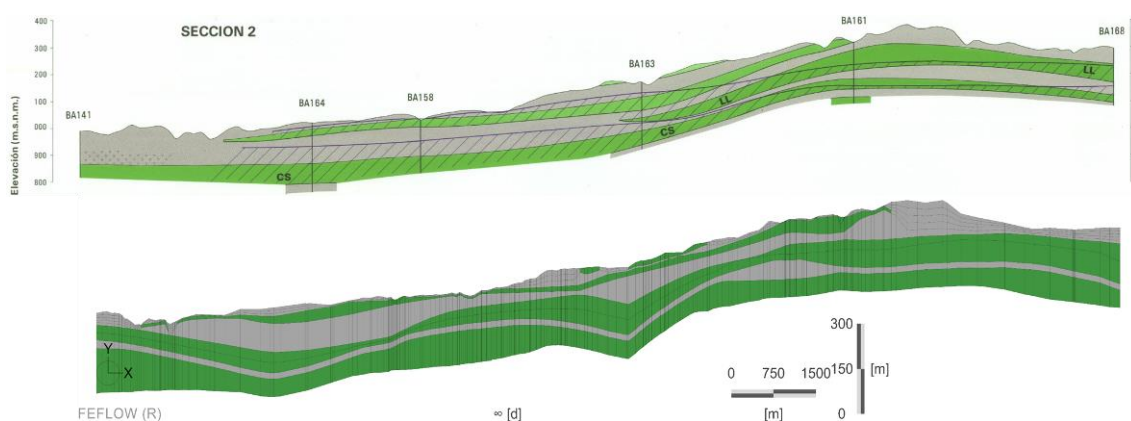


Figura 8 – Sección transversal Perfil BGS2 (modificado de BGS & SENARA, 1985) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

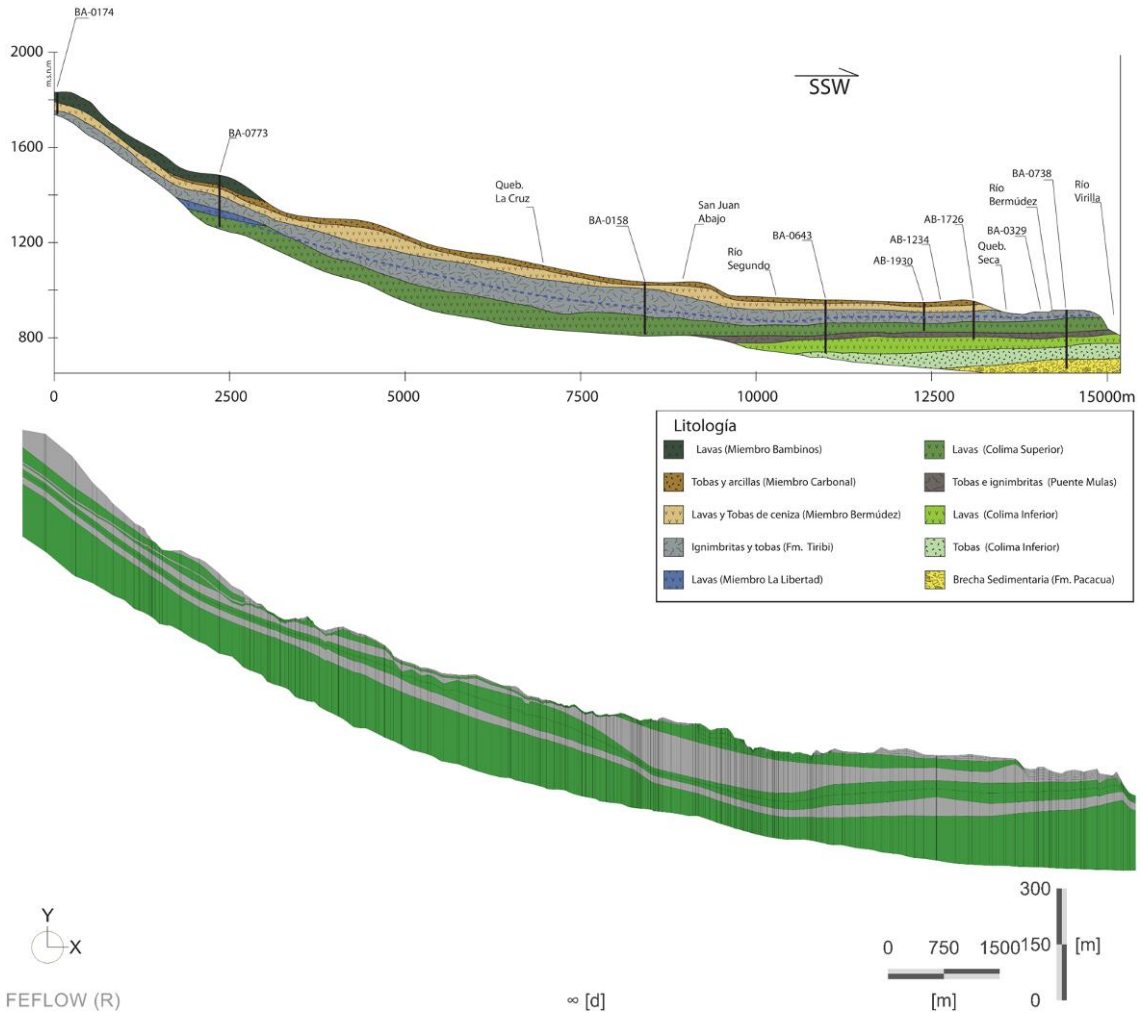


Figura 9 – Sección transversal Perfil P01 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 6 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

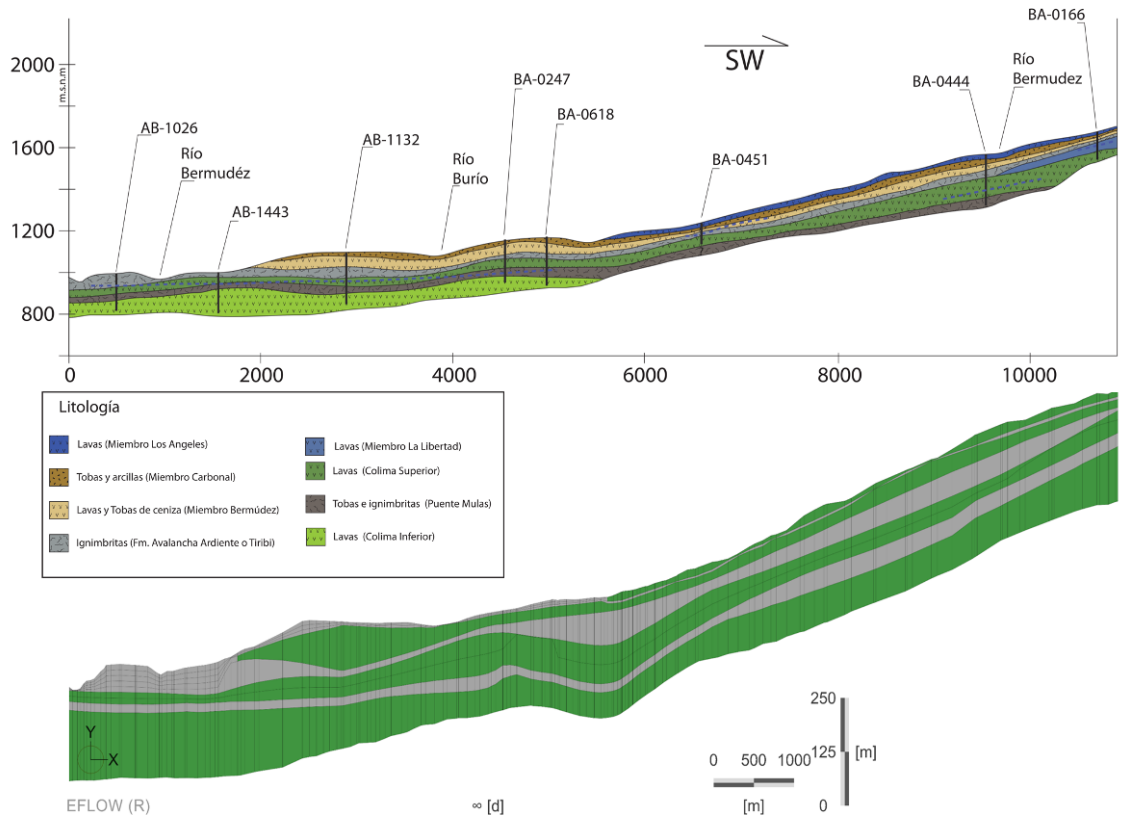


Figura 10 – Sección transversal Perfil P04 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

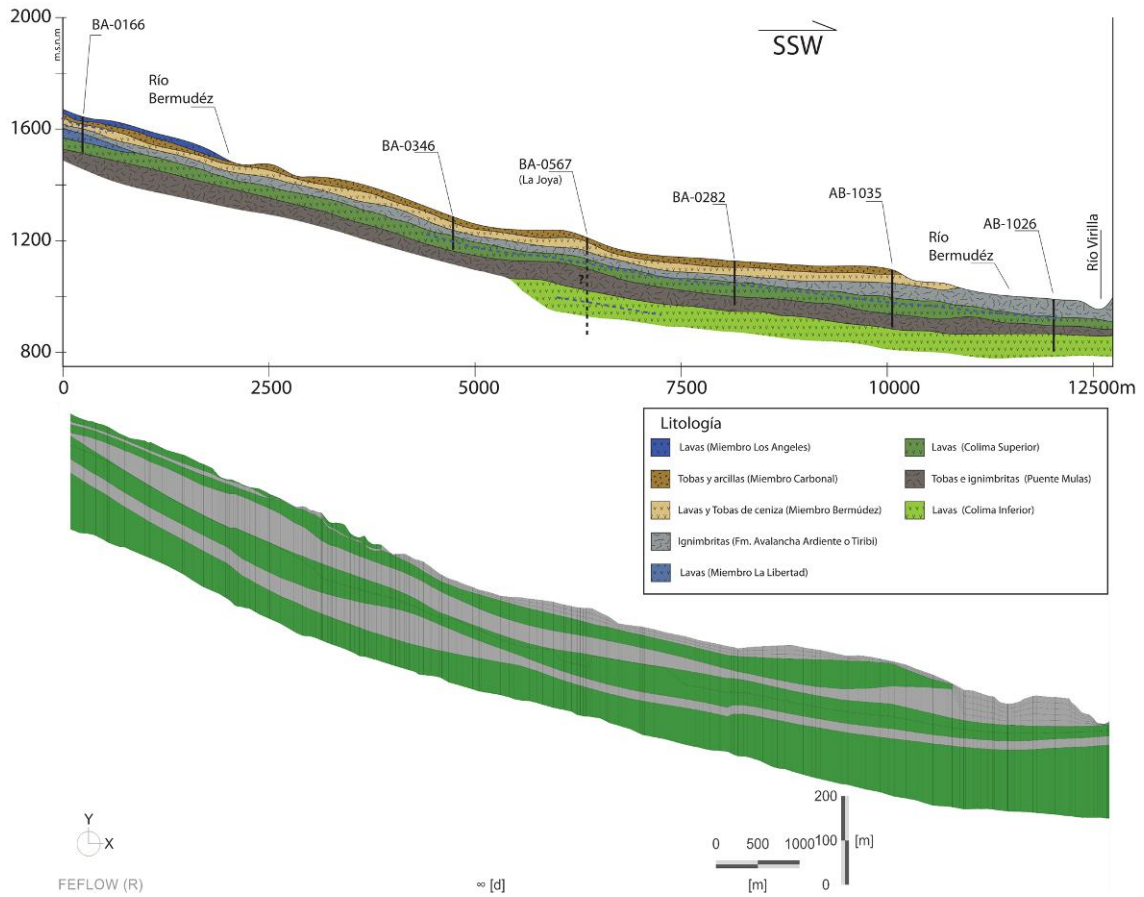


Figura 11 – Sección transversal Perfil P05 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

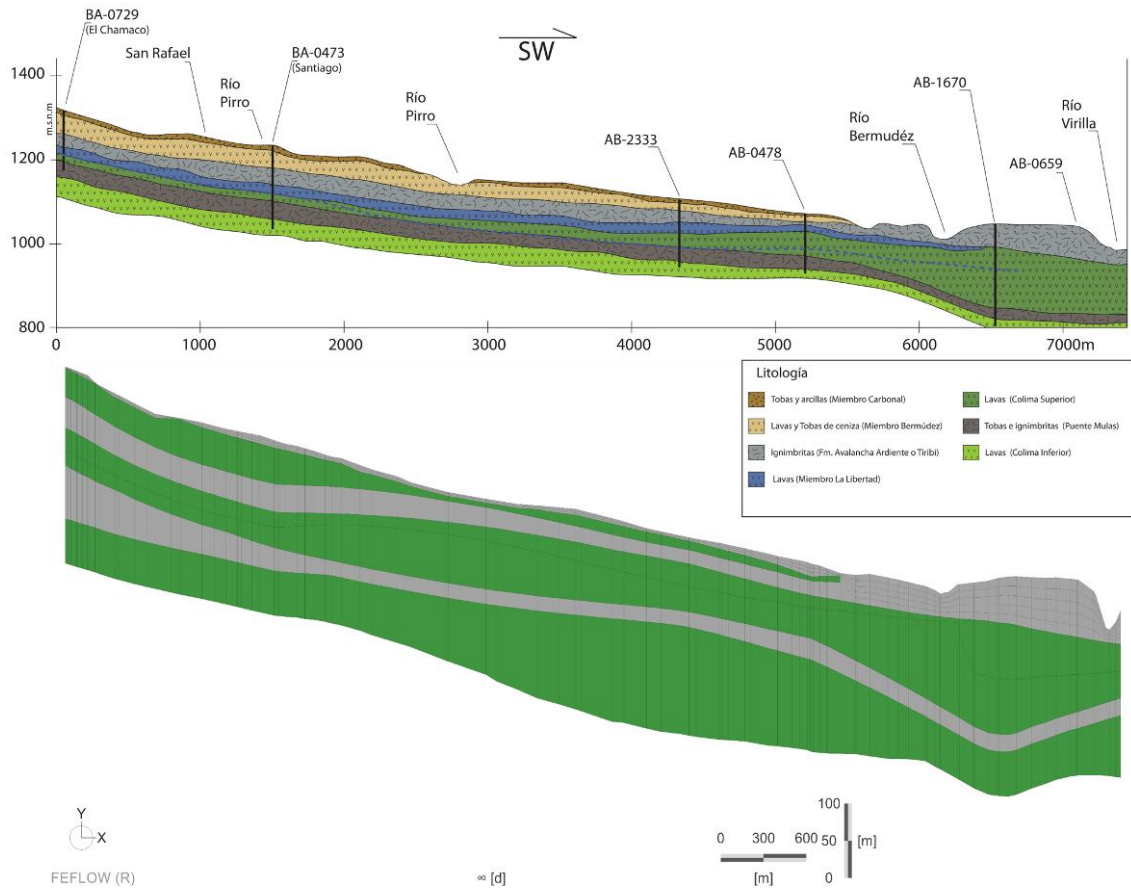


Figura 12 – Sección transversal Perfil P06 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

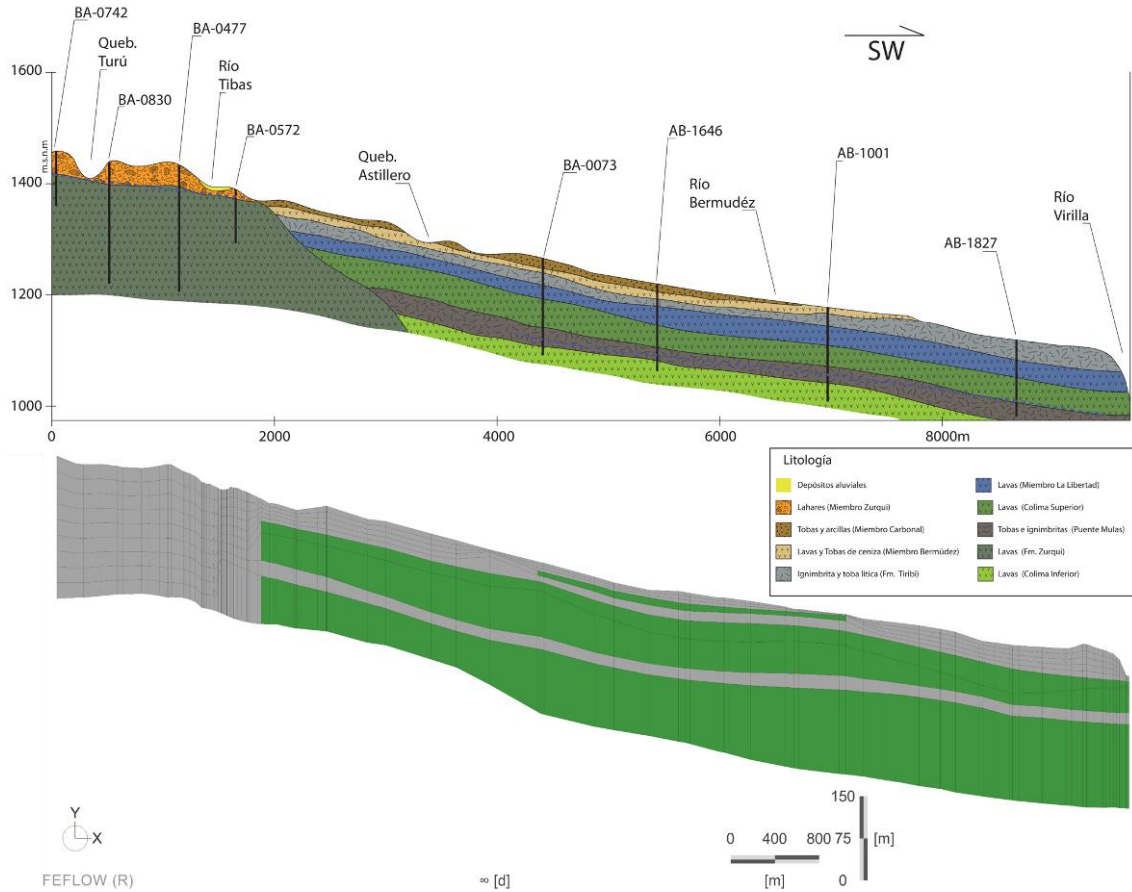


Figura 13 – Sección transversal Perfil P09 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

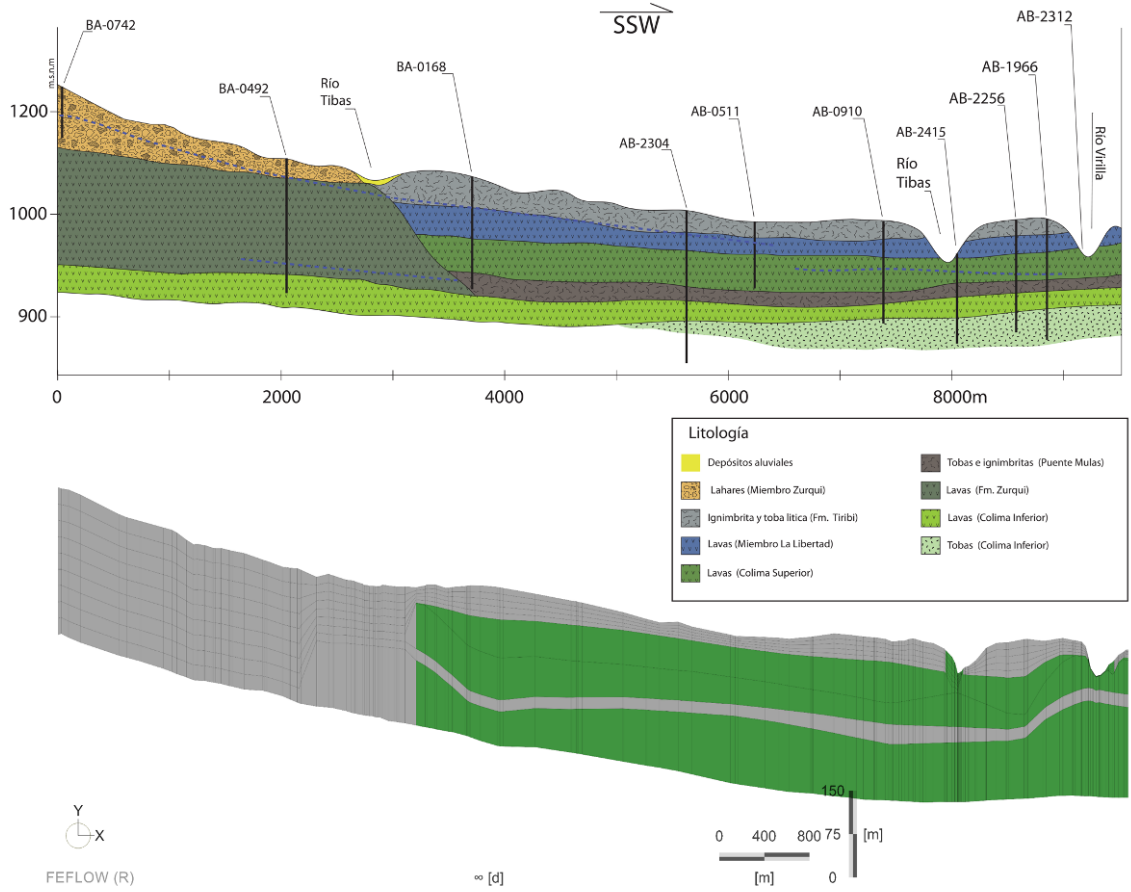


Figura 14 – Sección transversal Perfil P10 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

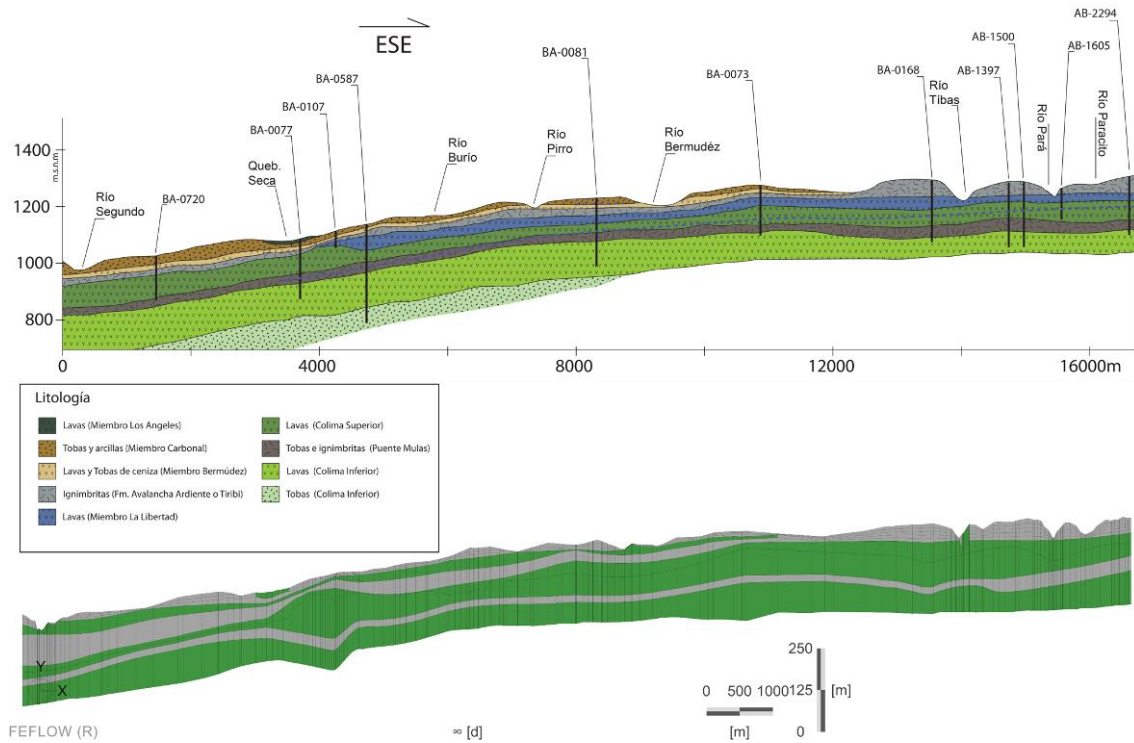


Figura 15 – Sección transversal Perfil P13 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva Sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

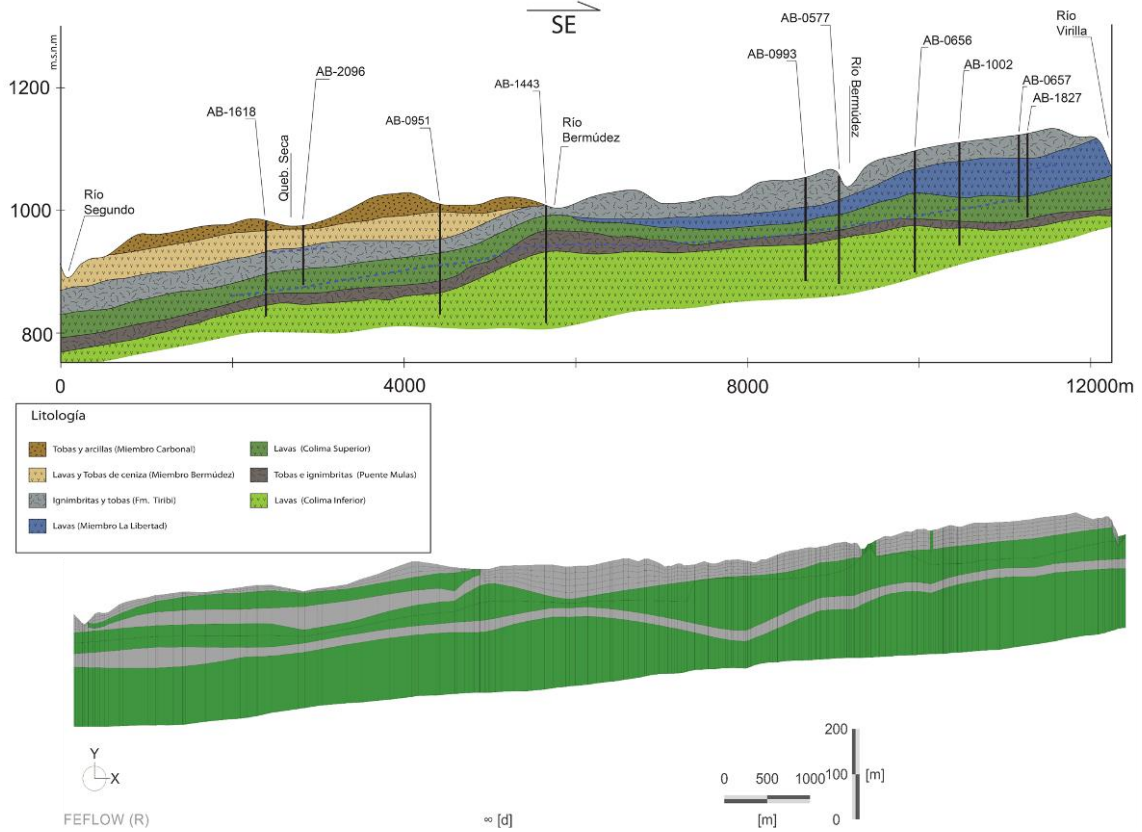


Figura 16 – Sección transversal Perfil P16 (Fernández, 2010) (arriba) cuya ubicación se presenta en la Figura 1 y respectiva sección transversal retirada de la red de elementos finitos elaborada en actual el presente informe (abajo).

En seguida, en la Figura 17 y Figura 18 se presentan vistas tridimensionales en perspectiva la red de elementos finitos, a partir de la cual se han extraído las secciones transversales representadas en las figuras anteriores.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

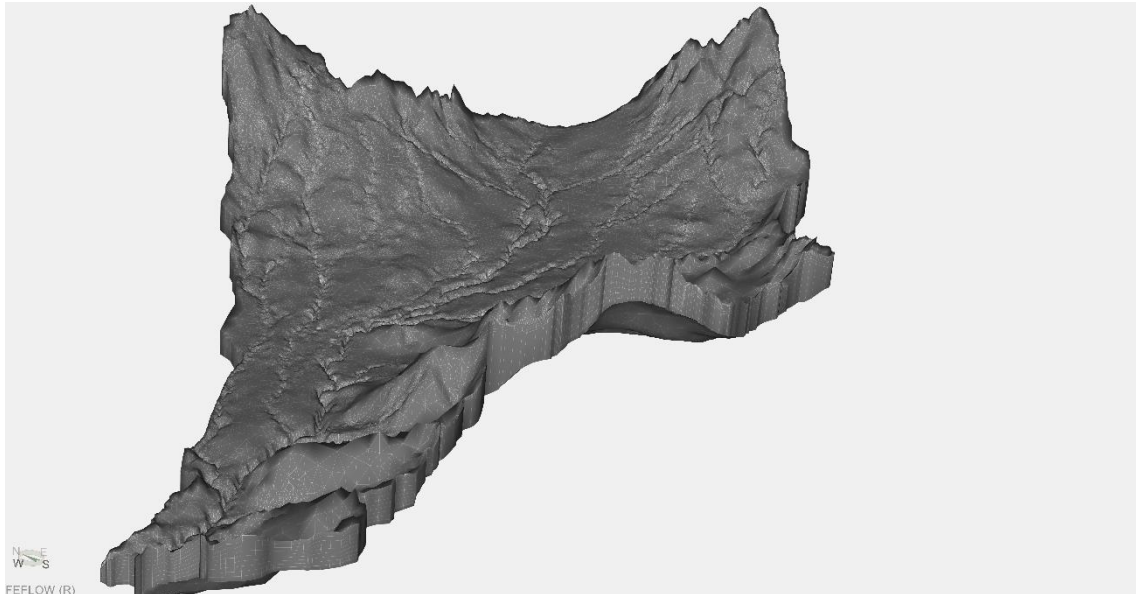


Figura 17 – Vista panorámica de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual.

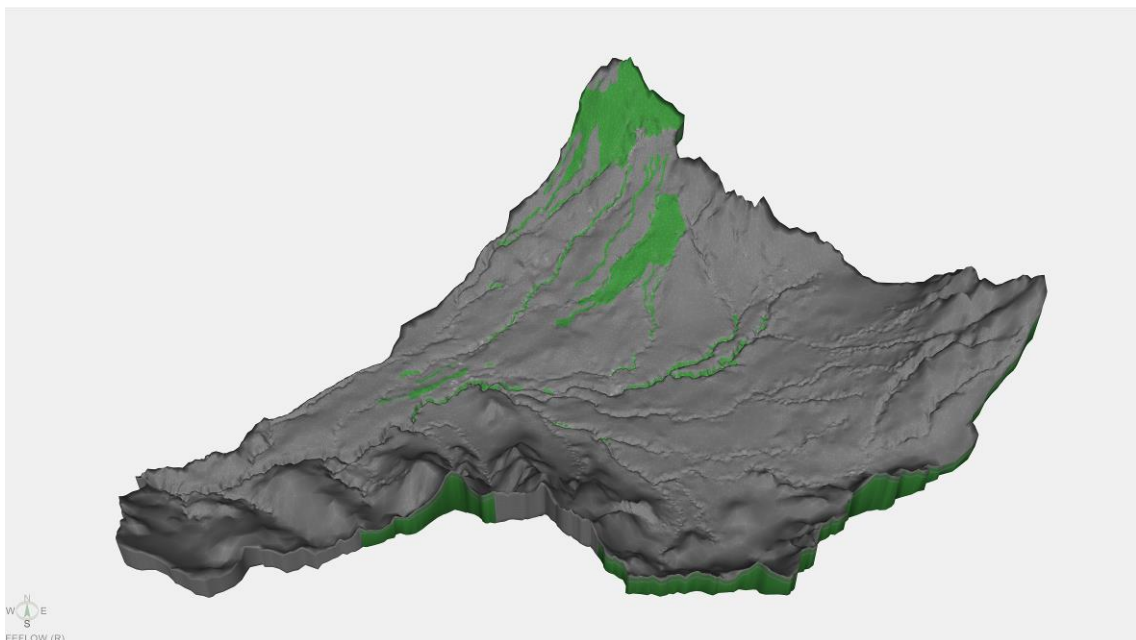


Figura 18 – Vista orientada a Norte de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con las formaciones acuíferas identificadas con color verde.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

3.2.2 Las condiciones en los límites

La definición de las condiciones de frontera es de grande importancia, bajo el punto de vista técnico y científico, para definir las direcciones regionales de flujo, ya que el movimiento del agua subterránea se verifica de las áreas de recarga hacia las salidas naturales (ríos y manantiales). De igual manera, son igualmente importantes bajo el punto de vista práctico para el análisis de la gestión de los recursos.

Para la ejecución del modelo presentado en esto trabajo se han impuesto tres tipos de condiciones de fronteras para representar a) las interacciones entre los ríos, b) los manantiales y c) los pozos de explotación públicos y privados, cuya localización se puede consultar en la Figura 19.

En lo que respecta a las interacciones entre los ríos, se impusieron condiciones de frontera de primero tipo 1 o Dirichlet sin cualquier restricción en los nodos de los ríos con potencial hidráulico igual a la elevación de la superficie terrestre y en la primera slice del modelo, de forma a permitir que el modelo y los parámetros definidos calculen las interacciones resultantes y los aforos resultantes de los ríos.

Los manantiales fueron representados por condiciones de frontera de tipo 1 o Dirichlet en los respectivos nodos, pero con restricciones para que su caudal sea siempre menor que cero, o sea, para que se comporten como puntos de salida de agua solamente. Se llama la atención al hecho de que muchos manantiales fueron impuestos en formaciones de acuitardos. Eso se debe a la baja resolución de la información geológica y a respectiva translación de los datos geológicos para el modelo o a la posible presencia de condiciones locales como fallas. Para compensar eso, las condiciones de frontera de los manantiales fueron impuestos en la respectiva slice del acuífero en el modelo con valor igual a la elevación de la superficie terrestre. Para la interpretación de las condiciones de ocurrencia de los tipos de manantiales presentes en el área de estudio es particularmente importante la contribución de Vargas (2002).

En todos los casos, sea para imposición de condiciones de frontera sea para para las medidas en el campo, todos los valores de potencial hidráulico se refieren a lo referencial “metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)”.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Los pozos son representados por condiciones de frontera de tipo 2 o Neuman con imposición de un flujo equivalente al caudal de explotación. Se identificaron 3 grupos de explotación, las bases de datos de los pozos públicos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S.A. (ESPHSA) y la base de datos de los pozos privados del ESPHSA, que han sido brindados por el SENARA. Los pozos públicos de AyA, fueran impuestos en el Colima Superior una vez que se supone que todos están explotando ese acuífero. La imposición de los pozos públicos de ESPHSA se basó en la profundidad de los pozos, brindada en la base de datos del organismo y han sido impuestos en el Colima Inferior, Colima Superior o Barva Inferior. Los pozos privados del ESPHSA fueran impuestos en la el Colima Superior y Barva Inferior debido a una adecuada falta de datos de profundidad.

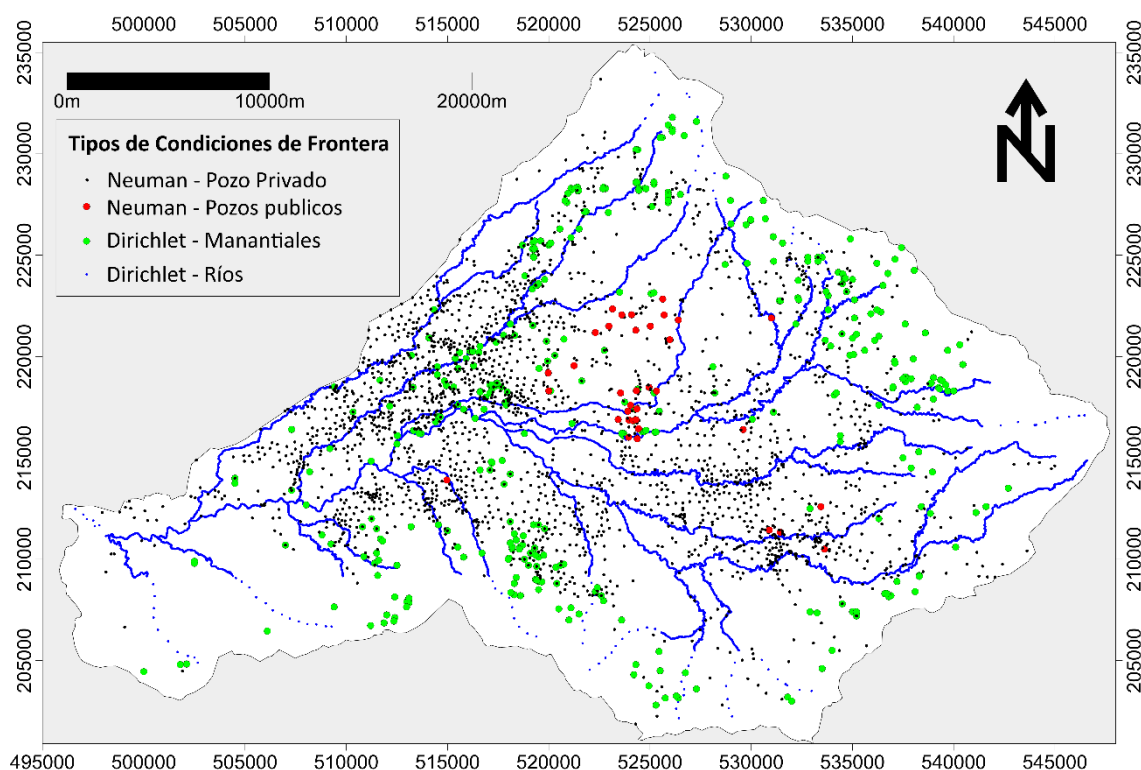


Figura 19 – Puntos utilizados para imposición de condiciones de frontera (ríos, manantiales y pozos de extracción), correspondientes a nodos en la red de elementos finitos del modelo numérico.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

3.2.3 Balance hídrico

El balance hídrico del modelo levanta una cuestión importante, que se refiere a la posibilidad de ocurrir o no recarga en las áreas urbanas provenientes de pérdidas en el sistema de abastecimiento de agua. Así, Se optó en este proyecto por definir y calibrar 2 modelos distintos, el modelo I en lo cual solo se considera la recarga natural de los acuíferos y el modelo II que, además de la recarga natural, considera también la recarga proveniente de las pérdidas del sistema de abastecimiento público.

Recarga natural

La investigación de la recarga del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central ha sufrido una evolución considerable desde las primeras contribuciones dedicadas al estudio regional de las aguas subterráneas anteriormente referenciados (Losilla et al., 1982; SENARA & BGS, 1988). Posteriormente a estas investigaciones de carácter más general fueran identificadas otras, más específicas especialmente dedicadas a la caracterización de la recarga e del balance hídrico de esta área de estudio (Ramírez, 2007; SENARA, 2008; Ramírez, 2015). En su trabajo sobre el estado actual de desarrollo del conocimiento sobre la hidrogeología del Valle Central, Soliz et al. (2012) hacen igualmente una síntesis sobre las contribuciones dedicadas a la caracterización de la recarga e del balance hídrico del área en estudio.

La recarga natural del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central hay sido descrita en detalle en el apartado 4.4.1 del informe 2 de este proyecto y hay sido definida en el modelo en función una recarga potencial neta anual basada en los afloramientos geológicos (Tabla 3). La recarga impuesta sobre los afloramientos de tobas (Tobas sobre Barva Superior y Tobas sobre Barva Inferior) han sido definidos con el valor de 296 mm/año, similarmente al valor de recarga de las Rocas volcánicas Terciarias. Estos valores de recarga neta han sido impuestos en el modelo numérico en el área que corresponde al techo del modelo.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 3 – Recarga neta potencial de las unidades geológicas (SENARA, 1980).

Formación	Recarga neta (mm/año)
Rocas volcánicas Terciarias	296,43
Formación Colima	886,96
Formación Tiribí	714,74
Formación Barva	1086,76
Complejo Volcánico Zurquí	840,96
Rocas Intrusivas	404,76
Rocas sedimentarias	440,53
Aluviones	608,31

Basado en las áreas de afloramiento de cada una de las unidades hidrogeológicas y la respectiva recarga neta anual, el modelo calcula la recarga total del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central que suma 18611 l/s, distribuidos como se presenta en la Figura 2 e en la Tabla 4.

Tabla 4 – Distribución espacial de recarga en mm/año y conversión de este valor para m³/s, considerando el área de cada formación en el modelo numérico del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central.

Unidad Hidrogeologica	Recarga (mm/año)	Área (km ²)	Recarga (m ³ /s)
Tobas (Barva Superior)	296	16	0,15
Barva Superior	1086.76	34	1,16
Tobas (Barva Inferior)	296	116	1,09
Barva Inferior	1086.76	10	0,35
Tiribi	714,74	601	13,61
La Libertad	886,96	4	0,1
Colima Superior	886,96	2	0,05
Zurquí	840,96	48	1,27
Terciario	296,43	87	0,82
Total	639,59	918	18.61

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Pérdidas urbanas

La expansión de las áreas urbanas resulta en numerosos impactos y alteraciones en el ciclo hidrológico e hidrogeológico, como es caso de las influencias en la infiltración y evapotranspiración, las pérdidas de las redes de distribución de agua que pueden contribuir para la recarga, y también impactos en la calidad del agua (McGrane, 2016). Así, se optó por realizar un análisis al efecto de las pérdidas de agua en la red de abastecimiento público urbano en el área de estudio.

En lo que hace respecto a las pérdidas urbanas Ramírez (2015) ha estimado las pérdidas urbanas proyectadas sobre la Gran Área Metropolitana en 2015 con base en la población residente (3057405 habitantes), la dotación de 300 litros por día por persona y un porcentaje de pérdidas de agua en la red de agua potable de 20%, según información brindada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2008). Así, se considera que hay una recarga artificial proveniente de las pérdidas urbanas de 2123,2 litros por segundo, que deberán ser contabilizadas en el área urbana respectiva en el modelo numérico. La inclusión de las pérdidas urbanas resulta en una recarga total anual de 20580 l/s en Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central

Las pérdidas urbanas han sido distribuidas en las áreas urbanas identificadas en la Cuenca del Valle Central, con base en la ocupación del suelo incluida en el Atlas de Costa Rica (2004), cuya área es de 125.14 km² y fueran impuestas como recarga adicional en el Modelo II, además de la recarga natural (Figura 20).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

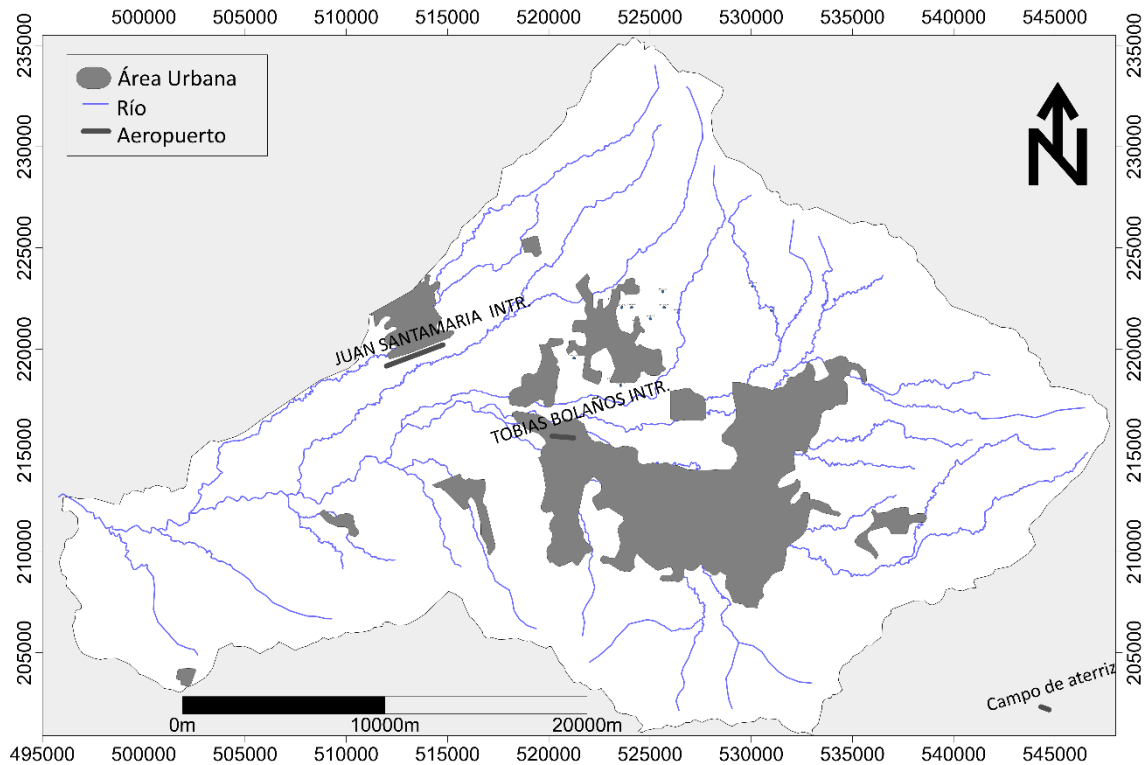


Figura 20 – Distribución del área urbana en el área de estudio basado en la ocupación del suelo incluida en el Atlas de Costa Rica (2004).

Salidas naturales y explotación del recurso

Los caudales de pozos de explotación del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central han sido determinados de acuerdo con las bases de datos de manantiales y de las explotaciones en pozos públicos y privados brindadas por el AyA y ESPSHA para los cuales los datos de caudales y ubicación están identificados.

Ramírez (2015) ha determinado un valor total de explotación y manantiales de los acuíferos Colima y Barba con base en los datos del SENARA que suman un total de 10326 l/s. De estos, se estima que 4837 l/s sean referentes a manantiales, basado en las bases de datos de concesiones del ESPSHA. Los datos de explotación para abastecimiento público de que hay conocimiento en las bases de datos del AyA y ESPSHA suman un total de 1375 l/s. Así, al substrair los valores de caudal de los manantiales y las explotaciones públicas al valor de explotación total referido por

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Ramírez (2015), se queda con un caudal de 4114 l/s que se considera corresponder a la extracción de agua subterránea en los pozos privados ubicados en el área de estudio, cuya base de datos y localización hay sido presentada previamente en el mapa de la Figura 19.

Se llama la atención para que, de acuerdo con los elementos más recientes obtenidos por el equipo del proyecto durante las citas con SENARA en Noviembre de 2016, los valores de explotación pública en la Cuenca del Virilla conocidos son más elevados do que los registrados en la base de datos disponible y corresponden a un caudal de, aproximadamente, 900 l/s para la ESPHSA, 2500 l/s para AyA y 300 l/s para la Municipalidad de Santo Domingo, lo que suma un total de 3700 l/s. Estos valores son por tanto más elevados de los que están registrados en la base de datos de AyA y de ESPHSA, en las cuales las informaciones disponibles de caudal suman un total de 1375 l/s, de los cuales 380 l/s se refieren a pozos del ESPHSA y 995 l/s a pozos del AyA y cuya ubicación se presenta en el mapa de la Figura 19.

Las variables de balance hídrico impuestas en los modelos desarrollados fueran la Recarga directa (Infiltración), la recarga proveniente del retorno las pérdidas urbanas, la explotación de los pozos públicos y privados cuyos valores se encuentran en la Tabla 5. Las salidas y entradas de agua en los manantiales y los ríos san calculadas por el modelo de acuerdo con las diferentes variables de estado impuestas en el modelo.

Tabla 5 – Valores del balance hídrico impuestos en el modelo

Variante	Recarga directa (l/s)	Recarga pérdidas urbanas (l/s)	Pozos públicos (l/s)	Pozos privados (l/s)
Modelo I (sin retorno de pérdidas urbanas)	18611	0	-1375	-4114
Modelo II (con retorno de pérdidas urbanas)	18611	2132	-1375	-4114

Es interesante analizar los datos existentes con diferentes orígenes a respecto de extracciones y descarga de manantiales presentados en la Tabla 6.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 6 –Datos de extracciones y descarga de manantiales obtenidos en diferentes instituciones y en el ámbito del presente proyecto.

INSTITUCION	EXTRACCIÓN	DESCARGA MANANTIALES	RECARGA	RETORNO
SENARA (2016)	9461,69 *	1793,00*		
DIRECCIÓN DE AGUA-MIANE	3250,36 **			
ESPH S.A.	5500,00 ***			
NEMUS	5479,70 ****	4991,40 ****	18611,00 ****	2113,20

*Este dato, se generó de la Base de Datos del SENARA, donde se contabiliza la extracción solicitada en el permiso de perforación, con el inconveniente de no poder corroborar si el caudal fue otorgado. En el caso de la Base de Datos de los manantiales (SENARA) son definidos no por concesión sino por el aforo (medición de caudal puntual, en espacio y tiempo) promedio.

** Este dato se basa en la Base de Datos de la Dirección de Agua-MINAE, solo concesiones de pozos y manantiales, no contempla aguas para fuerza hidráulica.

*** Este dato fue proporcionado por el Geólogo Franz Ulloa de la Empresa de Servicio Públicos de Heredia Sociedad Anónima. Dónde: A y A y ASADAS = 3000 litros por segundo, Municipalidad de Barva, Santo Domingo, Alajuela, Barva = 1600 litros por segundo y de la ESPH S.-A. = 900 litros por segundo. Esta información está basada en Charla: Estudios Técnicos para la Perforación de Pozos de la E.S.P.H S.A. 17 noviembre 2016.

****NEMUS, según la modelación matemática de los acuíferos multicapa.

Los datos presentados Tabla 6. Muestran que a pesar de existieren problemas de registro, las diferencias de los datos con diferentes orígenes dan testimonio de la necesidad de definir medidas para plantear soluciones integrales como: control de la perforación, macromedición y otras soluciones en la subcuenca del Virilla.

Como se puede verificar a lo largo de este informe, para el modelo se utilizó totalmente la base de datos de SENARA hasta este momento y sin embargo algunas simulaciones pueden o no utilizarse todos los pozos, dependiendo del tipo de escenarios considerados.

3.2.4 Descripción de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo

En su trabajo, Ramírez (2015) refiere valores de parámetros hidráulicos de las formaciones Barva y Colima. Para la formación Barva se refiere una transmisividad de 100 a 500 m²/día, permeabilidad de 1 a 10 m/día con un espesor promedio de 50 m y un coeficiente de

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

almacenamiento de 0,1 (Gómez, 1987). En lo que respecta a las formaciones de Colima las transmisividades varían entre 500 y 5000 m²/día con un espesor saturado superior a 100 m y el coeficiente de almacenamiento a variar entre $1,5 \times 10^{-3}$ a 0,1 (Alfaro et al., 2002).

Estos valores han sido utilizados como referencia (valores iniciales) para la calibración de los modelos definidos en este proyecto.

3.2.5 Distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado

Distribución espacial de la piezometría

La definición de puntos de observación piezométrica es una importante etapa en esto trabajo, de particular importancia para la calibración y validación de los parámetros del modelo de flujo. Por eso, se hay preparado una base de datos consolidada de observaciones piezométricas en la cuenca del Valle Central.

Los datos de medición de niveles piezométricos disponibles provienen de varias fuentes, en particular la base de datos de los pozos del AyA, la cual incluye los niveles de pozos del AyA entre 2010 y 2016, los datos de niveles de los pozos del ESPHSA y la base de datos de pozos privados utilizada en el informe Fernández (2010) del ESPHSA, que han sido brindados por el SENARA. Sin embargo, los datos de niveles piezométricos de los pozos en la cuenca del Virilla son dispersos espacial y temporalmente y muchos de los puntos de observación disponibles no tienen información de la profundidad del pozo o de que acuífero se refieren los niveles medidos. Es importante referir que en que lo respecta a la piezometría observada, los puntos de observación consisten en pozos de extracción de agua subterránea y no consisten en piezómetros perfectos. También es importante referir que en la base de datos de extracciones privadas del Senara no hay información respectivamente a la data en que se hay hecho la medición y que no existe información acerca de la profundidad del pozo o a que acuífero se refiere la medición.

Además de los puntos de observación que dicen respecto a los pozos, se hay añadido los manantiales y respectiva elevación como un punto de observación piezométrica y parámetro de calibración.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Al total, el número de observaciones piezométricas utilizadas en el modelo (incluyendo los manantiales y observaciones piezométricas en pozos) es de 991, de los cuales 491 son observaciones piezométricas de pozos y 500 son manantiales. De las 491 observaciones correspondientes a pozos, 51 pertenecen a pozos públicos del AyA, 22 se refieren a pozos públicos del ESPHSA y las restantes 481 consisten en observaciones piezométricas en pozos privados del ESPHSA.

Para la definición de los puntos de observación del modelo de flujo se hay considerado que los puntos de observación piezométrica correspondientes a los pozos del AyA están instalados en el Colima Superior. Así, para el modelo de flujo, estos han sido definidos como puntos de observación en el “slice” correspondiente al techo del Colima Superior. Los pozos de la base de datos de pozos públicos del ESPHSA incluyen los valores de profundidad, así, en el modelo de flujo, estos han sido definidos como puntos de observación piezométrica y su localización vertical hay sido impuesta de acuerdo con su profundidad. Sin embargo, la imposición de la profundidad del pozo como posición vertical en el modelo hay resultado que algunos de esos puntos sean observaciones del acuitardo Puente de Mulas, pero lo más probable es que estos sean captaciones o del Colima Superior o del Colima Inferior. Así, basado en esta incertidumbre, esos puntos de observación cuya posición vertical incida en la formación del acuitardo Puente de Mulas en el modelo numérico han sido trasladados para la formación Colima Inferior, lo que resulta que estos puntos han sido distribuidos en las slices correspondientes al Barva Inferior, Colima Superior y Colima Inferior. Los pozos privados de la base de datos del ESPHSA han sido impuestos en las slices correspondientes al Colima Superior, La Libertad y Barva Inferior debido a falta de información más detallada.

La ubicación de los manantiales hay sido impuesta como punto de observación en la superficie del modelo, con valor piezométrico observado igual a la elevación del terreno según el Modelo Digital Terrestre. Se recuerda una vez más que todos los valores de altitud, incluyendo las condiciones de frontera de tipo 1 y observaciones piezométricas se refieren a lo referencial “metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)”.

Distribución temporal de la recarga

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Para la definición de un modelo numérico en régimen transitorio mensual o anual es necesario que existan datos de variación temporal de infiltración para la definición de las variables de estado del modelo y de piezometría que permitan la calibración y validación del modelo.

Los datos de cuyas estaciones pluviométricas se encontrar dentro del área de estudio con valores de precipitación mensual presentados por Fernández (2010) servirán de base para crear los datos de recarga mensual de los acuíferos del Valle Central. De estos datos 10 de las estaciones pluviométricas están localizadas en el área de estudio con una precipitación media anual de 2436 mm/año y la precipitación presentada en la Tabla 7.

Tabla 7 – Variación temporal de precipitación basado en las medias plurianuales mensuales presentadas en Fernández (2010).

Mes	Precipitación (mm)	% de precipitación anual
Enero	33,44	1,4%
Febrero	27,48	1,1%
Marzo	35,79	1,5%
Abril	97,24	4,0%
Mayo	326,63	13,4%
Junio	312,93	12,8%
Julio	221,19	9,1%
Agosto	287,41	11,8%
Septiembre	397,13	16,3%
Octubre	412,15	16,9%
Noviembre	206,65	8,5%
Diciembre	78,37	3,2%
Anual	2436,41	100,0%

Los datos de recarga anual presentados en la Tabla 4 fueran convertidos en recarga mensual basado en las porcentajes de precipitación anual presentadas en la Tabla 7 para cada una de las unidades geológicas que afloran en la superficie del modelo, cuyos datos pueden ser consultados en la Tabla 8 y la Figura 21.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 8 – Variación mensual de recarga en mm/año calculada para las diferentes geologías de afloramiento en el area de estudio.

	Tobas Barva Sup.	Barva Sup.	Tobas Barva Inf.	Barva Inf.	Tiribi	La Libertad	Colima Sup.	Zurqui	Terceario
Anual	296,0	1086,8	296,0	1086,8	714,7	887,0	887,0	841,0	296,4
Enero	4,1	14,9	4,1	14,9	9,8	12,2	12,2	11,5	4,1
Febrero	3,3	12,3	3,3	12,3	8,1	10,0	10,0	9,5	3,3
Marzo	4,3	16,0	4,3	16,0	10,5	13,0	13,0	12,4	4,4
Abril	11,8	43,4	11,8	43,4	28,5	35,4	35,4	33,6	11,8
Mayo	39,7	145,7	39,7	145,7	95,8	118,9	118,9	112,7	39,7
Junio	38,0	139,6	38,0	139,6	91,8	113,9	113,9	108,0	38,1
Julio	26,9	98,7	26,9	98,7	64,9	80,5	80,5	76,3	26,9
Agosto	34,9	128,2	34,9	128,2	84,3	104,6	104,6	99,2	35,0
Septiembre	48,2	177,1	48,2	177,1	116,5	144,6	144,6	137,1	48,3
Octubre	50,1	183,8	50,1	183,8	120,9	150,0	150,0	142,3	50,1
Noviembre	25,1	92,2	25,1	92,2	60,6	75,2	75,2	71,3	25,1
Diciembre	9,5	35,0	9,5	35,0	23,0	28,5	28,5	27,1	9,5

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

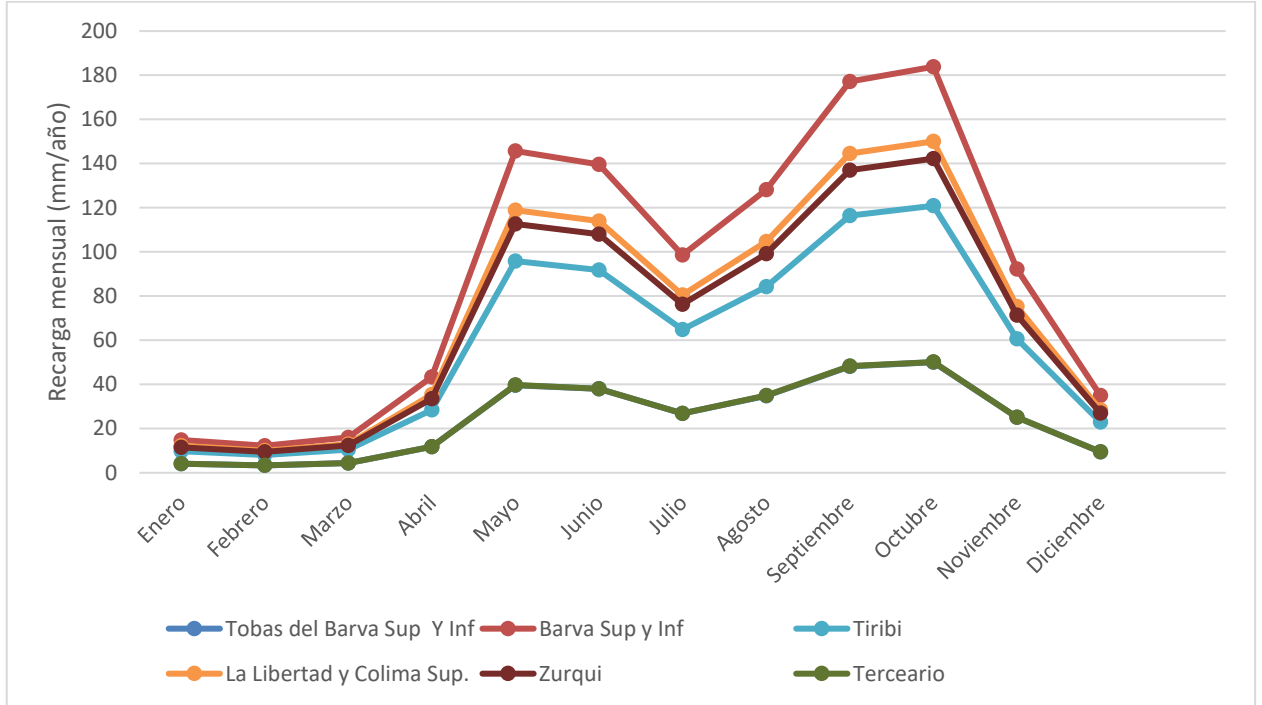


Figura 21 – Distribución temporal de la recarga en los acuífero del Valle Central discriminada por superficie de afloramiento geológico.

3.3 Implementación y desarrollo del Modelo

3.3.1 Análisis de coherencia entre el modelo conceptual y las condiciones de frontera impuestas en el modelo numérico

Después de finalizada la construcción de la red de elementos finitos, hecha la atribución de condiciones de frontera y la definidos los parámetros hidráulicos iniciales, se han construido las variantes iniciales del modelo, cuyos resultados se presentan en esto apartado. Una vez que se considera que el estadio actual del conocimiento sobre la geometría de las unidades hidroestratigráficas se encuentra reproducido en el modelo de la forma más completa posible la coherencia del modelo numérico con el modelo conceptual construido se basa en el impacto de las condiciones de frontera en la configuración regional de flujo, la influencia de las extracciones en esta misma configuración, y la distribución espacial y evolución temporal de las salidas de agua en los ríos y manantiales. No todas las simulaciones realizadas en esta etapa tienen la pretensión de representar el funcionamiento del “sistema real” de manera realista. Sin

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

embargo, este tipo de trabajo es relevante por el hecho que permite confirmar que el modelo no contiene errores bajo el punto de vista técnico de su construcción y por el hecho de permitir la evaluación de diferentes condiciones de frontera en la distribución de las variables de estado a lo largo del dominio de flujo.

Para la variante inicial del modelo se han definido condiciones de frontera del tipo 1 (Dirichlet) en todos los nodos del modelo correspondientes a los ríos en la superficie (slice 1), con valor igual a la cota de la superficie terrestre, expresada en “metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)”.

Para los pozos se definieran condiciones de frontera de tipo “well” (nomenclatura Feflow). En realidad, estos pozos funcionan de forma análoga a una condición de frontera de flujo impuesto (Neumann). Su ubicación ha sido definida donde se localizan los pozos de extracción.

A respecto del balance hídrico del modelo, se hay incorporado los datos de recarga de acuerdo con el balance hidrológico y recarga de acuíferos considerados en SENARA (2008), presentado en el apartado 4.4.1 del informe 2 del proyecto. Los parámetros hidráulicos asignados en estas variantes se basan en una calibración previa ejecutada a partir de los datos de conductividad descritas en el apartado 4.5 del informe 2 de esto proyecto.

El scatter plot entre la piezometría observada y la piezometría calculada para la variante inicial del modelo se presenta en la Figura 22, conjuntamente con el coeficiente de determinación R^2 y la ecuación de la recta de la regresión lineal del scatter plot. El error cuadrático medio de predicción (RMSE del inglés “Root Mean Square Error”) presentada por esta variante es de 136,36 metros. Como anteriormente referido esta se trata de una versión preliminar del modelo que ha sido empleado en la primera fase de pruebas y cuya calibración e validación se desarrolló como se posteriormente con la minimización de estos errores. Los 49 puntos de control piezométrico utilizados para la construcción del gráfico de la Figura 22 se representan en el mapa de la Figura 24 y corresponden a los datos obtenidos a partir de la base de datos de AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados). Se llama la atención para el hecho de que, en posteriores etapas de calibración y análisis de escenarios presentados posteriormente en este informe, el control de calidad de las simulaciones incluye puntos adicionales de piezometría que incluyen datos de manantiales y de pozos de ESPHSA (Empresa de Servicios

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Públicos de Heredia, S.A.), cuya base de datos ha sido brindada al equipo del proyecto por SENARA, posteriormente a los datos disponibles cuando se han hecho las simulaciones preliminares presentadas en este apartado.

Una de las mayores dificultades encontradas en las tareas de pre procesamiento de modelo ha consistido en el hecho de que las diferentes bases de datos iniciales no estaban relacionadas entre ellas y, muchas veces tenían la ubicación de los puntos, líneas y polígonos definidas en diferentes sistemas de coordenadas y proyecciones cartográficas que ha sido necesario compatibilizar. Se refiere a respecto de este tipo de trabajo que existen todavía tareas de este tipo en curso, aunque en este momento estas ya están perfectamente identificadas y distribuidas a diferentes miembros del equipo de trabajo y en fase de conclusión. Por ejemplo, los nuevos datos de AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados), obtenidos directamente de esta institución y de ESPHSA (Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S.A.), cuya base de datos ha sido brindada al equipo del proyecto por SENARA, incluyen datos de extracciones y de niveles que es necesario transformar en ficheros compatibles para input en el software de modelación. Esta tarea tiene que ser hecha individualmente para todos los pozos, lo que ya ha tenido un coste de centenas de horas de trabajo. Esta es la razón por la cual la calibración de las variantes presentadas en esto apartado es considerada preliminar, ya que la calidad de calibración automática depende en grande medida de todos estos datos. Sin embargo, la análisis de esta variante inicial es una etapa importante que permite verificar como se comporta el funcionamiento hidrogeológico del modelo en regla general y lo que es necesario cambiar, para aproximar el modelo de una solución más aproximada de la realidad.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

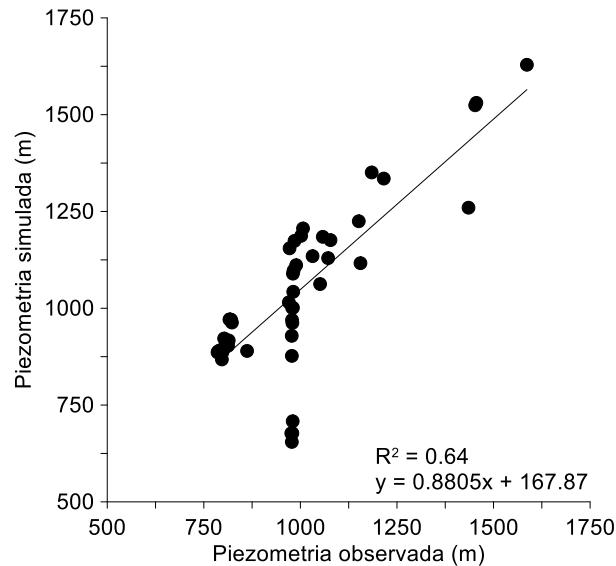


Figura 22 – “Scatter plot” entre la piezometría observada y la piezometría calculada por el modelo.

Como anteriormente referido los resultados de esta calibración se ha mejorado de forma importante como se describe, en la sección siguiente de este informe. Aunque los resultados presentados en el presente apartado sean de una variante calibrada solo preliminarmente del modelo, de seguida se presentan algunos de los resultados de la piezometría de esta variante preliminar.

En la Figura 23 y la Figura 24 se presenta la distribución piezométrica calculada por el modelo para la superficie del mismo y para la formación Colima Superior respectivamente. En estas figuras se puede verificar que el gradiente hidráulico se desarrolla de las principales zonas de recarga, a Norte y a Este y que el flujo direcciona a Oeste, replicando así la piezometría observada de una forma razonable.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

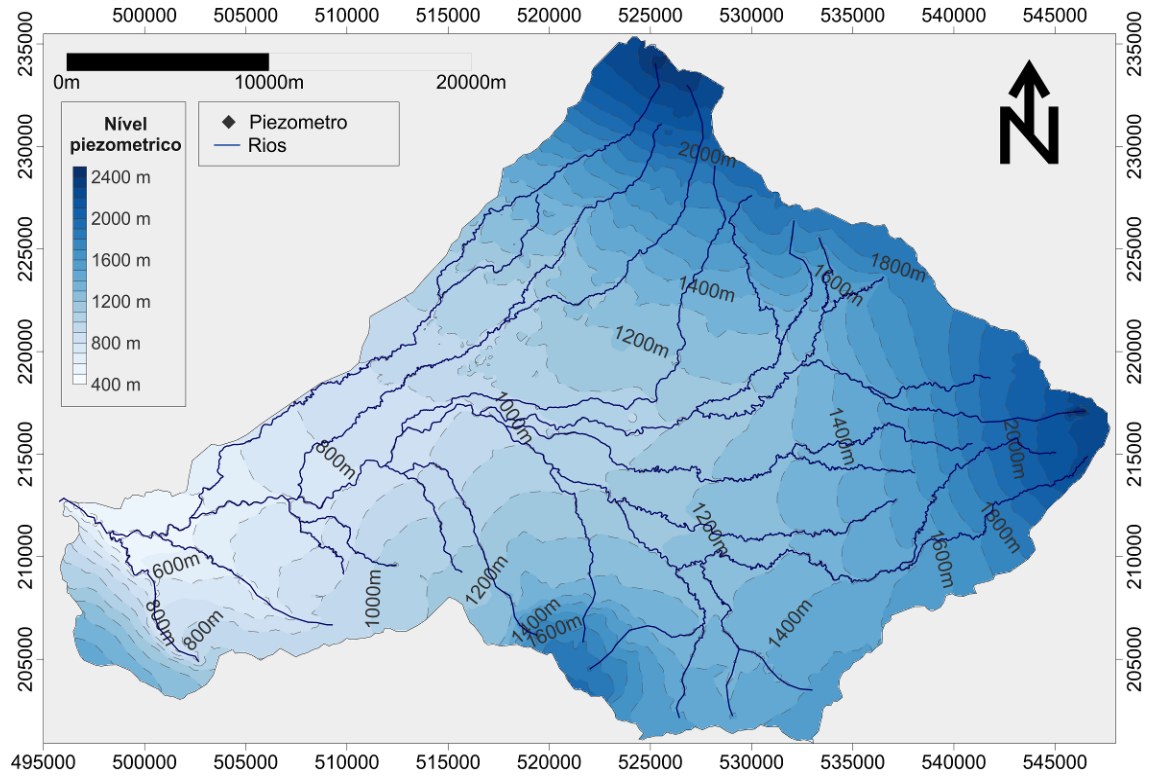


Figura 23 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. de la “slice” correspondiente à la superficie de la variante inicial del modelo.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

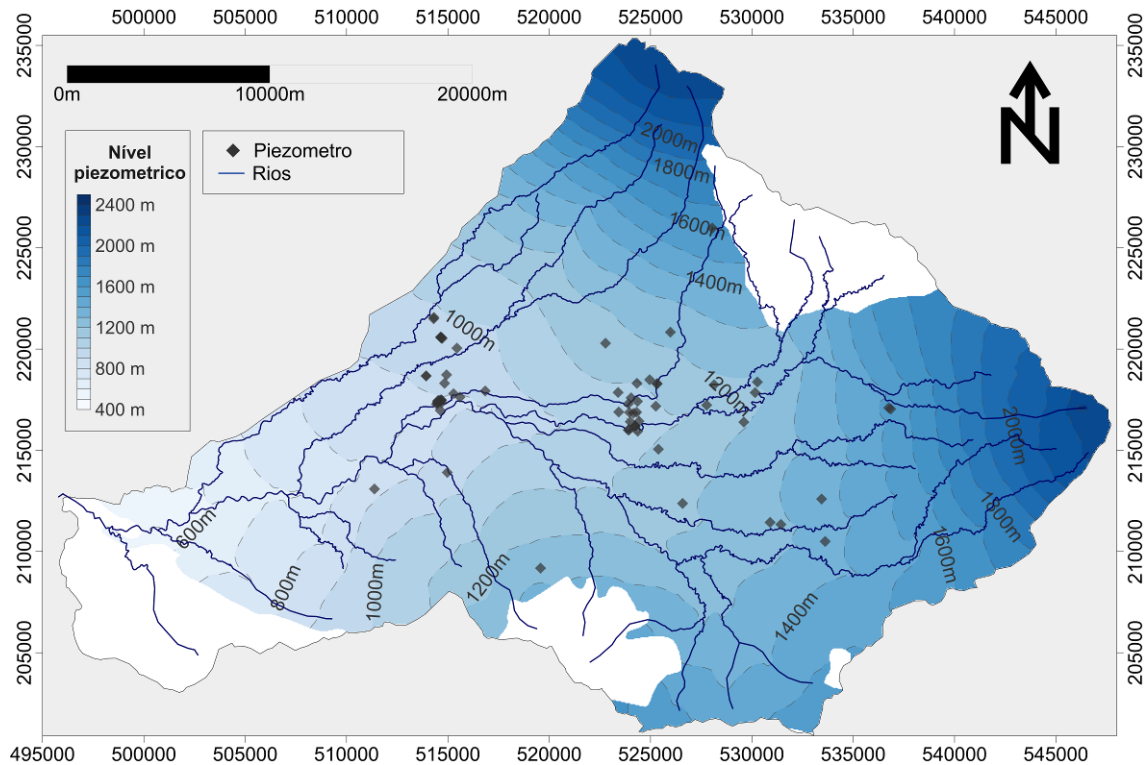


Figura 24 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. del “slice” siete, correspondiente a la formación Colima Superior de la variante inicial del modelo.

De forma a verificar la calidad del modelo se ha hecho una simulación preliminar con potencial impuesto correspondiente a la elevación m.s.n.m. de los nudos del modelo correspondientes a la ubicación de los ríos. Esta representación es una simplificación poco realista por suponer que todos de la red hidrográfica se encuentran en conexión directa con la zona saturada que así son obligados a corresponder a puntos de recarga y descarga proveniente de los ríos en el modelo. Se presentan en la Figura 25 los nodos respectivos a los ríos conforme su comportamiento influente (azul) y efluente (rojo) y respectiva escala de caudal. Así, los principales nodos de los ríos con comportamiento influente, o sea, en los cuales hay recarga, se localizan en la zona Norte y Oeste. En las restantes zonas, la mayoría de los trozos de ríos presentan comportamiento efluente, lo que consiste en zonas de descarga del modelo.

Esta simulación no pretende representar una imagen realista de los tipos de relación río acuífero. Se trata simplemente de una simulación preliminar, en la cual se hicieran funcionar todos los ríos en la cuenca del Virilla a partir de la imposición de valores de potencial hidráulico,

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

o sea, condiciones de frontera de tipo “Dirichlet”. Este tipo de condición de frontera no es necesariamente adecuado para todos los ríos en toda la extensión del valle, una vez que hay seguramente locales con diferentes tipos de conectividad entre aguas subterráneas y superficiales. Se repite que estas versiones preliminares del modelo corresponden a pruebas hechas para confirmar que el modelo se encuentra implementado de manera técnicamente correcta y corresponden al inicio del proceso de calibración que, mientras tanto ya ha evolucionado bastante y se presenta más adelante en este informe. De todas maneras se incluye ya la información existente sobre la localización de las áreas efluentes (áreas donde el agua descarga del acuífero al río) e influentes (áreas donde el río contribuye para la recarga del acuífero) cuya identificación ha sido hecha a partir de aforos diferenciales hechos en los ríos Turales, Bermúdez y Mancarrón en un total de 22 secciones mensualmente durante 12 meses. (Figura 26).

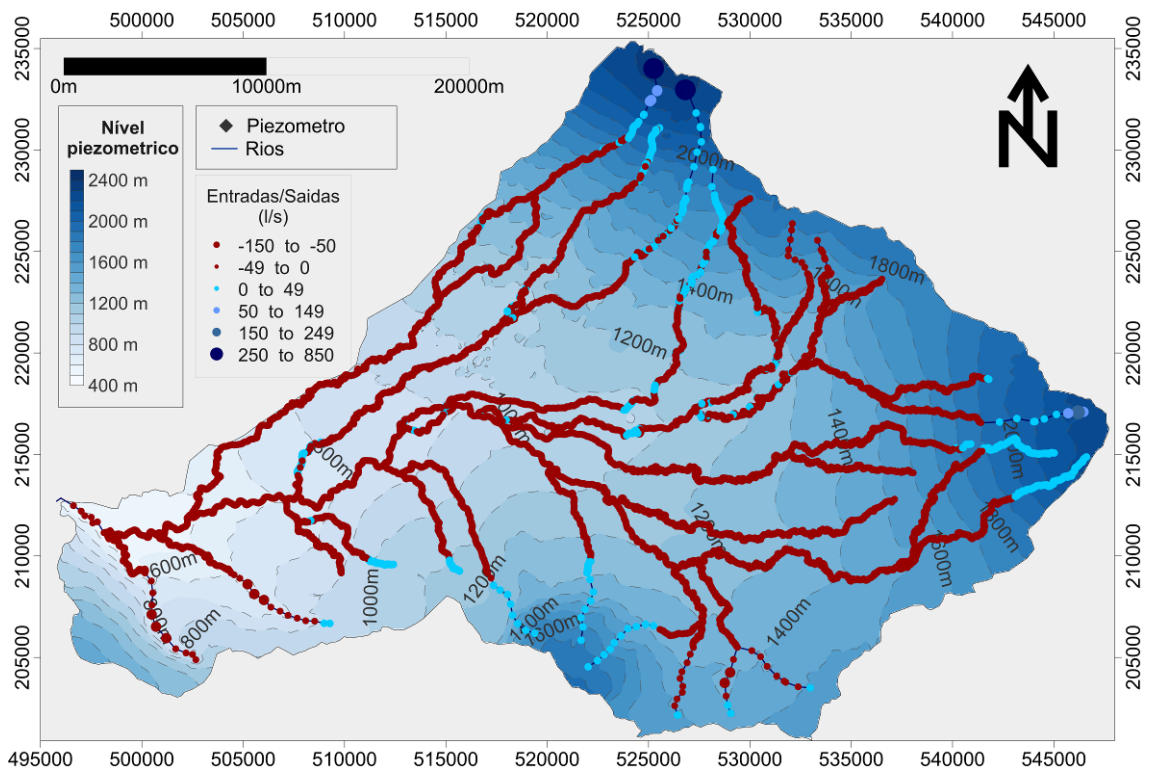


Figura 25 – Mapa de isopiezas en m.s.n.m. de la superficies de la variante inicial del modelo, conjuntamente con los nodos influentes (azul) y efluentes (rojo) de los ríos y respectivo caudal.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

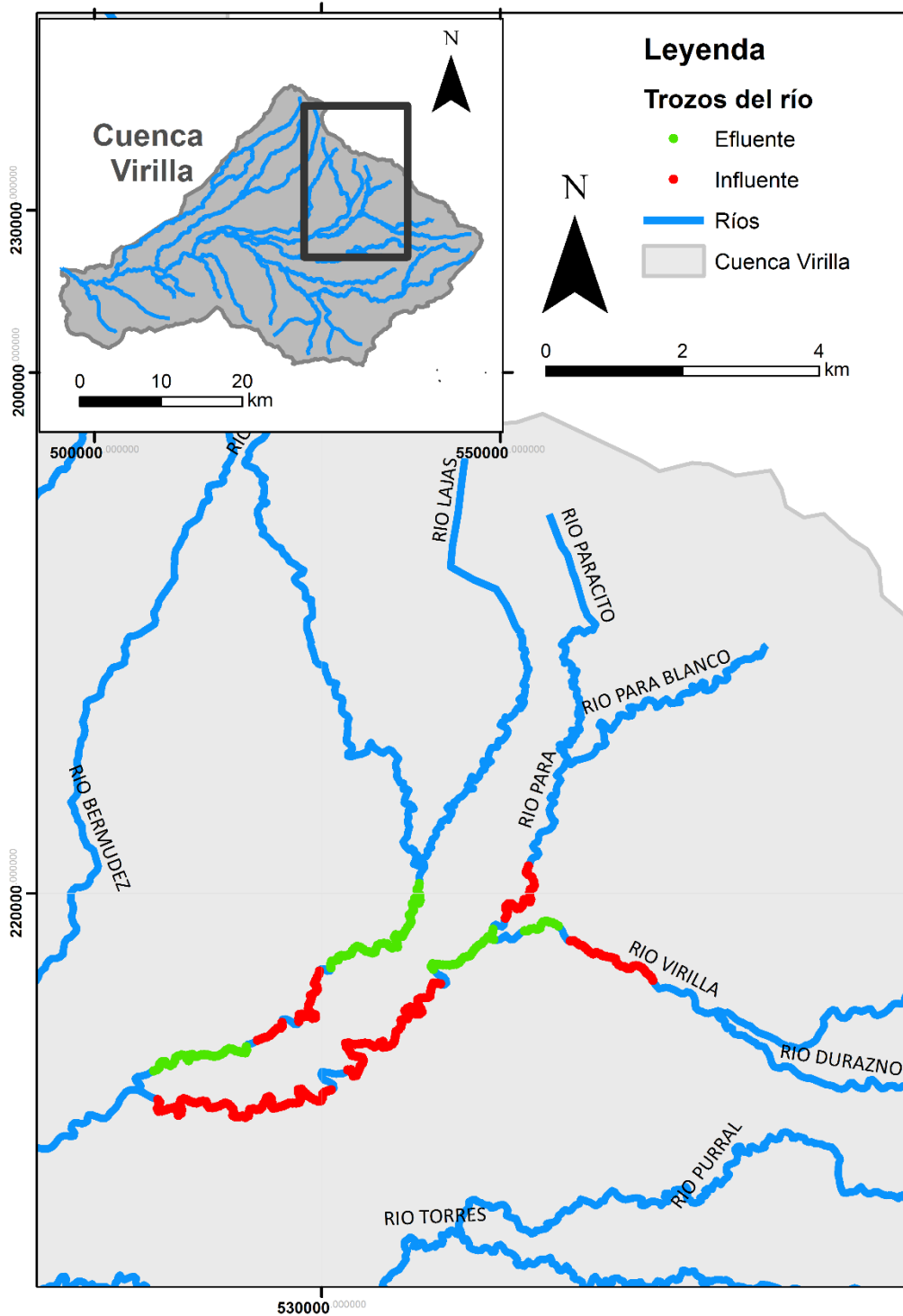


Figura 26 – Aforos diferenciales identificados en la cuenca del Valle Central (Elaboración propia basada en información brindada en Losilla et al., 1982 y Ramírez, 2015)

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Una de las variantes intentadas de particular interés es una simulación en la cual se incluirán las condiciones de frontera en los manantiales. Este ensayo ha permitido verificar el impacto de los manantiales en la distribución piezométrica de esta variante inicial del modelo. El resultado de este ensayo se exhibe en la Figura 27, en la cual se presenta el residuo piezométrico entre el modelo sin y con condiciones de fronteras en los manantiales.

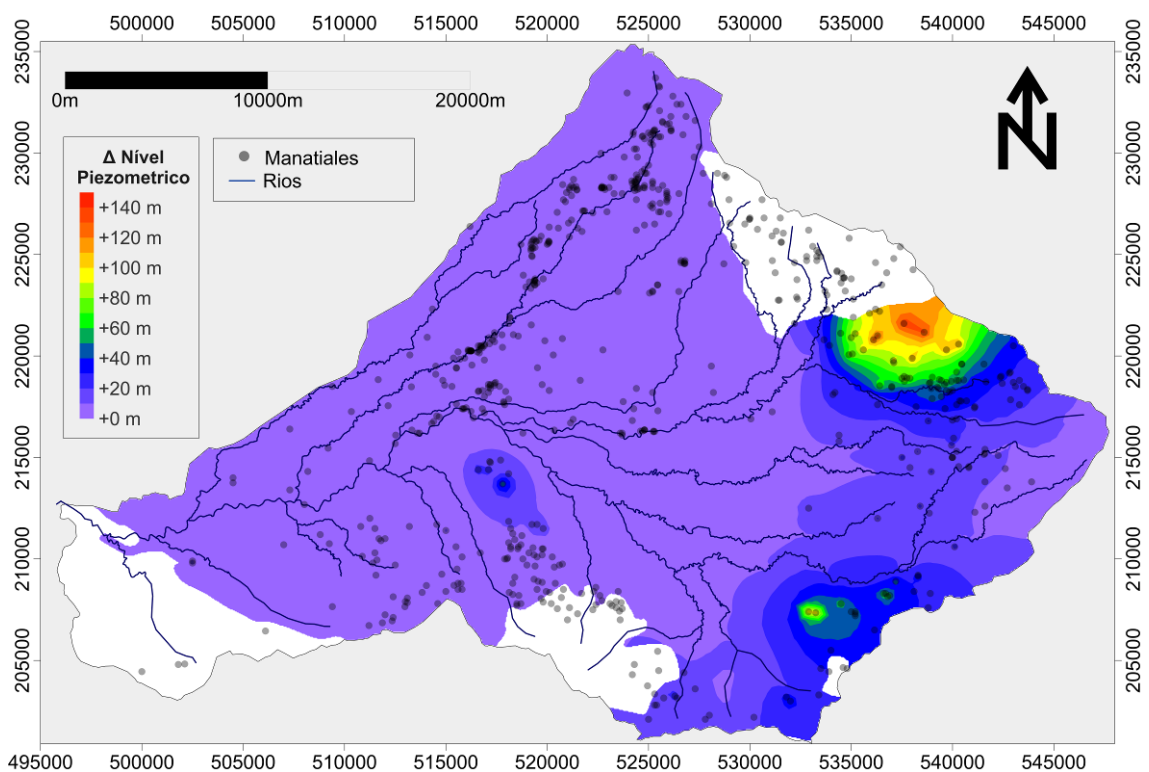


Figura 27 – Residuo piezométrico del modelo sin y con condiciones de frontera en los manantiales para el slice siete, que representa la formación Colima Superior.

El análisis preliminar presentado provee una idea general del efecto de los manantiales en la distribución espacial de la piezometría del sistema. Como es posible verificar en la Figura 27, hay tres zonas fuertemente afectadas por el funcionamiento de los manantiales en el Colima Superior, que dicen respecto a las zonas con los manantiales más importantes que drenan agua de esta formación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

En la Figura 28 y Figura 29 se presenta la distribución piezométrica calculada por la variante inicial del modelo en perspectivas tridimensionales de la red de elementos finitos.

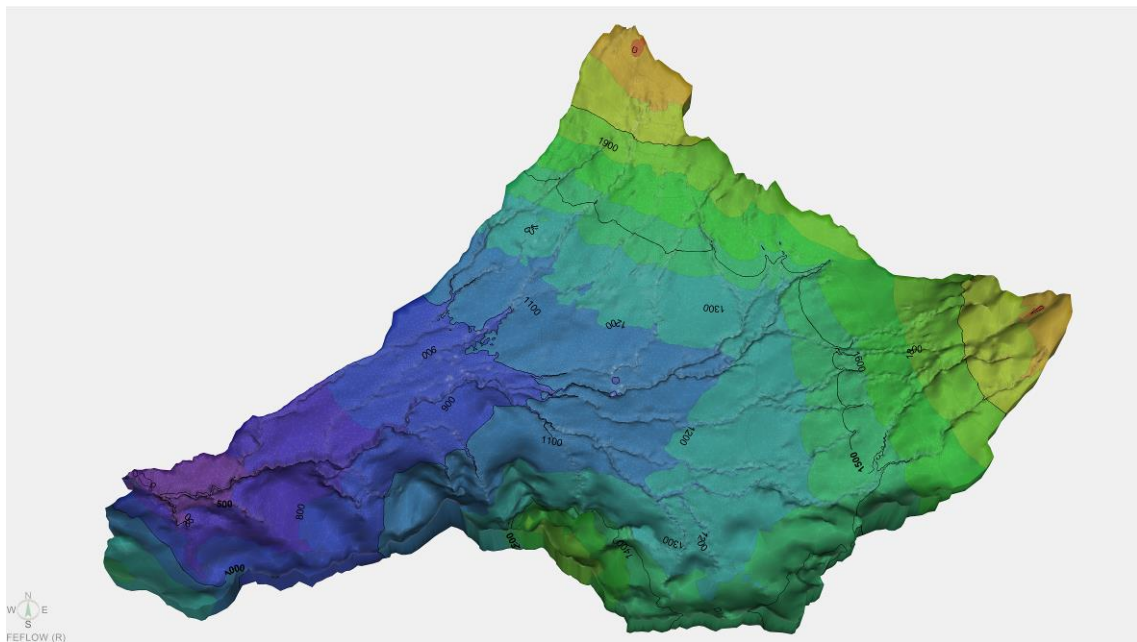


Figura 28 –Vista orientada a Norte de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con la representación de la piezometría calculada por la variante inicial del modelo.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

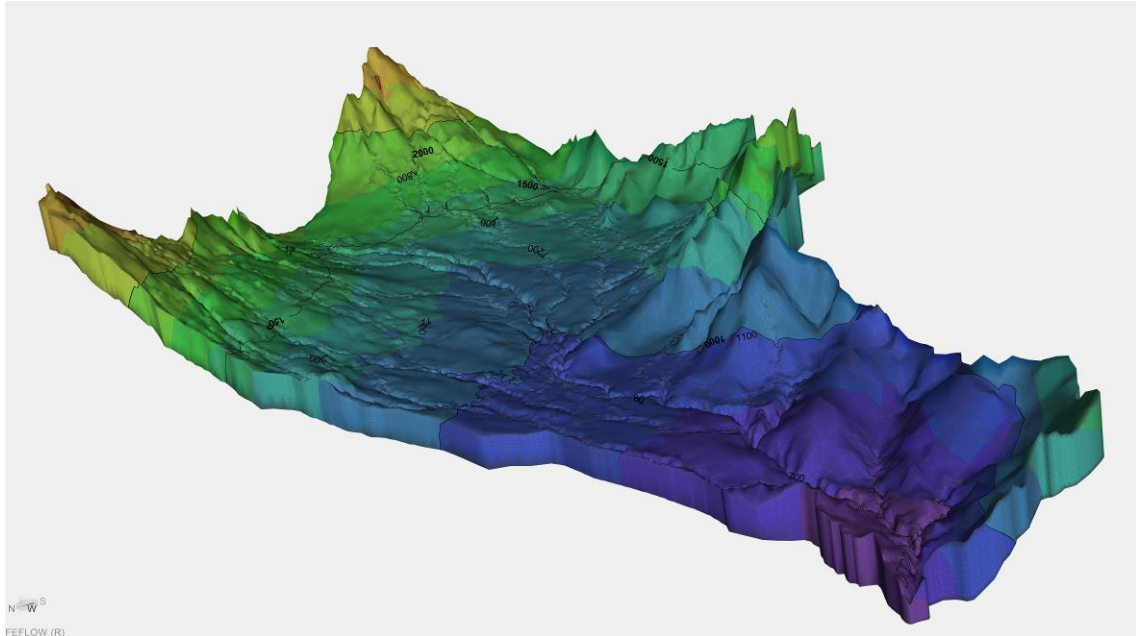


Figura 29 - Vista panorámica de la red de elementos finitos tridimensional del modelo de flujo elaborado en el proyecto actual con la representación de la piezometría calculada por la variante inicial del modelo.

Al respecto del balance hídrico del modelo en su variante inicial se presenta en la Tabla 9 los valores de recarga y descarga simulados en el modelo. Se verifica que la recarga directa es de 18611 l/s. Este valor coincide con la recarga media ponderada para toda el área del modelo presentada en SENARA (2008) que es de 659,93 mm/año. Los valores presentados en la Tabla 9, no consideran todavía un balance completo, en lo que respecta a extracciones, ya que el objetivo de estas primeras simulaciones consiste en verificar la corrección técnica del modelo, que ya se puede comprobar que funciona correctamente. La introducción de nuevos datos de extracciones se está empezando e llevando a cabo para el inicio del análisis de escenarios de gestión que se seguirá a la calibración del modelo. En esta fase solo se han introducido en el modelo algunos pozos más importantes a los cuales se añadirán todos los demás, cuyos datos se han organizado ya en la base de datos del proyecto. Por ejemplo, los nuevos datos de AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados), obtenidos directamente de esta institución y de ESPHSA (Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S.A.), cuya base de datos ha sido brindada al equipo del proyecto por SENARA, incluyen datos de extracciones y de niveles

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

que ha sido necesario transformar en ficheros compatibles para input en el software de modelación.

Tabla 9 – Balance hídrico resultante de las variantes iniciales del modelo.

Variante	Recarga directa (l/s)	Ríos (l/s)		Manantiales (l/s)	Pozos (l/s)	Balance (l/s)
		Entradas	Descarga			
v0 Ríos	18611	4160,6	-21396,6	0,0	-1375,0	0,0
v0 Ríos + Manantiales	18611	4360,7	-19484,9	-2111,8	-1375,0	0,0

Se llama la atención al hecho que el balance hídrico presentado en la variante inicial del modelo no coincide con los valores brindados en el informe anterior del proyecto (NEMUS & SENARA, Septiembre de 2016) que correspondía a un total de 19190 l/s para la recarga natural y que, mientras tanto con los cálculos más recientes, se concluye ser más correcto ser 18611 l/s.

3.3.2 Calibración estacionaria, transitoria y validación del modelo

En esto apartado se presenta y discute la evolución entre la variante del modelo preliminar presentada en el apartado anterior, que como se ha referido se considera preliminar. La calibración de los parámetros hidráulicos que dictan el flujo subterráneo es una etapa clave en el desarrollo del modelo, la cual podrá definir la precisión de los resultados de un modelo numérico de flujo subterráneo (Hill y Tiedeman, 2006).

Como hay sido descrito en el apartado 2.5.2, la calibración del modelo hay sido automatizada por modelización inversa con el software PEST (Dohery, 2002, 2003) que está implementado en el software de modelización FEFLOW con el nombre de FePEST (Diersch, 2014). El software de calibración permite llegar a una solución aproximada del problema con recurso a un algoritmo non linear automático de estimación conocido como “método de Gauss-Marquardt-Levenberg method”. El hecho de que la calibración se procesó de forma automática por modelización inversa hay permitido reducir en mucho el tiempo necesario para calibrar el modelo, sin embargo, esta es una de las etapas más laboriosas del proceso de modelización. En el caso de la

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

calibración del modelo del área de estudio se intentaron varias configuraciones de calibración para lograr la mejor solución, pero solamente se presenta la configuración final para la cual han sido obtenidos los mejores resultados. Se recuerda (apartado 3.2.3) que han sido desarrollados dos modelos, uno que solo considera la recarga natural y otro que contempla la recarga proveniente de las pérdidas urbanas además de la recarga natural y que ambos han sido calibrados con la misma configuración, pero con resultados diferentes.

En lo que respecta la configuración asumida para la calibración por modelización inversa de los dos modelos, se optó por indicar para todas las formaciones una relación entre las direcciones de conductividad hidráulica horizontal (K_{zz} y K_{yy}) y conductividad hidráulica vertical (K_{zz}) que corresponde al siguiente: $K_{xx} = K_{yy} = 10 * K_{zz}$. Las formaciones acuíferas de Barva (Barva Superior y Barva Inferior) han sido limitadas superiormente a 10 m/d. Los valores de conductividad de las formaciones acuitardas (Tobas sobre Barva Superior, Tobas sobre Barva Inferior, Tiribi y Puente Mulas) han sido limitados superiormente a 1 m/d. La formación La Libertad hay sido limitada superiormente a 500 m/d y las formaciones de Colima (Colima Superior y Colima Inferior) han sido limitadas inferiormente a 50 m/d. Para las formaciones de Zurqui y del Terciario no se han definido límites inferiores o superiores para la solución del algoritmo de calibración.

La información disponible para la calibración del modelo numérico del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central de Costa Rica se basó en los datos de parámetros hidráulicos que representan el sistema presentado en el apartado 3.2.4 y de los datos piezométricos del sistema presentados en el apartado 3.2.5. Una parte de los datos de pozos públicos del AyA y SENARA contienen mediciones en continuo, pero para la calibración y validación de los modelos en régimen permanente se hay utilizado la mediana de los valores medidos. Se llama la atención al hecho de que, como ya hay sido referido anteriormente en el apartado 3.2.4, los puntos de observación piezométrica no son piezómetros perfectos, una vez que consisten en mediciones realizadas en pozos de extracción. Para una calibración ideal, sería más fiable utilizar también dados de piezómetros perfectos, en particular próximo de las zonas de mayor extracción de agua, como forma de medir el impacto real de la extracción.

Los modelos han sido considerados como un régimen completamente saturado y como un sistema confinado para simplificar el problema y el peso y tiempo de cálculo matemáticos de los

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

modelos. Aunque el software de modelización Feflow presenta varios “solvers” se hay cogido el método iterativo standard de “Preconditioned Conjugate-gradient method (PCG)” (Diersch, 2014), no solo porque fue lo que presentó una mejor estabilidad de los cálculos iterativos, como también por presentar tiempos de cálculo más rápidos.

Se puede concluir que los resultados obtenidos en esta variante del modelo corresponden a una representación del sistema acuífero más realista do que la dedicada al análisis preliminar de la coherencia del modelo conceptual presentado en el apartado anterior.

El scatter plot entre la piezometría observada y la piezometría calculada para la variante actual del modelo se presentan en la Figura 30, conjuntamente con los valores calculados del coeficiente de regresión R^2 y la ecuación de la recta de la regresión linear correspondiente. Los valores del error cuadrático medio de predicción (RMSE del inglés “Root Mean Square Error”) presentadas para estas variante son de 128.39m y 128.35m para los modelos sin retorno y con retorno de pérdidas de sistema de abastecimiento urbano, respectivamente.

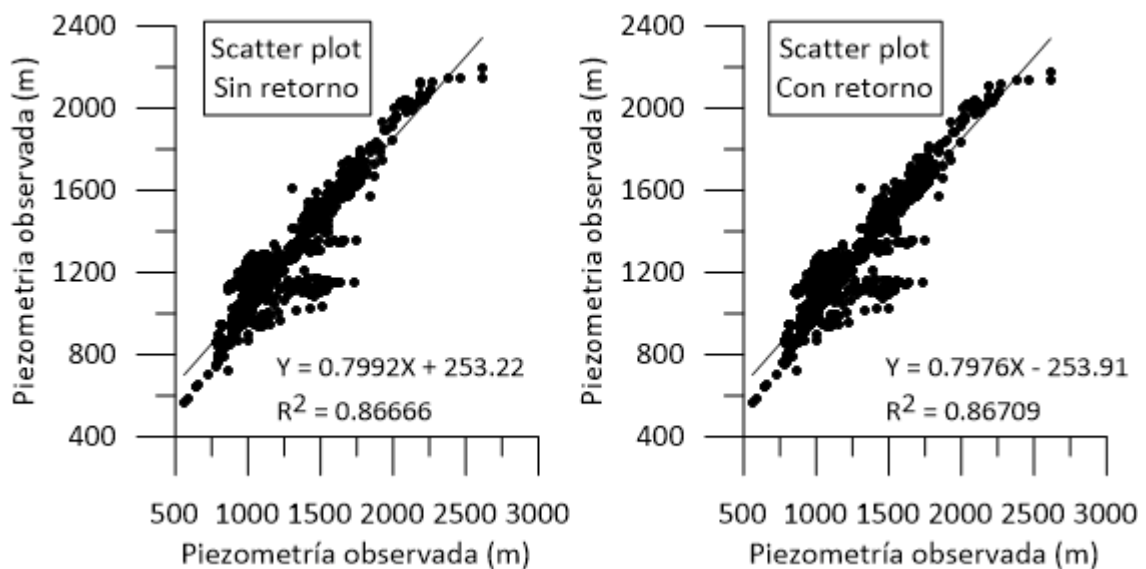


Figura 30 – “Scatter plot” entre la piezometría observada y la piezometría calculada por el modelo para la versión sin recarga proveniente del retorno de pérdidas de abastecimiento urbano (izquierda) y con recarga proveniente del retorno de pérdidas de abastecimiento urbano (derecha).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

La calibración efectuada resultó en la distribución de conductividades hidráulicas horizontal (K_{xx} y K_{yy}) expresa en la Tabla 10. Se recuerda, como hay sido referido anteriormente que la conductividad hidráulica vertical es un décimo de la conductividad horizontal ($K_{zz}=0,1*K_{xx}$).

Tabla 10 – Distribución de la conductividad hidráulica horizontal ($K_{xx}=K_{yy}$) calibrada para cada una de las unidades hidrogeológicas consideradas en los modelo numérico desarrollados.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/d)
	Sin Retorno	Con Retorno
Tobas (Barva Superior)	2,806E-02	2,135E-02
Barva Superior	1,000E+01	1,000E+01
Tobas (Barva Inferior)	2,806E-02	2,135E-02
Barva Inferior	1,000E+01	1,000E+01
Tiribi	1,000E+00	1,000E+00
La Libertad	2,687E+02	2,601E+02
Colima Superior	5,000E+01	5,000E+01
Puente Mulas	3,934E-03	3,195E-03
Colima Inferior	5,000E+01	5,000E+01
Zurqui	8,054E-02	8,108E-02
Terciario	3,983E-03	3,842E-03

Los 991 puntos de control piezométrico utilizados para la construcción del gráfico de la Figura 30 se representan en el mapa de la Figura 31 y corresponden a los datos obtenidos a partir de la base de datos de AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados) y los datos de manantiales y de pozos de ESPHSA (Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S.A.).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

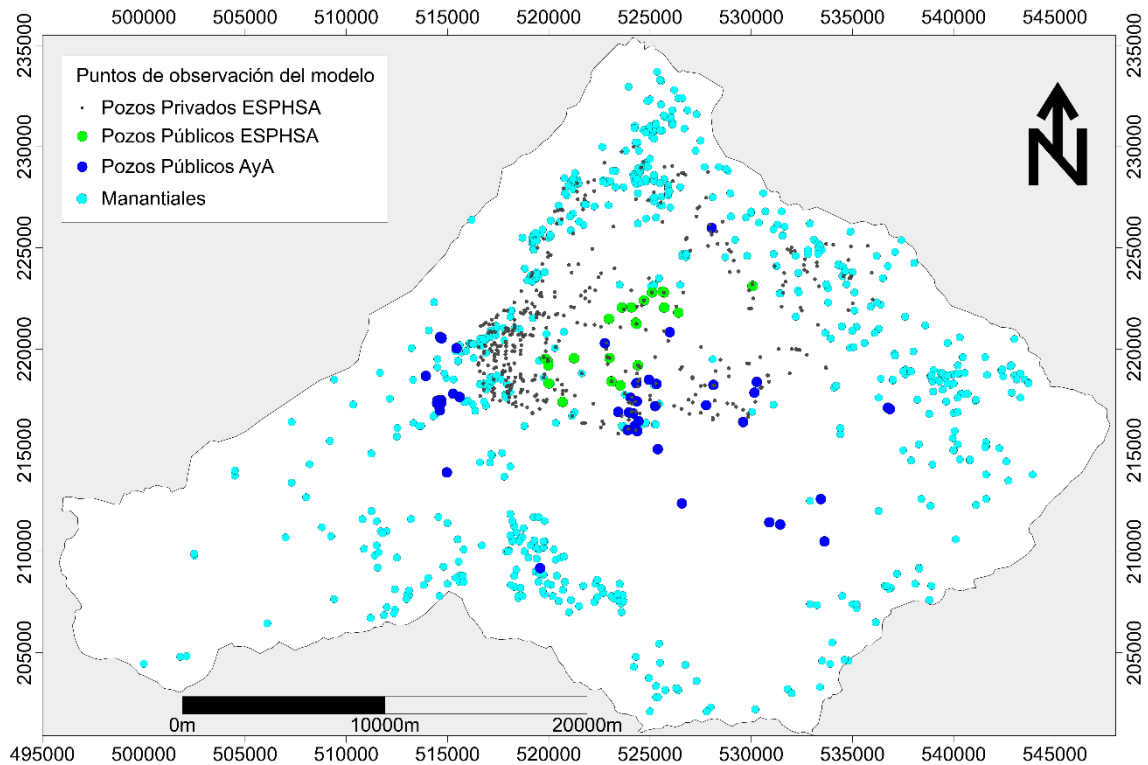


Figura 31 – Ubicación de los 991 puntos de observación utilizados en la calibración de los modelos numéricos

3.4 Análisis de escenarios

Después de las etapas de calibración y validación descritas en los apartados anteriores se estableció un conjunto de escenarios de alteraciones climáticas y explotación del sistema acuífero, de manera a empezar la utilización del modelo como herramienta de predicción bajo diferentes condiciones. Los escenarios elegidos son apenas ejemplos de los inúmeros ejercicios de modelación que se pueden establecer para evaluar estrategias de gestión de recursos hídricos en el área de estudio y se presentan esquemáticamente en la Figura 32.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

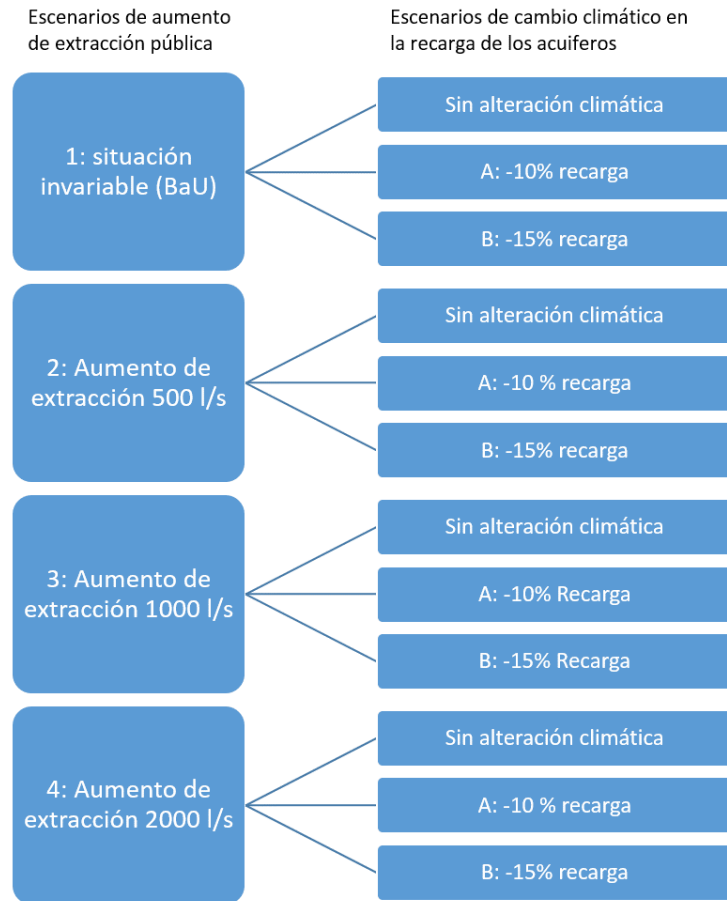


Figura 32 – Esquema descriptivo de escenarios de aumento de extracción y alteraciones climáticas simulados por el modelo numérico.

Estos escenarios han sido simulados para dos versiones del modelo que consideran la existencia o no de recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano. O sea, en la práctica se presentan en los apartados siguientes resultados de 24 variantes de los dos modelos desarrollados.

3.4.1 Análisis de la dinámica del agua subterránea bajo diferentes condiciones de explotación

En la bibliografía consultada se han encontrado varias referencias en las cuales se discute la posibilidad o se refiere la importancia para el aumento controlado del caudal de explotación de

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

aguas subterráneas en el Valle Central (Losilla et al. (1982), SENARA; BGS (1988); Solíz et al. (2012), Ramírez (2015)).

SENARA; BGS (1988) hacen una descripción detallada en su informe de la extracción en el valle central e indican las zonas potencialmente más adecuadas para incrementar el caudal de explotación, refiriendo que “sería imprudente rechazar la posibilidad de un mayor desarrollo del recurso de agua subterránea en un área de buen potencial”. Según los autores, sería posible desarrollar un caudal adicional de 1000 a 1500 l/s en los acuíferos de Colima además de los 5000 l/s existentes (incluso pozos particulares, públicos y manantiales).

La ubicación de los nuevos campos de pozos propuesta por los autores son a) la expansión del campo de pozos de La Valencia, b) un área entre Pitahaya y Barreal y c) el área al sur del Aeropuerto Juan Santamaría. Par el área a) Campo de pozos de La Valencia, se propone la instalación de un nuevo campo de pozos con capacidad para 200 a 300 l/s (con caudales de 50 a 70 l/s/pozo) a profundidades de 170 hasta los 200 m (CS y CI) en un área de 1 a 2 km². En el área b) (Barreal y Pitahaya) se refiere la posibilidad de desarrollar una producción de 500 a 1000 l/s en profundidades de 170 a 200m, en pozos espaciados de 250 a 500 m y con caudal por pozo de 50 l/s. Por fin, al sur del Aeropuerto Juan Santamaría, la propuesta representa una producción de 300 a 500 l/s a profundidades de 140 a 160 m (extracciones casi exclusivamente del Colima Inferior). Se recomienda un espaciamiento de pozos de 500 m y caudales por pozo de 50 l/s para reducir la interferencia.

Con base en la información brindada, se considera la ejecución de 3 escenarios de explotación de aguas subterráneas con el modelo numérico desarrollado en lo presente proyecto. Estos escenarios serán 1) el aumento de la explotación de aguas subterráneas de 500 l/s en las formaciones de Colima; 2) un incremento de la explotación de aguas subterráneas de 1000 l/s en las formaciones de Colima, 3) un aumento de la explotación de aguas subterráneas de 2000 l/s en las formaciones de Colima, que corresponde aproximadamente al incremento en la recarga proveniente de las pérdidas urbanas. Los datos relativos al aumento de extracción se presentan en Tabla 11 y la ubicación de los puntos de extracción implementados en el modelo se presenta en la Figura 33.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 11 – Detalles de los escenarios de aumento de extracción

Local	Variable	Escenario 1 (Cen1)	Escenario 2 (Cen2)	Escenario 3 (Cen3)
a) La Valencia	Caudal total local (l/s)	50	200	300
	#pozos	1	4	5
	Caudal por pozo(l/s)	50	50	60
b) Pitahaya y Barreal	Caudal total local (l/s)	300	500	1100
	#pozos	6	10	14
	Caudal por pozo(l/s)	50	50	78.6
c) sur del Aeropuerto Juan Santamaría	Caudal total local (l/s)	150	300	600
	#pozos	3	6	10
	Caudal por pozo(l/s)	50	50	60
Caudal total de escenario (l/s)		500	1000	2000

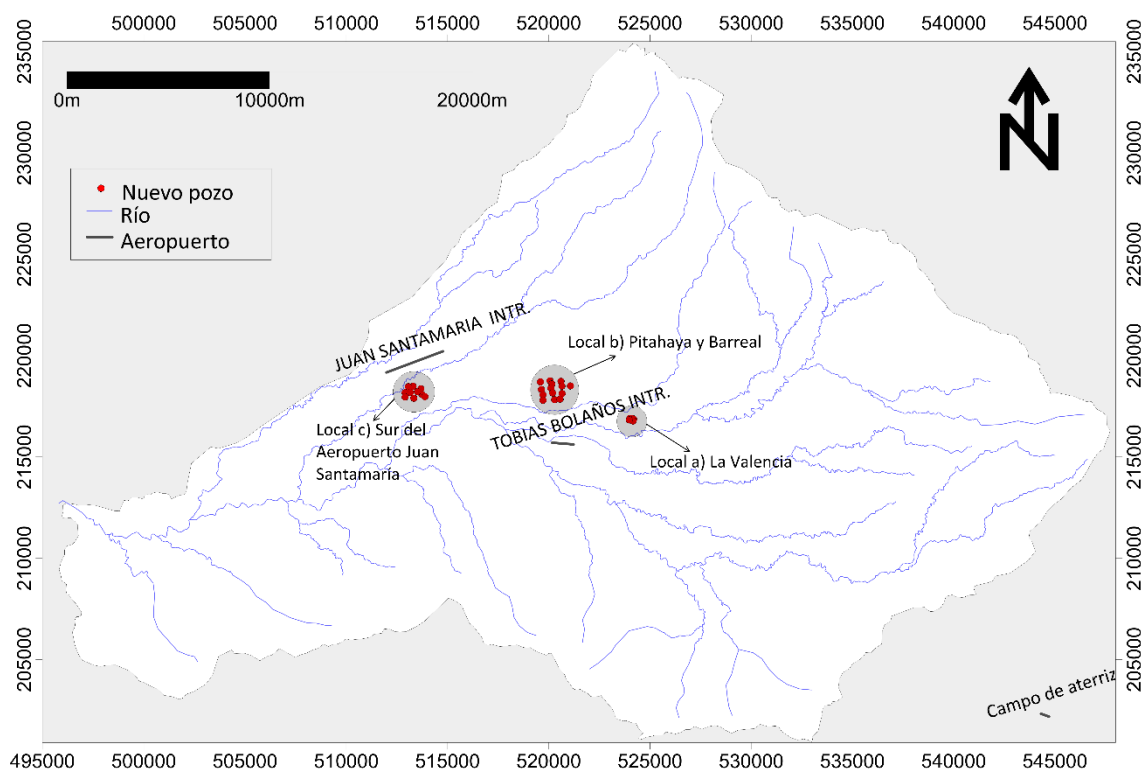


Figura 33 – Ubicación de los puntos de extracción añadidos a los previamente existentes en el escenario de situación invariable (Cen0) para la simulación de los escenarios de aumento de explotación (Cen1, Cen2 y Cen3).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

El análisis de las diferencias entre los resultados de estos escenarios de explotación se presenta con recurso a la comparación de: (1) salidas naturales en los manantiales; (2) variación local del potencial hidráulico en puntos de observación seleccionados cerca de las áreas afectadas de descensos y (3) distribución del residuo piezométrico regional (descensos) de los escenarios de explotación, comparados con la situación actual de explotación. Los resultados han sido comparados con la situación invariable (Cen 0), cuyos valores de explotación se presentan en la Tabla 5.

(1) Salidas naturales en los manantiales

Los diferentes escenarios de explotación resultaran en diferentes caudales de salidas en los manantiales de los modelos simulados. Los valores de las salidas en los manantiales conjuntamente con otras variables de recarga pueden ser consultadas en la Tabla 12.

Tabla 12 – Variables de recarga, retorno y explotación impuestas en las versiones calibradas del modelo y la salida en los manantiales calculada por el modelo en los diferentes escenarios de explotación simulados.

Versión del Modelo	Escenario de explotación	Recarga directa (l/s)	Retorno pérdidas urbanas (l/s)	Explotación por pozos (l/s)	Salidas en manantiales (l/s)
Sin Retorno	Cen0	18611	0	-5479,7	-5056,3
	Cen1	18611	0	-5979,7	-4912,7
	Cen2	18611	0	-6479,7	-4792,4
	Cen3	18611	0	-7479,7	-4560,8
Con Retorno	Cen0	18611	2132	-5479,7	-4991,4
	Cen1	18611	2132	-5979,7	-4846,9
	Cen2	18611	2132	-6479,7	-4726,8
	Cen3	18611	2132	-7479,7	-4488,6

En el caso del modelo sin retorno, bien como en el caso del modelo con retorno de recarga de abastecimiento público, se verifica una disminución de cerca de 500 l/s en los manantiales para el escenario más exigente de aumento de explotación (cen3). Los restantes escenarios de

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

aumento de explotación resultaran en disminución de aproximadamente 100 l/s y 250 l/s para los escenarios 1 y 2, respectivamente.

(2) Variación local del potencial hidráulico

De manera a analizar el descenso local del potencial hidráulico, se hay seleccionado un grupo restringido de 9 puntos de observación de los 991 puntos de observación disponibles. Estos 9 puntos se sitúan cerca de las áreas seleccionadas para aumentar la explotación (Tabla 11 y Figura 33). En la Tabla 13 se presentan el potencial hidráulico calculado en puntos de observación seleccionados, los cuales han sido convertidos en residuo piezométrico (o descenso), de forma a permitir una mejor análisis a variación piezométrica en los mismos.

Tabla 13 – Potencial hidráulico calculado por el modelo para los puntos de observación seleccionados.

pozo	Sin Retorno (m.s.n.m.)				Com Retorno (m.s.n.m.)			
	Cen 0	Cen 1	Cen 2	Cen 3	Cen 0	Cen 1	Cen 2	Cen 3
W N°1	1043,8	1043,7	1043,4	1043,1	1044,1	1043,9	1043,6	1043,3
W N°10	1070,4	1070,3	1070,0	1069,8	1070,4	1070,3	1070,0	1069,8
W N°3	1050,2	1048,8	1047,4	1045,0	1050,2	1048,8	1047,4	1045,0
W N°9	1055,6	1055,3	1054,9	1054,0	1055,6	1055,3	1054,8	1054,0
Zoológico	894,2	894,1	894,1	893,9	893,4	893,3	893,2	893,1
Plantel AyA Florida	1147,7	1147,6	1147,6	1147,6	1148,1	1148,1	1148,1	1148,0
Rincón Ricardo S Pablo	1115,0	1115,0	1114,9	1114,8	1115,2	1115,2	1115,1	1115,0
AB1132	1077,4	1076,5	1075,8	1073,2	1077,8	1076,9	1076,2	1073,6
AB679 (Aurora 2)	1034,4	1032,8	1031,9	1028,5	1034,6	1033,0	1032,1	1028,8

En la Figura 34 se presenta la ubicación de los puntos de observación seleccionados, su designación y descenso calculado para el escenario 3 (Cen3) del modelo numérico. Cuanto a la variación local en los puntos de observación seleccionados, esta se presenta en la Figura 35.

Los datos de residuo presentados en la Figura 34 y Figura 35 se refieren a la versión del modelo sin retorno de la recarga proveniente de pérdidas urbanas, sin embargo, los resultados presentados por ambos son prácticamente iguales.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

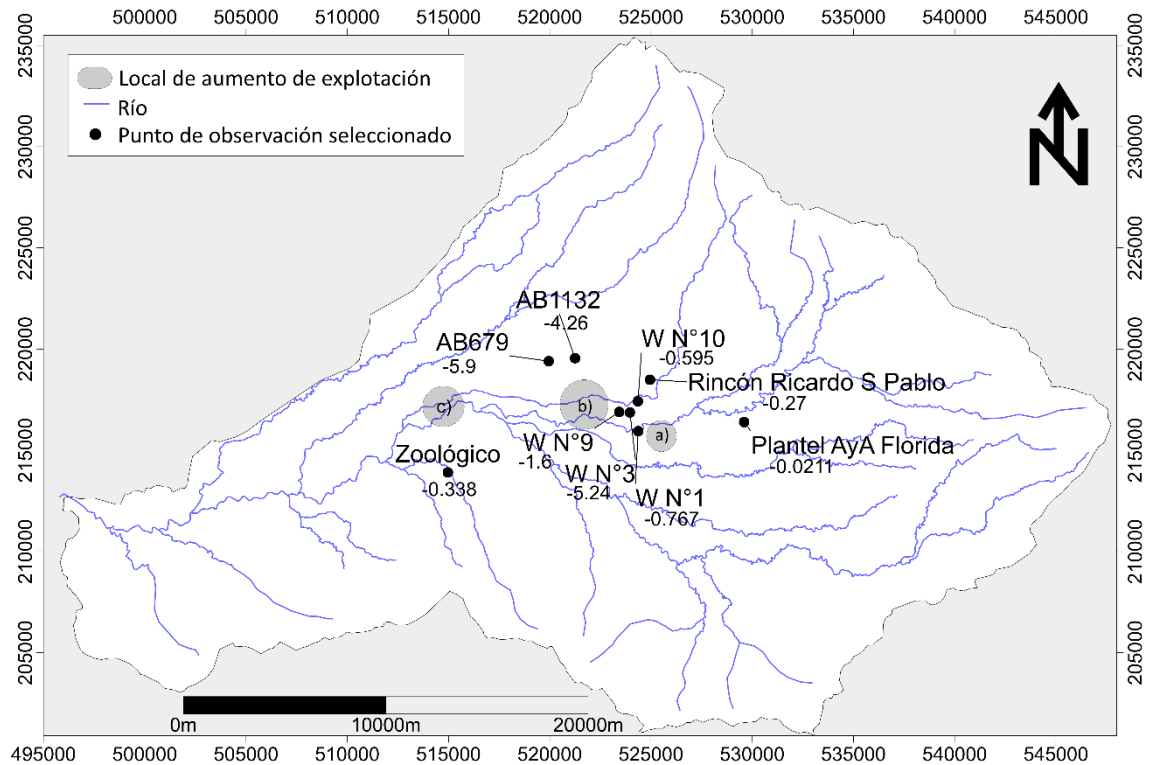


Figura 34 – Ubicación de los locales considerados para el aumento de explotación y de los puntos de observación seleccionados para la análisis del potencial hidráulico local conjuntamente con su respectivas designación y residuo (m) calculado para el modelo en el escenario más exigente de aumento de explotación (Cen3) comparado con el escenario de situación invariable.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

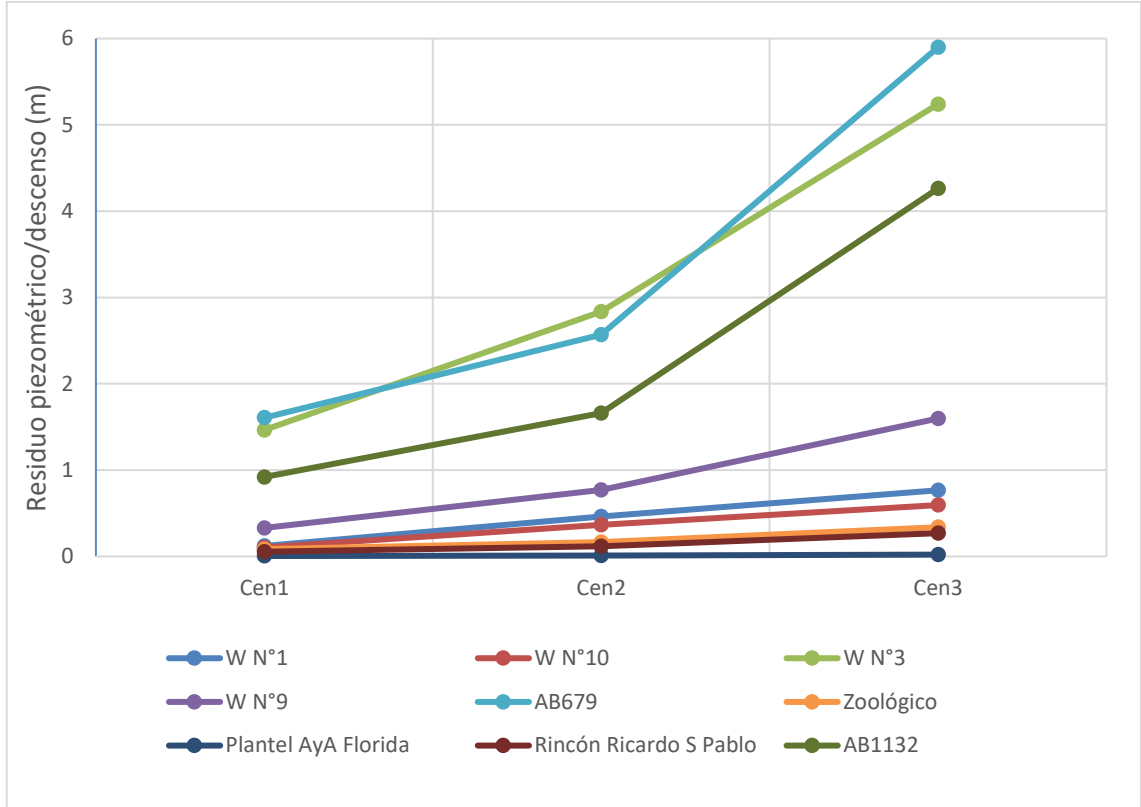


Figura 35 – Variación del descenso piezométrico en los puntos de observación seleccionados de acuerdo con los escenarios simulados relativamente al escenario de situación invariable (Cen0)

Como es posible verificar en el análisis local de potencial hidráulico, los puntos de observación más afectados son los que se sitúan más cerca del local de aumento de explotación b) Pitahaya y Barreal, en particular, los puntos AB679 (Aurora II), AB1132, W N° 3 y W N° 9, que pueden llegar a los 6 m aproximadamente. Esto es algo que se esperaba, una vez que este local es lo que presenta un mayor incremento de caudal en su escenario más exigente, con un aumento de 1100 l/s de explotación. En general, los puntos a sur o a este de los locales de aumento de explotación no presentan variaciones significativas, siempre inferiores a 1 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

(3) Distribución del residuo piezométrico regional (descensos)

De manera a permitir una análisis de un punto de vista regional al efecto del aumento de explotación impuesto en los puntos indicados en la Tabla 11 y Figura 33, se optó por calcular la diferencia de la distribución piezométrica entre la situación invariable (Cen0) y los demás escenarios de aumento de explotación (Cen1, Cen2 y Cen3) para el slice 7, correspondiente al Colima Superior. Esta operación consiste en una etapa de pos procesamiento a los resultados del modelo y los datos han sido tratados con el software Surfer® de Golden Software, con recurso a la herramienta de procesamiento de red. Así, basado en los resultados de los modelos, han sido creadas redes de análisis espacial de la distribución piezométrica calculada para cada escenario con un espaciamiento de 100mx100m. Posteriormente se hay procesado el cálculo de la diferencia entre la red de distribución piezométrica del Cen0 y los demás escenarios de explotación (Cen1, Cen2 y Cen3). Esto resultó en 3 mapas de residuo piezométrico, los cuales se presentan en la Figura 36 y Figura 37 respectivamente para el modelo sin retorno y con retorno de pérdidas urbanas, respectivamente. Para clarificación de las características de cada escenario consultar la Figura 32 y Tabla 11.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

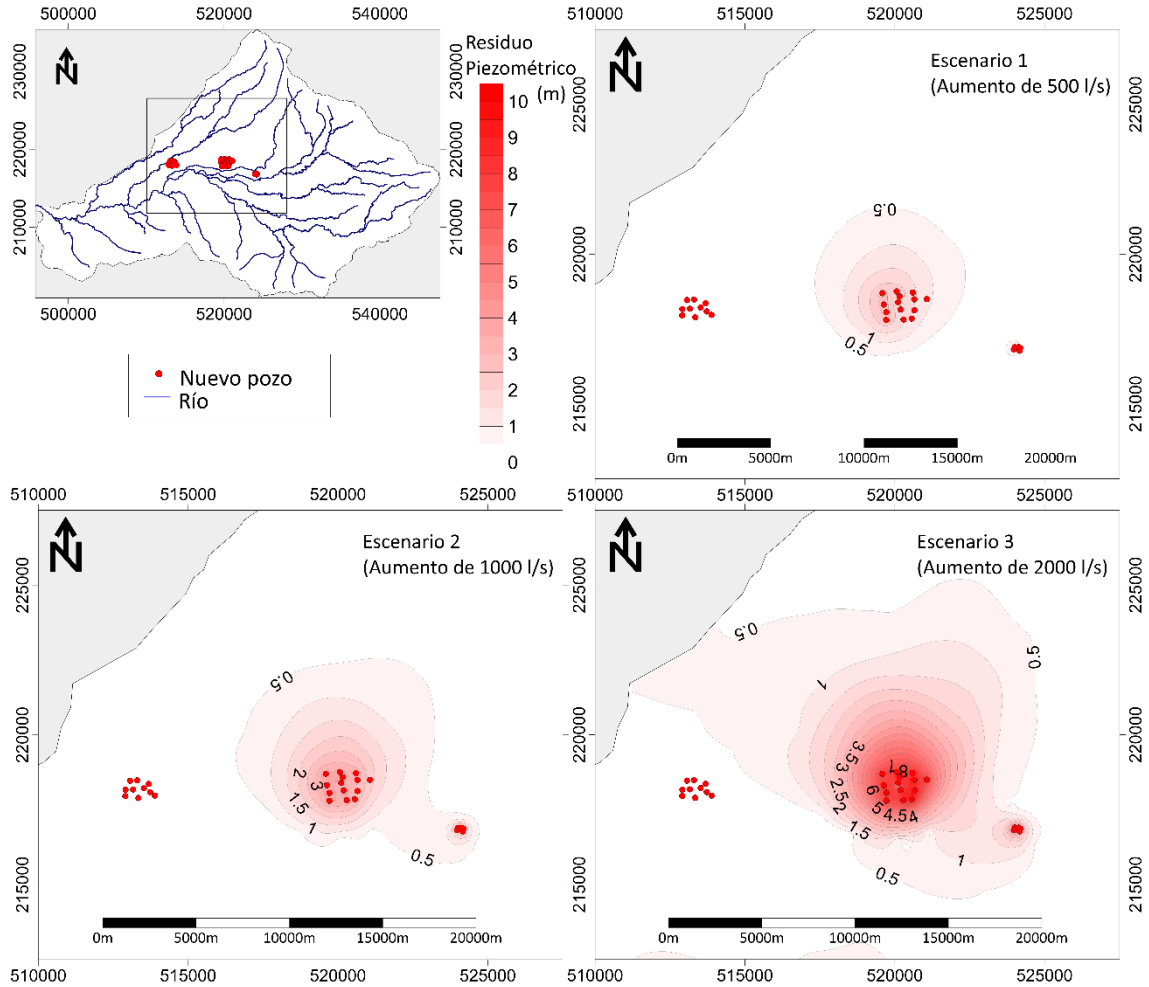


Figura 36 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el Slice 7 para los escenarios de explotación simulados de la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

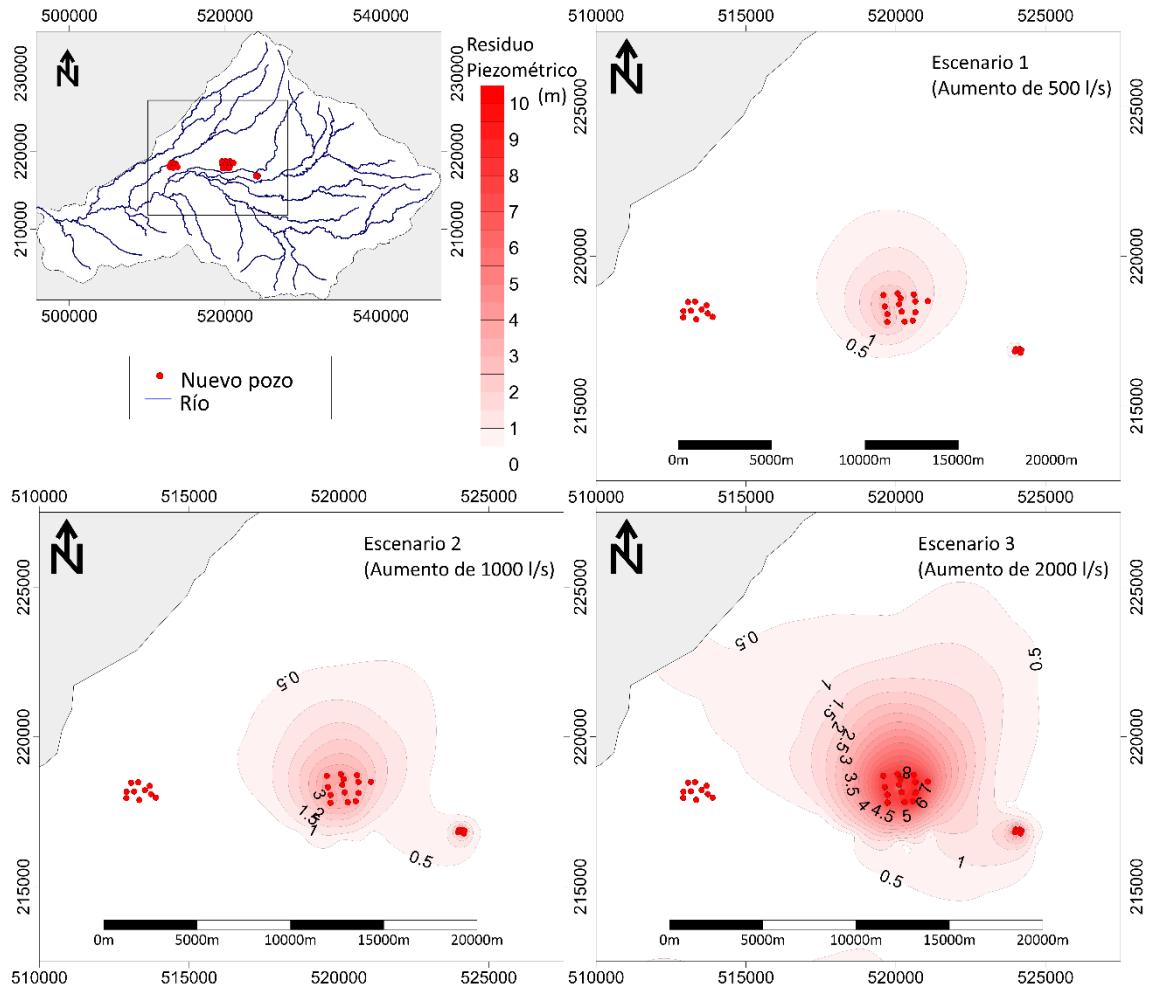


Figura 37 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 para los escenarios de explotación simulados de la de la versión del modelo con recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano.

La distribución regional del residuo piezométrico presentada en la Figura 36 y Figura 37 está de acuerdo con lo que hay sido discutido en el punto (2) de esto apartado, o sea, el local de aumento de explotación b) Pitahaya y Barreal es lo que presenta los mayores descensos o residuo piezométrico en las áreas afectadas del Colima Superior y, que en su escenario más exigente (Cen3), presenta descensos hasta los 9 metros. Tal como había sido referido en el punto (2) de esto apartado, no se verifican diferencias significativas en el residuo presentado por los modelos con y sin retorno de recarga de pérdidas urbanas.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

El hecho de que el local c) Aeropuerto Juan Santamaria no presenta variaciones significativas en el potencial hidráulico en la Slice 7, que corresponde al Colima Superior, es porque estos pozos han sido impuestos en la slice 9, la que corresponde al Colima Inferior.

3.4.2 Análisis del balance para estimar la sustentabilidad de las extracciones presentes y futuras

En la información disponible sobre el cambio climático en Costa Rica se encuentra un estudio detallado sobre los efectos de diferentes escenarios en la precipitación y la temperatura con resolución desde los 50 km al 1 km, que permiten obtener una visión global de los potenciales impactos del cambio climático en Costa Rica al respecto de la precipitación y de la temperatura. Sin embargo, no se ha encontrado referencia al efecto del cambio climático en los valores o porcentajes de alteración de recarga o infiltración de los acuíferos de Costa Rica. Así, los escenarios de modelación propuestos en este informe consisten en considerar los escenarios más probables de cambio porcentual en la precipitación en el Valle Central y considerar las mismas proporciones en el cambio de la recarga de los acuíferos del Valle Central.

Alvarado et al. (2012) en su informe sobre los escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica, consideraron el modelo PRECIS como uno de los modelos que presenta mejor precisión para las áreas de Costa Rica en el que respecta a la precipitación. El modelo PRECIS prevé en Valle Central un escenario de disminución de la lluvia en la época de verano de 10% y de 15 % en la temporada invernal para el período de 2070 hasta 2100.

Con base en las previsiones del PRECIS para el Valle Central (Alvarado et al., 2012), se han considerado dos escenarios extremos de cambio de recarga de los acuíferos del Valle Central. Así, se definen el Escenario A (CenA), que considera una reducción de 10% de la recarga anual y el escenario B (CenB), en lo cual se asume una reducción de recarga de 15%, ambos relativamente a la recarga definida en el modelo calibrado. Los escenarios de alteración climáticos resultaran en una recarga natural de 16750 l/s en el caso de reducción de 10% de recarga y de 15819 l/s para los escenarios de reducción de 15% de recarga.

De manera similar a lo que ocurrió en el apartado 3.4.1, la presentación de los resultados en y la análisis de las diferencias entre estos escenarios climáticos y de explotación se presenta con recurso a la comparación de: (1) salidas naturales en los manantiales; (2) variación local del

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

potencial hidráulico en puntos de observación seleccionados cerca de las áreas afectadas de descensos y (3) distribución del residuo piezométrico regional (descensos) de los escenarios de explotación, comparados con la situación actual de explotación.

(1) Salidas naturales en los manantiales

El análisis al balance y salidas en los manantiales para los escenarios de alteraciones climáticas permitió comparar el efecto de la disminución de recarga del acuífero en las salidas naturales y cuantificar su diferencia. Esa diferencia se expresa en la Tabla 14, en la cual es posible verificar la variación de las salidas en los manantiales calculada por los modelos, en los diferentes escenarios de alteraciones climáticas para el escenario de situación invariable de explotación.

Tabla 14 - Variables de recarga, retorno y explotación impuestas en las versiones del modelo calibradas y la salida en los manantiales calculada por el modelo en los diferentes escenarios de alteración climática simulados para el de situación invariable de explotación (Cen0).

Versión del modelo	Disminución de recarga	Recarga directa (l/s)	Retorno pérdidas urbanas (l/s)	Explotación por pozos (l/s)	Salidas en manantiales (l/s)
Sin Retorno	0%	18611	0	5479,7	5056,3
	10%	16750	0	5479,7	5020
	15%	15819	0	5479,7	5002,6
Con Retorno	0%	18611	2132	5479,7	4991,4
	10%	16750	2132	5479,7	4955,6
	15%	15819	2132	5479,7	4937,7

En el caso del modelo sin retorno, bien como en el caso del modelo con retorno de recarga de abastecimiento público, se verifica una disminución de cerca de 50 l/s en los manantiales para el escenario de mayor reducción de recarga (15%). Este valor, cuando comparado con los escenarios de explotación indica que el aumento de explotación podrá presentar efectos más significativos en las salidas naturales de agua en los manantiales que las alteraciones climáticas.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Mismo el escenario de aumento de explotación de 500 l/s (Cen1) implica descensos de caudal en los manantiales de aproximadamente 100 l/s, que es doble del descenso verificado en para el escenario de disminución de 15% de recarga.

(2) Variación local del potencial hidráulico

De manera a analizar el descenso local del potencial hidráulico, se hay seleccionado lo mismo grupo de 9 puntos de observación referidos en el punto (2) del apartado 3.4.1, cuya ubicación se presenta en la Figura 34. De seguida, en la Tabla 15 se presenta la variación del potencial hidráulico calculado por los modelos para los diferentes escenarios de alteración climática simulados. Consecuentemente, como hay sido efectuado en el punto (2) del apartado 3.4.1, se presenta en la Figura 38 el residuo piezométrico o descenso provocado por los escenarios climáticos en los puntos seleccionados.

Tabla 15 – Potencial hidráulico calculado por el modelo para los puntos de observación seleccionados para los escenarios climáticos simulados y para el escenario de explotación de situación invariable (Cen0)

pozo	Sin Retorno (m.s.n.m.)			Con Retorno (m.s.n.m.)		
	0%	10%	15%	0	10%	15%
W N°1	1043,8	1043,7	1043,6	1044,1	1043,9	1043,9
W N°10	1070,4	1070,3	1070,3	1070,4	1070,3	1070,3
W N°3	1050,2	1050,1	1050,1	1050,2	1050,1	1050,1
W N°9	1055,6	1055,5	1055,4	1055,6	1055,5	1055,4
Zoológico	894,2	893,6	893,3	893,4	892,8	892,5
Plantel AyA Florida	1147,7	1147,5	1147,5	1148,1	1148,0	1147,9
Rincón Ricardo S Pablo	1115,0	1115,0	1115,0	1115,2	1115,2	1115,2
AB1132	1077,4	1077,2	1077,1	1077,8	1077,6	1077,5
AB679	1034,4	1034,2	1034,1	1034,6	1034,4	1034,3

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

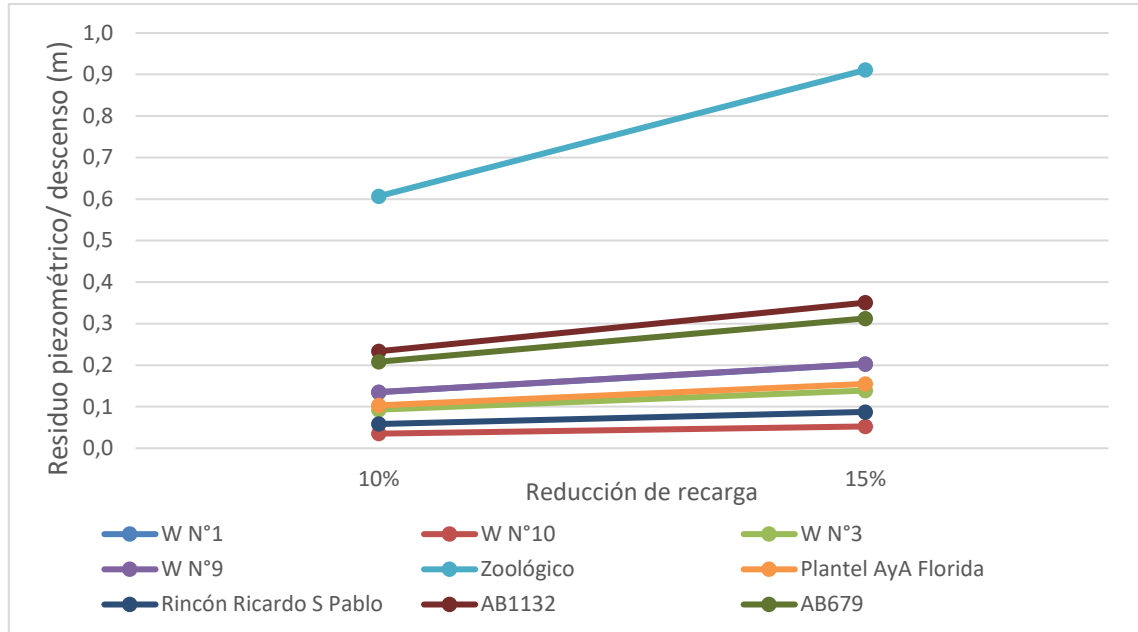


Figura 38 – Variación del descenso piezométrico en los puntos de observación seleccionados de acuerdo con los escenarios simulados relativamente al escenario de situación invariable (Cen0).

Así como había sido referido para las salidas de los manantiales, se verifica que los escenarios de alteración climáticas simulados consisten en un riesgo menor que los escenarios de aumento de caudal de explotación. Se verifica que para el peor de los casos (reducción de 15% de recarga) el punto de observación más afectado registra un descenso de 1 m, mientras que para los escenarios de explotación, mismo el escenario de aumento de 500 l/s de explotación (Cen1) resulta en descensos superiores a 1 metro en varios puntos de observación seleccionados.

(3) Distribución del residuo piezométrico regional (descensos)

En lo que respecta a la distribución del residuo piezométrico, se presenta la diferencia entre la piezometría del escenario de situación invariable de explotación (Cen0) y los escenarios de reducción de 10% de recarga y 15 % de recarga del modelo sin retorno de la recarga de pérdidas urbanas, cuyos resultados se presentan en Figura 39 y Figura 40, respectivamente. Estos elementos han sido preparados con el mismo procedimiento que hay sido descrito en el punto (3) del apartado 3.4.1.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

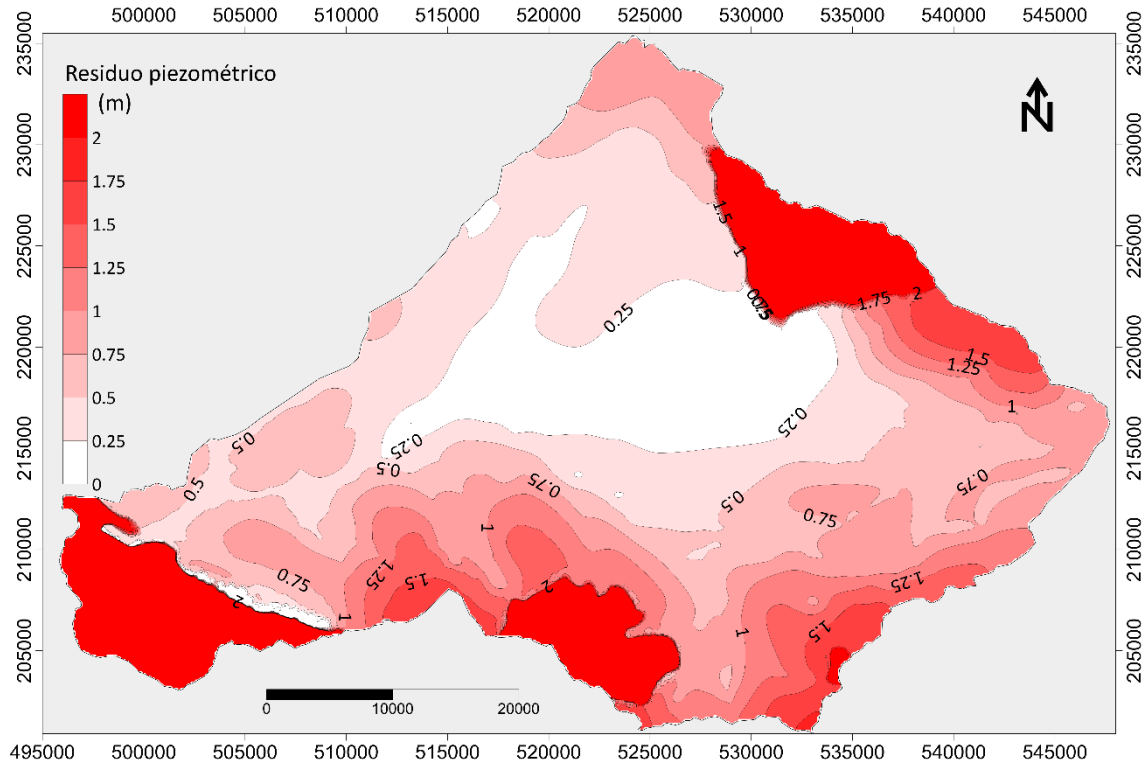


Figura 39 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 (Colima Superior) para el escenario climático de reducción de 10% de recarga y el escenario de situación invariable de explotación (Cen0) para la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

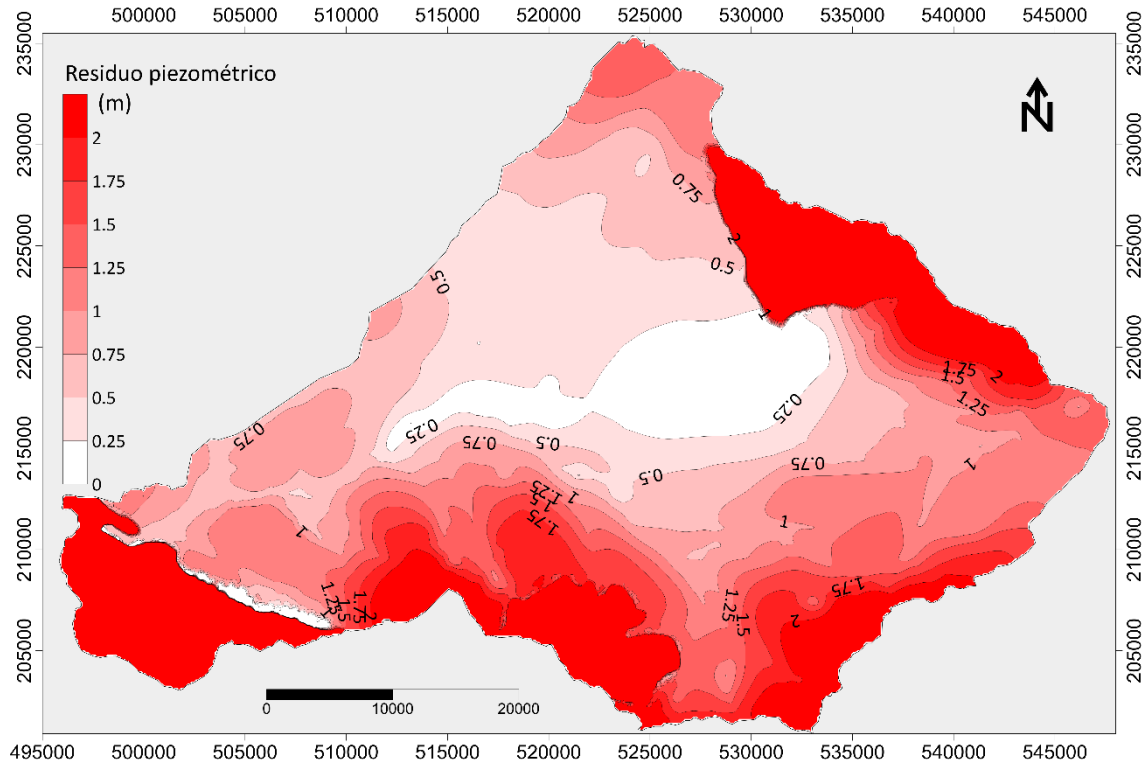


Figura 40 – Distribución espacial del residuo piezométrico en el slice 7 (Colima Superior) para el escenario climático de reducción de 15% de recarga y el escenario de situación invariable de explotación (Cen0) para la versión del modelo sin recarga proveniente del retorno de las pérdidas del sistema de abastecimiento urbano.

La distribución regional del residuo piezométrico de los escenarios climáticos presentada en la Figura 39 y Figura 40 muestra que la disminución de recarga de 15% afecta un área mayor que para el caso de la disminución de 10% de recarga. Sin embargo, se verifica que para ambos los casos, hay un área en el centro del acuífero en la cual el descenso provocado por la reducción de recarga es prácticamente inexistente, lo que es una indicación de elevada resiliencia del sistema. Por otro lado, se verifica que las zonas más afectadas en los escenarios de alteraciones climáticas son las áreas periféricas del modelo y en particular, las formaciones correspondientes a las formaciones del Terciario y Zurqui. En toda la restante área del modelo, el descenso verificado es en la generalidad inferior a 1 metro en ambos los escenarios de reducción de recarga.



nemus ●

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

CAPÍTULO IV

CONSIDERACIONES FINALES



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

6.1 Consideraciones finales

Para facilitar la lectura del presente informe la descripción de la recopilación, organización, análisis e interpretación de la información presentada en los dos primeros informes de este proyecto (NEMUS & SENARA, Junio de 2016; Septiembre de 2016) no se presenta en este tercer informe de manera exhaustiva. En la práctica, este texto se dedica sobre todo a la presentación del modelo matemático en elementos finitos que es el principal objeto de la presente contratación. Sin embargo, además de la descripción de las diferentes etapas de implementación del modelo y de su uso para el análisis de escenarios de explotación del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central se mantiene parte de la información anteriormente brindada sobre la metodología empleada y datos más relevantes para interpretación de las simulaciones realizadas. O sea, se mantiene la posibilidad de hacer una lectura autónoma de este informe. Sin embargo, los procesos de obtención de información e las opciones elegidas para construcción del modelo son complementados en los informes anteriores.

La organización de información necesaria al desarrollo del modelo ha exigido la consulta de centenas de ficheros informáticos y docenas de informes técnicos y artículos científicos. Parte importante de la información extraída de la bibliografía fue incorporada en bases de datos georreferenciadas, lo que ha permitido añadir información cartográfica al sistema de información geográfica inicialmente brindado al equipo de trabajo. Se puede considerar que el esfuerzo de redacción de los tres reportes corresponde a una fracción muy pequeña del volumen de trabajo desarrollado durante la ejecución del proyecto (NEMUS & SENARA, Septiembre de 2016).

Las tareas de pre procesamiento de modelo han permitido establecer la compatibilización de las bases de datos iniciales, lo que ha permitido construir una nueva base de datos consolidada donde se reúne la información y su representación geográfica de puntos, líneas y polígonos definidas en un sistemas de coordenadas y proyecciones cartográficas uniforme y compatible. Como exigido por SENARA esta georeferenciación final se realizó, tomando en cuenta, el sistema de referencia LNRN Lambert. Se incluyen en el sistema de información geográfica construido, además de las bases de datos de SENARA los datos de AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados), obtenidos directamente de esta institución y de ESPHSA (Empresa

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

de Servicios Públicos de Heredia, S.A.), cuya base de datos ha sido brindada al equipo del proyecto también por SENARA. Todos los datos de extracciones, de aforos de manantiales y de niveles piezométricos, además de las bases de cartografía hidrogeológica han sido transformados en ficheros informáticos compatibles para input en el software de modelación. Esta tarea se ha hecho individualmente para todos los pozos, lo que ha tenido un coste de centenas de horas de trabajo. Este conjunto de tareas ha sido desarrollado a lo largo de los primeros seis meses de ejecución del proyecto, y en simultáneo con la construcción de las versiones preliminares del modelo numérico presentado al final del segundo trimestre del proyecto. Así, las versiones del modelo numérico presentadas en este tercero informe son, como estaba previsto representaciones mucho más avanzadas del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central.

La metodología propuesta para la implementación del modelo se agrupó en las siguientes tareas:

- (1) Descripción de la geometría del medio hidrogeológico que constituye el dominio de flujo;
- (2) Definición de las condiciones en los límites;
- (3) Cuantificación del balance hídrico;
- (4) Determinación de los parámetros hidráulicos que caracterizan el dominio de flujo;
- (5) Investigación de la coherencia entre la información disponible y simulación de la distribución espacial y evolución temporal de las variables de estado.

Como se puede concluir de la lectura del presente informe todas estas etapas se han cumplido. Además de la descripción de estas cinco etapas se presentan igualmente las fases de calibración y validación del modelo. En resumen, el equipo del proyecto creó que la información brindada en este informe y ficheros de datos organizados, consiste en la caracterización geométrica, hidrodinámica y de impulsiones externas más completa existente en la actualidad para el Sistema Acuífero Multicapa de Valle Central de Costa Rica.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

El modelo matemático en su estado actual de desarrollo permite el análisis de la dinámica del agua subterránea bajo diferentes condiciones de recarga, descarga (pozos y manantiales). Su utilización en el estadio actual de desarrollo permite así que se estimen los escenarios más favorables de extracción de agua subterránea, sin afectación del entorno ambiental y estructural del acuífero, en las condiciones actuales y en diferentes escenarios futuros. Este trabajo de predicción de diferentes escenarios de explotación, en las condiciones climáticas actuales y considerando futuros escenarios de explotación se presenta igualmente en el presente informe, de manera a que los responsables de SENARA puedan ya utilizar estos resultados para evaluar sus decisiones al respecto de la utilización de los recursos hídricos del Valle Central y de la Cuenca del Río Virilla. Cada actual y futura utilización del modelo desarrollado deberá ser cuidadosamente confrontada con datos de campo y articulada con nuevos programas de monitoreo del sistema acuífero y análisis cruzada con otras metodologías hidrogeológicas que permitan su constante actualización y aumento de la fiabilidad de las predicciones sobre la gestión de los recursos hídricos, superficiales y subterráneos del área de estudio.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

BIBLIOGRAFÍA





Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Referencias (bibliografía referenciada en el presente informe)

Alfaro, A.; Ramos, V.; Ramírez, R. (2002). Proyecto Interinstitucional: Estudios Hidrogeológicos de los Acuíferos de las Márgenes Norte y Sur del Río Virilla, Valle Central, Costa Rica. A y A y SENARA. Documento Interno 12 págs.

Alvarado, L.; Contreras, W.; Alfaro, M.; Jiménez, E. (2012). Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica: mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica, como mecanismo para disminuir el riesgo al cambio climático y aumentar el índice de desarrollo humano (proyecto 61.152). San José: Departamento de Climatología e Investigaciones aplicadas, IMN y Minaet.

Atlas de Costa Rica (2004) Instituto Costarricense de Electricidad e Instituto Meteorológico Nacional. Proyecto Atlas Digital CR 2004. Costa Rica.

Bear, B.; Verruijt, A. (1987) - Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. Reydel Publishing Company. Dordrecht. 414pp.

BGS; SENARA (1985) Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica- Escala 1: 50 000, E.S.R., Limited, Inglaterra.

de Marsily, G. (1986) – Quantitative Hydrogeology. Academic press. San Diego. USA. 440 pp.

Diersch, H. J. (2014) FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer. ISBN: 978-3-642-38738-8 (Print) 978-3-642-38739-5 (Online). 996 pp.

Doherty, J. (2002). PEST, Model-Independent Parameter Estimation; 4th Edition. Watermark Numerical Computing, Australia, 279 pp.

Doherty, J. (2003). Groundwater model calibration using pilot points and regularisation. Ground Water. 41 (2): 170-177.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Fernández, M.V. (2010) Estudio Hidrogeológico para Determinar Sitios Factibles de Explotación De Pozos Profundos en la Zona de Influencia y Operación de la E.S.P.H.. Empresa de Servicios Públicos de Heredia (E.S.P.H.), Unidad de Investigación y Desarrollo. Concurso Secundario 04-2010. Informe técnico, Noviembre 2010. 99 pp y anexos.

Gable, C.W.; Trease, H.; Cherry, T. (1996). Geological applications of automatic grid generation tools for Finite Elements Applied to Porous Flow Modeling. Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics and Related Fields, edited by B. K. Soni, J. F. Thompson, H. Hausser and P. R. Eiseman. Engineering Research Center, Mississippi State Univ. Press, 9 pp.

Gómez, A. (1987). Evaluación del potencial de los acuíferos y diseño de las captaciones de aguas subterráneas en la zona de puente de Mulas, Heredia, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica(tesis inédita).

Hill, M.C.; Tiedeman, C.R. (2007) Effective groundwater model calibration: With analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty: Wiley and Sons, New York, New York, 455 p.

Huang, M.; Li, D.; Han, X. (2014). A Stratigraphic Modeling Method based on Borehole Data. IJCSI Int. J. Comput. Sci. Issues, 11, 39–43.

Huyakorn, P.S.; Pinder, G.F. (1983). Computational methods in subsurface flow. Academic Press, New York, 473 pp.

Kinzelbach, W. (1986). Groundwater modelling. An introduction with sample programs in Basic. Developments in Water Science nº25. Elsevier. 333 pp.

IMTA 2008: Elaboración de balances hídricos por cuencas hidrográficas y propuesta de modernización de la redes de medición de Costa Rica.- 154 págs. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Dirección De Aguas, Ministerio de Ambiente y Energía, San José, Costa Rica.

Labbé, I.T.; Director Ejecutivo (2012) Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEA. Ministerio de Medio Ambiente. Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Dirección General de Aguas. Chile, ISBN: 978-956-9076-12-1. 39pp

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Losilla, M.; Rodríguez, H. (1978). Consideraciones sobre recarga y descarga del acuífero de Colima en el área del Campo de Pozos de Santo Domingo. SENAS, informe técnico 102:

Losilla, M. (1986). Mapa hidrogeológico del Valle Central. - Rev. Geól. América Central 4: 93-95.

Losilla, M.; Rodríguez, H.V.; Foster, S.; Kitching, R. (1982) Estudio Hidrogeológico para el Desarrollo de los Acuíferos Colima. Aplicación del Modelo Matemático IGS/ SENAS Valle Central, Costa Rica. Informe técnico 153 pp.

McGrane, S.J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. Hydrological Sciences Journal 61:2295–2311. doi: 10.1080/02626667.2015.1128084

Mercer, J.W.; Faust, C.R. (1980). Ground-Water Modeling: An overview. Groundwater. Vol. 18. N. 2. 108-115.

Naciones Unidas (1975) Investigaciones de Aguas Subterráneas en Zonas Seleccionadas. Costa Rica. Informe Técnico, ONU DP/UN/COS-65-502/1. Capítulo III. Información Técnica. Área I. Valle Central. pp32-85.

NEMUS & SENARA (2016a) Evaluación y Propuesta de la Explotación de las Aguas Subterráneas Utilizando Modelación Hidrogeológica y Numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central. Proyecto en Ejecución en el Marco del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH). Nº 2014LI-000001-OC. Informe de Avance I (3 Meses). 15 de Junio de 2016. 136pp

NEMUS & SENARA (2016b) Evaluación y Propuesta de la Explotación de las Aguas Subterráneas Utilizando Modelación Hidrogeológica y Numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central. Proyecto en Ejecución en el Marco del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH). Nº 2014LI-000001-OC. Informe de Avance II (6 Meses). 15 de Septiembre de 2016. 216pp

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Ramírez, R. (2007). Recarga Potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y avenamiento. Área de Aguas Subterráneas. 41pp.

Ramírez, R. (2015). Recarga y Extracción Hídrica de los Acuíferos Colima Y Barva, Valle Central, Costa Rica. Tesis sometida a consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología, para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos. Universidad De Costa Rica. Sistema De Estudios De Posgrado. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 108 pp.

Schosinsky, G.; Vargas, A. (2001). Hidrogeología de un sector de la margen izquierda del río Virilla, Provincia de San José, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 24, 93-102.

SENARA (2008). Balance hídricos de suelos Valle Central. Contratación Directa N° 2008cd-000098-OC. 50 pp.

SENARA; BGS (1988). Continuación de las Investigaciones hidrogeológicas en el Valle Central de Costa Rica. San José. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA); British Geological Survey (BGS). Informe interno N°165. 136 pp.

Shewchuk, J.R. (1996) Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, in ``Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering'' (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin, May 1996. (From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.) Abstract (with BibTeX citation), PostScript (513k, 10 pages), and HTML.

Shewchuk, J.R. (2002) Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation, Computational Geometry: Theory and Applications 22(1-3):21-74, May 2002. PostScript (5,128k, 54 pages).

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Soliz, J.G. (Responsable); Cruz, L.B.; García, J.S.; García, N.S.; Orozco, E.G.; Ávilez, M.A.P. (2012) Análisis de la Información Hidrológica Existente: proyecto Numérico del Valle Central. Informe corresponde a los estudios hidrogeológicos pertenecientes a la contratación directa N° 2011cd000127-OC. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, estado de México, agosto de 2012. 177 pp.

Vargas, A. (2002). Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. Rev. Geol. Am. Central, 27: 39-52.

Wang H.F., Anderson M.P. (1982). Introduction to groundwater modelling. Finite difference and finite element Methods. Freeman, New-York, 237 pp.

Bibliografía consultada (referenciada solamente en los informes anteriores)

Arredondo Li; Sandra G. y Soto; Gerardo J. (2006). Edad de las lavas del miembro los Bambinos y sumario cronoestratigráfico de la formación Barva, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 34-35: 59-71.

Darling, W. P. J.; Rodríguez, H.; Lardner, A. (1987). Investigation of a Volcanic Aquifer System in Costa Rica using Environmental Isotopes. Actas de un Seminario Regional para America Latina sobre el Empleo de Técnicas Isotópicas en Hidrología. Nuclear Investigations Centre of Salazar, México. 28 September-2 October 1987. pp 215-228.

Foster, S.; Ellis, A.; Losilla, M.; Rodriguez, H. (1985). Role of volcanic tuffs in ground-water regime of Valle Central, Costa Rica. Ground Water, 23, No.6.

Kiraly, L. (1975). Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. Hydrogeology of karstic terrains. Union Geol. Sciences, (eds. Burger & Dubertret), Series B, 3, 53-67.

Logan, J. (1964) Estimating Transmissivity from Routine Production Tests of Water Wells. Groundwater. 2, 35-37.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente



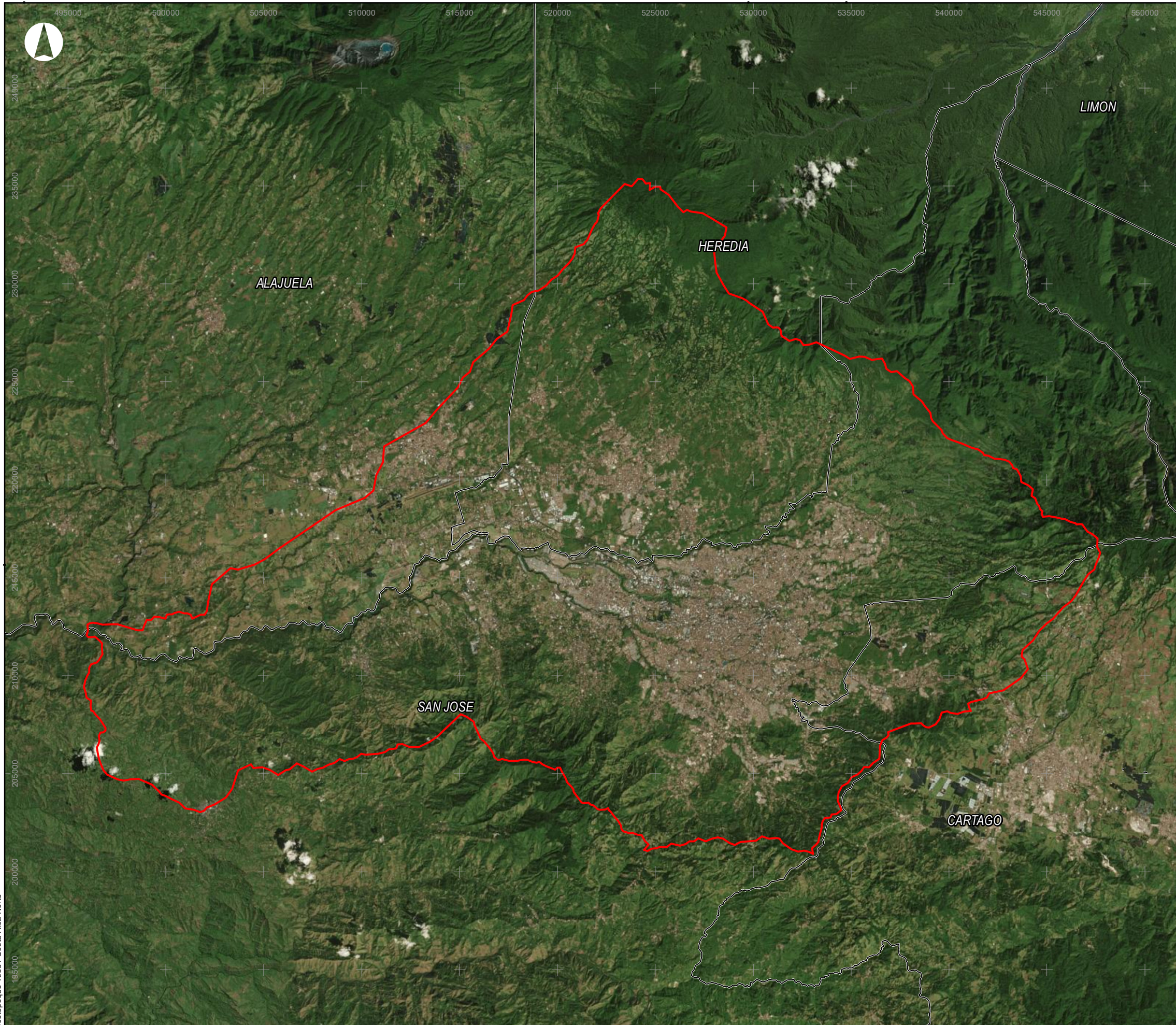
Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH



ANEXO I – UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

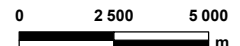
Dejado en blanco intencionalmente



LIMITE CUENCA VIRILLA

PROVINCIAS


Ocotepaque 1935 / Costa Rica Norte



Escala 1:200 000 Escala gráfica 	Concebido por César Jesus Verificado por César Jesus Dibujado por João Fernandes Aprobado por Pedro Bettencourt	En lugar de - Sustituido por: -
---	--	--

EVALUACION Y PROPUESTA DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO MODELACION HIDROGEOLOGICA Y NUMERICA DEL VALLE CENTRAL DE COSTA RICA, AMERICA
 Ubicación del área de estudio

Número	1	
Código	T15003-01-Ubicacion_1611	
Fecha	noviembre 2016	
Hoja	/	



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

ANEXO II - CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA ACUÍFERO MULTICAPA DEL VALLE CENTRAL



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

**ANEXO II.A -
PERFORACIONES
ESTRATIGRÁFICAS
EMPLEADAS PARA LA
DEFINICIÓN DE LA
GEOMETRÍA DEL SISTEMA
ACUÍFERO**



nemus •

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 16 – Información sobre secciones y perforaciones estratigráficas empleadas para la definición de la geometría del sistema acuífero multicapa del Valle Central

Identificación de pozo	Coordenada X	Coordenada Y	Fuente
BA163	522800	222200	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA164	516700	222200	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA161	526650	222800	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA166	527950	226150	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA168	530950	220500	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA81	525700	220900	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
AB764	525250	219600	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
BA158	518650	222870	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
AB656	525000	217500	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
AB549	524400	216700	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
AB548	524300	216000	Losilla et al. (1982); BGS & SENARA (1985)
AB908	515521	217640	SENARA & BGS (1988)
AB909	514670	217000	SENARA & BGS (1988)
AB910	528150	218220	SENARA & BGS (1988)
AB950	531100	217350	SENARA & BGS (1988)
AB951	519750	218590	SENARA & BGS (1988)
AB985	513300	218480	SENARA & BGS (1988)
AB1025	520300	220050	SENARA & BGS (1988)
AB1026	521210	216900	SENARA & BGS (1988)
AB1035	521630	218800	SENARA & BGS (1988)
BA206	514500	220700	SENARA & BGS (1988)
BA207	518570	220980	SENARA & BGS (1988)
BA215	534460	221100	SENARA & BGS (1988)
BA216	522750	220320	SENARA & BGS (1988)
AB-443	522400	213700	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-462	524200	214650	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-484	526200	214900	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-635	525900	211600	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-667	525220	213180	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1117	522570	216130	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1118	521650	216350	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1279	523430	215820	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1310	523550	214250	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1328	524150	215075	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1402	524770	214370	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1684	525320	212835	Schosinsky Y Vargas (1999)
AB-1788	524450	213650	Schosinsky Y Vargas (1999)

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Identificación de pozo	Coordenada X	Coordenada Y	Fuente
AB1534	514800	218200	Soliz et al. (2012)
AB803	514750	213800	Soliz et al. (2012)
AB697	523930	216050	Soliz et al. (2012)
AB626	524250	216200	Soliz et al. (2012)
AB595	524100	216900	Soliz et al. (2012)
AB578	524300	216900	Soliz et al. (2012)
AB577	524300	217900	Soliz et al. (2012)
AB574	523600	216700	Soliz et al. (2012)
AB562	524400	218400	Soliz et al. (2012)
AB555	523950	216500	Soliz et al. (2012)
AB549	524400	216700	Soliz et al. (2012)
AB548	524300	216000	Soliz et al. (2012)
AB469	523950	217360	Soliz et al. (2012)
AB0478	523069	218412	Soliz et al. (2012)
AB0520	520689	217387	Soliz et al. (2012)
AB0537	524587	219087	Soliz et al. (2012)
AB0537	524593	219087	Soliz et al. (2012)
AB0601	519950	219420	Soliz et al. (2012)
AB0679	519971	219375	Soliz et al. (2012)
AB1089	520059	218223	Soliz et al. (2012)
AB1132	521265	219545	Soliz et al. (2012)
AB1546	523603	218207	Soliz et al. (2012)
AB1670	522808	216883	Soliz et al. (2012)
AB1731	520003	219188	Soliz et al. (2012)
AB1875	522983	219545	Soliz et al. (2012)
ILG749	520005	218387	Soliz et al. (2012)
BA0005	519120	221773	Soliz et al. (2012)
BA0339	524350	222100	Soliz et al. (2012)
BA0345	524744	222470	Soliz et al. (2012)
BA0346	524953	222632	Soliz et al. (2012)
BA0450	524953	222644	Soliz et al. (2012)
BA0474	524347	221253	Soliz et al. (2012)
BA-500	525624	222803	Soliz et al. (2012)
BA0506	522296	221224	Soliz et al. (2012)
BA0567	524371	221251	Soliz et al. (2012)
BA0587	522274	221222	Soliz et al. (2012)
BA0611	530995	221761	Soliz et al. (2012)
BA0618	522933	221489	Soliz et al. (2012)
BA0670	523669	222126	Soliz et al. (2012)

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Identificación de pozo	Coordenada X	Coordenada Y	Fuente
BA-729	525624	222801	Soliz et al. (2012)
BA0734	523182	222365	Soliz et al. (2012)
BA0843	527775	227480	Soliz et al. (2012)
BA0897	526369	221716	Soliz et al. (2012)
BA0923	522273	221957	Soliz et al. (2012)
BA0925	523705	221040	Soliz et al. (2012)
AB490	525300	218300	Ramírez (2015)
AB336	518220	217280	FERNÁNDEZ (2010)
AB458	530200	217400	FERNÁNDEZ (2010)
AB459	525000	217700	FERNÁNDEZ (2010)
AB511	528900	219050	FERNÁNDEZ (2010)
AB644	523960	217400	FERNÁNDEZ (2010)
AB647	519800	218750	FERNÁNDEZ (2010)
AB659	522480	216860	FERNÁNDEZ (2010)
AB685	524500	218500	FERNÁNDEZ (2010)
AB738	516610	217680	FERNÁNDEZ (2010)
AB881	524500	216820	FERNÁNDEZ (2010)
AB993	523750	217800	FERNÁNDEZ (2010)
AB1001	527100	218620	FERNÁNDEZ (2010)
AB1002	525460	217300	FERNÁNDEZ (2010)
AB1142	530800	218700	FERNÁNDEZ (2010)
AB1375	522250	219750	FERNÁNDEZ (2010)
AB1397	532000	220000	FERNÁNDEZ (2010)
AB1443	520875	217950	FERNÁNDEZ (2010)
AB1500	532200	220000	FERNÁNDEZ (2010)
AB1594	517750	218920	FERNÁNDEZ (2010)
AB1600	530520	218125	FERNÁNDEZ (2010)
AB1605	532750	219725	FERNÁNDEZ (2010)
AB1618	517900	219350	FERNÁNDEZ (2010)
AB1646	527520	220100	FERNÁNDEZ (2010)
AB1726	516600	218900	FERNÁNDEZ (2010)
AB1827	526190	217190	FERNÁNDEZ (2010)
AB1930	516645	219600	FERNÁNDEZ (2010)
AB1966	529100	217300	FERNÁNDEZ (2010)
AB2096	518300	219300	FERNÁNDEZ (2010)
AB2110	518360	217375	FERNÁNDEZ (2010)
AB2181	530460	218060	FERNÁNDEZ (2010)
AB2256	528820	217320	FERNÁNDEZ (2010)
AB2294	533680	219100	FERNÁNDEZ (2010)

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Identificación de pozo	Coordenada X	Coordenada Y	Fuente
AB2304	529421	219379	FERNÁNDEZ (2010)
AB2312	529170	217046	FERNÁNDEZ (2010)
AB2331	517900	219900	FERNÁNDEZ (2010)
AB2333	523800	218900	FERNÁNDEZ (2010)
AB2339	524900	218400	FERNÁNDEZ (2010)
AB2415	528345	217655	FERNÁNDEZ (2010)
BA0073	528300	220900	FERNÁNDEZ (2010)
BA0077	521300	221300	FERNÁNDEZ (2010)
BA0081	525700	220900	FERNÁNDEZ (2010)
BA0107	521800	221200	FERNÁNDEZ (2010)
BA0113	525900	220400	FERNÁNDEZ (2010)
BA0158	518650	222870	FERNÁNDEZ (2010)
BA0161	526650	222800	FERNÁNDEZ (2010)
BA0166	527950	226150	FERNÁNDEZ (2010)
BA0168	530950	220500	FERNÁNDEZ (2010)
BA0207	518570	220980	FERNÁNDEZ (2010)
BA0247	522580	221100	FERNÁNDEZ (2010)
BA0282	522850	220300	FERNÁNDEZ (2010)
BA0307	522600	223750	FERNÁNDEZ (2010)
BA0346	525100	222800	FERNÁNDEZ (2010)
BA0381	523250	224000	FERNÁNDEZ (2010)
BA0444	526770	225425	FERNÁNDEZ (2010)
BA0451	524075	222900	FERNÁNDEZ (2010)
BA0473	525020	221500	FERNÁNDEZ (2010)
BA0475	522000	222350	FERNÁNDEZ (2010)
BA0477	530150	223550	FERNÁNDEZ (2010)
BA0492	531500	222100	FERNÁNDEZ (2010)
BA0527	519720	221680	FERNÁNDEZ (2010)
BA0567	524340	221250	FERNÁNDEZ (2010)
BA0572	530070	223110	FERNÁNDEZ (2010)
BA0587	522265	221200	FERNÁNDEZ (2010)
BA0618	522970	221500	FERNÁNDEZ (2010)
BA0620	533875	221450	FERNÁNDEZ (2010)
BA0642	518100	221030	FERNÁNDEZ (2010)
BA0643	517350	220850	FERNÁNDEZ (2010)
BA0663	523200	226050	FERNÁNDEZ (2010)
BA0720	519100	221400	FERNÁNDEZ (2010)
BA0729	525630	222830	FERNÁNDEZ (2010)
BA0742	531150	224100	FERNÁNDEZ (2010)

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Identificación de pozo	Coordenada X	Coordenada Y	Fuente
BA0773	522250	227800	FERNÁNDEZ (2010)
BA0796	519100	220700	FERNÁNDEZ (2010)
BA0830	530650	223900	FERNÁNDEZ (2010)
BA0856	519700	223360	FERNÁNDEZ (2010)
BA0897	526396	221803	FERNÁNDEZ (2010)
BA0917	522465	223549	FERNÁNDEZ (2010)
BA0174	523600	229750	FERNÁNDEZ (2010)
BA141	512850	224100	FERNÁNDEZ (2010)



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

**ANEXO II.B -
IDENTIFICACIÓN DE LOS
PUNTOS DONDE SE CONOCEN
LOS LÍMITES ENTRE LAS
UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS**



nemus •

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tabla 17 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tobas sobre Barva Superior.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0174	1812	523600	229750	1812	1794	18
BA-0773	1499	522250	227800	1499	1486	13

Tabla 18 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Barva Superior.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0166	1652	527950	226150	1652	1635	17
BA-0444	1573	526770	225425	1573	1553	20
BA-0451	1245	524075	222900	1245	1220	25
BA-0475	1154	522000	222350	1154	1111	43
BA-0077	1081	521300	221300	1081	1057	24

Tabla 19 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tobas sobre Barva Inferior.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0174	1812	523600	229750	1757	1754	3
BA-0773	1499	522250	227800	1451	1448	3
BA-0166	1652	527950	226150	1635	1629	6
BA-0444	1573	526770	225425	1553	1544	9
BA-0451	1245	524075	222900	1220	1214	6
BA-0475	1154	522000	222350	1111	1096	15
BA-0077	1081	521300	221300	1057	1049	8
AB-0478	1068	523100	218400	1068	1047	21
AB-0647	1031	519800	218750	1031	1016	15
AB-0951	1014	519750	218590	1014	1001	13
AB-1001	1184	527100	218620	1184	1179	5
AB-1025	1054	520300	220050	1054	1035	20
AB-1035	1096	521630	218800	1096	1094	2
AB-1132	1117	521250	219550	1117	1105	12
AB-1443	1017	520875	217950	1017	1002	15

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
AB-1594	953	517750	218920	953	945	8
AB-1618	978	517900	219350	978	968	10
AB-1646	1212	527520	220100	1212	1194	18
AB-1726	952	516600	218900	952	941	11
AB-1731	1043	519975	219190	1043	1030	13
AB-1875	1119	523000	219560	1119	1101	18
AB-1930	963	516645	219600	963	949	15
AB-2096	968	518300	219300	968	952	16
BA-0073	1268	528300	220900	1268	1250	18
BA-0081	1232	525700	220900	1232	1214	18
BA-0107	1115	521800	221200	1115	1095	20
BA-0158	1055	518650	222870	1055	1039	16
BA-0161	1325	526650	222800	1325	1311	14
BA-0207	1016	518570	220980	1016	971	45
BA-0247	1148	522580	221100	1148	1133	15
BA-0282	1133	522850	220300	1133	1109	25
BA-0307	1238	522600	223750	1238	1204	34
BA-0346	1296	525100	222800	1296	1276	20
BA-0381	1307	523250	224000	1307	1267	40
BA-0473	1233	525020	221500	1233	1221	12
BA-0527	1059	519720	221680	1059	1042	17
BA-0587	1145	522265	221200	1145	1133	12
BA-0642	996	518100	221030	996	982	14
BA-0643	971	517350	220850	971	952	19
BA-0729	1337	525630	222830	1337	1329	8
BA-0796	1041	519100	220700	1041	1019	22
BA-0856	1126	519700	223360	1126	1105	21
BA-0897	1248	526396	221803	1248	1230	18
BA-0917	1205	522465	223549	1205	1175	30
AB-2331	991	517900	219900	991	979	12

Tabla 20 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Barva Inferior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0174	1812	523600	229750	1754	1742	12
BA-0773	1499	522250	227800	1448	1418	30
BA-0166	1652	527950	226150	1629	1610	19
BA-0444	1573	526770	225425	1544	1516	28
BA-0451	1245	524075	222900	1214	1207	7
BA-0475	1154	522000	222350	1097	1076	21
BA-0077	1081	521300	221300	1049	1041	8
AB-0478	1068	523100	218400	1047	1042	5
AB-0647	1031	519800	218750	1016	994	21
AB-0951	1014	519750	218590	1001	956	45
AB-1001	1184	527100	218620	1179	1170	9
AB-1025	1054	520300	220050	1035	991	43
AB-1035	1096	521630	218800	1094	1040	54
AB-1132	1117	521250	219550	1105	997	108
AB-1443	1017	520875	217950	1002	975	27
AB-1594	953	517750	218920	945	912	33
AB-1618	978	517900	219350	968	926	42
AB-1646	1212	527520	220100	1194	1178	16
AB-1726	952	516600	218900	941	910	31
AB-1731	1043	519975	219190	1030	995	35
AB-1875	1119	523000	219560	1101	1059	42
AB-1930	963	516645	219600	949	924	25
AB-2096	968	518300	219300	952	928	24
BA-0073	1268	528300	220900	1250	1242	8
BA-0081	1232	525700	220900	1232	1214	18
BA-0081	1232	525700	220900	1214	1195	18
BA-0107	1115	521800	221200	1095	1089	6
BA-0158	1055	518650	222870	1039	1027	12
BA-0161	1325	526650	222800	1311	1272	39
BA-0207	1016	518570	220980	971	936	35
BA-0247	1148	522580	221100	1133	1108	25
BA-0282	1133	522850	220300	1109	1077	31
BA-0307	1238	522600	223750	1204	1173	31
BA-0346	1296	525100	222800	1276	1256	20
BA-0381	1307	523250	224000	1267	1227	40
BA-0473	1233	525020	221500	1221	1171	50

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0527	1059	519720	221680	1042	1016	26
BA-0587	1145	522265	221200	1133	1125	8
BA-0642	996	518100	221030	982	936	46
BA-0643	971	517350	220850	952	931	21
BA-0729	1337	525630	222830	1329	1295	34
BA-0796	1041	519100	220700	1019	971	48
BA-0856	1126	519700	223360	1105	1099	6
BA-0897	1248	526396	221803	1230	1167	63
BA-0917	1205	522465	223549	1175	1160	15
AB-2331	991	517900	219900	979	946	33

Tabla 21 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Tiribi.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0174	1812	523600	229750	1742	1735	7
BA-0773	1499	522250	227800	1418	1394	24
BA-0166	1652	527950	226150	1610	1606	5
BA-0444	1573	526770	225425	1516	1463	53
BA-0451	1245	524075	222900	1207	1188	19
BA-0475	1154	522000	222350	1076	1064	12
BA-0077	1081	521300	221300	1041	1004	38
AB-0336	942	518220	217280	942	906	36
AB-0459	1099	525000	217700	1099	1080	19
AB-0478	1068	523100	218400	1042	1023	19
AB-0490	1124	525300	218300	1124	1103	21
AB-0511	1203	528900	219050	1203	1172	31
AB-0549	1068	524400	216700	1068	1030	38
AB-0562	1108	524400	218400	1108	1096	12
AB-0574	1056	523600	216700	1056	942	114
AB-0577	1071	524100	217620	1071	1034	37
AB-0644	1055	523960	217400	1055	992	63
AB-0647	1031	519800	218750	994	953	41
AB-0656	1086	525000	217500	1086	1055	31
AB-0685	1105	524500	218500	1105	1088	17

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
AB-0697	1003	523930	216050	1003	989	14
AB-0738	908	516610	217680	908	886	22
AB-0764	1172	525250	219600	1172	1157	15
AB-0881	1078	524500	216820	1078	1012	66
AB-0910	1191	528150	218220	1191	1157	34
AB-0951	1014	519750	218590	956	937	19
AB-1001	1184	527100	218620	1170	1152	18
AB-1025	1054	520300	220050	991	961	30
AB-1026	1016	521210	216900	1016	949	67
AB-1035	1096	521630	218800	1040	1001	39
AB-1132	1117	521250	219550	997	983	14
AB-1142	1270	530800	218700	1270	1224	46
AB-1397	1289	532000	220000	1289	1241	48
AB-1443	1017	520875	217950	975	939	36
AB-1500	1294	532200	220000	1294	1239	55
AB-1594	953	517750	218920	912	882	30
AB-1600	1240	530520	218125	1240	1197	43
AB-1605	1252	532750	219725	1252	1241	11
AB-1618	978	517900	219350	926	890	36
AB-1646	1212	527520	220100	1178	1162	16
AB-1670	1045	522900	217100	1045	990	55
AB-1726	952	516600	218900	910	882	28
AB-1731	1043	519975	219190	995	991	4
AB-1827	1121	526190	217190	1121	1077	44
AB-1875	1119	523000	219560	1059	1031	28
AB-1930	963	516645	219600	924	890	34
AB-1966	1192	529100	217300	1192	1171	21
AB-2096	968	518300	219300	928	868	60
AB-2110	944	518360	217375	944	926	18
AB-2181	1237	530460	218060	1237	1199	38
AB-2256	1196	528820	217320	1196	1127	69
AB-2294	1304	533680	219100	1304	1262	42
AB-2339	1122	524900	218400	1122	1099	23
BA-0073	1268	528300	220900	1242	1233	9
BA-0081	1232	525700	220900	1195	1180	15
BA-0107	1115	521800	221200	1089	1086	3

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0158	1055	518650	222870	1027	923	104
BA-0161	1325	526650	222800	1272	1248	24
BA-0168	1291	530950	220500	1291	1231	60
BA-0207	1016	518570	220980	936	902	34
BA-0247	1148	522580	221100	1108	1088	20
BA-0282	1133	522850	220300	1077	1056	21
BA-0307	1238	522600	223750	1173	1142	31
BA-0346	1296	525100	222800	1256	1206	50
BA-0381	1307	523250	224000	1227	1194	33
BA-0473	1233	525020	221500	1171	1133	38
BA-0527	1059	519720	221680	1016	941	75
BA-0587	1145	522265	221200	1125	1097	28
BA-0620	1377	533875	221450	1377	1324	53
BA-0642	996	518100	221030	936	837	99
BA-0643	971	517350	220850	931	879	53
BA-0729	1337	525630	222830	1295	1251	44
BA-0796	1041	519100	220700	971	925	46
BA-0856	1126	519700	223360	1099	1079	20
BA-0897	1248	526396	221803	1167	1156	11
BA-0917	1205	522465	223549	1160	1119	41
AB-2331	991	517900	219900	946	904	42
BA-163	1157	522800	222200	1052	1027	25
BA-164	1023	516700	222200	976	866	110
AB-548	1015	524300	216000	1015	996	19
AB-595	1060	524100	216900	1060	973	87
AB-1089	1005	520000	218300	1005	983	22
AB-908	894	515521	217640	894	887	7
AB-909	874	514670	217000	874	839	35
AB-985	877	513300	218480	877	841	36
BA-206	917	514500	220700	873	854	19
BA-215	1385	534460	221100	1385	1235	150
BA-216	1126	522750	220320	1071	1064	7
AB-443	1063	522400	213700	1063	1005	58
AB-462	1082	524200	214650	1082	1040	42
AB-484	1106	526200	214900	1106	1076	30
AB-635	1109	525900	211600	1109	1070	39

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
AB-667	1123	525220	213180	1123	1083	40
AB-1117	1036	522570	216130	1036	952	84
AB-1118	1015	521650	216350	1015	950	65
AB-1279	1060	523430	215820	1060	970	90
AB-1310	1079	523550	214250	1079	1057	22
AB-1328	1076	524150	215075	1076	1040	36
AB-1402	1106	524770	214370	1106	1073	33
AB-1684	1137	525320	212835	1137	1060	77
AB-1788	1119	524450	213650	1119	1060	59

Tabla 22 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica La Libertad.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0174	1812	523600	229750	1735	1727	8
BA-0773	1499	522250	227800	1394	1348	46
BA-0166	1652	527950	226150	1606	1582	24
AB-0458	1150	530200	217400	1150	1105	45
AB-0459	1099	525000	217700	1080	1058	22
AB-0478	1068	523100	218400	1023	1006	17
AB-0490	1124	525300	218300	1103	1075	28
AB-0511	1203	528900	219050	1172	1121	52
AB-0549	1068	524400	216700	1030	1018	12
AB-0562	1108	524400	218400	1096	1039	57
AB-0577	1071	524100	217620	1034	1016	18
AB-0656	1086	525000	217500	1055	1019	36
AB-0685	1105	524500	218500	1088	1035	53
AB-0764	1172	525250	219600	1157	1128	29
AB-0881	1078	524500	216820	1012	998	14
AB-0910	1191	528150	218220	1157	1084	73
AB-1001	1184	527100	218620	1152	1129	23
AB-1142	1270	530800	218700	1224	1140	84
AB-1397	1289	532000	220000	1241	1219	22
AB-1500	1294	532200	220000	1239	1224	15
AB-1600	1240	530520	218125	1197	1162	35

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
AB-1605	1252	532750	219725	1241	1174	67
AB-1646	1212	527520	220100	1162	1132	30
AB-1827	1121	526190	217190	1077	1032	45
AB-1966	1192	529100	217300	1171	1155	16
AB-2181	1237	530460	218060	1199	1182	17
AB-2256	1196	528820	217320	1127	1055	72
AB-2294	1304	533680	219100	1262	1228	34
AB-2312	1188	529170	217046	1188	1178	10
AB-2339	1122	524900	218400	1099	1060	39
AB-2415	1154	528345	217655	1154	1104	50
BA-0073	1268	528300	220900	1233	1218	15
BA-0081	1232	525700	220900	1180	1144	37
BA-0107	1115	521800	221200	1086	1067	19
BA-0161	1325	526650	222800	1248	1215	32
BA-0168	1291	530950	220500	1231	1163	68
BA-0381	1307	523250	224000	1194	1173	21
BA-0473	1233	525020	221500	1133	1113	20
BA-0587	1145	522265	221200	1097	1045	52
BA-0729	1337	525630	222830	1251	1219	32
BA-0897	1248	526396	221803	1156	1099	57
BA-339	1230	524350	222100	1138	1125	13

Tabla 23 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Colima Superior.

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0773	1499	522250	227800	1348	1281	67
BA-0166	1652	527950	226150	1561	1520	41

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0444	1573	526770	225425	1463	1343	120
BA-0451	1245	524075	222900	1188	1145	43
BA-0475	1154	522000	222350	1064	1045	19
BA-0077	1081	521300	221300	1004	980	24
AB-0336	942	518220	217280	906	866	40
AB-0458	1150	530200	217400	1105	1071	34
AB-0459	1099	525000	217700	1058	1020	38
AB-0478	1068	523100	218400	1006	967	39
AB-0490	1124	525300	218300	1075	1061	14
AB-0511	1203	528900	219050	1121	1073	47
AB-0549	1068	524400	216700	1018	973	45
AB-0562	1108	524400	218400	1039	1024	15
AB-0574	1056	523600	216700	942	916	26
AB-0577	1071	524100	217620	1016	950	66
AB-0644	1055	523960	217400	992	947	45
AB-0647	1031	519800	218750	953	944	9
AB-0656	1086	525000	217500	1019	977	42
AB-0685	1105	524500	218500	1035	1015	20
AB-0697	1003	523930	216050	989	949	40
AB-0738	908	516610	217680	886	841	45
AB-0764	1172	525250	219600	1128	1033	95
AB-0881	1078	524500	216820	998	975	23
AB-0910	1191	528150	218220	1084	1048	36
AB-0951	1014	519750	218590	937	893	44
AB-1001	1184	527100	218620	1129	1070	59
AB-1025	1054	520300	220050	961	942	19
AB-1026	1016	521210	216900	949	923	26
AB-1035	1096	521630	218800	1001	945	56
AB-1132	1117	521250	219550	983	937	46
AB-1142	1270	530800	218700	1140	1118	22
AB-1397	1289	532000	220000	1219	1122	97
AB-1443	1017	520875	217950	939	929	10
AB-1500	1294	532200	220000	1224	1127	97
AB-1594	953	517750	218920	882	828	54
AB-1600	1240	530520	218125	1162	1094	68
AB-1605	1252	532750	219725	1174	1140	34

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
AB-1618	978	517900	219350	890	838	52
AB-1646	1212	527520	220100	1132	1080	52
AB-1670	1045	522900	217100	990	827	163
AB-1726	952	516600	218900	882	826	56
AB-1731	1043	519975	219190	991	973	18
AB-1827	1121	526190	217190	1032	1017	15
AB-1875	1119	523000	219560	1031	989	42
AB-1930	963	516645	219600	890	846	44
AB-1966	1192	529100	217300	1155	1094	61
AB-2096	968	518300	219300	868	853	15
AB-2110	944	518360	217375	926	886	40
AB-2181	1237	530460	218060	1182	1117	65
AB-2256	1196	528820	217320	1055	1038	17
AB-2294	1304	533680	219100	1228	1192	36
AB-2312	1188	529170	217046	1178	1112	66
AB-2339	1122	524900	218400	1060	994	66
AB-2415	1154	528345	217655	1104	1044	60
BA-0073	1268	528300	220900	1218	1135	83
BA-0081	1232	525700	220900	1144	1077	67
BA-0107	1115	521800	221200	1067	1050	18
BA-0158	1055	518650	222870	923	846	77
BA-0161	1325	526650	222800	1215	1157	59
BA-0168	1291	530950	220500	1163	1088	75
BA-0207	1016	518570	220980	902	860	42
BA-0247	1148	522580	221100	1088	1018	70
BA-0282	1133	522850	220300	1056	989	67
BA-0307	1238	522600	223750	1142	1105	37
BA-0346	1296	525100	222800	1206	1172	34
BA-0381	1307	523250	224000	1173	1152	21
BA-0473	1233	525020	221500	1113	1086	27
BA-0527	1059	519720	221680	941	923	18
BA-0587	1145	522265	221200	1045	941	104
BA-0620	1377	533875	221450	1324	1261	63
BA-0642	996	518100	221030	837	803	34
BA-0643	971	517350	220850	879	823	56
BA-0729	1337	525630	222830	1219	1209	10

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0796	1041	519100	220700	925	911	14
BA-0856	1126	519700	223360	1079	1026	53
BA-0897	1248	526396	221803	1099	1074	25
BA-0917	1205	522465	223549	1119	1095	24
AB-2331	991	517900	219900	904	871	33
BA-163	1157	522800	222200	1027	922	105
BA-164	1023	516700	222200	865	790	75
AB-548	1015	524300	216000	996	972	24
AB-595	1060	524100	216900	973	962	11
AB-1089	1005	520000	218300	983	894	89
BA-339	1230	524350	222100	1125	1112	13
AB-908	894	515521	217640	887	834	53
AB-909	874	514670	217000	839	829	10
AB-985	877	513300	218480	841	800	41
BA-206	917	514500	220700	854	837	17
BA-215	1385	534460	221100	1235	1185	50
BA-216	1126	522750	220320	1064	1009	55
AB-443	1063	522400	213700	1005	985	20
AB-462	1082	524200	214650	1040	1006	34
AB-484	1106	526200	214900	1076	1076	0
AB-484	1106	526200	214900	1076	1006	70
AB-635	1109	525900	211600	1070	1010	60
AB-667	1123	525220	213180	1083	986	97
AB-1117	1036	522570	216130	952	915	37
AB-1118	1015	521650	216350	950	905	45
AB-1279	1060	523430	215820	970	957	13
AB-1310	1079	523550	214250	1057	1022	35
AB-1328	1076	524150	215075	1040	1007	33
AB-1402	1106	524770	214370	1073	995	78
AB-1684	1137	525320	212835	1060	984	76
AB-1788	1119	524450	213650	1060	1028	32

Tabla 24 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Puente Mulas.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0077	1081	521300	221300	980	947	33
AB-0458	1150	530200	217400	1071	1053	18
AB-0459	1099	525000	217700	1020	1008	13
AB-0478	1068	523100	218400	967	938	29
AB-0490	1124	525300	218300	1061	1044	16
AB-0549	1068	524400	216700	973	938	35
AB-0562	1108	524400	218400	1024	1000	24
AB-0577	1071	524100	217620	950	920	30
AB-0644	1055	523960	217400	947	922	25
AB-0656	1086	525000	217500	977	965	12
AB-0697	1003	523930	216050	949	886	63
AB-0738	908	516610	217680	841	811	30
AB-0881	1078	524500	216820	975	970	5
AB-0910	1191	528150	218220	1048	1013	35
AB-0951	1014	519750	218590	893	871	22
AB-1001	1184	527100	218620	1070	1042	28
AB-1025	1054	520300	220050	942	926	16
AB-1026	1016	521210	216900	923	914	9
AB-1132	1117	521250	219550	937	927	10
AB-1142	1270	530800	218700	1118	1102	16
AB-1397	1289	532000	220000	1122	1079	43
AB-1443	1017	520875	217950	929	919	10
AB-1500	1294	532200	220000	1127	1084	43
AB-1600	1240	530520	218125	1094	1060	34
AB-1618	978	517900	219350	838	833	5
AB-1646	1212	527520	220100	1080	1064	16
AB-1670	1045	522900	217100	827	805	22
AB-1726	952	516600	218900	826	792	34
AB-1875	1119	523000	219560	989	977	12
AB-1966	1192	529100	217300	1094	1071	23
AB-2110	944	518360	217375	886	872	14
AB-2256	1196	528820	217320	1038	1021	17
AB-2294	1304	533680	219100	1192	1148	44
AB-2312	1188	529170	217046	1112	1090	22
AB-2339	1122	524900	218400	994	973	21
AB-2415	1154	528345	217655	1044	1017	27

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0073	1268	528300	220900	1135	1112	23
BA-0081	1232	525700	220900	1077	1055	21
BA-0161	1325	526650	222800	1157	1144	13
BA-0207	1016	518570	220980	860	840	20
BA-0247	1148	522580	221100	1018	988	30
BA-0282	1133	522850	220300	989	982	7
BA-0307	1238	522600	223750	1105	1071	34
BA-0473	1233	525020	221500	1086	1055	31
BA-0587	1145	522265	221200	941	905	36
BA-0642	996	518100	221030	803	785	18
BA-0643	971	517350	220850	823	789	34
BA-0897	1248	526396	221803	1074	1056	18
BA-0917	1205	522465	223549	1095	1039	56
AB-548	1015	524300	216000	972	937	35
AB-595	1060	524100	216900	1058	923	135
AB-1089	1005	520000	218300	894	866	28
BA-339	1230	524350	222100	1112	1104	8
AB-908	894	515521	217640	834	821	13
AB-909	874	514670	217000	829	809	20
AB-985	877	513300	218480	800	795	5
BA-216	1126	522750	220320	1009	991	18
AB-443	1063	522400	213700	985	978	7
AB-462	1082	524200	214650	1006	942	64
AB-484	1106	526200	214900	1006	965	41
AB-635	1109	525900	211600	1010	944	66
AB-667	1123	525220	213180	986	942	44
AB-1279	1060	523430	215820	957	908	49
AB-1310	1079	523550	214250	1022	964	58
AB-1328	1076	524150	215075	1007	950	57
AB-1402	1106	524770	214370	995	960	35

Tabla 25 - Características geométricas de la unidad hidrogeológica Colima Inferior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0077	1081	521300	221300	947	868	80
AB-0458	1150	530200	217400	1053	1043	9
AB-0459	1099	525000	217700	1008	992	15
AB-0478	1068	523100	218400	938	918	20
AB-0490	1124	525300	218300	1044	1032	12
AB-0549	1068	524400	216700	938	893	45
AB-0562	1108	524400	218400	1000	973	27
AB-0577	1071	524100	217620	920	896	24
AB-0644	1055	523960	217400	922	871	50
AB-0656	1086	525000	217500	965	888	77
AB-0697	1003	523930	216050	886	877	9
AB-0738	908	516610	217680	811	708	103
AB-0881	1078	524500	216820	970	922	48
AB-0910	1191	528150	218220	1013	998	15
AB-0951	1014	519750	218590	871	808	64
AB-1001	1184	527100	218620	1042	1012	30
AB-1025	1054	520300	220050	926	894	32
AB-1026	1016	521210	216900	914	834	80
AB-1132	1117	521250	219550	927	872	55
AB-1142	1270	530800	218700	1102	1070	32
AB-1397	1289	532000	220000	1079	1059	20
AB-1443	1017	520875	217950	919	825	94
AB-1500	1294	532200	220000	1084	1064	20
AB-1600	1240	530520	218125	1060	1042	18
AB-1618	978	517900	219350	833	830	3
AB-1646	1212	527520	220100	1064	1052	12
AB-1670	1045	522900	217100	805	800	5
AB-1875	1119	523000	219560	977	875	102
AB-1966	1192	529100	217300	1071	952	119
AB-2110	944	518360	217375	872	844	28
AB-2256	1196	528820	217320	1021	976	45
AB-2294	1304	533680	219100	1148	1086	62
AB-2312	1188	529170	217046	1090	1038	52
AB-2339	1122	524900	218400	973	948	25
AB-2415	1154	528345	217655	1017	988	29
BA-0073	1268	528300	220900	1112	1088	25

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

POZO	Cota topográfica (m.s.n.m)	Coordenadas		Elevación		Espesor (m)
		X (m)	Y (m)	Techo (m.s.n.m)	Piso (m.s.n.m)	
BA-0081	1232	525700	220900	1055	979	76
BA-0161	1325	526650	222800	1144	1105	39
BA-0207	1016	518570	220980	840	798	42
BA-0247	1148	522580	221100	988	942	46
BA-0282	1133	522850	220300	982	971	11
BA-0307	1238	522600	223750	1071	1047	24
BA-0473	1233	525020	221500	1055	1033	22
BA-0587	1145	522265	221200	905	795	110
BA-0642	996	518100	221030	785	716	69
BA-0643	971	517350	220850	789	746	43
BA-0897	1248	526396	221803	1056	964	92
BA-0917	1205	522465	223549	1039	1015	24
AB-548	1015	524300	216000	972	937	35
AB-1089	1005	520000	218300	866	836	30
BA-339	1230	524350	222100	1104	1091	13
AB-908	894	515521	217640	821	790	31
AB-909	874	514670	217000	809	774	35
AB-985	877	513300	218480	795	727	68
BA-216	1126	522750	220320	991	941	50
AB-443	1063	522400	213700	978	974	4
AB-462	1082	524200	214650	942	936	6
AB-484	1106	526200	214900	965	946	19
AB-635	1109	525900	211600	944	898	46
AB-667	1123	525220	213180	942	916	26
AB-1279	1060	523430	215820	908	895	13
AB-1310	1079	523550	214250	964	951	13
AB-1328	1076	524150	215075	950	941	9
AB-1402	1106	524770	214370	960	943	17



nemus •

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

**ANEXO II.C -
CARACTERIZACIÓN
GEOMÉTRICA DE LAS
SUPERFICIES DE CONTACTO
INTERPOLADAS ENTRE LAS
UNIDADES
HIDROESTRATIGRÁFICAS**



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Con base en la definición de los límites superiores e inferiores de las unidades hidroestratigráficas identificadas en el **Anexo II.B**, se ha hecho la interpolación de la profundidad de los datos de lo techo y del piso de cada formación. Para la interpolación se optó utilizar el interpolador *Kriging* con el *software* Surfer. Se eligió este interpolador que es utilizado con frecuencia en diversos campos de aplicaciones de cartografía geológica e hidrogeológica, e interpolación espacial de datos en años recientes (Huang *et al.*, 2014). En la secuencia de figuras entre la Figura 41 a Figura 47 del **Anexo II.C** se presentan las superficies interpoladas del techo y del piso que limitan el límite superior y inferior de las unidades hidroestratigráficas consideradas en el proyecto. Esta información permitirá la construcción de la red tridimensional de elementos finitos del modelo de flujo del Sistema Acuífero Multicapa del Valle Central.

Del mismo modo, en la secuencia de Figura 48 a Figura 54 de este **Anexo II.C** se presenta la interpolación, también obtenida por el método de *Kriging*, del espesor de las formaciones que hacen parte del Sistema Acuífero del Valle Central.

Una nota importante no que respecta la Formación Colima Inferior es el hecho de que el piso de la formación nunca ha sido ultrapasado en los pozos estratigráficos. Por eso, los valores de piso de la Formación Colima Inferior identificados en el **Anexo II.B** y las interpolaciones que hacen referencia al piso e espesor del Colima Inferior (Figura 47 y Figura 54 del **Anexo II.C**, respectivamente) deberán ser interpretados como la profundidad máxima conocida de esa formación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

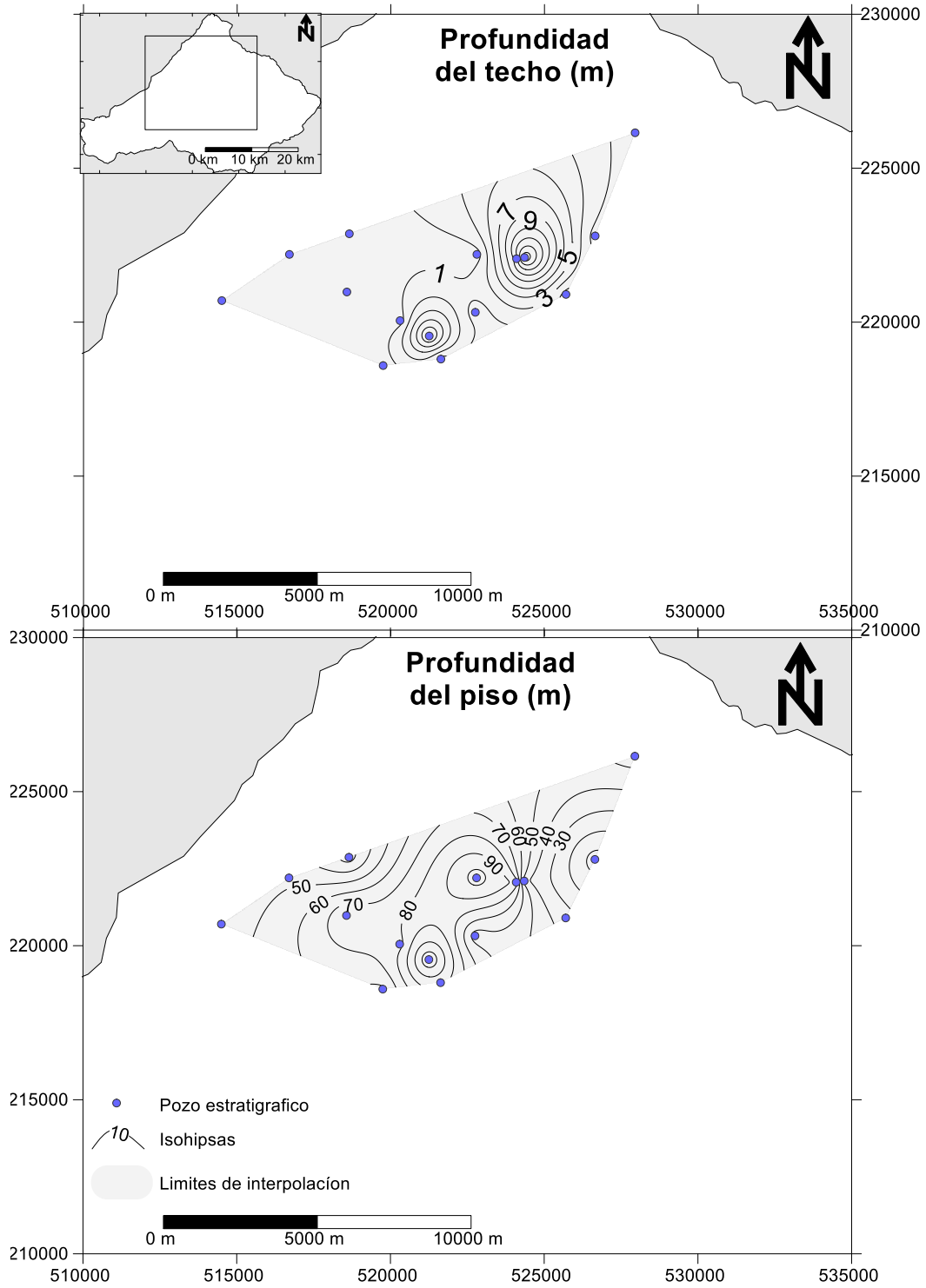


Figura 41 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Barba y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

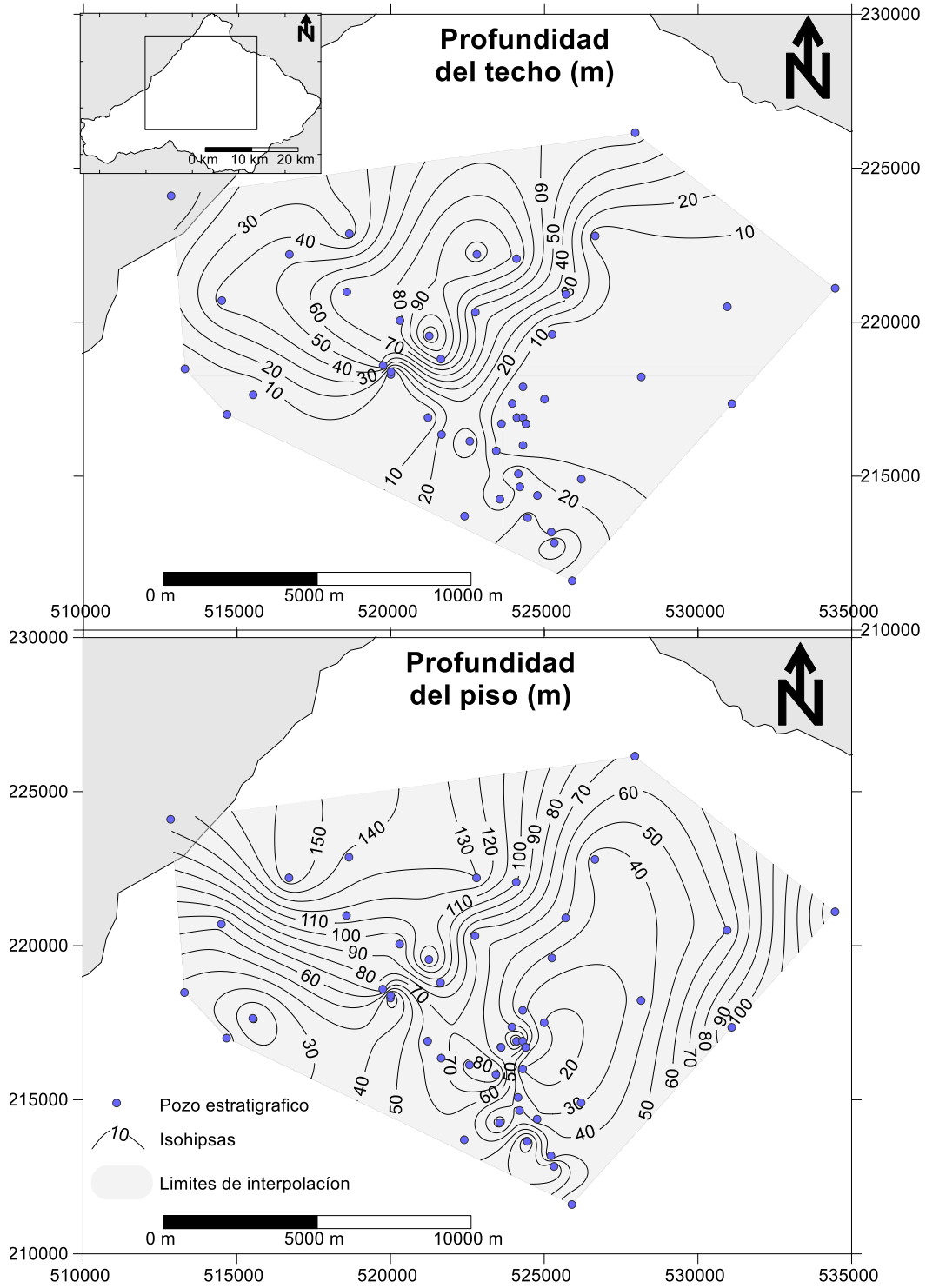


Figura 42 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Tiribi y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

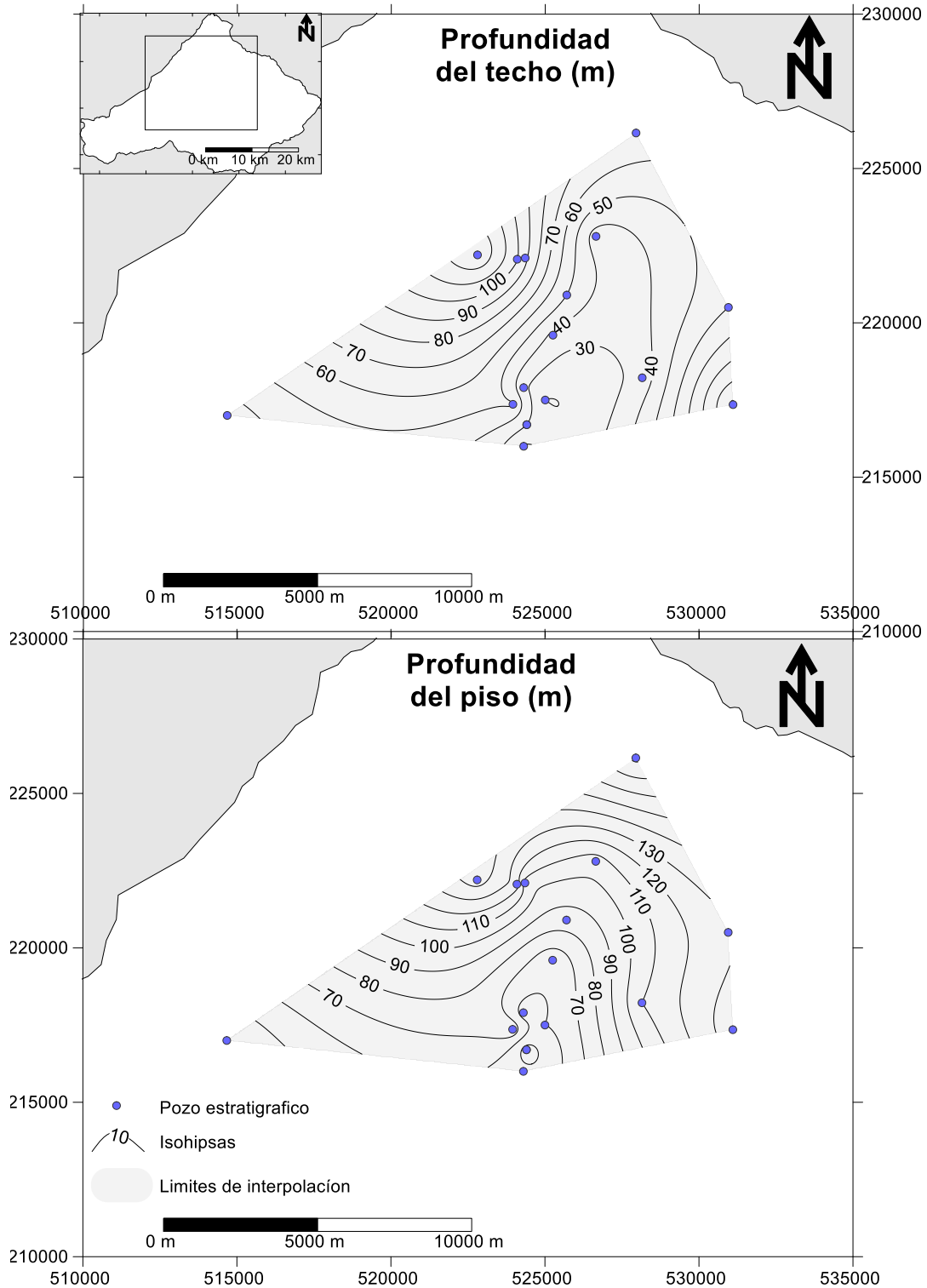


Figura 43 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación La Libertad y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

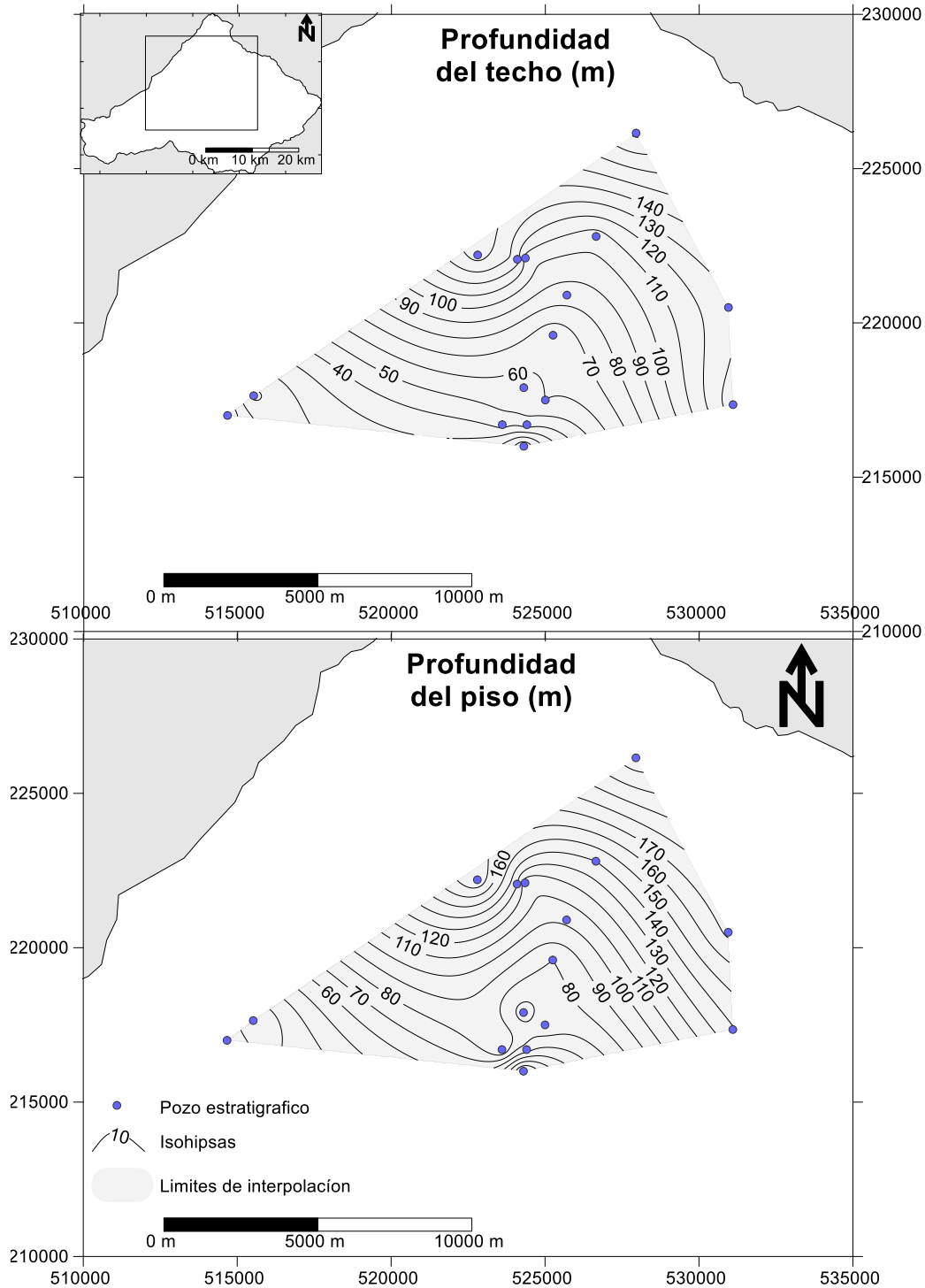


Figura 44 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación indiferenciada de Tobas situada entre las formaciones de La Libertad y Colima Superior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

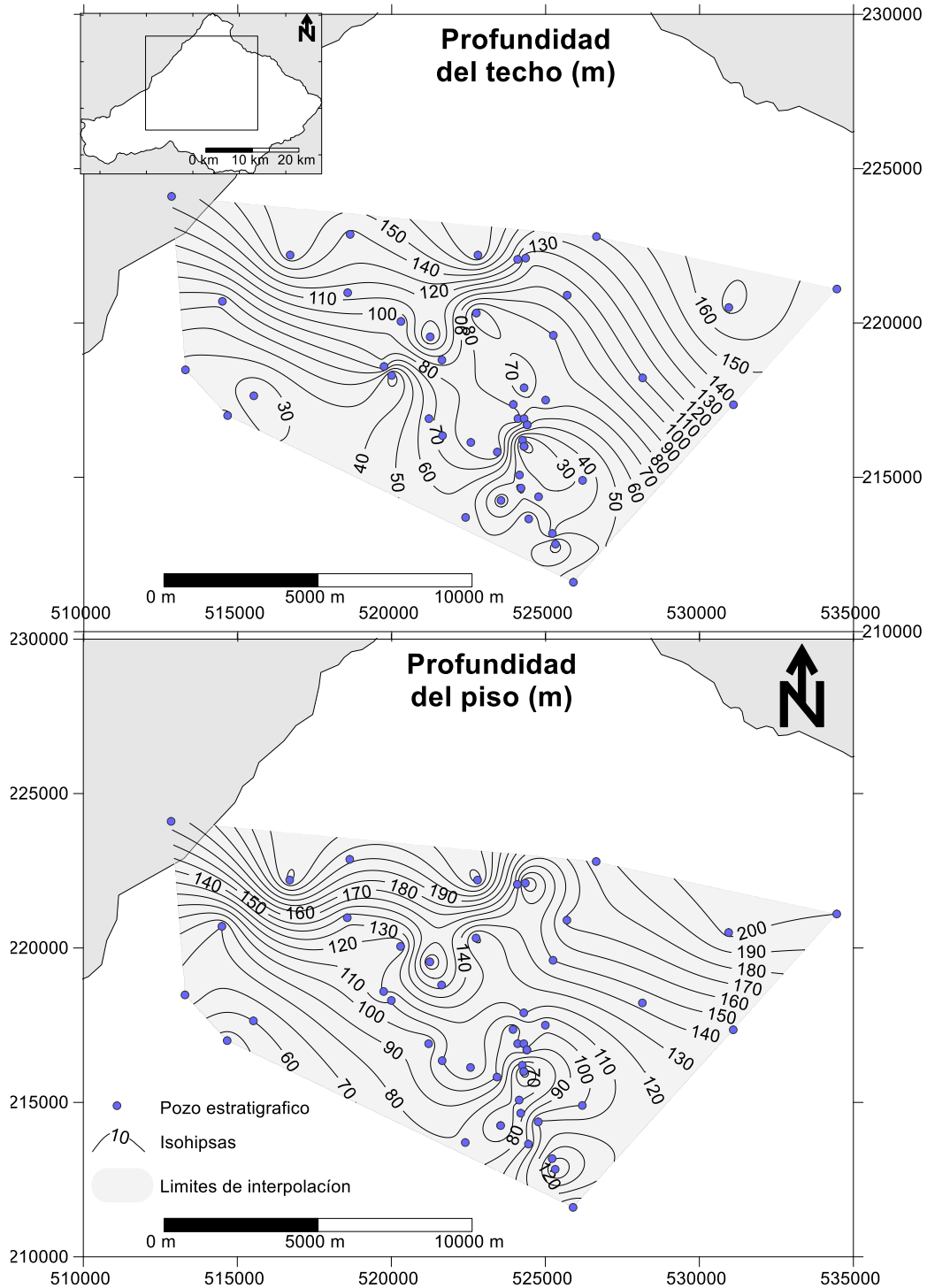


Figura 45 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Colima Superior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

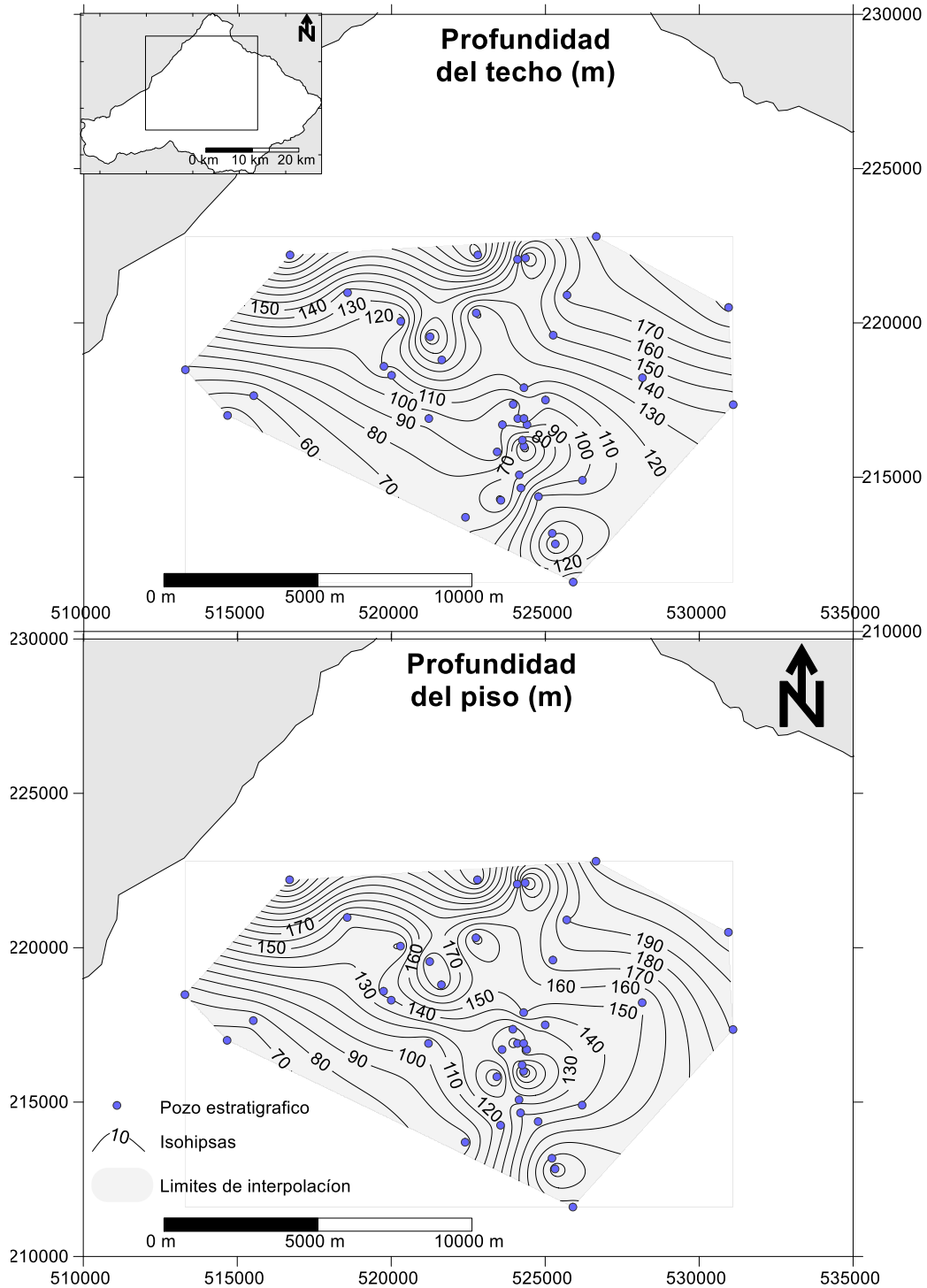


Figura 46 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Puente Mulas y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

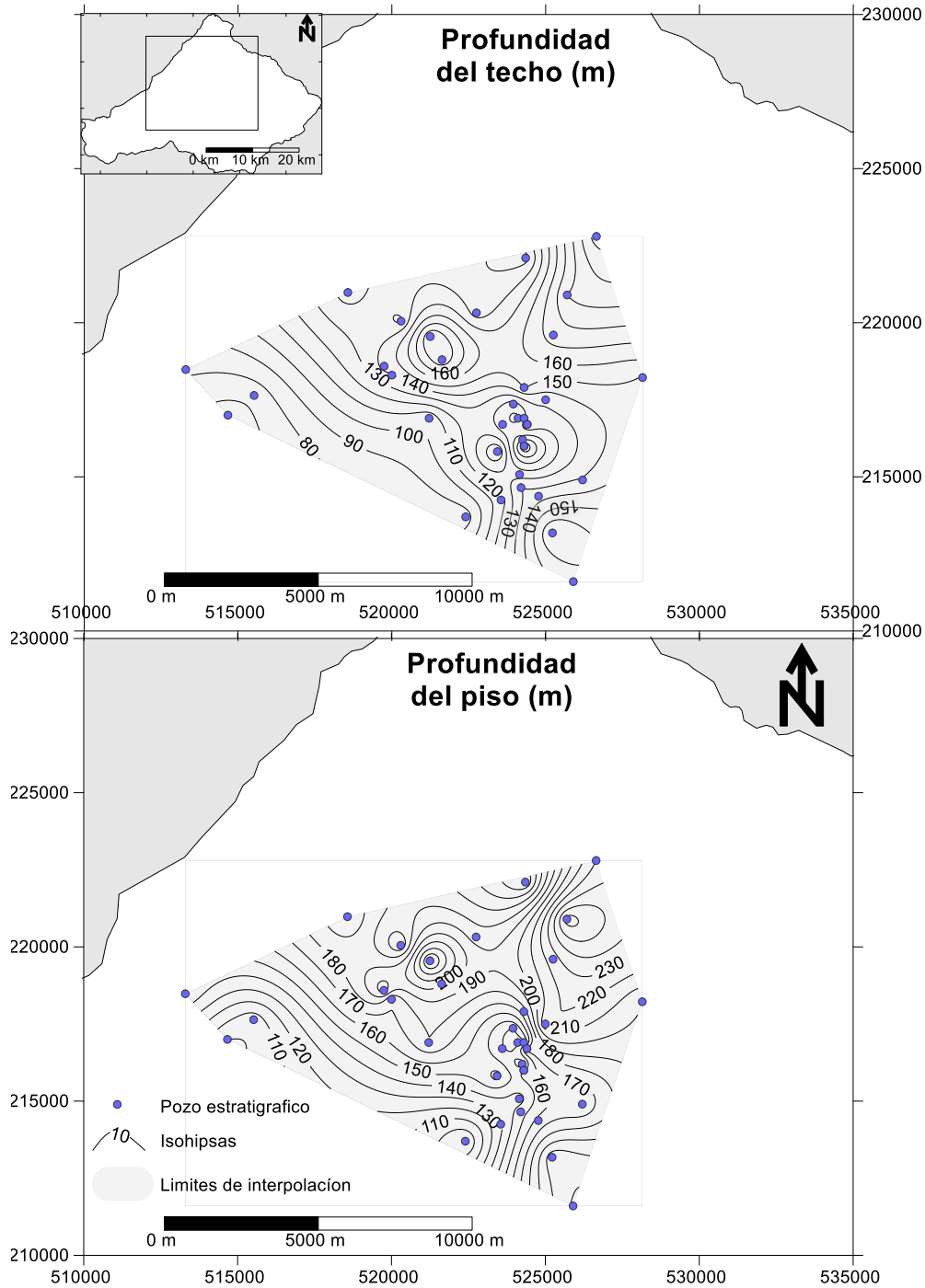


Figura 47 - Mapa de isohipsas (profundidad del techo e piso) de la Formación Colima Inferior y localización de los pozos estratigráficos utilizados para la interpolación. La información referente al piso de esta formación es definida segundo la información conocida, aunque su piso nunca hay sido ultrapasado en pozos estratigráficos.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

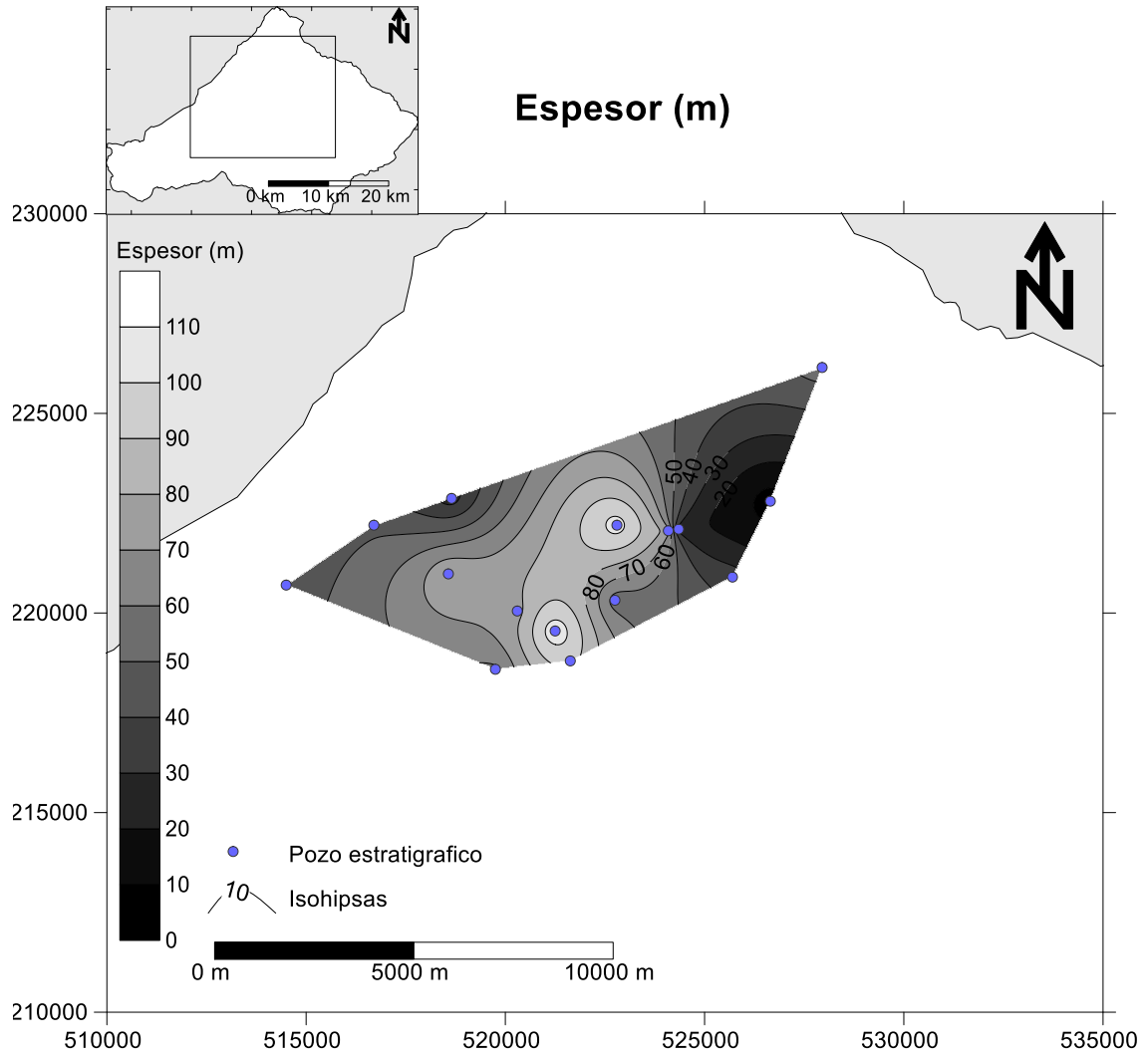


Figura 48 - Espesor interpolado de la Formación Barba.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

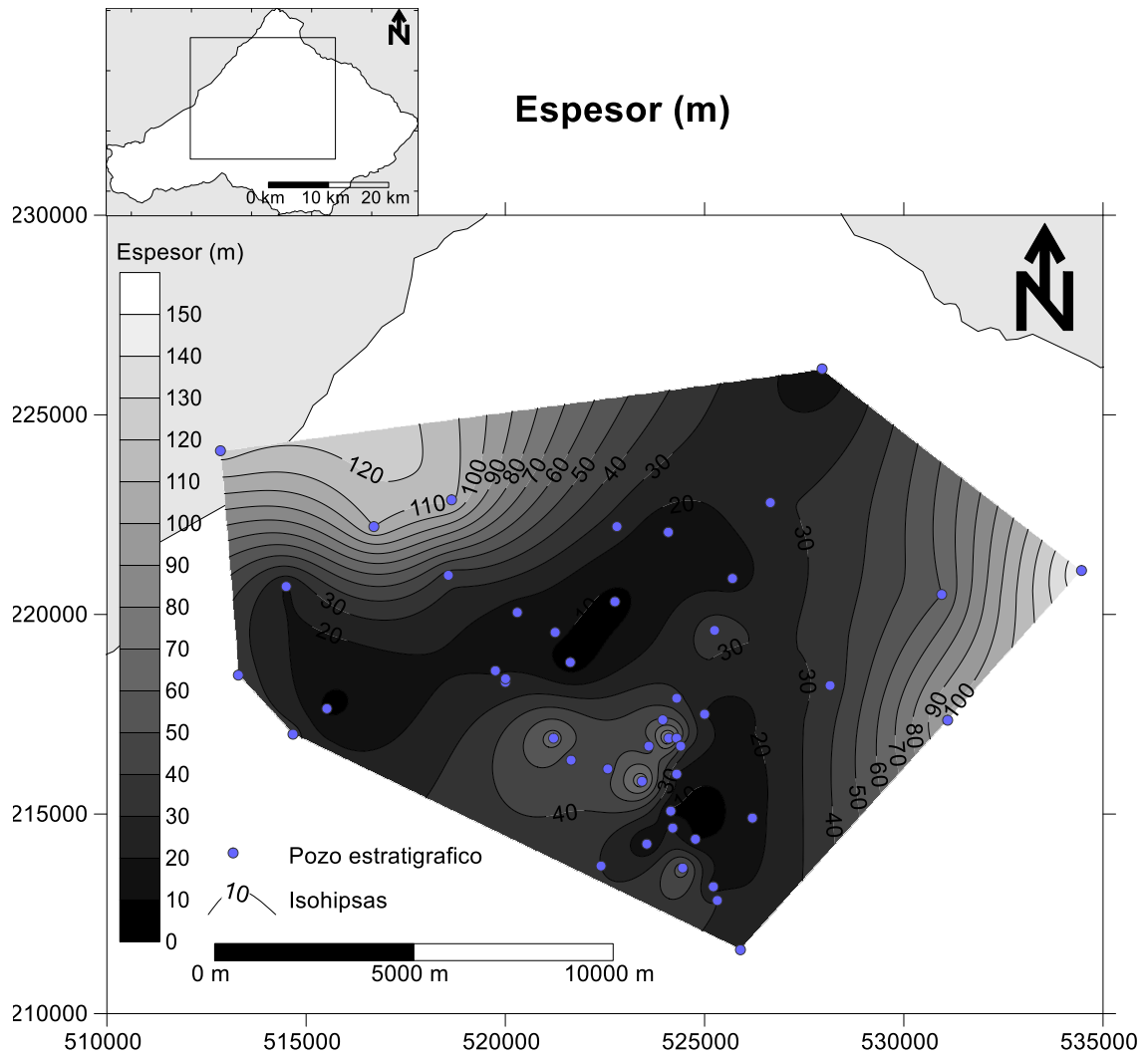


Figura 49 - Espesor interpolado de la Formación Tiribi.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

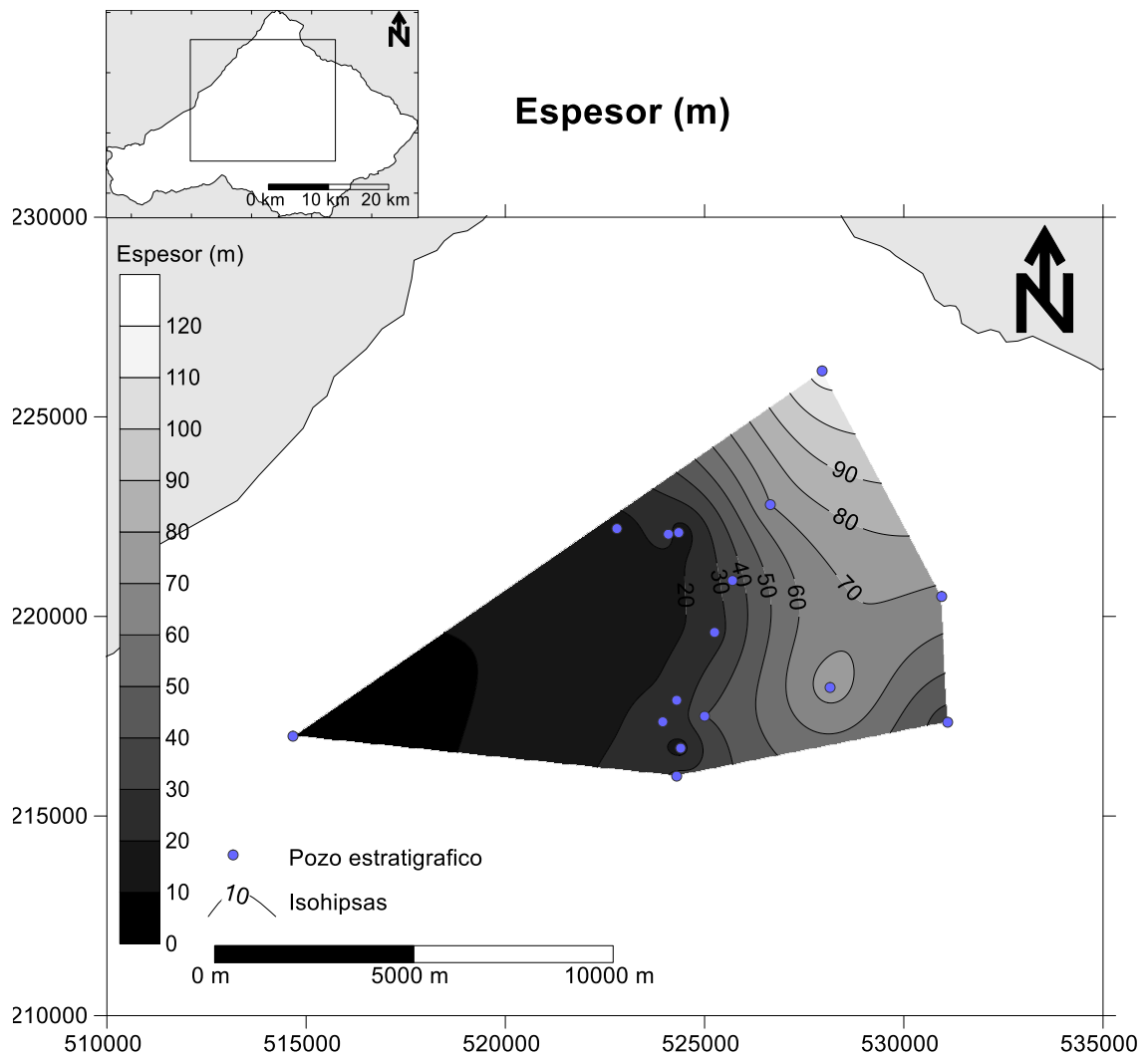


Figura 50 - Espesor interpolado de la Formación La Libertad.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

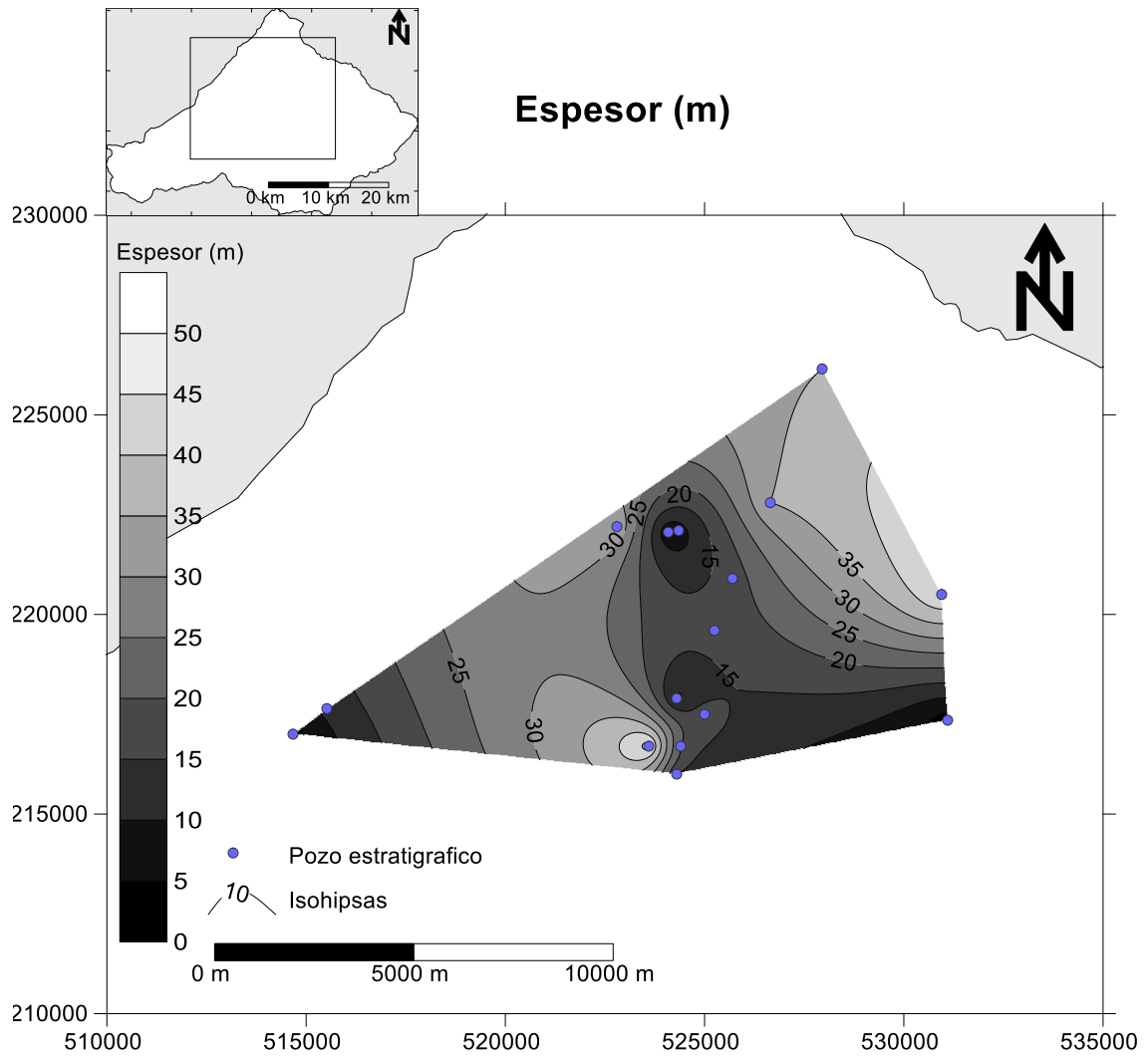


Figura 51 - Espesor interpolado de la formación indiferenciada de Tobas situada entre las formaciones La Libertad e Colima Superior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

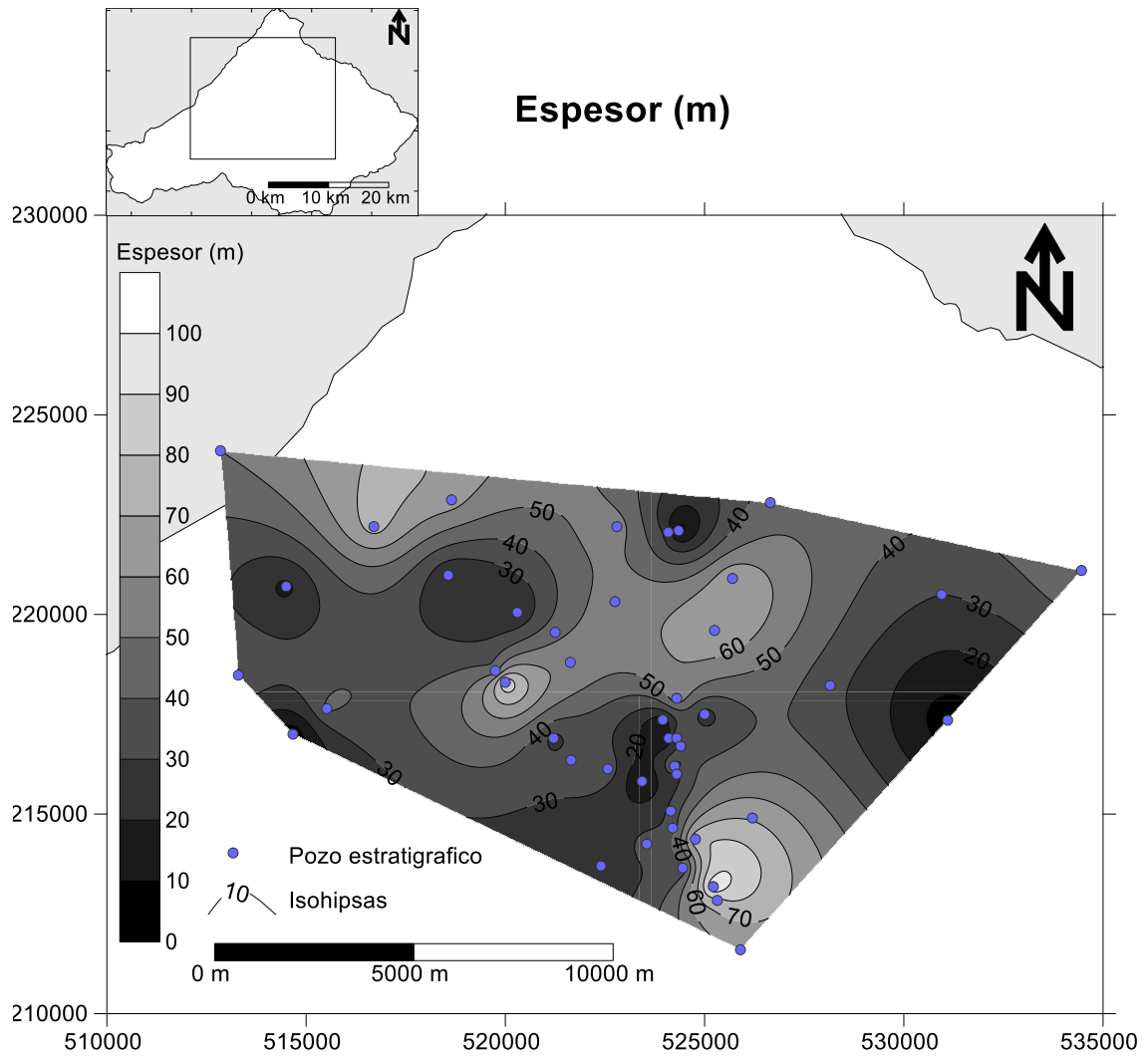


Figura 52 - Espesor interpolado de la Formación Colima Superior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

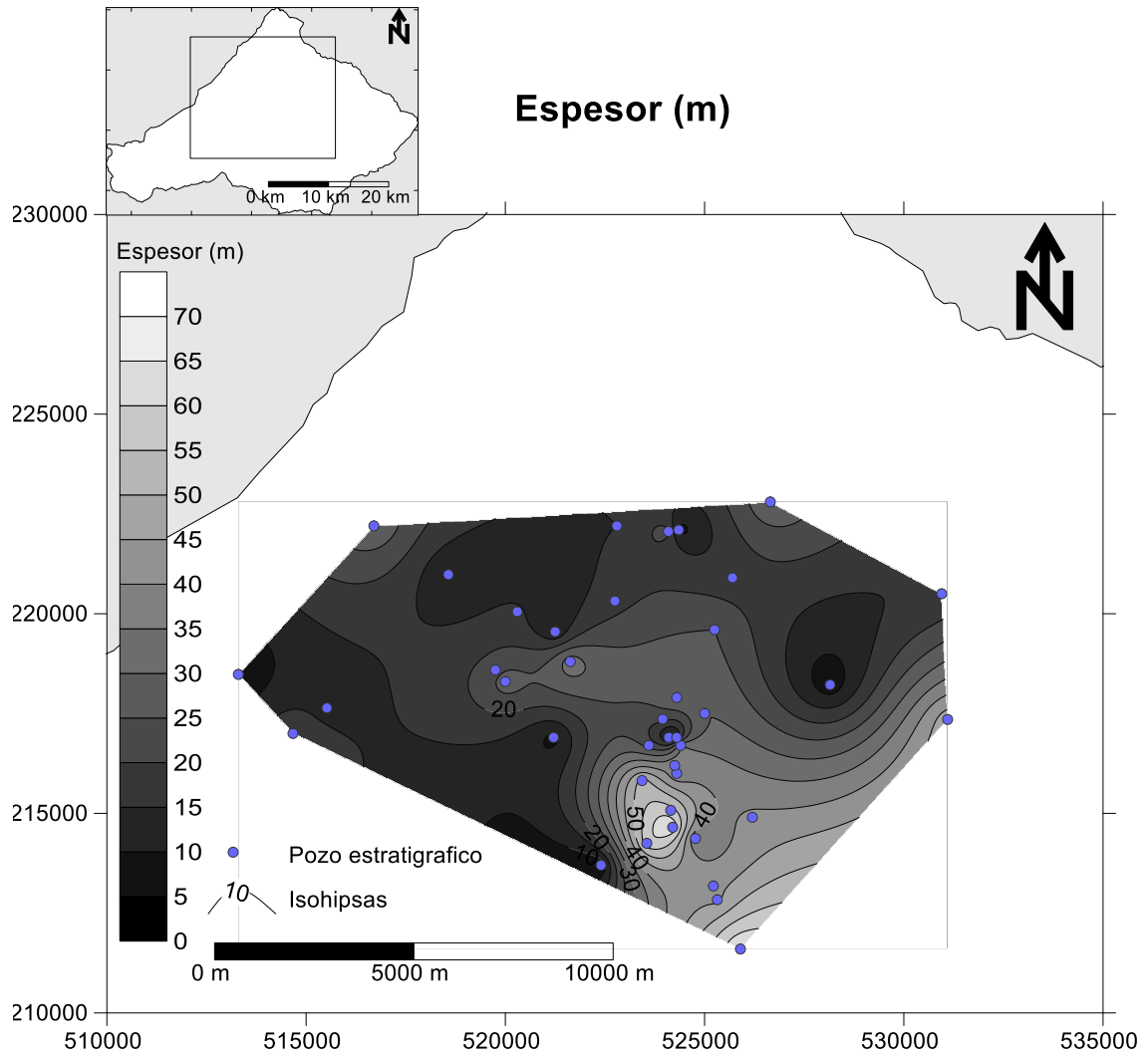


Figura 53 - Espesor interpolado de la Formación Puente Mulas.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

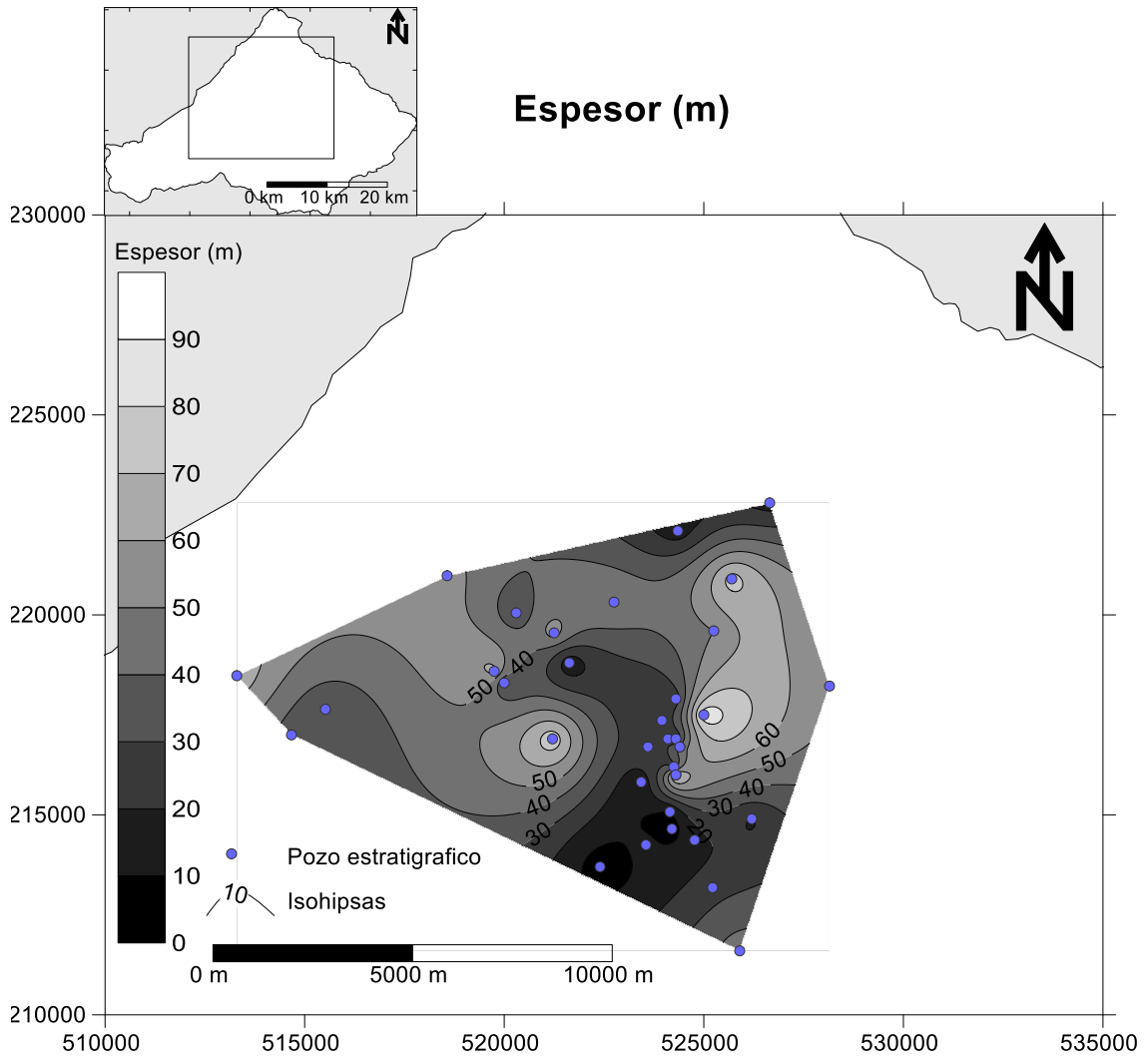


Figura 54 - Espesor interpolado de la Formación Colima Inferior. Como hay sido referido anteriormente, esta formación nunca hay sido ultrapasada en los pozos estratigráficos aunque el espesos presentado se ha basado en la profundidad máxima conocida de Colima Inferior.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

**ANEXO II.D –
INTERPOLACIÓN DE LAS
SUPERFICIES DE CONTACTO
ENTRE LAS UNIDADES
HIDROESTRATIGRÁFICAS
IMPLEMENTADAS EN EL
MODELO NUMÉRICO**



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Esta etapa del trabajo resultó en la definición de los límites, espesor e elevación del piso de cada formación que han sido implementados en el modelo numérico para la construcción de la red tridimensional de elementos finitos.

Miembro Cráter – Tobas sobre el Barva Superior

El miembro Cráter consiste en una formación acuitardo de tobas sobrepuestas sobre la formación Barva Superior. Presenta una pequeña expresión en el área del caso de estudio y sus límites de afloramiento y del piso coinciden.

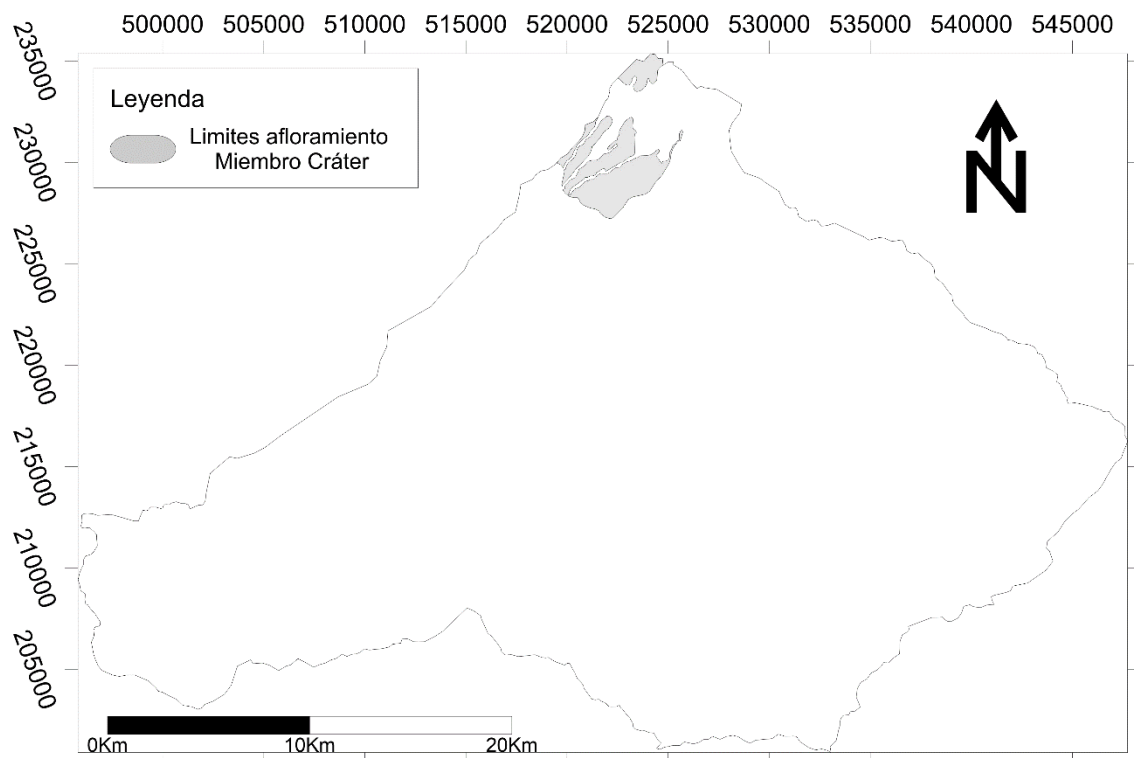


Figura 55 - Límites de afloramiento (coincidentes con los límites del piso) de la formación Cráter - Tobas sobre el Barva Superior.

La interpolación de esta formación presenta un espesor entre los 13,4 m y 17,9 m, con un espesor medio de 15,5 m. Los límites internos y externos de la formación han sido definidos con un espesor de 15,5 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

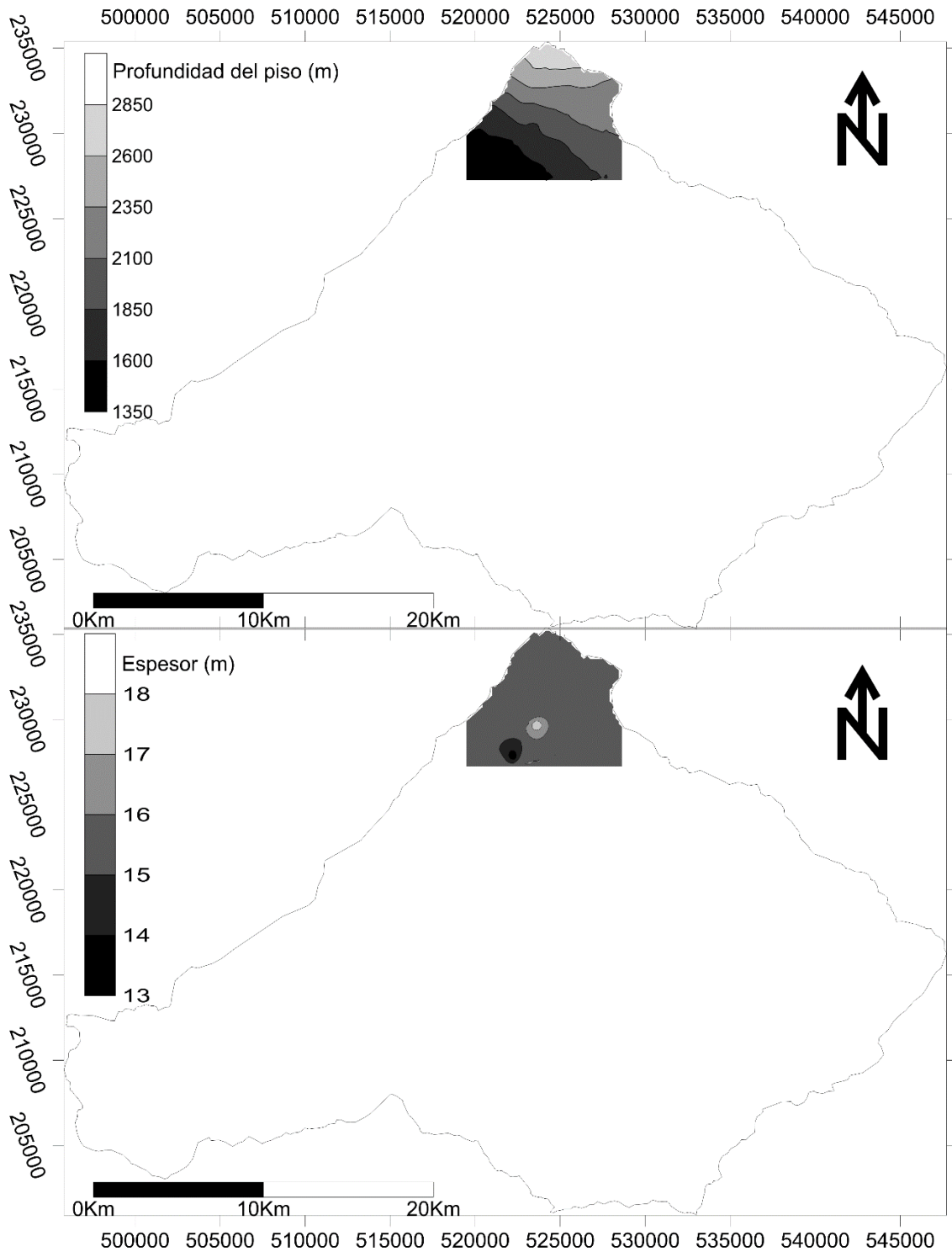


Figura 56 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación Miembro Cráter - Tobas sobre el Barva Superior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Barva Superior

La formación Barva Superior es una formación acuífera con una pequeña expresión y afloramiento a Norte del área del caso de estudio. Esta se desarrolla entre los acuitardos del Miembro Cráter y Miembro Porrosatí y Carbonal.

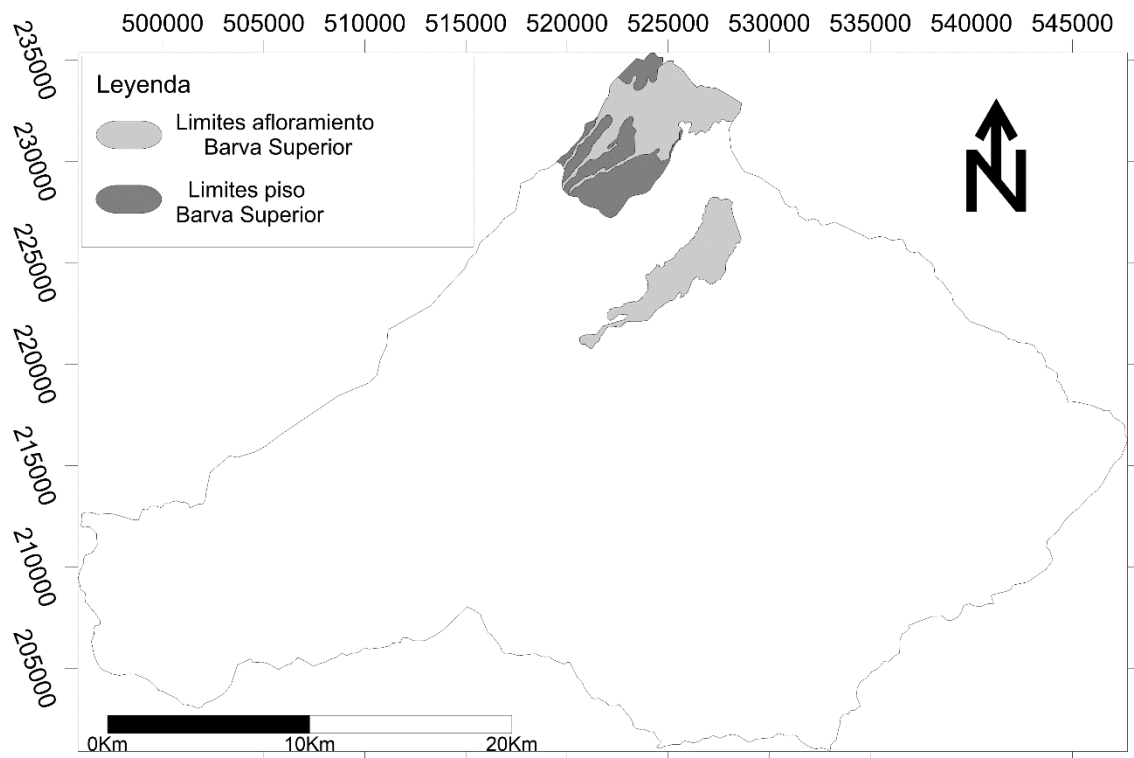


Figura 57 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Barva Superior.

La interpolación de esta formación presenta un espesor entre los 10 m y 43 m, con un espesor medio de 17,3m. En el polígono ubicado a Norte, los límites externos de la formación han sido definidos con un espesor de 37 m y el límite interno hay sido definido con un espesor de 15 m. En el polígono ubicado a Sul los límites han sido definidos con un espesor de 10 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

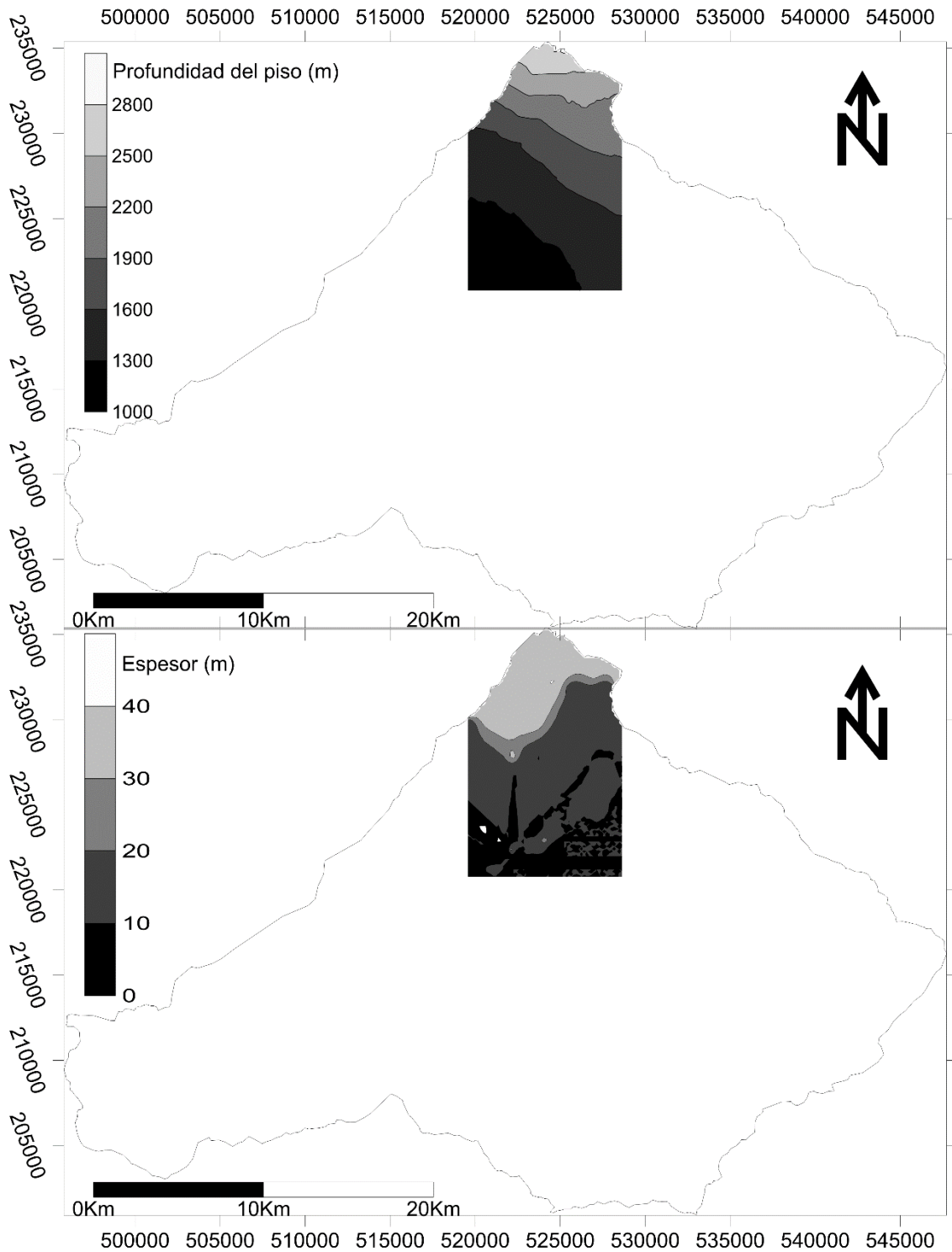


Figura 58 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de del Barva Superior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Miembro Porrosatí y Carbonal – Tobas sobre el Barva Inferior

Esta es una formación acuitardo ubicada entre las formaciones acuíferas del Barva superior e Inferior con una vasta área de afloramiento.

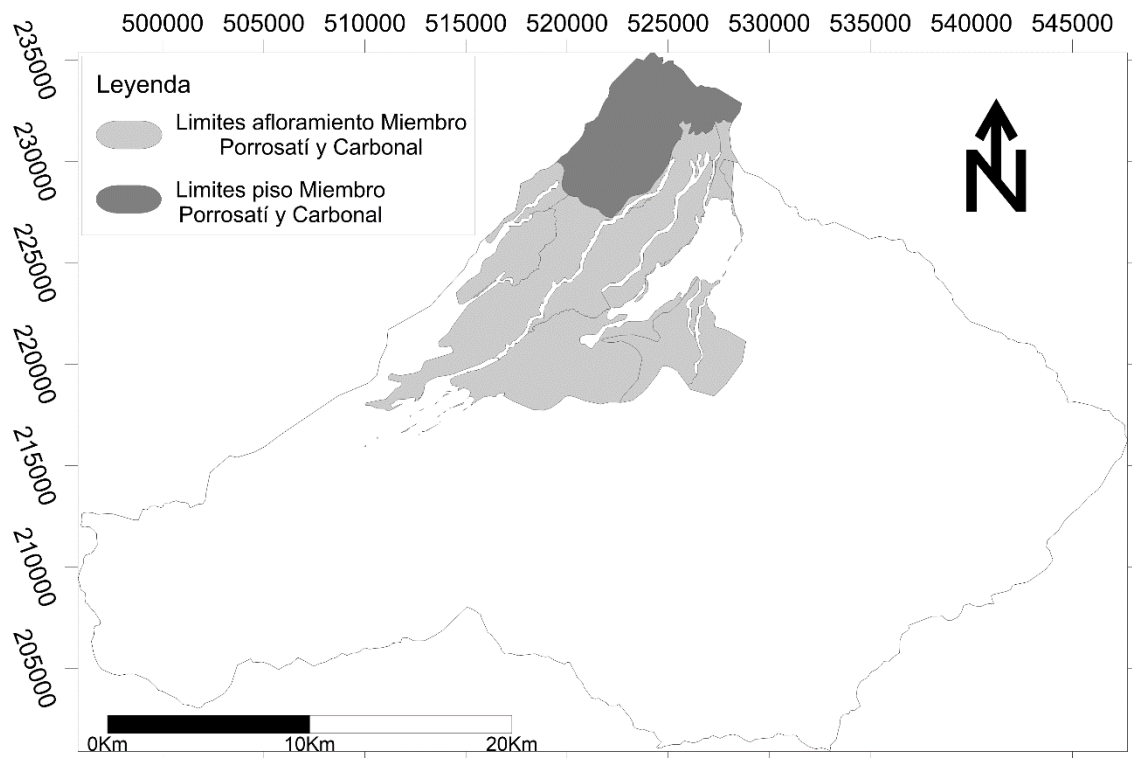


Figura 59 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Porrosatí y Carbonal - Tobas sobre el Barva Inferior.

La interpolación de esta formación presenta un espesor entre los 2 m y 45 m, con un espesor medio de 16 m. Los límites externos de la formación han sido definidos con un espesor de 15 m y el límite interno hay sido definido con un espesor de 2 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

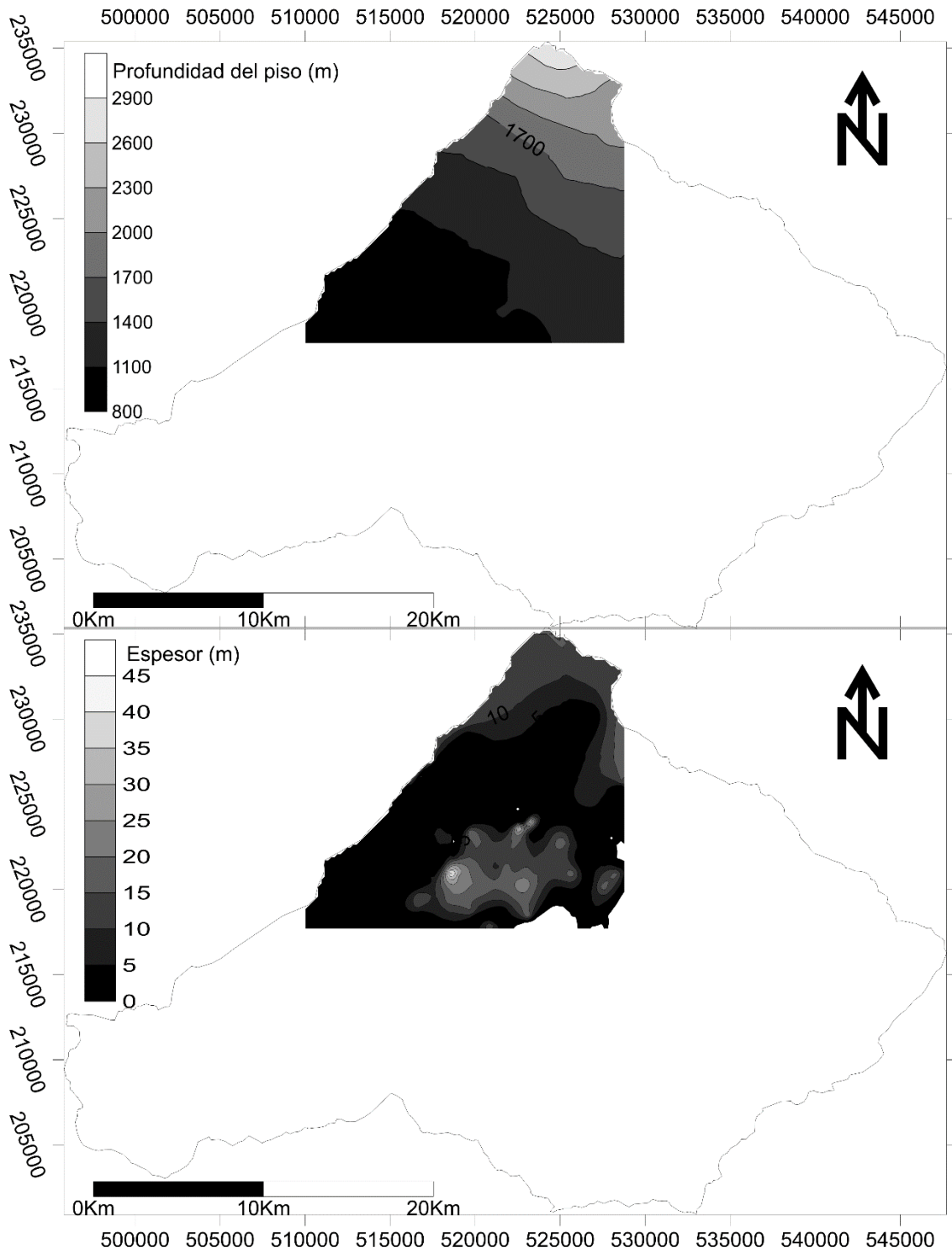


Figura 60 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Tobas sobre el Barva Inferior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Barva Inferior

La formación acuífera Barva Inferior presenta límites similares a la formación acuitardo del miembro Porrosatí y Carbonal ubicada en el Norte del área del caso de estudio.

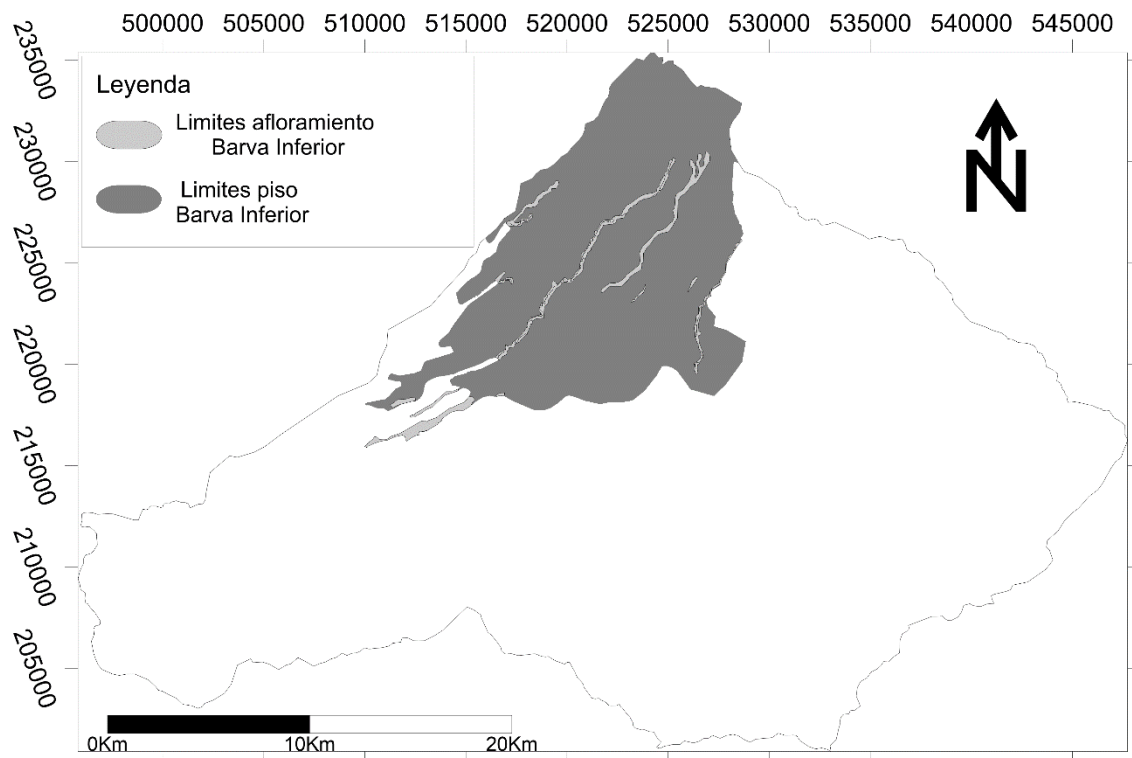


Figura 61 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Barva Inferior.

Los datos de interpolación del espesor de la formación Barva Inferior varían entre los 5 y los 108 m, con un valor medio de 29 m.

La interpolación de esta formación presenta un espesor entre los 2 m y 45 m, con un espesor medio de 16 m. Los límites externos de la formación han sido definidos con un espesor de 20 m y el límite interno hay sido definido con un espesor de 10 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

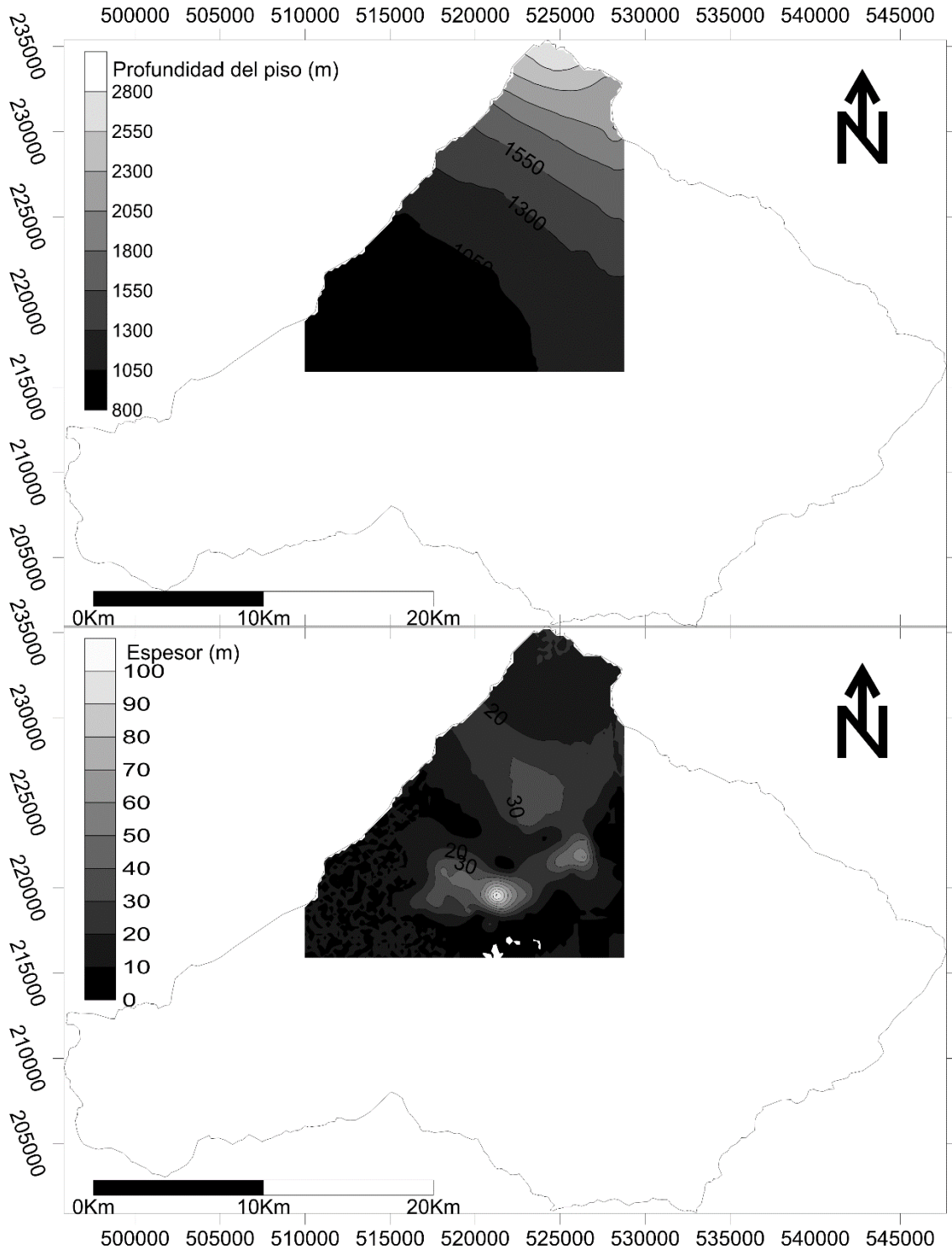


Figura 62 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación del Barva Inferior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Tiribi

La formación Tiribi consiste en un importante acuitardo que se extiende por casi toda el área del caso de estudio, con excepción de los afloramientos del Terciario y Zurqui.

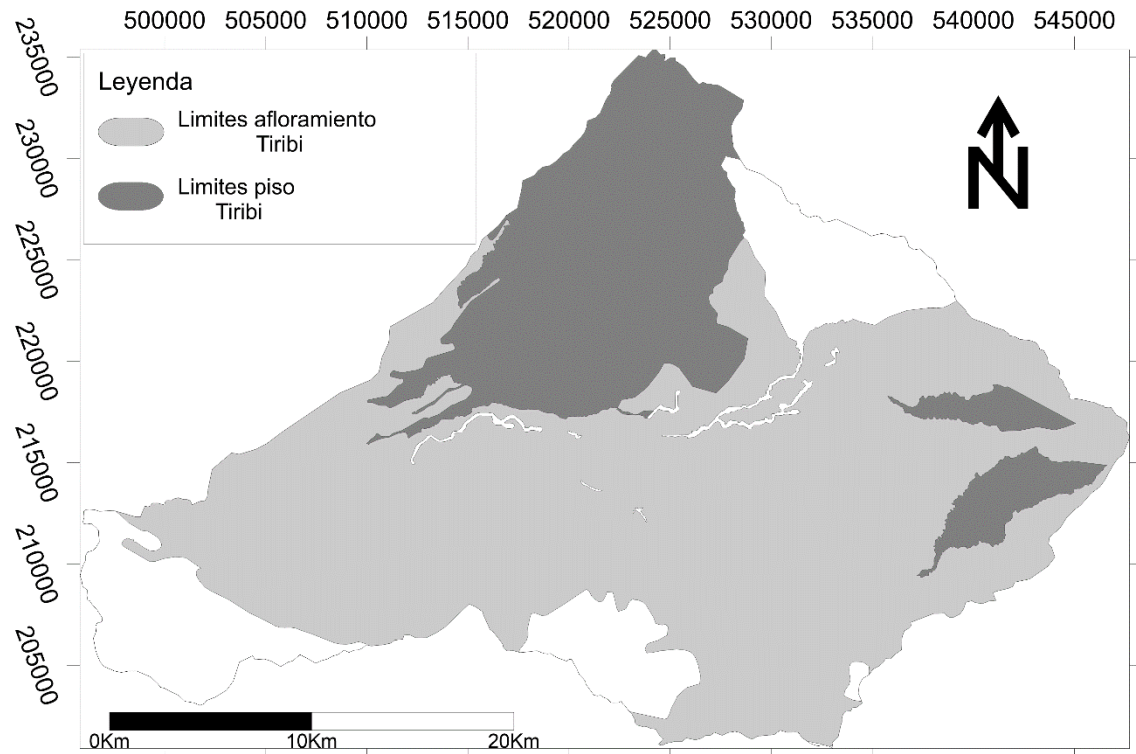


Figura 63 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Tiribi.

El espesor interpolado para esta formación varía entre los 3 y 150 m, con un espesor medio de 37 m y sus límites han sido definidos con 40 m de espesor.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

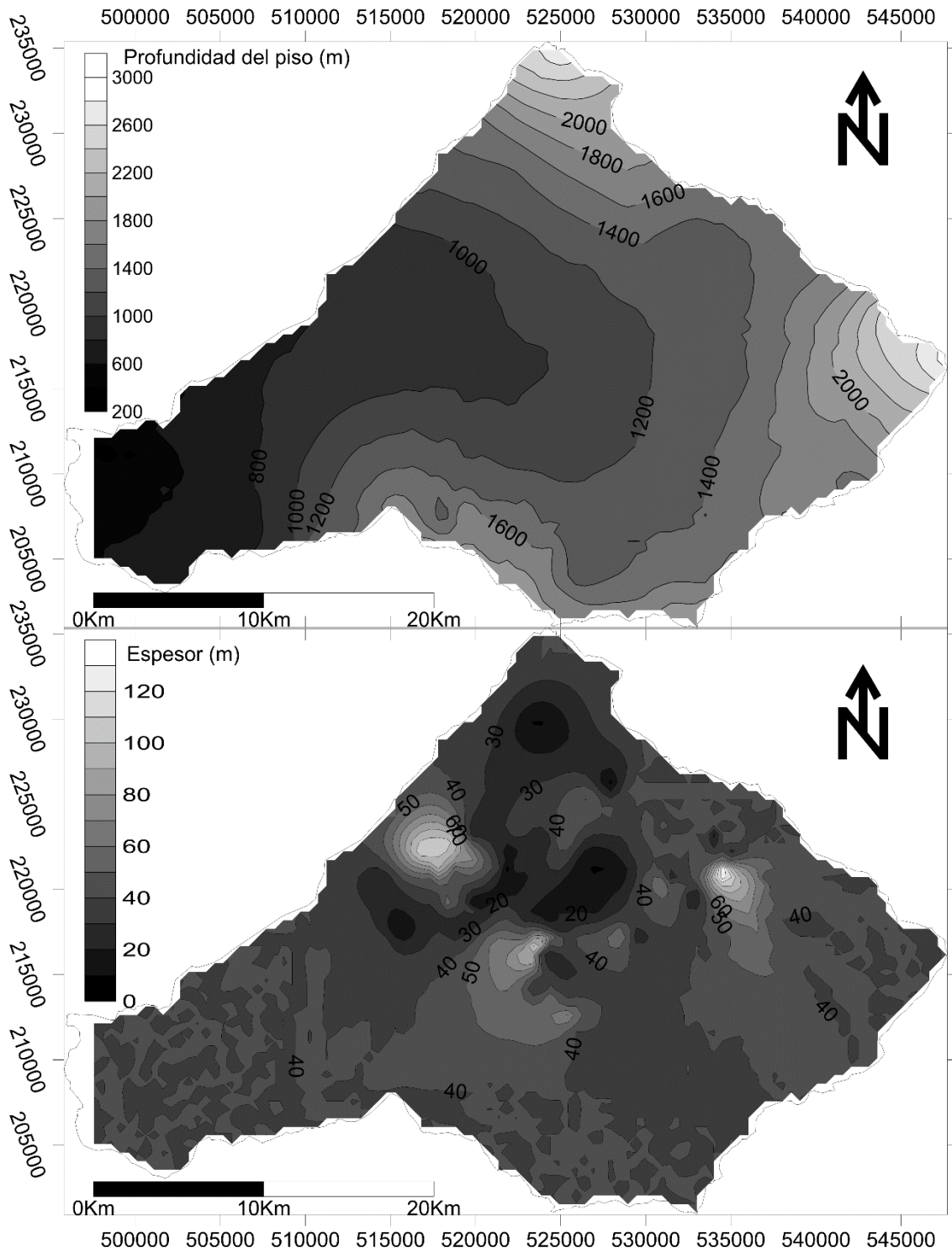


Figura 64 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Tiribi.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

La Libertad

La formación La Libertad consiste en una pequeña, pero importante formación acuífera ubicada en el centro del área del caso de estudio, con algunos afloramientos.

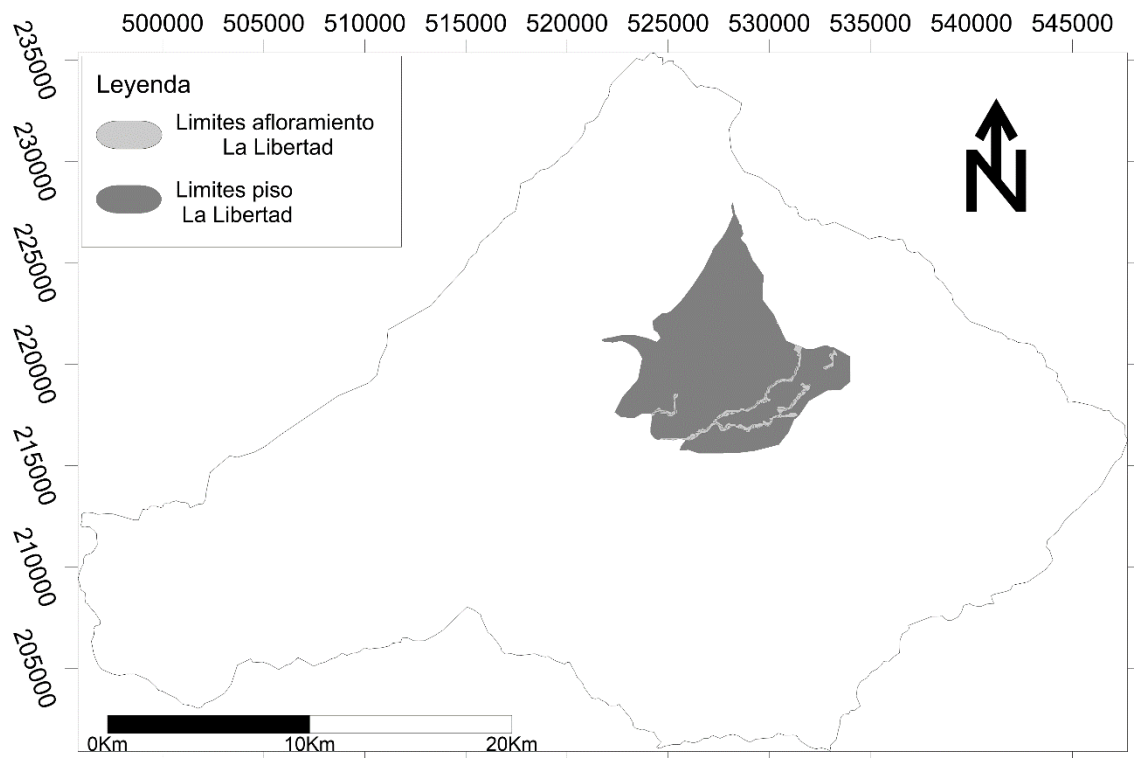


Figura 65 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación La Libertad.

La interpolación de esta formación resulto en espesores que varían entre los 10 y 84 m, con un valor medio de 35 m y sus límites han sido definidos con un espesor de 5 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

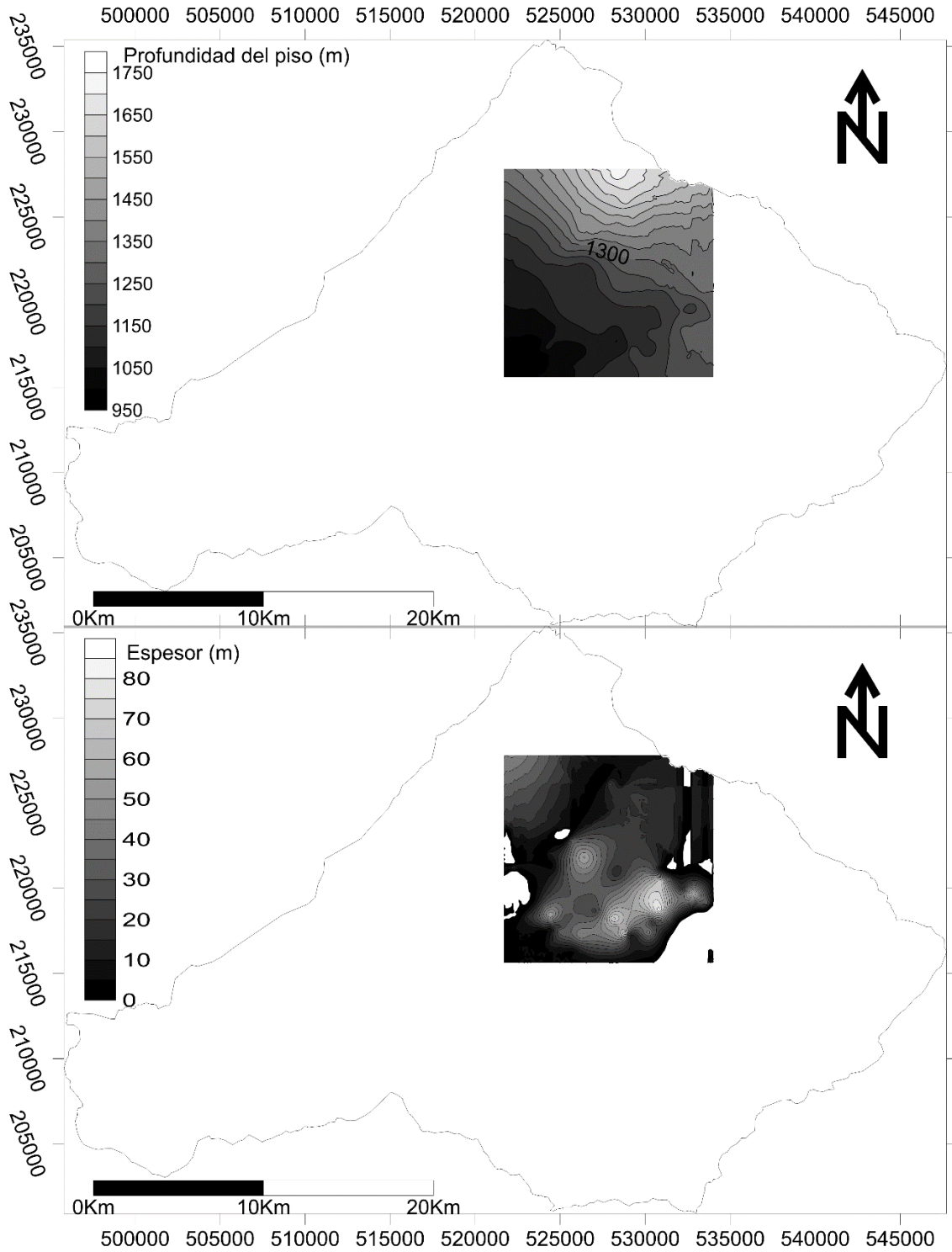


Figura 66 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de La Libertad.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Colima Superior

La formación Colima Superior consiste en una de las más importantes formaciones acuíferas que se extiende en el subsuelo de grande parte del área del caso de estudio, con excepción de las áreas donde se ubican los afloramientos Terciarios y Zurqui. Sin embargo el área de afloramiento de colima superior existen en pequeñas localizaciones que se limitan a los cañones de erosión más importantes del Rio Virilla.

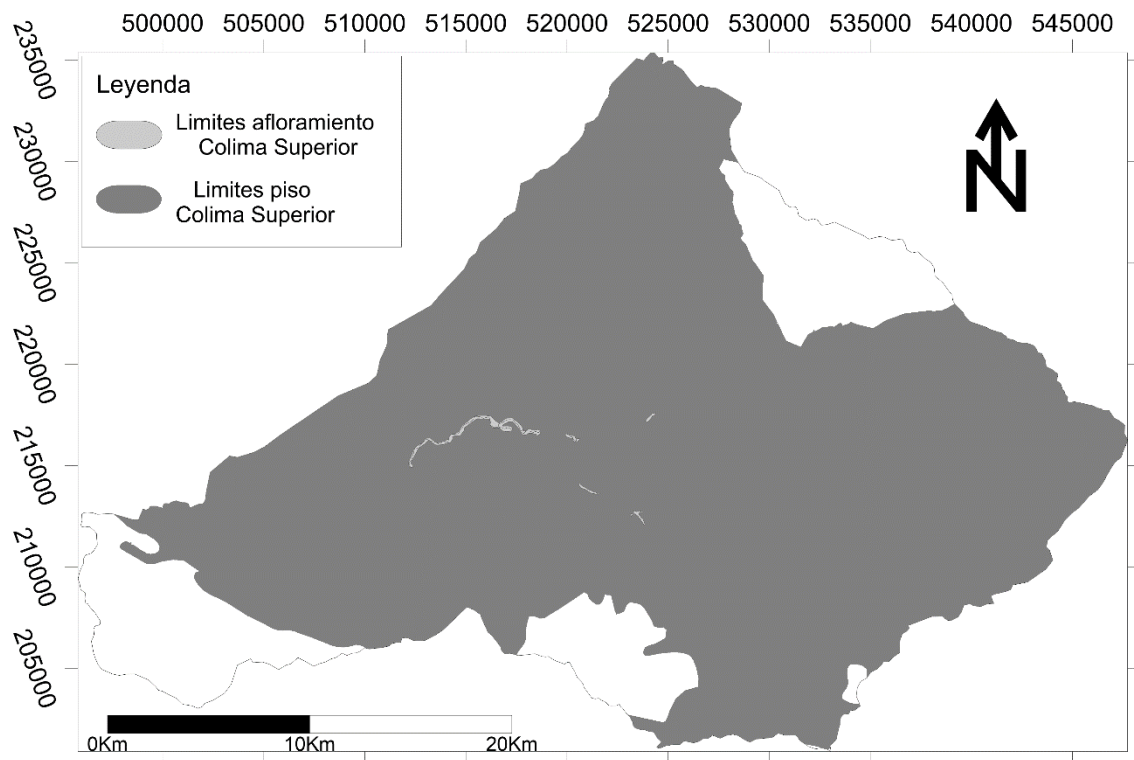


Figura 67 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Colima Superior.

Esta formación presenta valores interpolados de espesor que varían entre los 10 y 163 m, con un valor medio de 49 m y sus límites han sido definidos con un espesor de 50 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

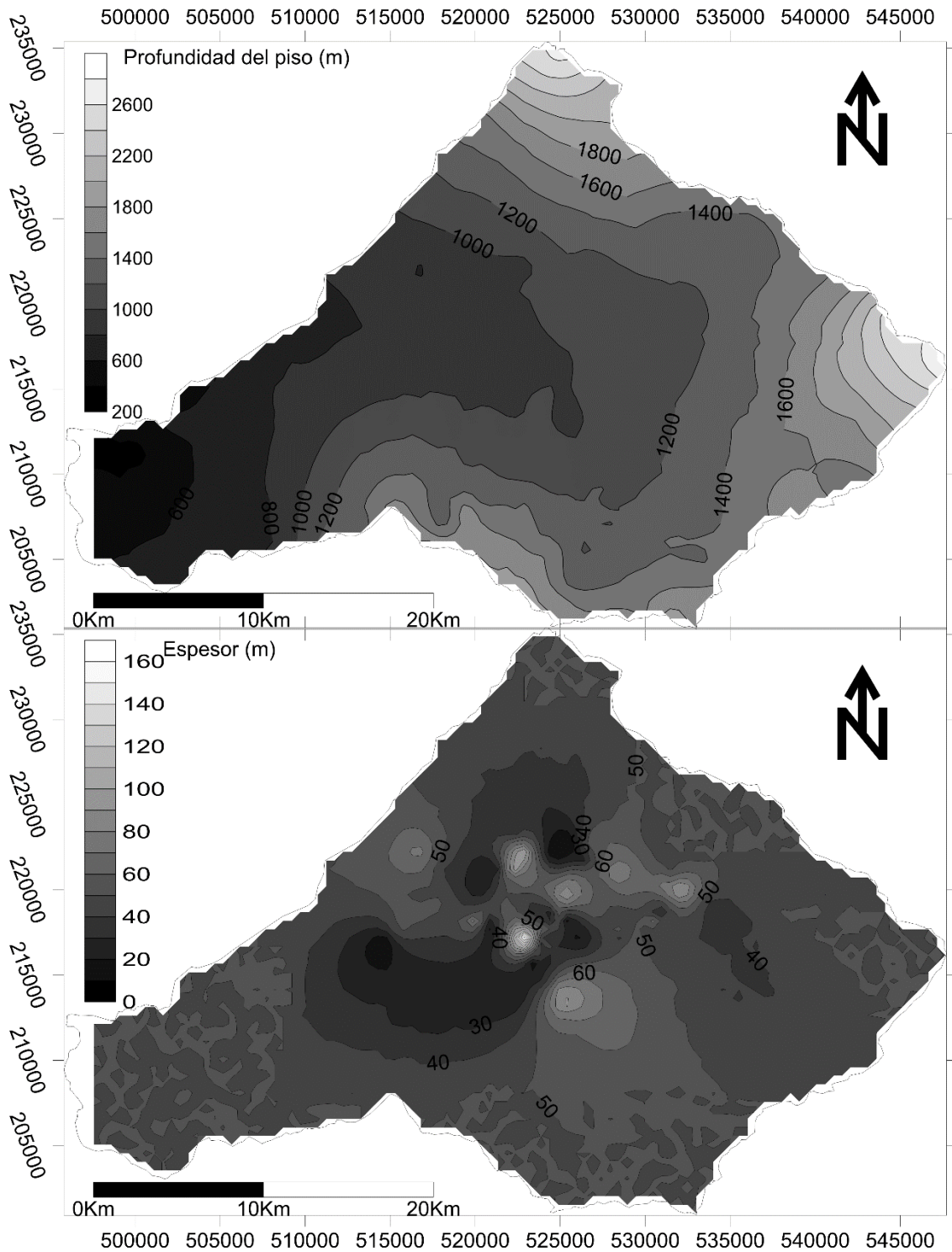


Figura 68 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Colima Superior.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Puente Mulas

Tal como sucede con la formación Colima Superior, La formación acuitarda de Puente Mulas se extiende por casi toda el área del caso de estudio excepto en las áreas de afloramiento del Terciario y Zurqui. No hay información acerca de afloramientos de esta formación en la bibliografía consultada.

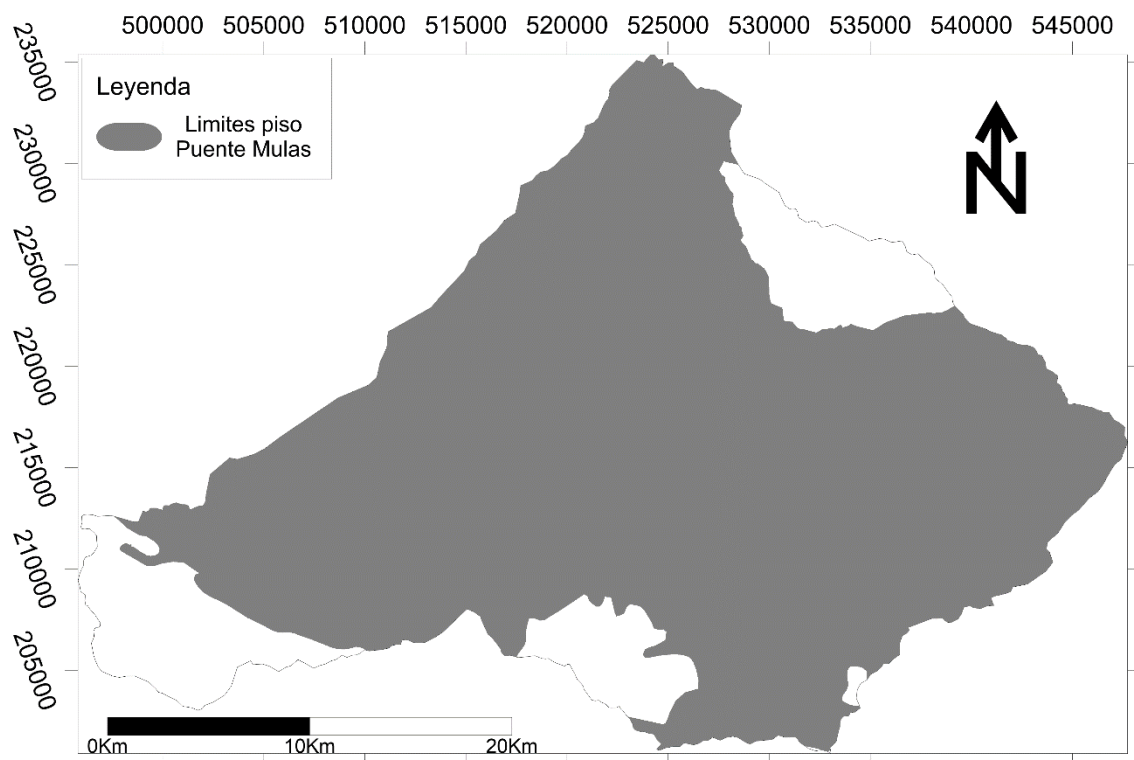


Figura 69 - Límites de afloramiento y límites del piso de la formación Puente Mulas.

La interpolación de la formación Puente Mulas presenta espesores entre los 5m y los 135 m con un valor medio de 28 m y para sus límites hay sido definido un espesor de 28 m.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

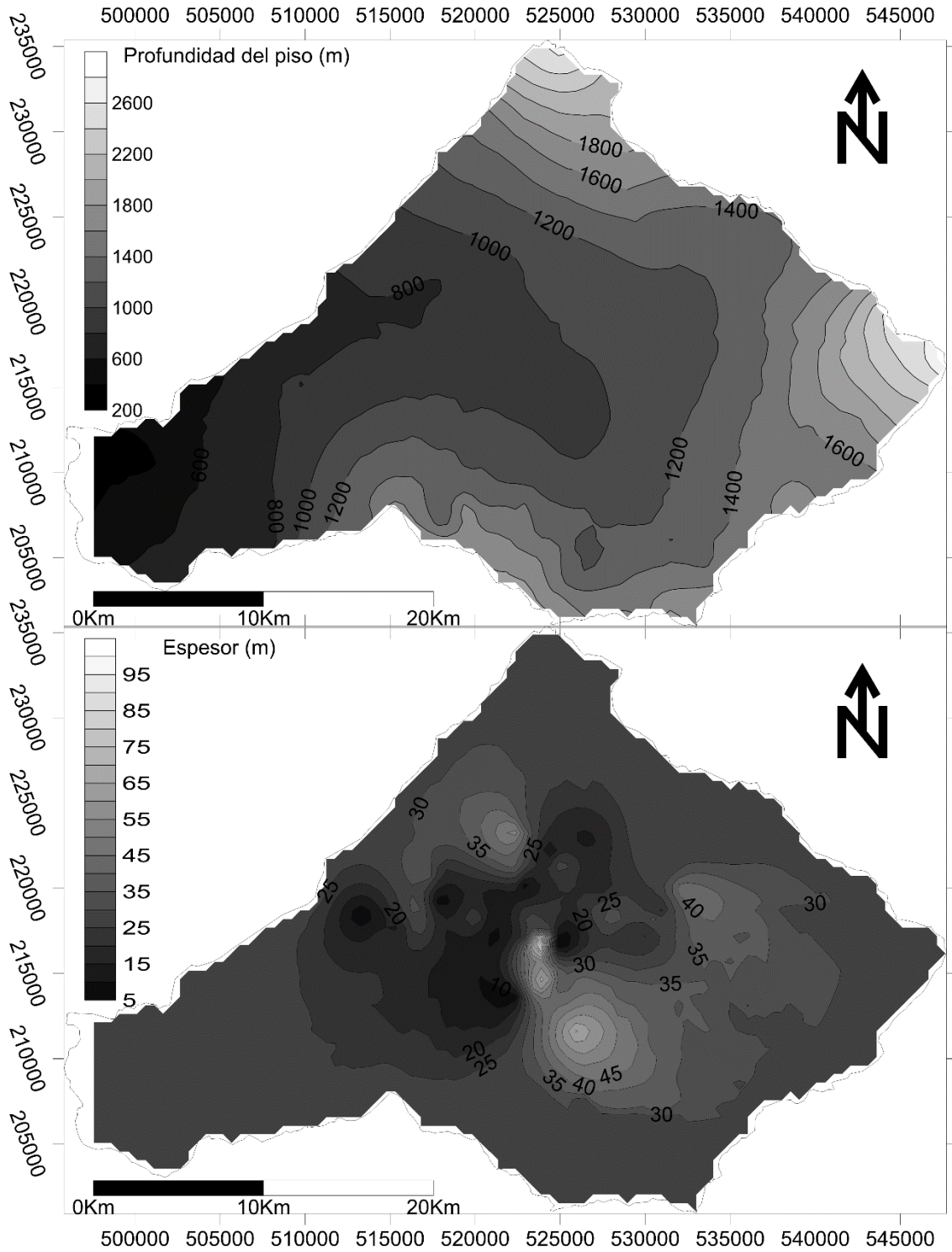


Figura 70 - Mapa de isohipsas (profundidad del piso (m.s.n.m.) e espesor (m)) de la Formación de Puentes Mulas.

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Colima Inferior

La formación Colima Inferior, tal como la formación Puente Mulas, se extiende por la mayoría del área del caso de estudio y no presenta información de afloramientos.

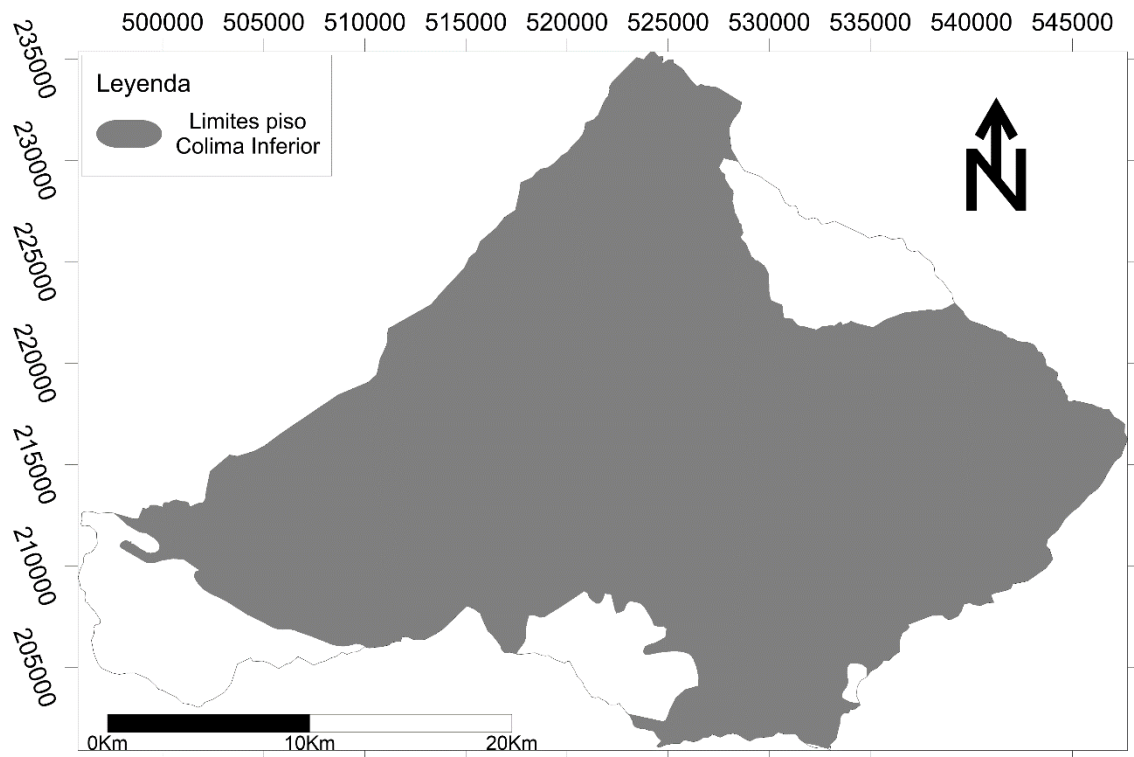


Figura 71 - Límites del piso de la formación Colima Inferior.

En el caso del Colima Inferior, no hay conocimiento que permita definir su espesor con precisión aunque el piso de esta formación no hay sido alcanzando por las perforaciones estratigráficas disponibles en la bibliografía. Así, se hay asumido un espesor mínima de 120m por toda su extensión.



Dirección de Investigación y Gestión Hídrica-PROGIRH

Dejado en blanco intencionalmente