



INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN SECTORES DE GRAN PRESIÓN DE LA PROVINCIA DE JAÉN. PAUTAS PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS ABASTECIMIENTOS URBANOS.



**MEJORA DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA LA
SOSTENIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS DE CABRA DEL SANTO
CRISTO, LOS NACIMIENTOS-SAZADILLA Y GANTE-CHOTOS**

Noviembre de 2015

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	EQUIPO DE TRABAJO.....	4
3	ÁREA DE ESTUDIO	4
3.1	Marco geográfico.....	4
3.2	Contexto geológico.....	5
3.3	Contexto hidrogeológico	11
3.3.1	El acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos.....	11
3.3.2	Acuífero de Cabra del Santo Cristo.....	16
3.3.3	Acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa	16
4	METODOLOGÍAS Y TRABAJOS REALIZADOS	17
4.1	Gravimetría	17
4.1.1	Adquisición de datos gravimétricos	17
4.1.2	Magnetometría.....	20
4.1.3	Prospección geofísica (SEDT)	23
4.1.4	Adquisición de datos.....	23
4.1.5	Interpretación combinada gravimetría-magnetometría-SEDT	24
4.1.6	Revisión geológica y tectónica.....	28
4.1.7	Red piezométrica y foronómica.....	33
5	NUEVA DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS.....	37
5.1	Acuífero de Gante-Chotos.....	37
5.2	Acuífero de Los Nacimientos-Sazadilla	39
5.3	Acuífero de Cabra de Santo Cristo.....	41
6	RECOMENDACIONES	42
7	REFERENCIAS	43

MEJORA DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS DE CABRA DEL SANTO CRISTO, LOS NACIMIENTOS-SAZADILLA Y GANTE-CHOTOS

1 INTRODUCCIÓN

El presente informe forma parte de las actividades previstas en el Convenio Específico entre la Excelentísima Diputación Provincial de Jaén y el Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME) en materia de aguas subterráneas (2012-2015) y cuyo objetivo es la mejora del conocimiento de los acuíferos en algunos núcleos urbanos o sectores de la provincia de Jaén. Se encuadra dentro de la Actividad 1 del mencionado convenio.

La Excm. Diputación Provincial de Jaén y el IGME, cuya actividad realizando investigaciones hidrogeológicas de detalle en la provincia de Jaén se viene llevando a cabo desde el año 1966 (Proyecto del Guadalquivir. FAO-IGME), suscribieron, con fecha 27 de octubre de 1981, un Convenio Marco que regula de forma general la colaboración entre ambas entidades y que prevé en su cláusula segunda la realización de una serie de actuaciones mediante la figura de un convenio de colaboración. Actualmente, y dentro del Convenio Específico (Excm. Diputación Provincial de Jaén- IGME) en materia de aguas subterráneas (años 2012-2015), se pretende ampliar el conocimiento de diferentes sectores de masas de agua subterránea (MASb) donde la presión humana por bombeos o la presencia de focos potenciales de contaminación puede poner en peligro el suministro de agua potable a las municipios afectados, así como recomendar pautas para la sostenibilidad de sus recursos.

Una definición de sostenibilidad puede ser la de atender a las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social. En este sentido, la explotación sostenible de las aguas subterráneas deberá ir encaminada a un conocimiento de los recursos y reservas existentes en los acuíferos junto con la dinámica y funcionamiento de los mismos.

Los acuíferos estudiados en este trabajo se incluían en el grupo de acuíferos de Larva-Solera, según la denominación utilizada en el Atlas Hidrogeológico de la provincia de Jaén (IGME-DPJ, 2012). Se trata de un conjunto de acuíferos considerados en la bibliografía como una unidad pero con características diferentes y comportamiento hidrogeológico independiente, como se ha puesto de manifiesto en el presente trabajo.

De la misma manera, estos acuíferos se incluían administrativamente en la antigua Masa de Agua Subterránea (MASb) 05.41 "Guadahortuna-Larva", que en la revisión actual del Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadalquivir se ha dividido en varias MASb debido a que los acuíferos que la integraban, entre los que se incluyen los estudiados, presentan un comportamiento hidrogeológico diferenciado.

Estos acuíferos sí tienen una característica en común y esta es su importancia en el mantenimiento del abastecimiento urbano a municipios de la provincia de Jaén

como Cabra del Santo Cristo y Solera (Huelma), además del uso para regadío, principalmente del olivar.

Los trabajos llevados a cabo en este estudio se han encaminado a una mejor definición y delimitación de este conjunto de acuíferos como un primer paso para concretar medidas encaminadas a la sostenibilidad de los recursos hídricos de los mismos.

En la redacción de este documento se ha partido de los numerosos estudios hidrogeológicos puntuales que se han llevado a efecto en estos acuíferos y otros más generales entre los que cabe destacar el *Proyecto de investigación hidrogeológica infraestructural de los sistemas acuíferos 30 y 31* (IGME, 1983), el *Plan de investigación de las unidades hidrogeológicas localizadas entre los ríos Guadalbullón y Jandulilla* (ITGE, 1990) y el *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Jaén* (IGME-DPJ, 2012).

2 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo que ha llevado a cabo este estudio ha sido el formado por Crisanto Martín Montañés (Jefe de Proyectos Técnicos y Responsable del Proyecto), Sergio Martos Rosillo (Científico Titular del IGME), Juan Carlos Rubio Campos (Científico Titular del IGME), Ana Ruiz Constán (Investigadora Contratada "Juan de la Cierva") y Antonio Pedrera Parias (Investigador Contratado) por parte del IGME. Además se ha contado con la colaboración de José Pablo González de Aguilar Etchemendi con su Trabajo Fin de Máster del "Máster Oficial en geología aplicada a la obra civil y los recursos hídricos (GEORHID)" de la Universidad de Granada. Asimismo se ha contado con la participación del catedrático de la UGR Jesús Galindo Zaldívar.

3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Marco geográfico

La área de estudio está situada en la parte suroriental de la Península Ibérica (Figura 3.1.A), al sur de la provincia de Jaén, en el entorno de los núcleos de Solera y Cabra del Santo Cristo (Figura 3.1.B). Se localiza en las hojas 970 (Huelma) y 948 (Torres) del Mapa Topográfico Nacional de escala 1:50.000. Abarca un área de unos 165 km² ocupada por sierras que alcanzan hasta los 1.433 m s.n.m. (Cerro del Buitre, a 2 km al oeste de Cabra del Santo Cristo) y llanuras a cotas cercanas a los 1.000 m s.n.m. El río Jandulilla supone el límite occidental y la frontera con Sierra Mágina. En el borde meridional el río Guadahortuna separa las provincias de Jaén y Granada (Figura 3.1.B).

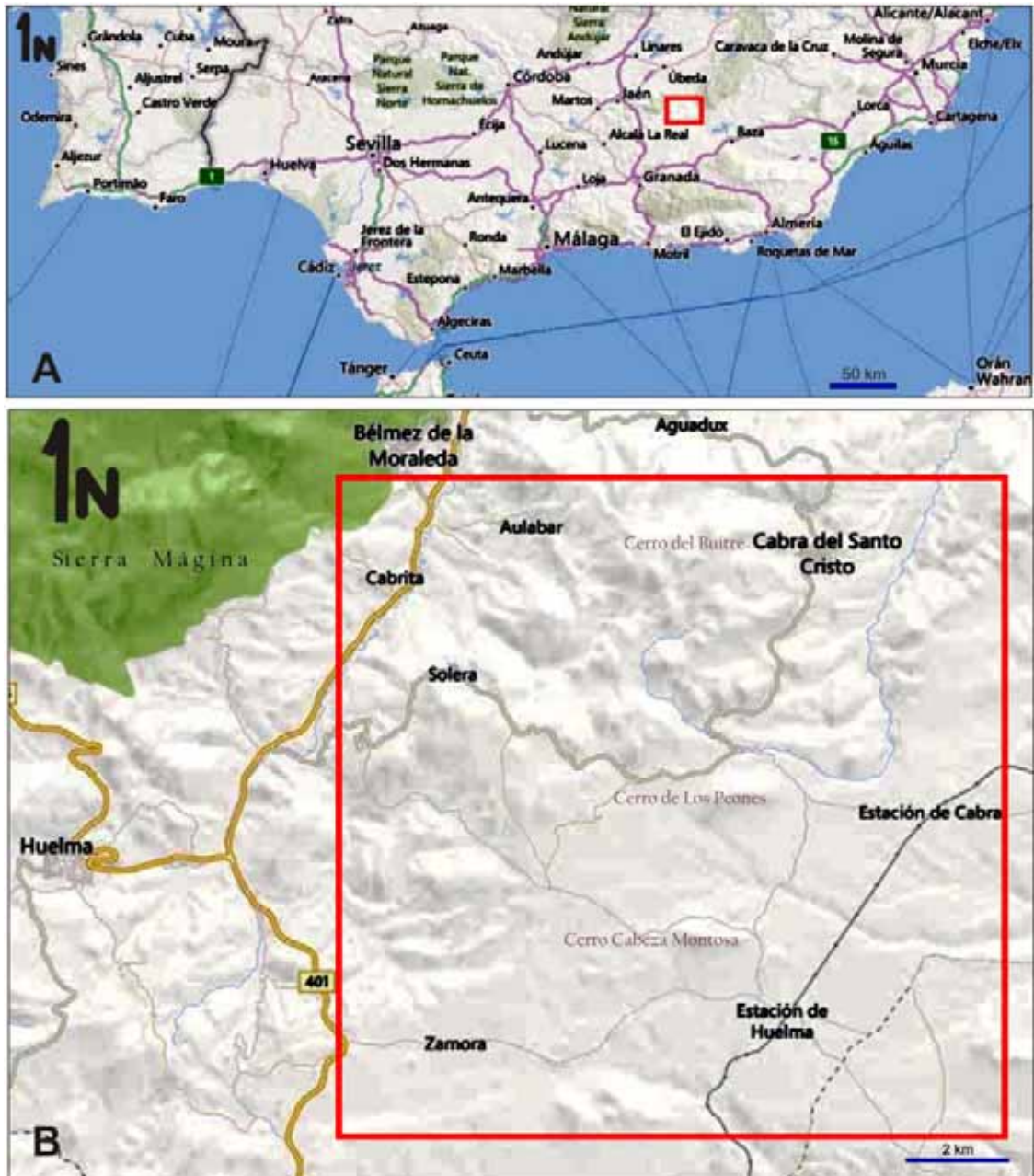


Figura 3.1: Localización geográfica de la zona de estudio; A) Localización general en la parte suroriental de la Península Ibérica; B) Localización geográfica detallada que incluye los principales relieves y núcleos de población.

3.2 Contexto geológico

La región se encuadra dentro de las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Figura 3.2). La Cordillera Bética, junto con el Rif en el norte de África, constituye la parte más occidental del orógeno alpino mediterráneo. Las Zonas Externas de la Cordillera Bética están formadas esencialmente por sucesiones de rocas sedimentarias, con algunas rocas volcánicas, que se depositaron discordantes sobre el margen sur del Macizo Ibérico (paleomargen Sudibérico) durante el Mesozoico y parte del Cenozoico, hasta el Mioceno inferior. Desde el Mioceno medio y superior los depósitos se localizan en cuencas sedimentarias neógenas y cuaternarias que son en muchos casos discordantes sobre los sustratos previos. En el paleomargen Sudibérico dominaba un ambiente marino de plataforma somera con sedimentación carbonática a principios del Jurásico inferior. Sin embargo, durante el

Pliensbachense, hace unos 187 Ma, tuvo lugar un periodo de rifting. A causa de esta actividad tectónica extensional la plataforma carbonática se fragmentó dando lugar a distintos dominios paleogeográficos que de mayor a menor proximidad con el antepaís varisco son: Prebético (zona de plataforma marina somera), Unidades o Dominio Intermedio (zona de surco pelágico), Subbético Externo (zona de umbral pelágico), Subbético Medio (zona de surco pelágico) y Subbético Interno (zona de umbral pelágico) (Figuras 3.2 y 3.3) (Vera, 2004a).

Las Zonas Externas están muy deformadas en un contexto contractivo desde el Oligoceno superior (~25 Ma). La deformación tuvo lugar de forma superficial ("thin-skinned"), por lo que las Zonas Externas de la Cordillera Bética no están afectadas por metamorfismo. Generalmente los materiales se encuentran plegados y existe un despegue entre los materiales triásicos y el zócalo paleozoico, que aunque no aflora, representa la prolongación del Macizo varisco de la Meseta Ibérica. El Prebético comprende unidades parautoctonas que afloran casi exclusivamente en la mitad oriental de la Cordillera principalmente deformadas por pliegues y cabalgamientos. El Subbético cabalga ampliamente sobre el Prebético. Tiene una estructura interna más compleja. En algunos sectores, esta zona está predominantemente constituida por rocas triásicas intensamente deformadas y brechificadas que han perdido su coherencia interna, conocidas como Complejos Caóticos Subbéticos o Unidad Olistostrómica (Vera, 2004a; Roldán et al., 2012).

En el área de estudio afloran rocas de la Zona Subbética. Las rocas sedimentarias más antiguas datan del Triásico superior. Tienen facies típicas Keuper con areniscas rojas, carniolas, evaporitas y lutitas abigarradas del Carniense (Pérez-López, 1991; Pérez-López, 1996). Cabe señalar que en esta zona los materiales se encuentran menos deformados que en el resto de la cordillera. A pesar de ello, otros autores consideran estos materiales como pertenecientes a la Unidad Olistostrómica (Roldán et al., 2012).

Durante la primera parte del Jurásico inferior se depositaron calizas de la Fm. Gavilán. Las calizas tienen facies de tipo wackestone, con gasterópodos y oolitos, micritas peletoidales con textura fenestral, pisolitos vadosos y falsos estromatolitos. Estas calizas han sufrido un importante proceso de dolomitización. Las dolomías se presentan como una brecha compuesta por cantos angulosos, en las que, en ocasiones, se puede identificar su textura original, de tipo grainstone a packstone oolítico-peletoidal. Durante la etapa transtensiva jurásica se intercalaron coladas de rocas volcánicas básicas submarinas de tipo lavas almohadilladas o pillow-lavas en el Subbético Medio.

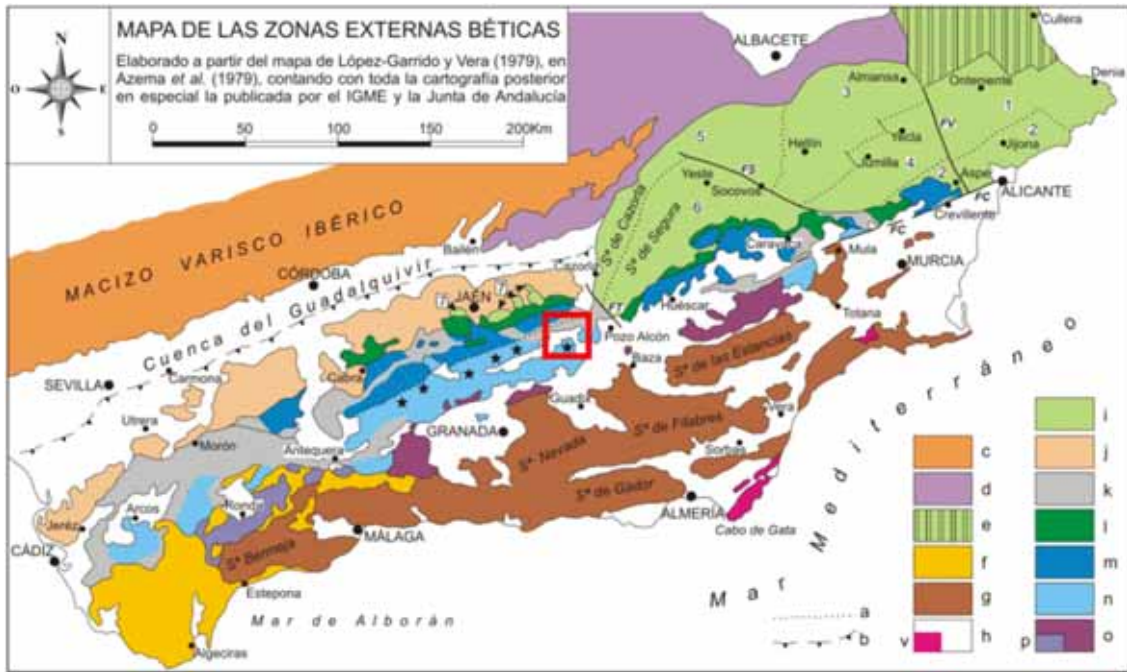


Figura 3.2: Mapa geológico de la Cordillera Bética. Leyenda: a.- Límites entre las unidades morfoestructurales delimitadas en el Prebético y límite entre dominios paleogeográficos del Subbético, cuando no coincide con un límite tectónico. b.- Frente norte del Complejo Olistostrómico del Guadalquivir detectado en el subsuelo. c.- Macizo Ibérico. d.- Cobertera Tabular. e.- Cordillera Ibérica. f.- Complejo del Campo de Gibraltar. g.- Zonas Internas Béticas. h.- Cuencas Neógenas postorogénicas (v.- rocas volcánicas neógenas). i-p: Zonas Externas Béticas. i.- Prebético (1.- Prebético de Onteniense-Denia. 2.- Prebético de Aspe-Jijona-Alicante. 3.- Prebético de Hellín-Almansa. 4.- Prebético de Jumilla-Yecla. 5.- Prebético de las Sierras de Cazorla y Alcaraz. 6.- Prebético de la Sierra de Segura. 7.- Prebético de Jaén). j.- Afloramientos del Complejo Olistostrómico del Guadalquivir. k.- Complejos Caóticos Subbéticos (Subbético con estructura interna caótica). l.- Dominio Intermedio. m.- Subbético Externo. n.- Subbético Medio (asteriscos: principales afloramientos de rocas volcánicas jurásicas). o.- Subbético Interno (p.- Penibético). Abreviaturas de estructuras geológicas: FC.- Falla de Crevillente. FS.- Falla de Socovos. FT.- Falla de Tíscar. FV.- Falla del Vinalopó. Tomada de Vera, 2004a.

En las zonas de surco se depositaron calizas oolíticas, calizas con sílex, margas radiolaríticas, margas, margocalizas y calizas nodulosas hasta el Jurásico superior, inclusive. El Cretácico inferior está representado por margas y margocalizas blancas. Entre el Cretácico superior y el Paleoceno-Eoceno inferior sedimentaron margas y margocalizas rojizas. A continuación se formó una serie sedimentaria de margas y calcarenitas principalmente, entre el Eoceno y el Tortonense. Por último, entre el Plioceno y el Cuaternario se depositaron conglomerados, gravas, arenas y lutitas de medios aluviales, coluviales y fluviales postorogénicos (Figuras 3.4 y 3.5) (Vera, 2004a).

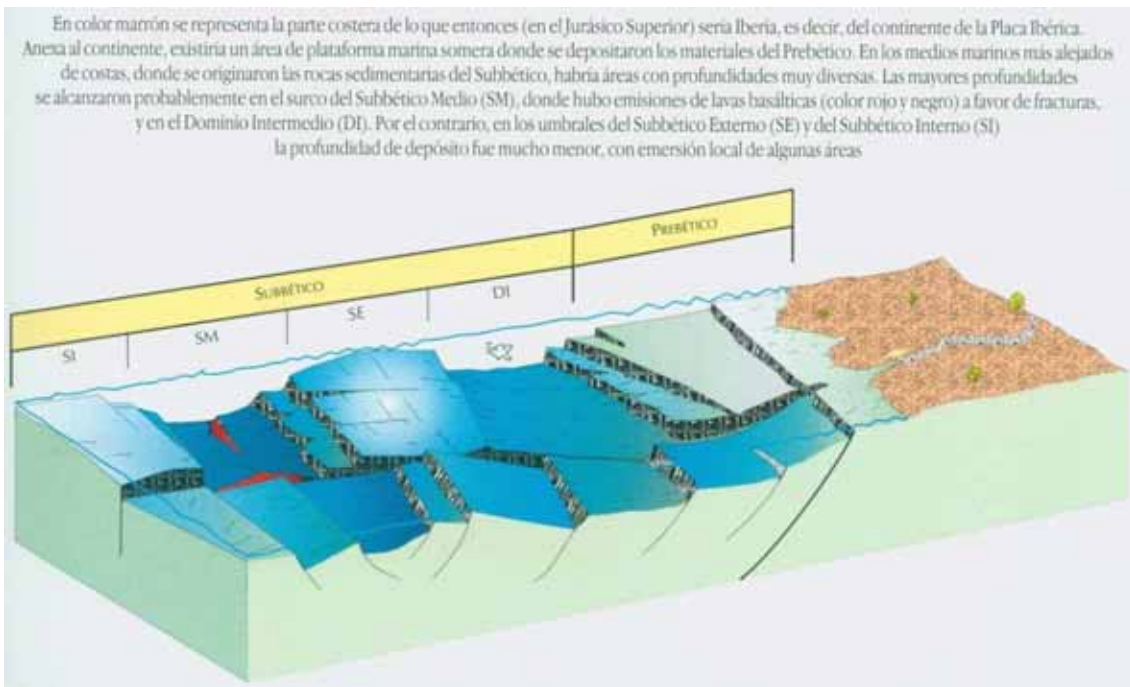


Figura 3.3: Esquema tridimensional en el que se muestra una reconstrucción idealizada de la paleogeografía durante el Malm. Modificada de Vera, 2004b.

El área de estudio se caracteriza por su relativa complejidad estructural. Actualmente existen discrepancias entre los investigadores sobre si el sistema de cerros que se encuentra entre Cabra del Santo Cristo y Solera pertenece al Dominio Intermedio, al Subbético Externo o a lo que también se ha denominado Complejos Caóticos Subbéticos (Vera, 2004a). En el Cerro de los Peones afloran dolomías y calizas del Lías inferior (Fm. Gavilán). Por su parte, el Cerro de Cabeza Montosa (antiguamente Cabeza Matosa) es claramente perteneciente al Subbético Medio, dada la presencia característica de lavas almohadilladas intercaladas entre calizas micríticas, tempestitas carbonáticas y calizas oolíticas de la Fm. Milanos del Kimmeridgiense superior-Tithónico (Molina y Vera, 1996).

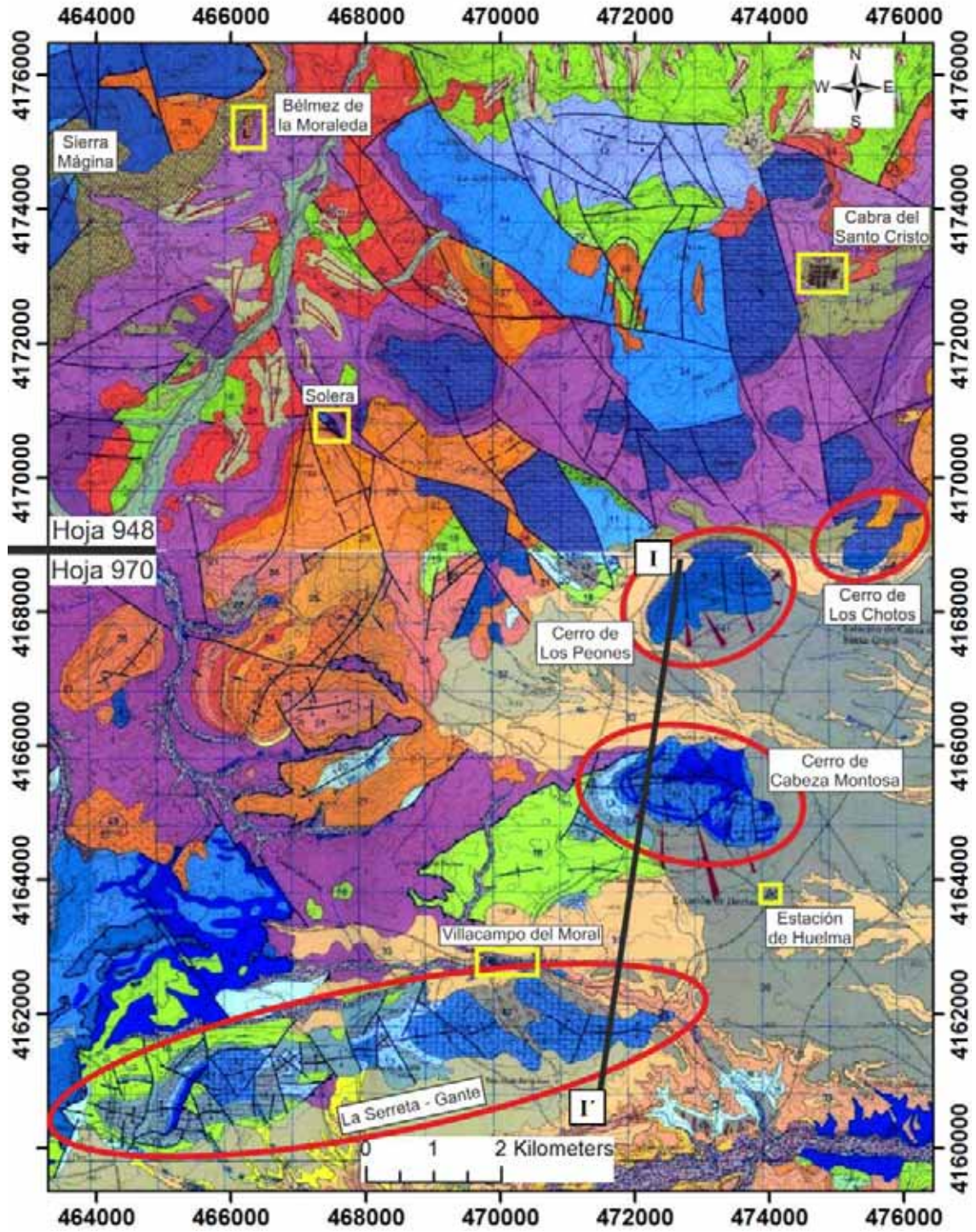


Figura 3.4: Mapa geológico y columnas estratigráficas de la serie MAGNA. Modificado de Ruiz Reig, 1988a y de Ruiz Reig, 1988b.

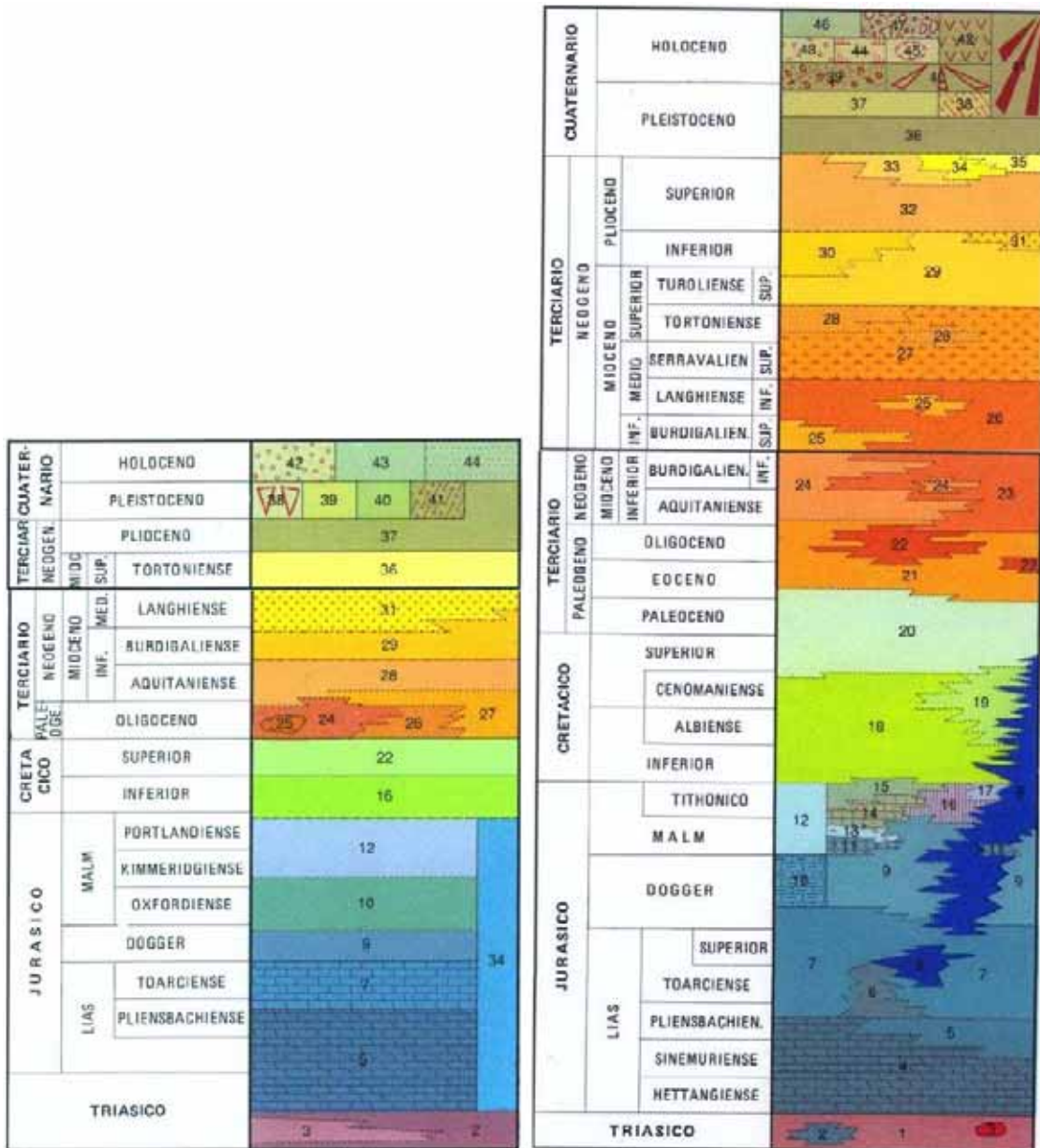


Figura 3.5: Leyenda de la figura 1.4. Tomado de Ruiz Reig et al., 1988a y de Ruiz Reig et al., 1988b.

A la izquierda la correspondiente a la Hoja 948: 2.- Arcillas, limolitas y yesos. 3.- Areniscas rojas y limolitas. 5.- Dolomías (Fm. Gavilán). 7.- Calizas tableadas. 9.- Dolomías, calizas bioclásticas y oolíticas con sílex. 10.- Margas radiolaríticas y calizas nodulosas. 12.- Calizas, margas y brechas calcáreas. 34.- Jurásico indiferenciado. 16.- Margas, calizas y areniscas. 22.- Margas y margocalizas. 24.- Arcillas rojas con cantos, gravas yesíferas, yesos y bloques. 25.- Olistolitos de materiales mesozoicos indiferenciados. 26.- Brechas y megabrechas. 27.- Margas. 28.- Calcarenitas. 29.- Areniscas, brechas, conglomerados y margas. 31.- Margas grises y blanquecinas. 36.- Margas y areniscas. 37.- Conglomerados, margas en la base. 38.- Glacis. 39.- Terraza. 40.- Terraza. 41.- Coluvial encostrado. 42.- Coluvial. 43.- Aluvial. 44.- Fondo de valle.

A la derecha la que pertenece a la Hoja 970: 1.- Arcillas versicolores, yesos y areniscas rojas. 2.- Dolomías y calizas tableadas negras. 3.- Rocas subvolcánicas (ofitas). 4.- Dolomías (Fm. Gavilán). 5.- Calizas tableadas gris-azuladas (Fm. Gavilán). 6.- Calizas tableadas beigeas. 7.- Calizas margosas, margas y calizas nodulosas rojas (ammonitico rosso). 8.- Rocas volcánicas básicas. 9.- Calizas margosas y margas. 10.- Calizas tableadas y calizas nodulosas. 11.- Calizas oolíticas (Fm. Milanos). 12.- Calizas y margas. 13.- Margas rojas y verdes con radiolarios (radiolaritas). 14.- Calizas detríticas con sílex. 15.- Calizas nodulosas y margas rojas. 16.- Calizas tableadas. 17.- Calizas oolíticas masivas. 18.- Margas y margocalizas blancas. 19.- Arcillas verdes. 20.- Margas y margocalizas rojas. 21.- Margas blancas con niveles de areniscas bioclásticas ocreas. 22.- Calcarenitas, areniscas bioclásticas y margas. 23.- Margas

blancas. 24.- Calcarenitas. 25.- Conglomerados y calcarenitas. 26.- Margas. 27.- Margas blancas. 28.- Calcarenitas bioclásticas. 29.- Margas y margocalizas blancas y grises, areniscas y conglomerados. 30.- Calizas con gasterópodos y margas. 31.- Lutitas ocreas. 32.- Lutitas ocreas, conglomerados y areniscas. 33.- Areniscas conglomerados y lutitas rojas. 34.- Limos pardo-amarillentos y margas claras. 35.- Calizas y calizas margosas. 36.- Encostramientos carbonatados con gravas, arenas y limos. 37.- Gravas y arcillas rojas. 38.- Tobas y travertinos. 39.- Gravas y arcillas ocreas. 40.- Arcillas y cantos. 41.- Arcillas y cantos con encostramientos carbonatados. 42.- Conglomerados, arenas y arcillas (coluviones). 43.- Gravas y arenas (terrazas). 44.- Limos y arcillas (Fondos de valle). 45.- Arcillas rojas (cubetas de descalcificación). 46.- Limos, conglomerados y arenas (aluvial-coluvial). 47.- Conglomerados, arenas y arcillas (depósitos aluviales).

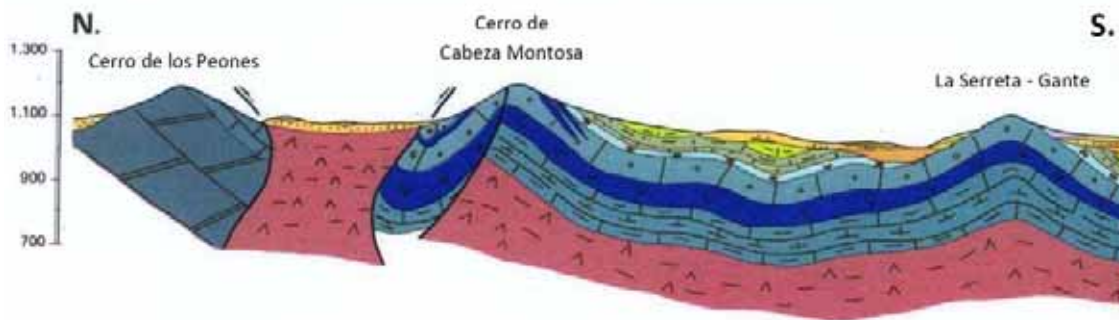


Figura 3.6: Corte geológico I-I' entre el Cerro de los Peones y La Serreta-Gante. La relación de escala horizontal/vertical es de 1/2,5. Modificado de Ruiz Reig et al., 1988b.

3.3 Contexto hidrogeológico

En el área investigada se habían definido con anterioridad cinco acuíferos principales denominados Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y Cabra del Santo Cristo, al norte, y La Serreta-Gante-Cabeza Montosa, Los Gallardos y Santerga, al sur. De ellos, los trabajos se han centrado en los dos primeros si bien la propia naturaleza hidrogeológica ha obligado a ampliar hacia el sur el área de estudio (Figura 3.7).

3.3.1 El acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos

El acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos está incluido, administrativamente en la antigua MASb 05.41 "Guadahortuna-Larva". Lo constituyen dolomías, de edad Lías inferior y medio, cuya potencia estratigráfica puede superar los 300 metros, y areniscas calcáreas bioclásticas, de edad Mioceno inferior, con espesores que pueden alcanzar los 100-120 metros.

En superficie, el acuífero consiste en una serie de afloramientos dispersos de materiales carbonáticos situados en la transversal Solera-Estación de Cabra del Santo Cristo. La superficie de rocas permeables que aflora es de 9 km² de materiales dolomíticos y de unos 20 km² de materiales calcareníticos. Los recursos renovables fueron estimados en 2,4 hm³/año (IGME-DPJ, 2011). Los límites laterales del acuífero no son bien conocidos. No ocurre lo mismo con el muro del acuífero, existe un sustrato de baja permeabilidad, bien definido, formado por arcillas y margas triásicas. Estos mismos materiales afloran al norte, al oeste y al sur del acuífero, donde definirían un límite cerrado al flujo subterráneo. Sin duda, el límite que más incertidumbre plantea, en cuanto a su carácter cerrado o abierto al flujo subterráneo, es el este-sureste. Aquí afloran materiales pliocuaternarios semipermeables que impiden conocer la continuidad en profundidad de los materiales permeables del acuífero de Los Chotos- Sazadilla- Los Nacimientos.

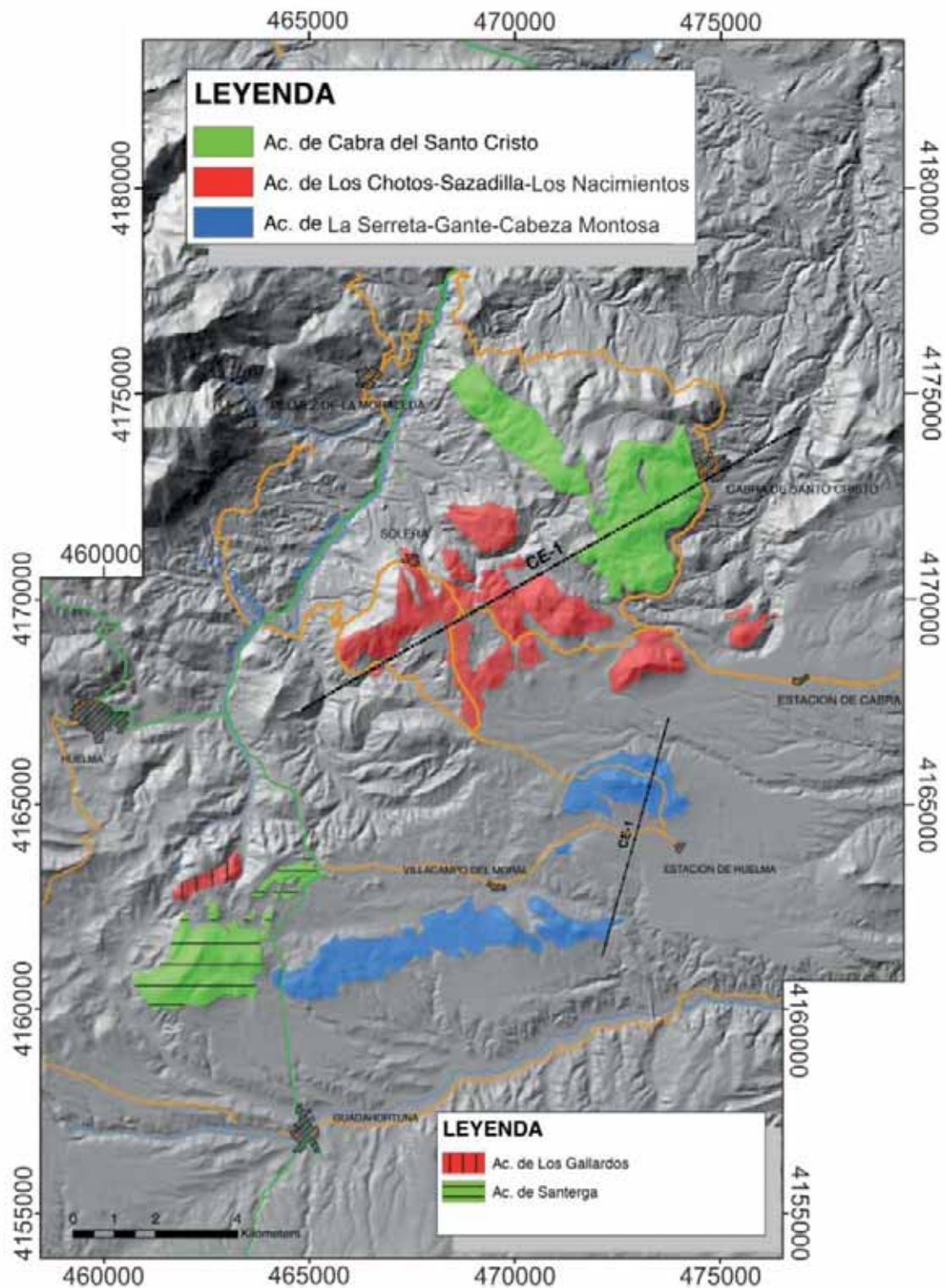


Figura 3.7: Mapa de sombras a partir de MDE donde se muestran los acuíferos de la zona de estudio. Modificado de IGME-DPJ, 2011.

Con todo, en IGME-DPJ (2011) se diferencian tres sectores en este acuífero. El primero de estos sectores es identificado como el de Los Chotos-Cortijo Hidalgo y se localiza al este del acuífero. Lo conforman las dolomías del Lías de los cerros de Los Chotos y de Los Peones (donde se ubica el Cortijo Hidalgo). El carácter abierto

o cerrado de sus límites no se conoce con certeza. En el extremo oriental del Cerro de Los Peones se encuentra el sondeo del mismo nombre (203930023), el cual es uno de los puntos de abastecimiento de agua potable a Cabra del Santo Cristo y de riego de la zona.

El segundo sector, el de Sazadilla, está formado por materiales carbonáticos mesozoicos. Desde el punto de vista litológico, está integrado por dolomías y carniolas del Lías inferior, a las que se le superponen calizas oolíticas con sílex del resto del Jurásico. En este sector se han diferenciado a su vez dos subsectores. El denominado del Cerro del Pinar, situado al norte y limitado por el Arroyo de Cabrera, con una extensión de unos 1,5 km², que funcionaría como un acuífero colgado, cuya base impermeable está constituida principalmente por los materiales triásicos, y en el que la falta de puntos de agua inventariados en la zona hace suponer que su drenaje ha de realizarse de manera difusa a través del contacto entre los materiales permeables e impermeables de base. El otro subsector, localizado al sur del anterior, se encuentra fosilizado por materiales cretácicos y terciarios y presenta una extensión de afloramiento de unos 4 km², aunque cabe suponer que exista continuidad tanto hacia el sureste como al suroeste bajo los materiales terciarios y cuaternarios.

Por último, existe un tercer sector, el suroccidental, denominado Los Nacimientos. Está compuesto por materiales miocenos, representados por calcarenitas, calizas lacustres y niveles conglomeráticos, en cuya base se sitúan las margas blanquecinas rojizas que actúan como impermeable de los niveles carbonatados superiores. Actuaría como un acuífero colgado en el que los drenajes se producirían a favor de este contacto. La intensa fracturación de estos materiales origina descargas de pequeños caudales en los contactos entre materiales permeables e impermeables.

Respecto a los parámetros hidráulicos del acuífero la información es muy limitada. En este sentido, en ITGE (1990) se indica que en el ensayo de bombeo realizado en el sondeo del Cerro de Los Peones la transmisividad resulta comprendida entre 8.784 y 12.160 m²/día.

La revisión del inventario de puntos de agua, la recopilación de niveles piezométricos y de datos foronómicos y las medidas de nivel piezométrico realizadas con motivo de esta investigación han permitido realizar el plano hidrogeológico que se adjunta en la Figura 8. En él se han identificado los principales puntos de agua, además de anotarse la cota piezométrica. El análisis de esta figura permite observar que el manantial de Los Nacimientos, que es el principal punto de drenaje del sector occidental del acuífero, presenta una cota piezométrica (996 m s.n.m.) más alta que en el resto del acuífero, lo que apoya la idea de que la procedencia de los recursos drenados por este manantial deben estar asociados, fundamentalmente, a los materiales miocenos.

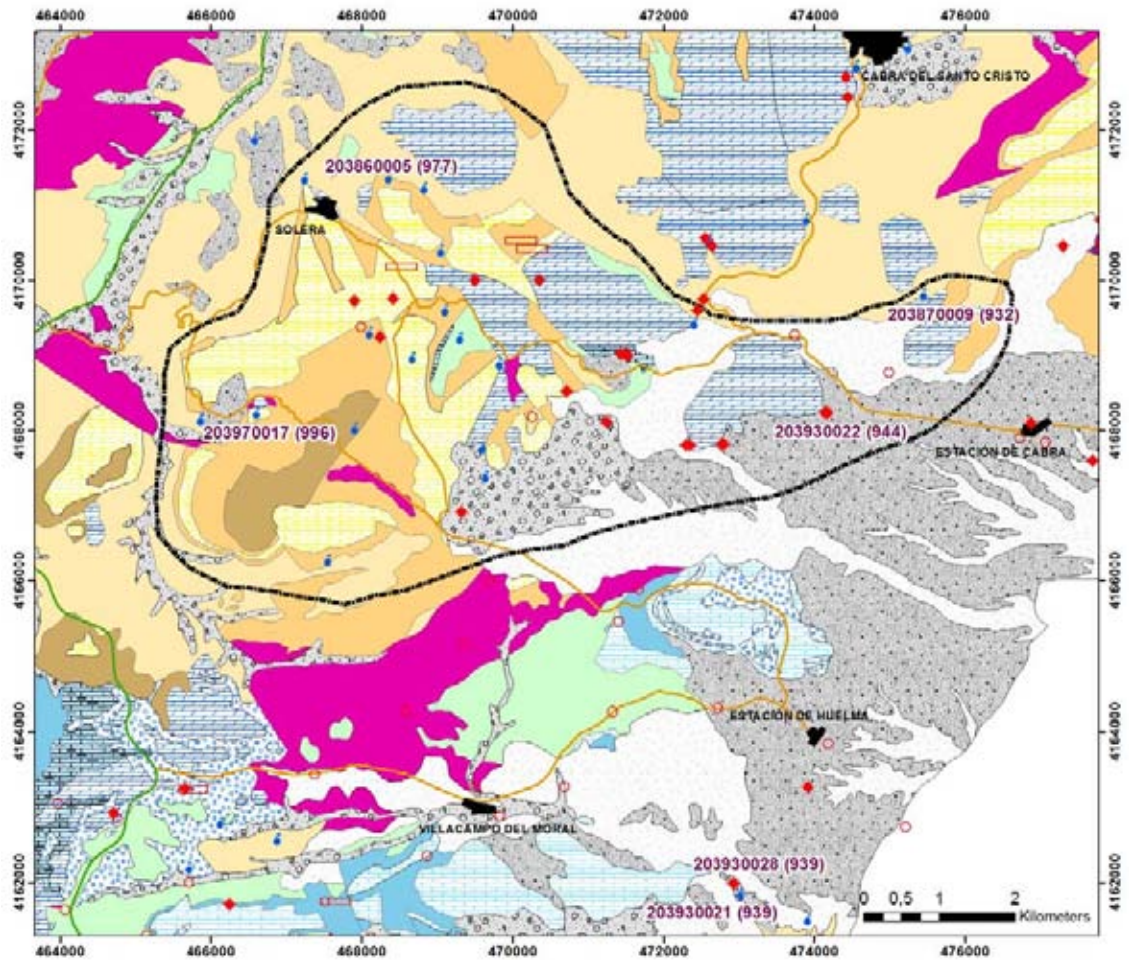


Figura 3.8: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio con datos piezométricos de julio de 2013. Con una línea negra se señala el contorno del acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos. Los principales puntos de agua son: el manantial de La Fuente de las Negras (203860005), el manantial de Los Nacimientos (203970017), el manantial del Molino del Barranco (203870009), el Sondeo del Cerro de Los Peones (203930022), el manantial del Molino de Gante (203930021) y el sondeo del Molino de Gante (203930028). En el mapa entre paréntesis aparece la cota piezométrica.



Figura 3.9: Leyenda del mapa hidrogeológico de la Figura 3.8.

Por otro lado, las cotas piezométricas medidas en el sondeo del Cerro de Los Peones (944 m s.n.m. en julio de 2013) y en su piezómetro próximo Piezómetro Cortijo Hidalgo (situado a escasos metros) y la cota del manantial del Molino del Barranco (932 m s.n.m.) sugieren la posibilidad de que este sector oriental tenga una misma superficie piezométrica, que coincidiría en altitud con la que presenta el manantial del Molino de Gante (939 m s.n.m.) y el piezómetro que existe junto al manantial (939 m s.n.m. en julio de 2013). Por tanto, la escasa información disponible respecto a la distribución espacial de los datos piezométricos parece sugerir la posibilidad de cierta continuidad hidrogeológica entre los afloramientos jurásicos del sector oriental del acuífero, desde el Cerro de Los Chotos, hasta el manantial del Molino de Gante, que consiste en el principal punto de drenaje del acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa.

En lo que a la distribución temporal de la piezometría se refiere, en la Figura 3.10 se representa toda la información piezométrica existente de este punto, que procede de medidas realizadas por el IGME, la Diputación Provincial de Jaén, los responsables del abastecimiento a Cabra del Santo Cristo y durante el periodo de ejecución del presente proyecto. En este gráfico es posible comprobar como en el periodo comprendido entre abril de 2004 y agosto de 2009 el descenso piezométrico acumulado fue de 34 metros. Asimismo, es posible observar que durante los periodos de lluvias intensas el nivel piezométrico se recupera y se pone por encima de la cota de drenaje del manantial del Molino del Barranco (932 m s.n.m.). De esta gráfica debe ser destacado el notable ritmo de descenso del nivel piezométrico en los periodos secos. En este sentido se observa una mayor velocidad de depresión del nivel cuando está activo el manantial del Molino del Barranco y otra menor, pero no por ello menos importante, cuando las salidas se

concentran en los bombeos del sondeo del Cerro de Los Peones. Este último ritmo de descenso tan importante podría estar justificado por la presencia de barreras impermeables próximas que acelerarían la depresión del nivel del cono de bombeo de este sondeo. Por otro lado, también debe ser destacada la rápida recuperación del nivel que se produce en el sondeo tras los años de lluvias intensas. Esta rápida recuperación también sugiere la posible conexión de este afloramiento con un sistema de importantes reservas.

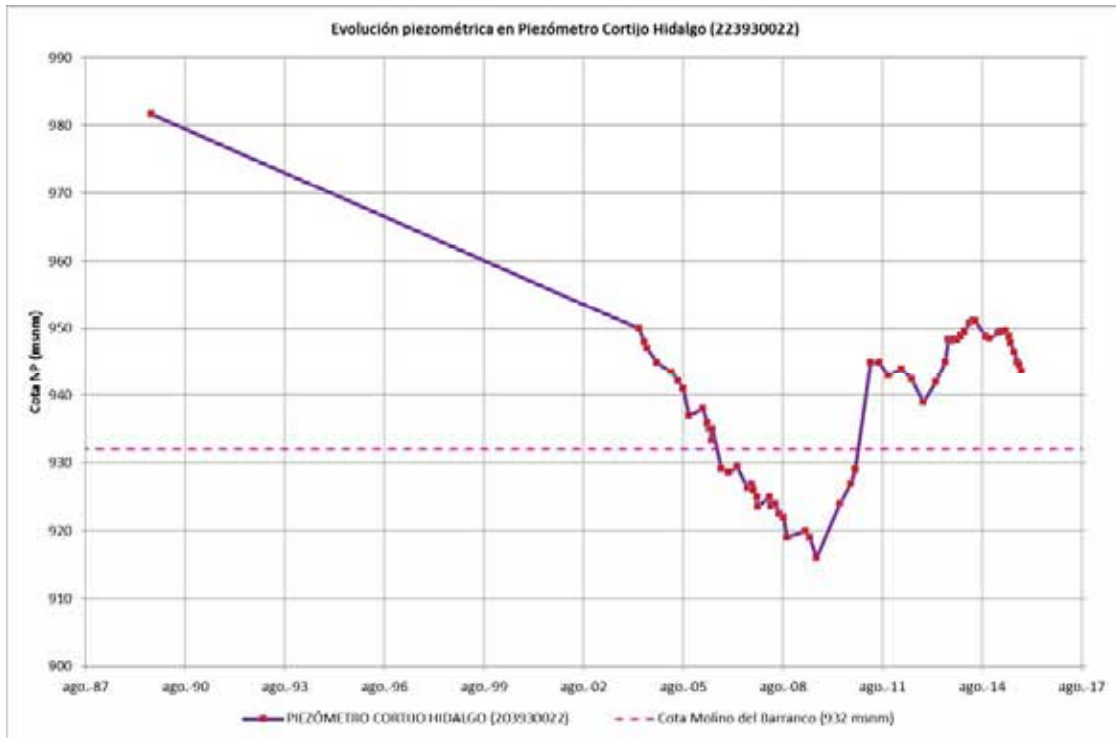


Figura 3.10: Evolución piezométrica en el Piezómetro Cortijo Hidalgo (223930022).

3.3.2 Acuífero de Cabra del Santo Cristo

El acuífero de Cabra del Santo Cristo, situado al norte del de los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos (Figura 3.7), está constituido por dolomías y calizas del Jurásico que se encuentran al suroeste y oeste del municipio del mismo nombre. Se trata de un acuífero colgado sobre materiales arcillosos y lutíticos del Triásico, que actúan como sustrato impermeable y como bordes de flujo en sus márgenes occidental, meridional y oriental. En el límite septentrional se hallan las margas y margocalizas impermeables del Cretácico inferior. Los materiales carbonáticos afloran en una superficie de 11,4 km² y presentan alta permeabilidad por fracturación y karstificación. El manantial más importante que descarga el acuífero es El Nacimiento de Cabra del Santo Cristo (203870002), situado en la entrada sur de Cabra del Santo Cristo y a una cota de 960 m s.n.m. considerada nivel regional. Esta surgencia libera unos 20 l/s. Otros puntos de descarga se hallan en el contacto permeable-impermeable de los carbonatos jurásicos con las lutitas triásicas (IGME-DPJ, 2011).

3.3.3 Acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa

El acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa lo definen, por un lado, los promontorios de La Serreta-Gante y, por otro, el Cerro de Cabeza Montosa (Figura

3.7). Consiste en un sistema compuesto por dos anticlinales y un sinclinal de rocas carbonáticas del Dogger-Malm de unos 200 metros de potencia (ITGE, 1991). En el Cerro de Cabeza Montosa además aparecen rocas volcánicas intercaladas. En este sector nororiental no existen captaciones ni manantiales catalogados. Sin embargo, en el límite sureste se encuentran el manantial del Molino de Gante (293930021), a una cota de 939 m s.n.m. y que libera entre 18 y 44 l/s, y el sondeo del Molino de Gante (293930028). En el borde este del acuífero podría existir descarga oculta hacia materiales detríticos semipermeables del Plioceno al Cuaternario (IGME-DPJ, 2011).

4 METODOLOGÍAS Y TRABAJOS REALIZADOS

Las actividades llevadas a cabo en los acuíferos de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y de Cabra del Santo Cristo han consistido en varias campañas de prospección geofísica (gravimétrica y magnética) a la vez que se ha realizado una revisión exhaustiva de la geología del área. Con estos trabajos se han investigado los límites septentrional y meridional del acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y, por ende, el límite sur del de Cabra del Santo Cristo junto con el sector oeste (Los Nacimientos) del primero de ellos. Asimismo se han revisado los puntos de agua de abastecimiento a las localidades de Cabra del Santo Cristo y Solera (Huelma) junto una revisión del inventario de puntos de agua y el establecimiento de una red de control piezométrico e hidrométrico.

4.1 Gravimetría

4.1.1 Adquisición de datos gravimétricos

La obtención de las medidas gravimétricas se llevó a cabo con un gravímetro Scintrex Autograv modelo CG-5. Este instrumento tiene una precisión de 0,001 mGal y además realiza automáticamente la corrección de deriva de mareas, ya que toma la posición y tiempo de medida de cada estación mediante GPS.

Las coordenadas horizontales de las estaciones de medida se obtuvieron mediante GPS navegador, modelo Garmin e-Trex, con precisión de 5 m. Posteriormente, a esos puntos de medida se les asignó la cota obtenida mediante el MDE con paso de malla de 5 m del IGN. Este MDE tiene precisión centimétrica en la vertical puesto que se ha construido bien mediante estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) o bien por interpolación a partir de vuelos LIDAR del PNOA.

Esta metodología se contrastó, previamente y con datos de otra campaña geofísica, con los resultados obtenidos mediante un barógrafo fijo situado en la base durante los ciclos de medida. La comparación demostró que ambas metodologías proporcionan valores muy similares y que mejoran la resolución de la cota obtenida mediante GPS navegador.

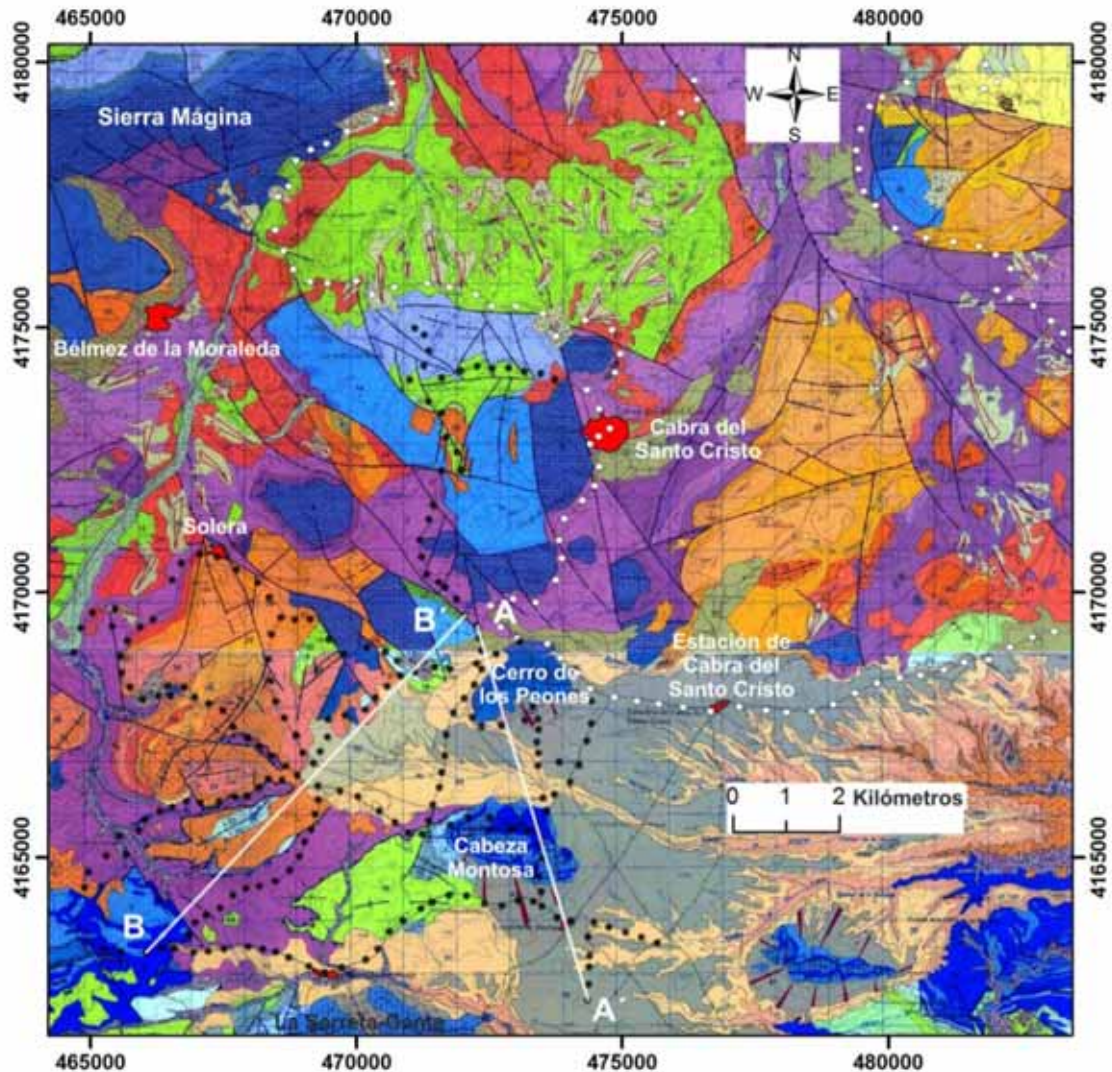


Figura 4.1: Mapa geológico con las estaciones gravimétricas: datos adquiridos durante este estudio (círculos negros) y los valores disponibles en la base de datos del IGME (círculos blancos). También incluye las trazas de los perfiles elaborados.

La adquisición de datos gravimétricos consistió en la medición de la gravedad en 210 estaciones distribuidas a lo largo de varios perfiles que cubren la zona de estudio (Figura 4.1). Además, los nuevos datos gravimétricos se han integrado con otras 99 medidas tomadas de estudios geofísicos previos obtenidos por el IGME con la finalidad de conseguir una mayor cobertura en la realización del mapa de anomalía de Bouguer. El espaciado entre estaciones es de aproximadamente 250-300 m. Se hicieron ciclos de medida teniendo como referencia la base gravimétrica del IGN situada en la Facultad de Medicina de la Universidad de Granada, donde se conoce el valor absoluto de la gravedad.

4.1.1.1 Anomalía de Bouguer

En el mapa de anomalía de Bouguer (Figura 4.2) se observa una tendencia decreciente del valor de anomalía hacia el sur con un gradiente medio de 2 mGal/km. El máximo gravimétrico se encuentra en el extremo oriental de Sierra Mágina (-85 mGal), mientras que el mínimo se ubica unos 6 km al oeste de Cabeza Montosa, en una zona donde aflora de manera frecuente el Triásico (-111 mGal).

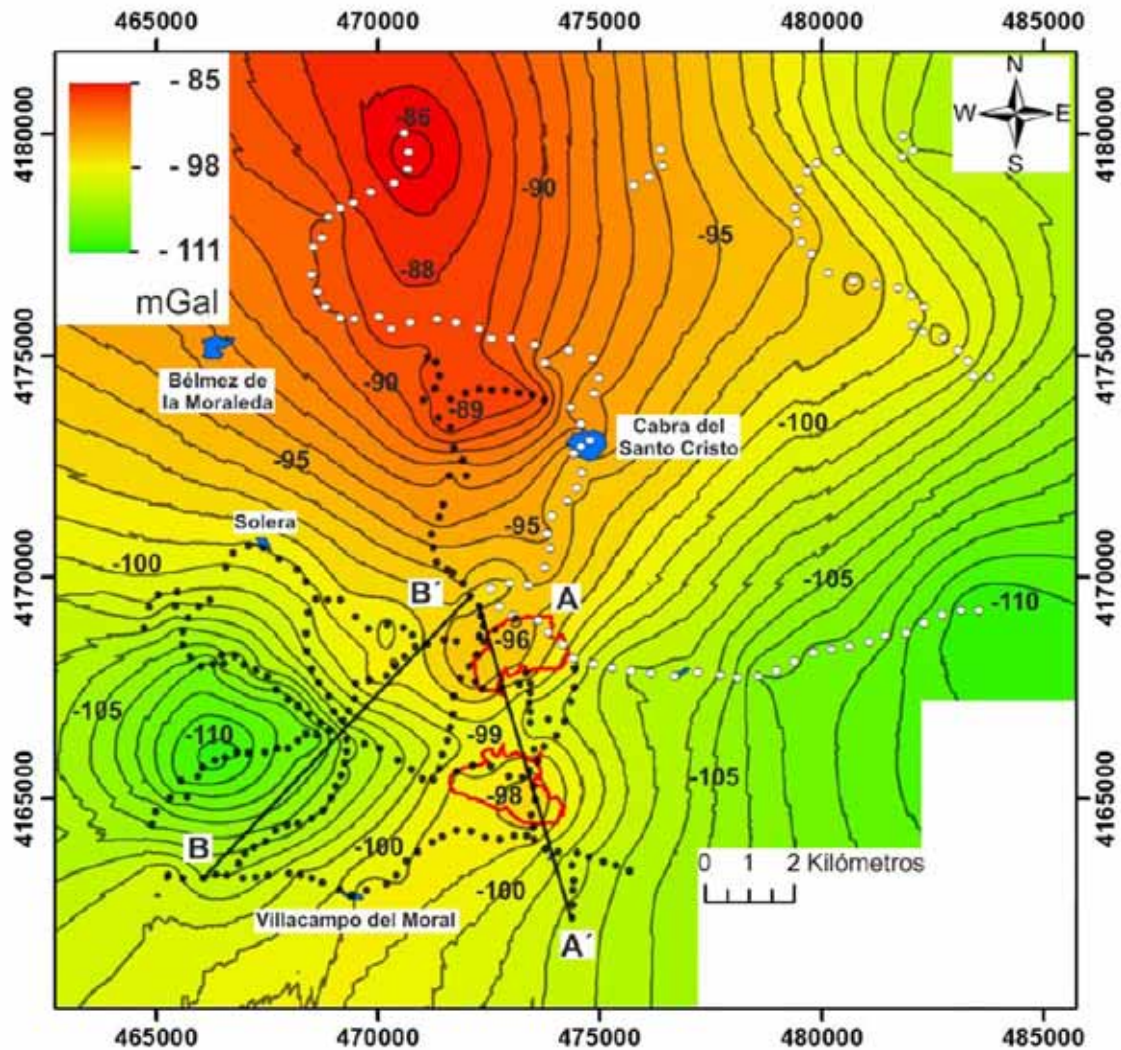


Figura 4.2: Mapa de anomalía de Bouguer de la región. Con líneas rojas aparecen los contornos del Cerro de Los Peones y Cabeza Montosa y en negro las trazas de los perfiles.

En el Cerro de los Peones aparece una anomalía de Bouguer de hasta -95 mGal, mientras que en el Cerro de Cabeza Montosa llega a los -97 mGal. El máximo relativo correspondiente al Cerro de los Peones se encuentra desplazado hacia el noroeste de las dolomías que afloran en superficie. El máximo gravimétrico de Cabeza Montosa se halla en la mitad oriental de las calizas aflorantes, a falta de más estaciones gravimétricas. Ambas anomalías aparecen individualizadas del entorno que presenta valores más bajos. En la transversal entre los dos cerros existe un mínimo gravimétrico relativo con respecto a estos máximos de unos -100 mGal. Por último, unos cinco kilómetros al sur de Solera aparece una acusada anomalía de Bouguer negativa equidimensional (-111 mGal) relacionada con los afloramientos de rocas sedimentarias neógenas poco densas y del Triásico. Este mínimo gravimétrico aparece, aunque no con sus valores más bajos, en el perfil B-B' donde llega a alcanzar hasta -106 mGal.

Se han modelizado dos perfiles gravimétricos. El primero de ellos, el A-A' (Figura 4.3), tiene una dirección N164°E y una longitud de 7,35 km que incluyen el Cerro de los Peones y el Cerro de Cabeza Montosa. El segundo, el B-B' (Figura 4.4), tiene una dirección N43°E y una longitud de 8,75 km. El trazado atraviesa la zona de la gran anomalía gravimétrica negativa donde afloran el Triásico, las rocas del

Mioceno y los sedimentos pliocuaternarios aunque no con sus valores más bajos, llegando sólo hasta -106 mGal.

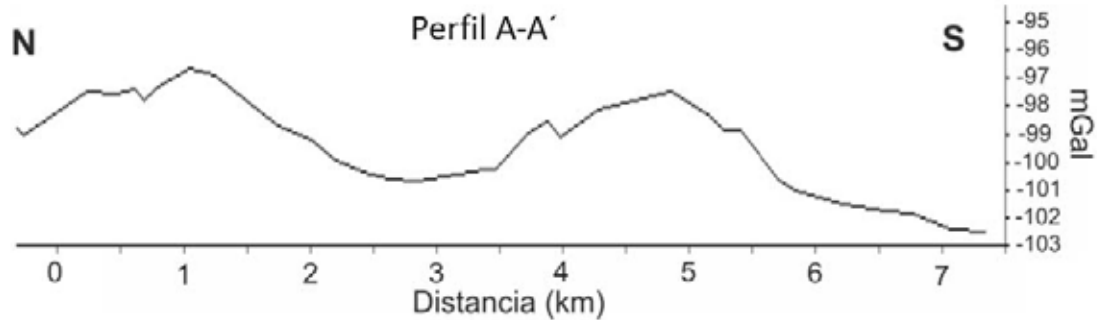


Figura 4.3: Anomalía gravimétrica del perfil A-A'.

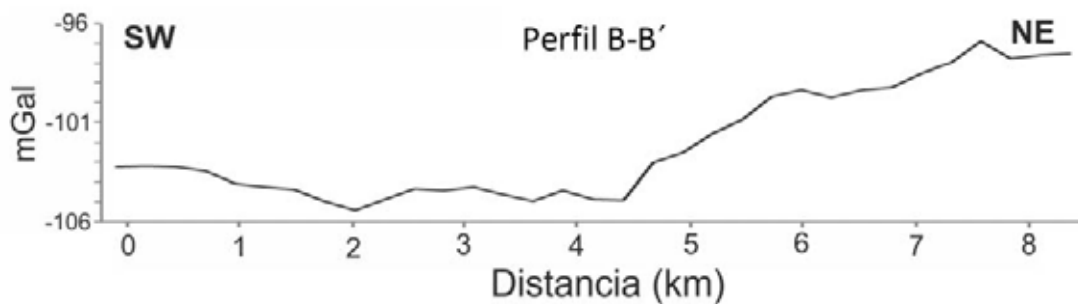


Figura 4.4: Anomalía gravimétrica del perfil B-B'.

4.1.2 Magnetometría

4.1.2.1 Adquisición de datos magnéticos

Las medidas de la intensidad del campo magnético total se tomaron utilizando un magnetómetro GSM 8 de precisión de protones, el cual tiene una precisión máxima de 1 nT. Las medidas directas de la susceptibilidad magnética de las lavas almohadilladas del Cerro de Cabeza Montosa se realizaron con un susceptómetro Exploranium kappameter KT-9.

De manera simultánea a la adquisición de datos gravimétricos, se tomaron 209 medidas de la intensidad del campo magnético terrestre (Figura 4.5). La presencia de estructuras anómalas de origen antrópico cercanas, tales como señales de tráfico o cables eléctricos, hacen que la toma de la medida sea errónea. No obstante, la zona estudio destaca por su bajo grado de interferencia artificial.

Se realizaron varias medidas de la susceptibilidad magnética de las rocas volcánicas que afloran en el Cerro de Cabeza Montosa. Estas medidas consistieron en registrar esta propiedad diez veces en distintos puntos del mismo afloramiento rocoso. De estos registros se anota su media aritmética y sus valores máximo y mínimo. Este proceso se repitió en distintos lugares donde se encontraron las lavas almohadilladas para conseguir la máxima representatividad ya que suele existir gran variación según el lugar donde se mida.

El procesado de la magnetometría consiste en calcular las contribuciones del campo magnético de origen interno y externo, para sustraer dichos valores a las medidas y obtener la anomalía magnética. Las variaciones diurnas debidas a causas externas se han eliminado a partir de los datos de intensidad del campo magnético total registrados en la estación de San Fernando (SFS) situada en el Real Instituto y Observatorio de la Armada (Cádiz).

4.7.2.2 Anomalías magnéticas

El rasgo más destacable del mapa de anomalía magnética de la figura 4.5 es la existencia de un dipolo con un mínimo (-389 nT) situado al Norte de Cabeza Montosa y un máximo menos acusado (+223 nT) situado al sur de dicho cerro (detalle en Figura 4.6). Cualitativamente es posible interpretar que un cuerpo equidimensional o elongado O-E situado entre el máximo y el mínimo y con un contraste de susceptibilidad magnética positivo produce dicha anomalía.

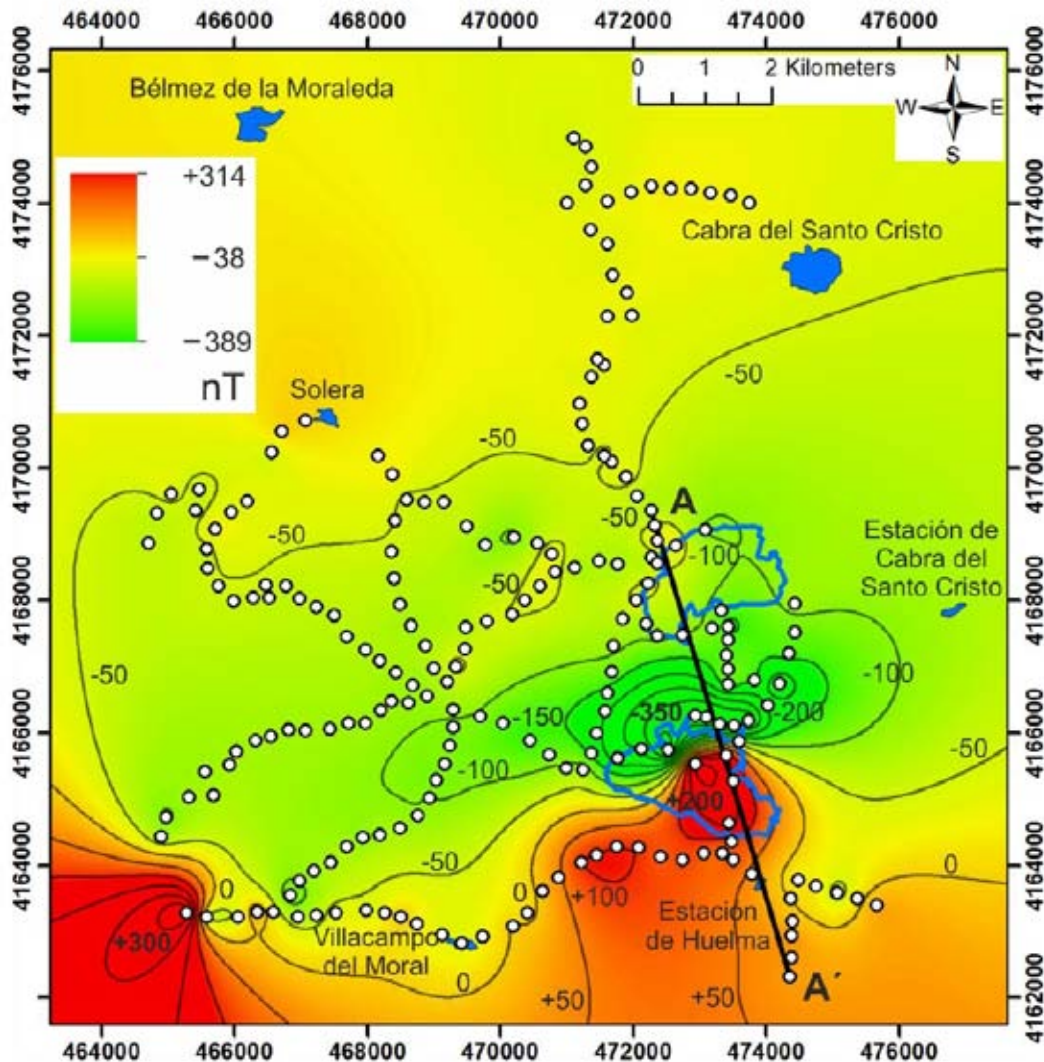


Figura 4.5: Mapa de anomalía magnética obtenido a partir de los datos de campo. Los círculos blancos representan las estaciones de medida empleadas para la realización del mapa. Se muestran también la posición del perfil modelado (A-A'), los municipios (polígonos azules) y el perímetro de Cerro de los Peones y la Sierra de Cabeza Montosa (líneas azules).

Las responsables de esta anomalía magnética son las lavas almohadilladas (pillow-laves) jurásicas que afloran interestratificadas entre las rocas carbonatadas que constituyen esta sierra. Además de este dipolo principal también se observa otro dipolo peor definido unos ocho kilómetros al oeste de Cabeza Montosa. El dipolo, con un máximo que alcanza los +314 nT y un mínimo peor definido por falta de estaciones en esa zona está también relacionado con la existencia de afloramientos de rocas volcánicas.

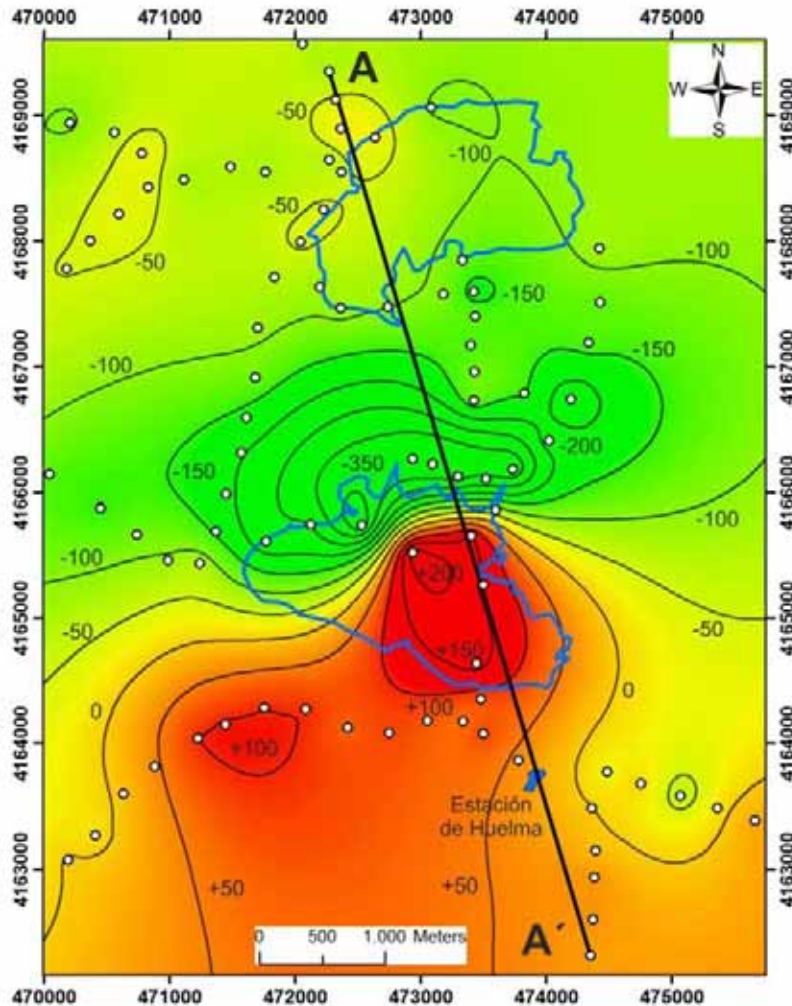


Figura 4.6: Detalle del dipolo magnético asociado a las rocas volcánicas que afloran en el sector de Cabeza Montosa

En el perfil magnético A-A' (Figura 4.7) aparece un dipolo con un mínimo al norte de -327 nT y un máximo de +223 nT hacia el sur. Este dipolo se extiende unos dos kilómetros y a sus extremos volvemos a encontrar valores de fondo entre +50 y -50 nT.

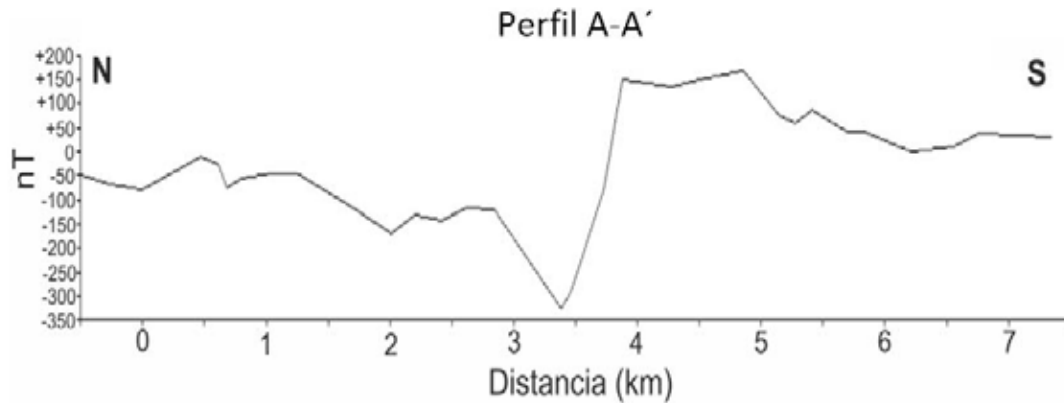


Figura 4.7. Anomalía magnética del perfil A-A'.

4.1.3 Prospección geofísica (SEDT)

4.1.4 Adquisición de datos

Para confirmar con un tercer método de prospección geofísica las observaciones realizadas, se llevó a cabo una campaña de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT).

El trabajo de campo no presentó problemas reseñables en la zona de Cabra del Santo–Solera. Se pudieron elegir zonas de muy bajo ruido electromagnético y topografía suave que proporcionaron SEDTs de alta calidad y excelente penetración para los tamaños de bucles empleados (200m*200m).

Una vez realizada la toma de datos en campo se vuelcan los mismos al ordenador mediante la conexión Ehternet de forma que puede iniciarse el procesado e inversión de los mismos.

Para la zona de Cabra de Santo Cristo–Solera se han obtenido, en general, modelos con muy buenos ajustes y coherentes para las tres frecuencias gracias, entre otras cosas, a los excelentes datos de campo. De hecho, se seleccionaron áreas con bajo nivel de ruido electromagnético y topografía suave que proporcionan datos de buena calidad y profundidad de investigación de hasta 600 m. En el cuadro adjunto se presenta el listado de SEDTs realizados y su situación.

ESTACIÓN SEDT	X UTM	Y UTM
SEDT-1	474588	4168769
SEDT-2	473653	4167977
SEDT-3	473632	4167472
SEDT-4	474444	4166888
SEDT-5	473294	4166325
SEDT-6	473492	4165168
SEDT-7	472828	4164505
SEDT-8	471650	4163882
SEDT-9	470220	4162258
SEDT-10	468153	4168894
SEDT-11	466328	4168448
SEDT-12	466437	4167244

Como se puede observar en la figura 4.8, los SEDTs se ubicaron tratando, dentro de lo posible, de seguir la traza de los perfiles realizados con las otras dos campañas de prospección geofísica (gravimétrica y magnética).

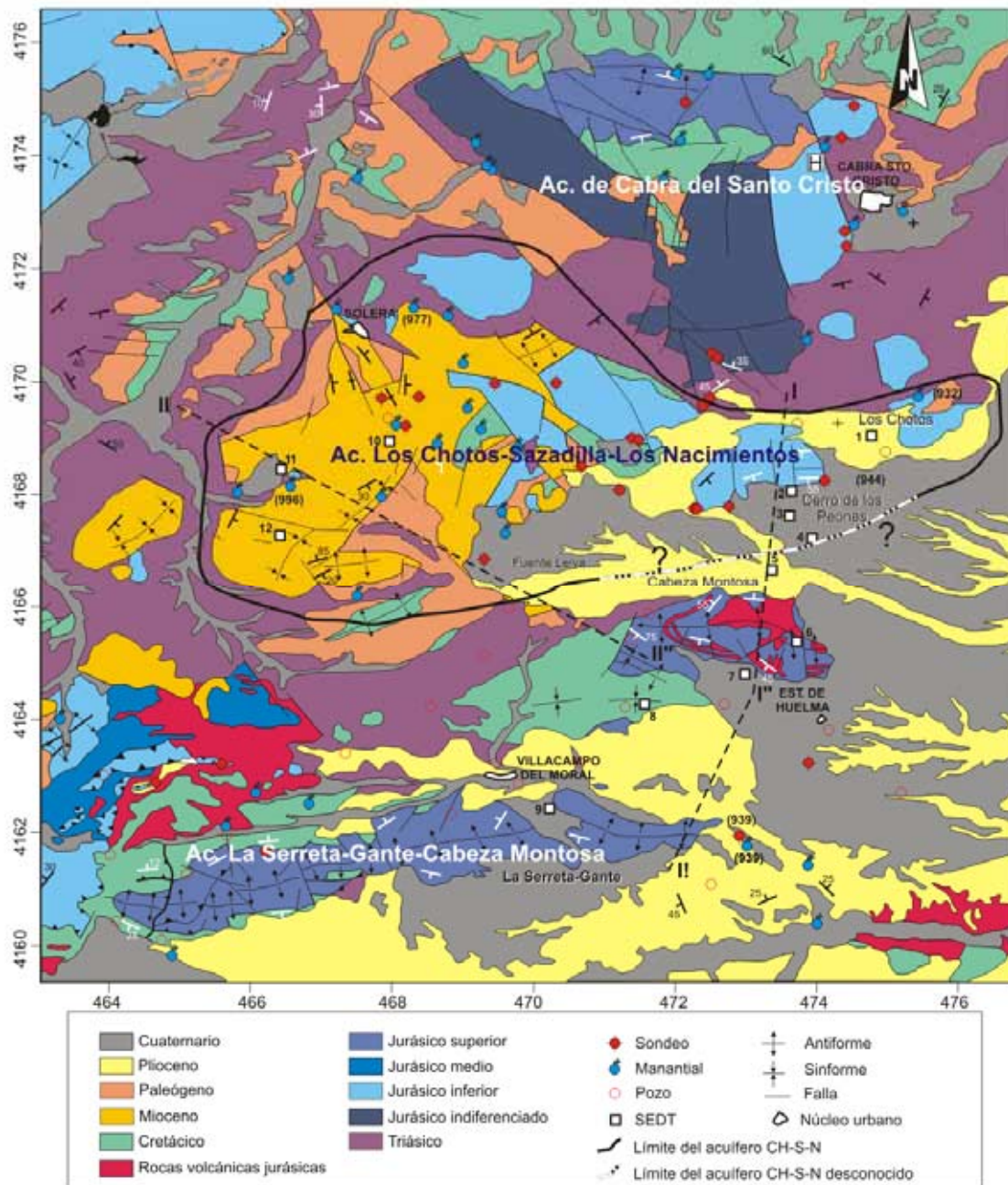


Figura 4.8: Mapa geológico con la situación de las estaciones SEDT y los perfiles elaborados con la gravimetría y magnetometría.

4.1.5 Interpretación combinada gravimetría-magnetometría-SEDT

A partir del análisis de las anomalías, tanto gravimétrica como magnética, se ha realizado la modelización geométrica de los cuerpos que las producen. Estos modelos se han acotado, además, mediante la información complementaria que proporcionan la geología de superficie y los datos geofísicos previos. En este estudio se han realizado modelos, correspondientes a los perfiles A-A' y B-B'. Dichos modelos se han diseñado empleando el programa GRAVMAG (Pedley et al.,

1993) que reproduce las anomalías teóricas debidas a cuerpos poligonales. Tras sustraer tendencia regional descendente de los valores hacia el sur se abordó la modelización de la anomalía gravimétrica residual. Las densidades utilizadas en los modelos se han asignado a partir de tablas de las densidades teóricas medias de las diferentes litologías (Telford et al., 1990). Tras las medidas directas en el campo, a las rocas volcánicas Cerro de Cabeza Montosa se les asignó una susceptibilidad magnética de 0,067 SI.

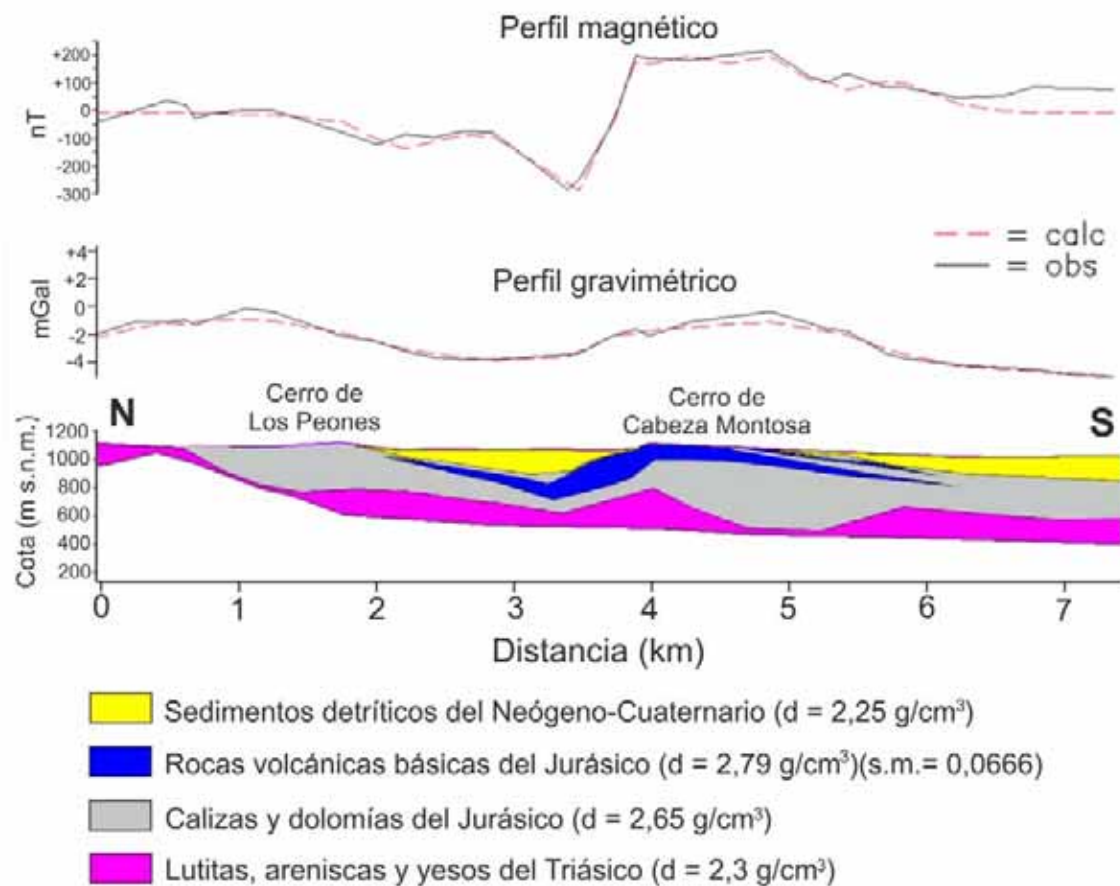


Figura 4.9: Modelo gravimétrico y magnético del perfil A-A' realizado a partir de la anomalía de Bouguer y la anomalía magnética obtenida de los datos de campo.

El modelo para el perfil A-A' con el que se obtiene el mejor ajuste, que se presenta en la figura 4.9, es aquel en el que las calizas y las rocas volcánicas se disponen de manera continua entre los cerros de Los Peones y de Cabeza Montosa bajo los sedimentos detríticos neógeno-cuaternarios. Especialmente decisivo ha sido la necesidad de prolongar las rocas volcánicas que afloran en el Cerro de Cabeza Montosa hacia el norte para poder ajustar el dipolo magnético observado. El cuerpo principal de rocas volcánicas tendría un potencia máxima de entre 150 y 200 metros y se acuñaría concordantemente al flanco septentrional de la sinforma en las calizas del Dogger-Malm entre las que se encuentran interestratificadas. Asimismo, el mínimo gravimétrico relativo entre ambas sierras se ajusta con un relleno detrítico de densidad igual a $2,25 \text{ g/cm}^3$ y un espesor máximo de unos 200 metros. Es importante recalcar que la modelización conjunta de ambas anomalías permite constreñir la geometría de las rocas volcánicas en profundidad.

se detecta otra capa conductora (15-50 Ohm*m) relacionada con la presencia de arcillas y yesos triásicos que sellan el acuífero. La profundidad alcanzada por los sondeos TDEM, de entre 450-600 m, no permite alcanzar la base de esta unidad nada más que en uno de los sondeos (sondeo 2, con un espesor de ~200 m). Hay una gran similitud entre los valores de resistividad obtenidos para las rocas volcánicas y las arcillas triásicas, pero el conocimiento de la estructura geológica permite discernir entre ambas.

La cantidad de información obtenida en el perfil II (sondeos TDEM 10-12) es más limitada pero apunta hacia la presencia de arcillas triásicas bajo la alternancia de margas y calcarenitas neógenas que constituyen el sector occidental del acuífero. El relleno neógeno en este sector está constituido por una alternancia de rocas conductoras y resistivas hasta los 150-200 metros de espesor. Las rocas triásicas sellarían el acuífero produciendo la desconexión hidrogeológica de este sector. Aunque esta es la estructura más probable, serían necesarios más sondeos para confirmarlo.

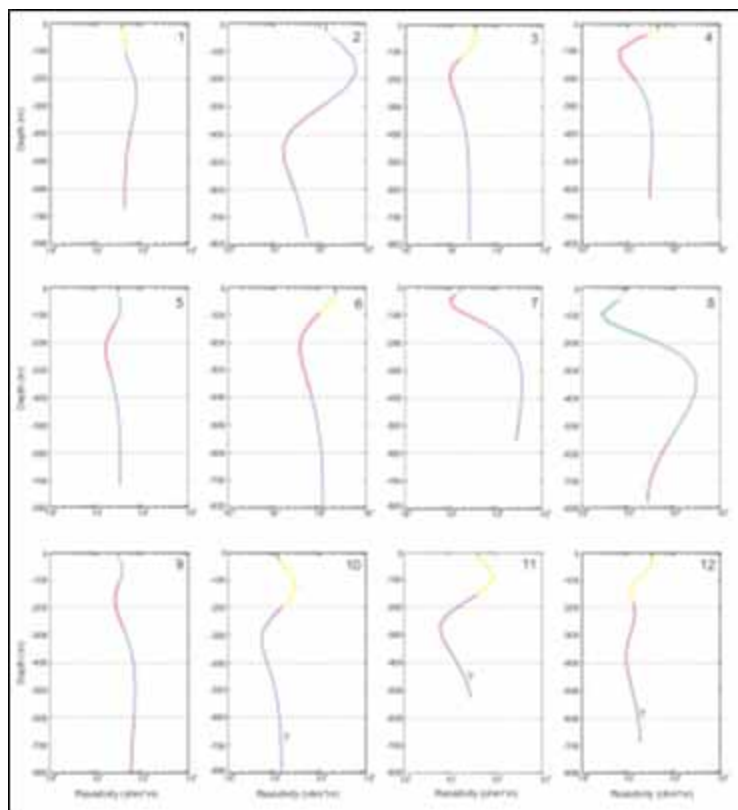


Figura 4.11: Interpretación de los SEDTs

La combinación de los tres métodos de prospección geofísica empleados ha permitido definir el perfil de la figura 4.12 en el que se aprecia, como más destacable, la continuidad litológica entre el hasta ahora llamado acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y el de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa.

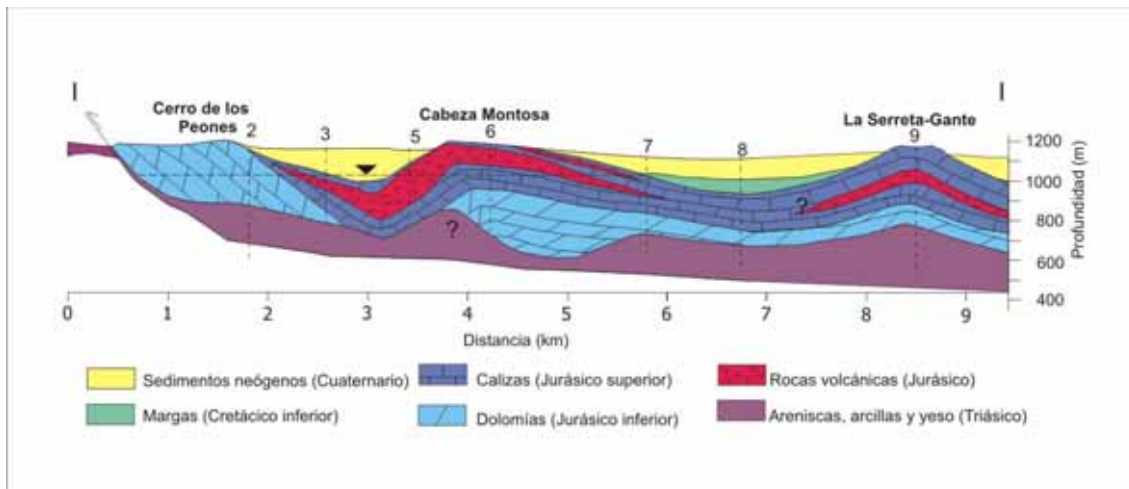


Figura 4.12: Perfil interpretado con el resultado de las tres campañas de prospección geofísica.

En cuanto a las implicaciones hidrogeológicas de la investigación geofísica realizada hasta la fecha, cabe concluir lo siguiente:

- ✓ La integración de la gravimetría, magnetometría y SEDT ha proporcionado buenos resultados para determinar la geometría del acuífero estudiado mostrando ser una herramienta eficaz para la detección, como es el caso, de acuíferos carbonatados profundos con capas de rocas volcánicas básicas intercaladas.
- ✓ La continuidad hidrogeológica entre el hasta ahora denominado acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y el de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa se apoya en aspectos de carácter hidrogeológico como la rápida recuperación de los niveles piezométricos y la similitud de las cotas de sus principales manantiales. Además, la combinación de las técnicas geofísicas utilizadas (gravimetría, magnetometría y SEDT) ponen de manifiesto la ausencia de un prominente diapiro triásico que desconecte los niveles carbonatados del Cerro de los Peones y Cabeza Montosa.
- ✓ Tal evidencia sugiere la necesidad de redefinir los límites de estos acuíferos anteriormente considerados desconectados e implicaría un incremento en el volumen del depósito carbonatado. La baja tasa de recarga y la reducida capacidad de almacenamiento del acuífero mioceno requieren un estricto control de la explotación de las aguas subterráneas (volumen, calidad y evolución de los niveles). Esta información será esencial para definir una explotación sostenible de las aguas subterráneas en esta región.

4.1.6 Revisión geológica y tectónica

En los recorridos de campo se llevó a cabo una revisión de geología estructural del área de estudio encaminada, en primer lugar, a caracterizar la tectónica general de la zona y, en segundo lugar, a resolver la estructura entre el Cerro de Los Peones y el Cerro de Cabeza Montosa.

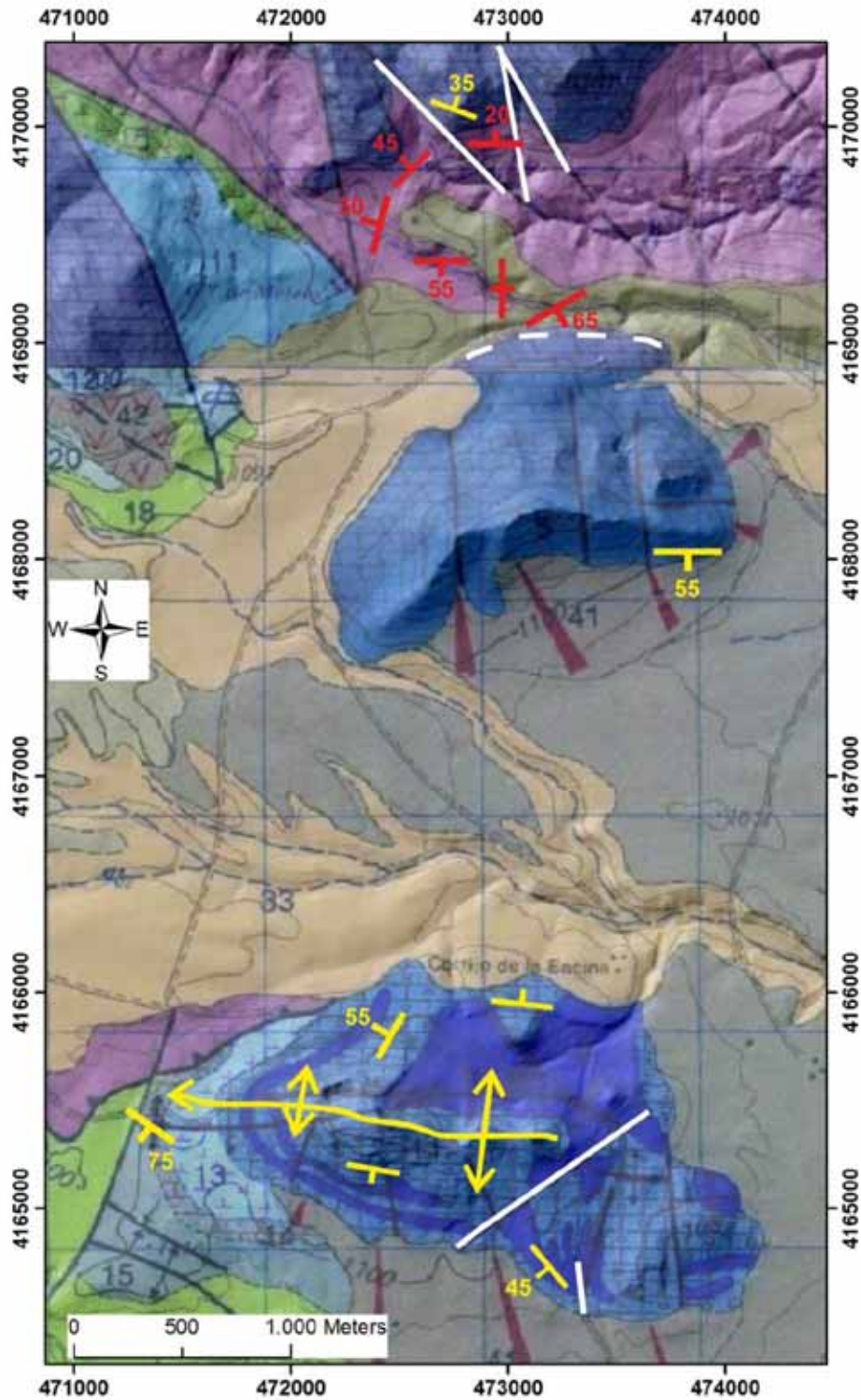


Figura 4.13: Mapa geológico serie MAGNA sobre mapa de sombras del MDE. Aparecen las medidas estructurales tomadas: en amarillo sobre las rocas carbonáticas del Jurásico, en rojo sobre los materiales del Triásico y en blanco las fallas y contactos mecánicos. Modificado de Ruiz et al., 1988a y de Ruiz et al., 1988b.

Estas observaciones consistieron en la identificación de las diferentes litofacies presentes, establecimiento de la posición relativa de las unidades diferenciadas, posicionamiento de los límites cartográficos y comprobación de sus relaciones de contacto.

Como base cartográfica se han utilizado los mapas geológicos serie MAGNA (1:50.000) (Ruiz et al., 1988a; Ruiz et al. 1988b) y se contrastaron las observaciones utilizando para ello sistemas de información geográfica (ArcGIS v.10). Además se empleó la superposición de capas como mapas de sombras construidos a partir del modelo digital de elevaciones de cinco metros de resolución (MDE 5 m) (Figura 4.13) así como las imágenes de alta resolución del PNOA (Figura 4.14), ambos del IGN. Los resultados fueron tenidos en cuenta a la hora de modelizar los perfiles de gravimetría y magnetometría.

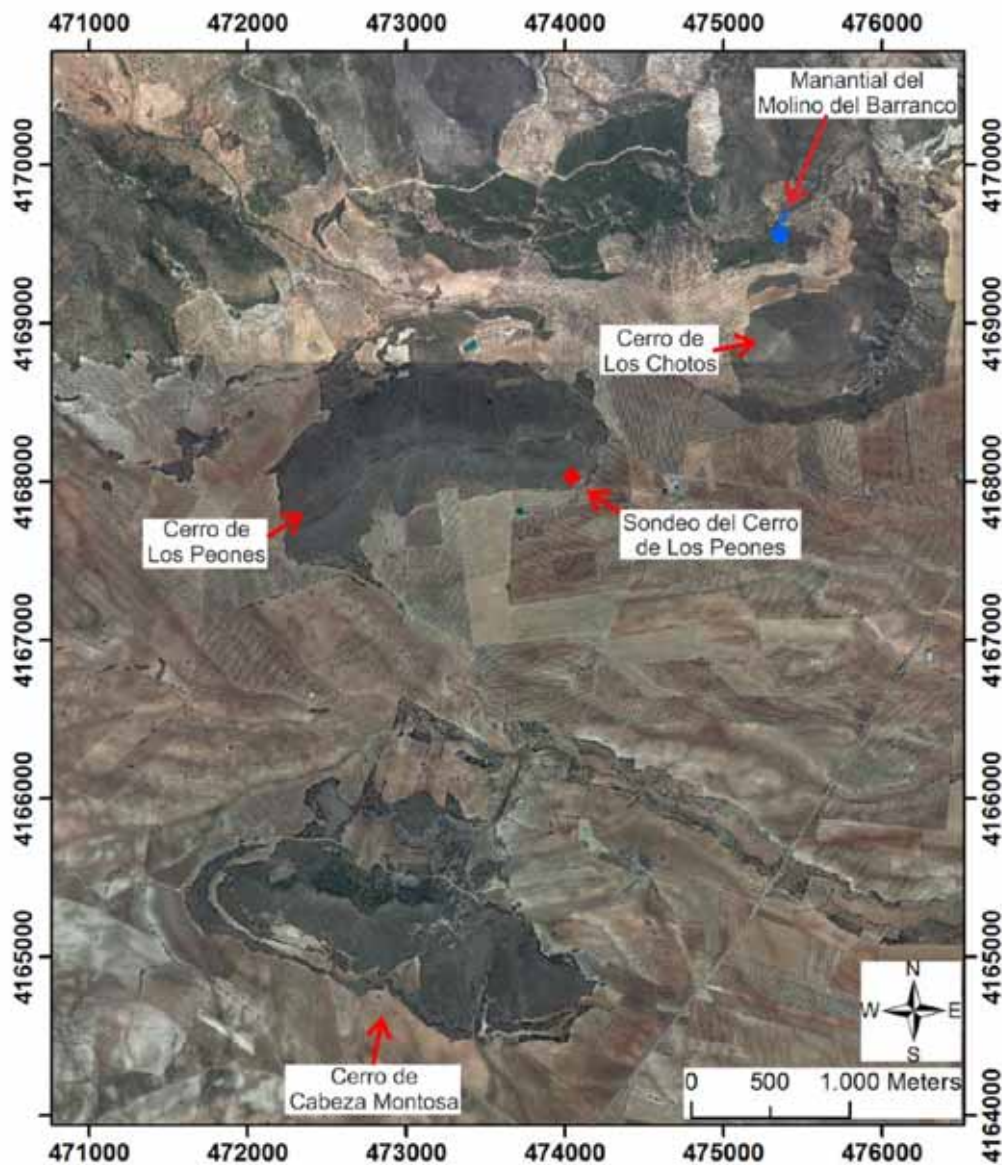


Figura 4.14: Ortofotografía de alta resolución de la transversal de interés en este estudio.

El Cerro de Cabeza Montosa tiene una estructura anticlinal de dirección aproximada N100E y vergencia norte. El flanco sur buza de 25° a 50° mientras que en el flanco norte la erosión ha eliminado parte de las calizas de la Formación Milanos y ha dejado expuestos los basaltos submarinos que se encuentran interestratificados (Figura 4.15.A). Ocasionalmente pueden distinguirse superficies de estratificación estriadas con cinemática de falla inversa que sugieren un mecanismo de deslizamiento flexural entre capas durante el plegamiento (Figura 3.7). El borde

occidental de la Sierra de Cabeza Montosa coincide con el cierre periclinal de este anticlinal, claramente identificable en ortofotografía por los trazados que dibujan las capas calizas y las rocas volcánicas. Esta sierra se encuentra retocada por fallas normales de dirección aproximadamente N50°E. A su vez, existen fallas secundarias que escalonan las principales y tienen una dirección N-S (Figura 4.15.B).



Figura 4.15: Estructuras en Cerro Cabeza Montosa. A) En primer plano aparecen las pillow-lavas y sobre ellas las calizas de la Formación Milanos. B) Plano de una de las fallas secundarias N-S en el que se aprecian las estrías que muestran una cinemática normal-dextrosa. (Foto: J.P. González de Aguilar)

El Cerro de Cabeza Montosa parece estar conectado al Cerro de Los Peones por una sinforma situada en la vaguada entre ambas sierras. Esta depresión está cubierta por materiales terrígenos recientes que ocultan los afloramientos de calizas del Jurásico.

El Cerro de Los Peones podría ser una estructura monoclinal que conecta con la sinforma mediante un flanco con un buzamiento de unos 55° hacia el sur. Este lado se encuentra tapado por un pie de monte de pendiente suave. En la ladera norte las dolomías carniolares del Jurásico inferior presentan una estratificación difusa difícil de medir. En este sector se encuentra el contacto con los sedimentos del Triásico, los cuales llegan a encontrarse montados encima de los jurásicos. Aquí las arcillas y yesos del Triás presentan deformación dúctil (Figura 4.16). Por estos motivos cabe pensar que se trata de un contacto mecánico, que localmente favoreció el flujo diapírico de los yesos y arcillas triásicos.



Figura 4.16: Arcillas y yeso con deformación dúctil en el flanco Norte del Cerro de Los Peones. (Foto: J.P. González de Aguilar)

Hacia el norte del Cerro de Los Peones se encuentra un valle de un kilómetro de anchura donde afloran las arcillas, yesos y areniscas del Triásico. En él estas rocas sedimentarias se encuentran deformadas por pliegues. En el borde septentrional de este valle vuelven a aparecer las dolomías del Lías buzando hacia el norte. En este lugar detectamos la presencia de varias fallas importantes NW-SE a N-S que cortan varios bloques carbonáticos y también afectan a los sedimentos triásicos (Figuras 4.18 y 4.19). Sin embargo, aquí el contacto Triásico-Jurásico aparentemente es concordante y no mecánico (Figura 4.17).

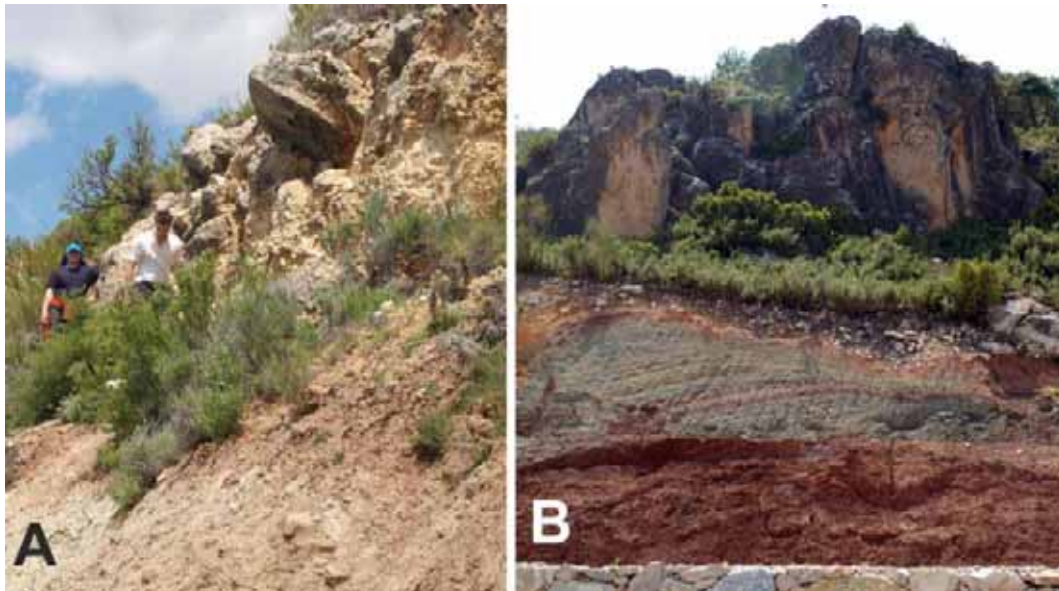


Figura 4.17: Contacto concordante Triásico-Jurásico en el acuífero de Cabra del Santo Cristo. (Foto: J.P. González de Aguilar)



Figura 4.18: Falla en areniscas y arcillas del Triásico. (Foto: J.P. González de Aguilar)



Figura 4.19: Falla en la que en el bloque de muro están las lutitas versicolores y en el bloque de techo las areniscas rojas con estratificación cruzada del Triásico superior. En la esquina superior izquierda se encuentran las dolomías del Jurásico inferior. (Foto: J.P. González de Aguilar).

4.1.7 Red piezométrica y foronómica

La red piezométrica y foronómica (Tabla 1 y Figura 4.20) definida en este proyecto para el acuífero de Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos consta de 8 puntos de los que 3 componen la red piezométrica y 5 la foronómica. En el caso del acuífero de Cabra del Santo Cristo se compone de 2 manantiales y 1 piezómetro. Ambas redes se han controlado con periodicidad mensual y además se ha recopilado información histórica de aquellos puntos en los que ha sido posible. Además, en el punto Piezómetro Cortijo Hidalgo, por su especial importancia se ha instalado un sensor

de piezometría y temperatura modelo Diver para obtener un registro continuo de la evolución de estos parámetros.

Acuífero	Nº IGME	X	X	Toponimia	Nat	Red
Chotos-Sazadilla- Los Nacimientos	203920017	466604	4168236	Los Nacimientos	Man	Hidro
	203860005	468348	4171366	Fuente de las Negras	Man	Hidro
	203870022	472400	4169432	Cortijo Metelos y Cújar	Man	Hidro
	203870009	475455	4169819	Molino del Barranco	Man	Hidro
	203870023	470257	4170418	Man. del Cortijo de Béjar	Man	Hidro
	203930022	474167	4168235	Piez. Cortijo Hidalgo	Piez	Piez
	203860050	468238	4169248	Pozo del Morrón	Sond	Piez
	203860051	468411	4169756	Pozo de Rafael	Sond	Piez
Cabra del Santo Cristo	203870002	474562	4172843	El Nacimiento de Cabra	Man	Hidro
	203870001	473898	4170811	Arroyo Santo	Man	Hidro
	RN0541001	472527	4171382	Camino Cerro del Buitre	Piez	Piez

Tabla 1: Red piezométrica definida en los acuíferos de Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y Cabra del Santo Cristo.

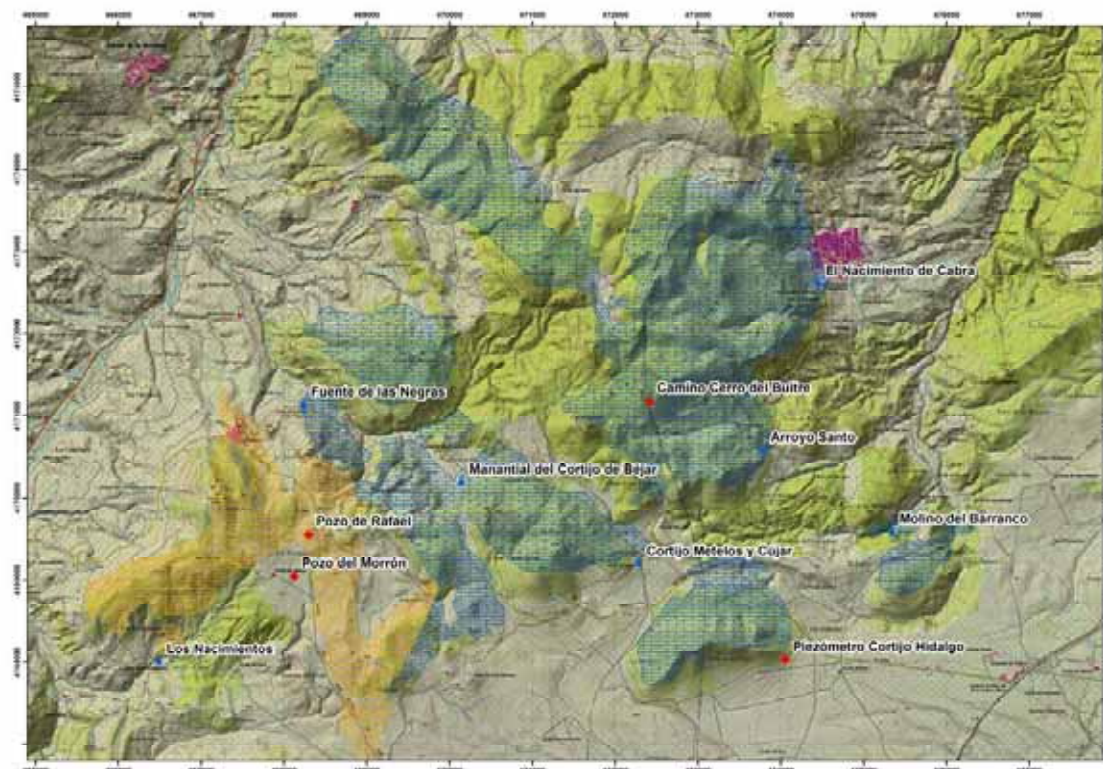


Figura 4.20: Localización de los puntos de control en los acuíferos de Cabra del Santo Cristo y Los Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos.

El comportamiento de los manantiales controlados pone de manifiesto ciertas diferencias, si bien existe una tendencia en todos ellos a una disminución del caudal surgente atribuible, en principio, a que durante el periodo de estudio (años hidrológicos 2013-2014) la pluviometría ha sido claramente decreciente aunque los valores registrados en las tormentas de agosto y septiembre de 2015 incrementen el total registrado. Este aspecto se puede observar en las figuras 4.21.

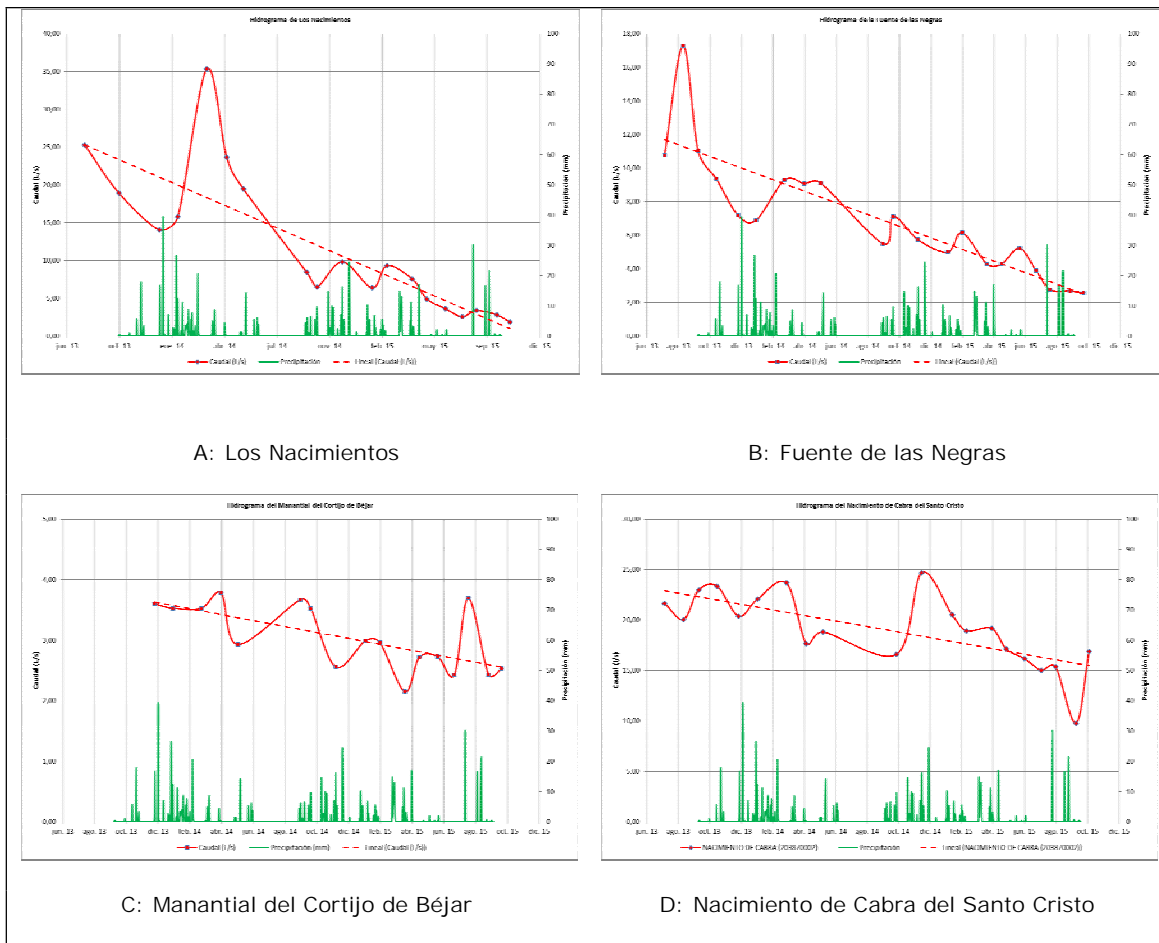


Figura 4.21: Hidrogramas de los manantiales de Los Nacimientos, Fuente de las Negras, Cortijo de Béjar y Nacimiento de Cabra del Santo Cristo.

En el caso de los Nacimientos y la Fuente de las Negras (Figura 21.A y B) existe un cierto paralelismo que sólo deja de hacerse patente en el pico de marzo de 2013 en el segundo de ellos. Esto se debe a que se trata de valores puntuales (no continuos) y en esa fecha no se pudo realizar la medida en Los Nacimientos por falta de acceso. El manantial del Cortijo de Béjar (Figura 21.C) presenta un comportamiento diferenciado con unas menores diferencias de caudal y una cierta tendencia al equilibrio en el periodo estudiado. Por último, el Nacimiento de Cabra del Santo Cristo (Figura 21.D) también presenta un comportamiento diferente destacando la recuperación del caudal al comienzo del año hidrológico 2014-2015 aunque la posterior disminución de las precipitaciones ha hecho que el caudal siga disminuyendo hasta valores importantes (menos de 10 l/s en septiembre de 2015) pero con una subida tras las precipitaciones de finales del año hidrológico.

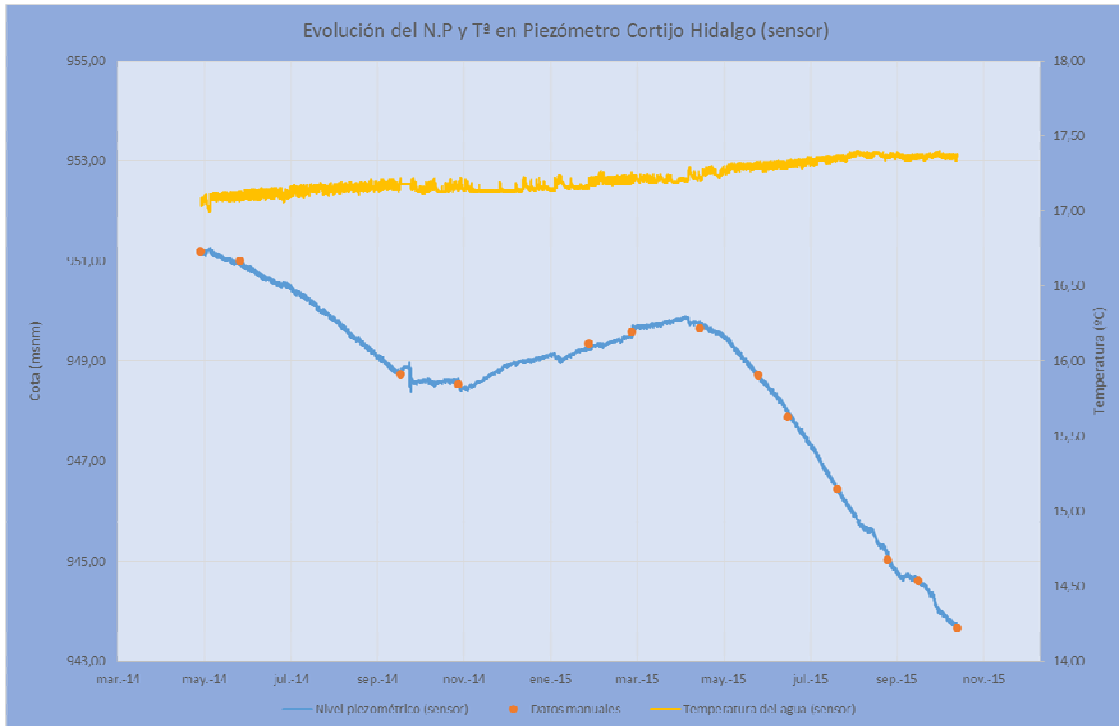


Figura 4.22: Evolución del nivel piezométrico y la temperatura en el Piezómetro Cortijo Hidalgo.

En cuanto a la evolución de la piezometría, en la figura 4.22 se presenta la evolución del nivel piezométrico y la temperatura del agua subterránea en el Piezómetro Cortijo Hidalgo.

En la figura se observan los significativos descensos producidos durante la campaña de riego y la posterior recuperación del nivel piezométrico en el sondeo. El déficit interanual para la campaña de riego entre abril y octubre de 2014, que se observa comprobando el dato de máxima recuperación en abril de 2015, es de aproximadamente 1 metro. A partir de esa fecha, el nivel desciende con una pendiente constante hasta octubre de 2015 con un descenso acumulado en torno a 6,5 m. Este dato, si bien en sí mismo no tiene porqué ser preocupante a efectos de la explotación del acuífero, debe tenerse en cuenta en el caso de que no se llegue, en el transcurso del presente año hidrológico (2015-2016), a niveles similares a los de abril de 2015.

Por otra parte, la temperatura del agua del sondeo muestra un aumento cuando desciende el nivel piezométrico y una ligera estabilización en el periodo de recuperación. Esto indica que se está extrayendo, en los periodos de riego, agua cada vez a mayor profundidad, que, debido al gradiente geotérmico, tiene una mayor temperatura.

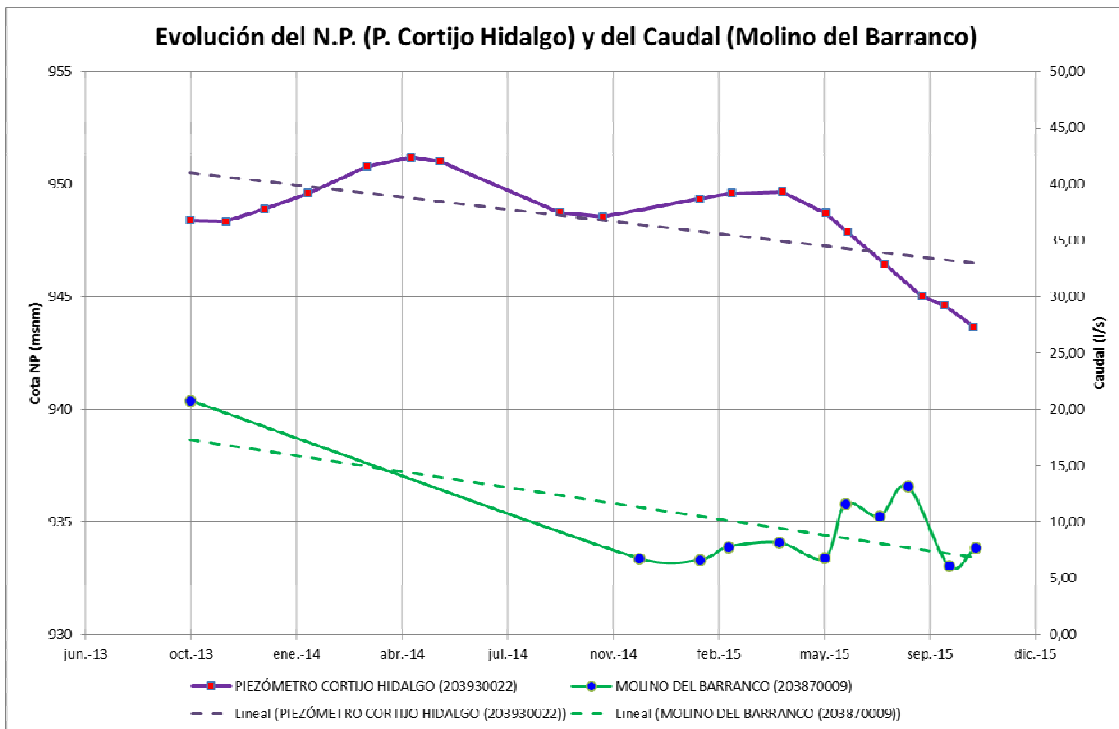


Figura 4.23: Evolución del nivel piezométrico en el Piezómetro Cortijo Hidalgo y del caudal en el Molino del Barranco.

Otro aspecto interesante observado ha sido la evolución del caudal del manantial del Molino del Barranco. En la figura 4.23 se ha representado junto a la evolución del nivel piezométrico en el Piezómetro Cortijo Hidalgo. Como se puede observar, la evolución de ambos registros muestra una tendencia descendente que indica, si bien no de manera concluyente, la relación existente entre la posición del nivel en el piezómetro y el caudal surgente por el manantial que se manifiesta con un cierto desfase. Estos aspectos no han podido afinarse más debido a que el registro de los caudales se ha realizado de manera puntual y no siempre se ha tenido acceso a la surgencia para realizar el aforo.

5 NUEVA DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS

Las observaciones realizadas durante el proyecto han permitido mejorar en gran medida la definición de los acuíferos estudiados, que se presenta a continuación.

El anteriormente denominado acuífero Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos se ha dividido en dos acuíferos denominados Los Nacimientos y Gante-Chotos.

5.1 Acuífero de Gante-Chotos

Comprende los relieves carbonatados de los cerros de Los Chotos, de Los Peones y Cabeza Montosa así como los del anticlinal de La Serreta-Gante. La extensión de estos afloramientos es de 10,63 km².

En general, los materiales acuíferos no presentan una continuidad cartográfica y aparecen individualizados en distintos afloramientos separados por materiales pliocuaternarios. No obstante, trabajos de prospección geofísicas llevados a cabo recientemente en este acuífero han puesto de manifiesto la conexión entre estos afloramientos (IGME y Diputación de Jaén, en elaboración).

Está constituido por calizas oolíticas del Dogger–Malm, con zonas con alto grado de karstificación en superficie. La potencia de los materiales acuíferos es normalmente superior a los 200 metros. En el anticlinal de La Serreta–Gante, los límites impermeables están constituidos por calizas margosas, margocalizas y margas del Lías superior–Dogger y por rocas volcánicas del Dogger–Malm. En Cabeza Montosa son las radiolaritas del Malm y rocas volcánicas infrayacentes las que delimitan los materiales carbonatados.

Separado de estos afloramientos al oeste por efecto de fracturas de salto en dirección, se localiza el relieve de Los Oqueales, al norte de Alamedilla. Está constituido esencialmente por una secuencia de calizas oolíticas y calizas con sílex de edad Dogger- Malm. Ocupa una extensión de aproximadamente 1 km² y posee una potencia media de 170 m. Se encuentra rodeado en sus bordes por materiales pliocenos, bajo los cuales aparecen materiales margosos del Lías superior y cretácicos.

La alimentación procede en su totalidad de la infiltración directa de la lluvia. El drenaje natural principal de este acuífero tiene lugar en dos sentidos de flujo principales: hacia el norte y hacia el sur. En el borde norte se encuentra uno de los principales puntos de drenaje, el manantial del Molino del Barranco (203870009), que drena un caudal de alrededor de 11 l/s, a una cota de 943 m s.n.m.. En el borde sur el punto más significativo es el manantial de Gante (203930021), con un caudal medio de 16 l/s, está situado a una cota de 949 m. Pudiera ser que el resto de los recursos del sistema sean drenados de manera oculta a través de los materiales pliocuaternarios de borde hacia el aluvial del río Guadahortuna. Efectivamente, aguas abajo del manantial de Gante y sobre el aluvial de ese río existe una surgencia denominada Fuente del Cortijo Almenas (203930029), a cota 920 m, con una descarga anual visible próxima a 0,3 hm³/a.

La alimentación en el sector de los Oqueales se produce por infiltración directa del agua de lluvia, y por flujos procedentes de los materiales pliocuaternarios que recubren parte del acuífero. No se conocen surgencias relacionadas directamente con las calizas, sino con los materiales pliocuaternarios que las recubren.

Los datos de evolución piezométrica de que se dispone son los recopilados en este trabajo. Estos se refieren al Piezómetro Cortijo Hidalgo (203930022) que capta los materiales carbonatados del sector acuífero de Gante-Los Chotos. Como se puede observar en la Figura 3.10, la evolución del nivel piezométrico sufrió un descenso continuado entre 2003 y agosto de 2009 lo que contribuyó en gran medida a la propuesta de declaración de sobreexplotación de la MASb. Sin embargo, a partir de esa fecha el nivel piezométrico muestra una importante recuperación hasta alcanzar los 950 m s.n.m. por lo que se podría considerar que en la actualidad existe una situación de equilibrio apoyado también en el hecho de que el manantial del Molino del Barranco (203870009), punto importante de drenaje del norte del sector, surge de manera ininterrumpida en los últimos años. No obstante, esta apreciación debe tomarse con cierta reserva puesto que se dispone de un dato de cota del nivel piezométrico en ese mismo piezómetro a fecha de su construcción (agosto de 1989 y no representado en el gráfico) de 981 m s.n.m., es decir, unos 30 metros por encima de la situación actual.

Este acuífero se incluye actualmente en la MASb de nueva definición¹ 54104 "Gante-Santerga-Chotos" que engloba, además del acuífero aquí definido, los del Miopliocuaternario de Ciruelos-Canalejas, Umbría-Chantre, Santerga y Los Gallardos. En función de los datos de que se dispone se ha realizado un balance global, para toda la MASb.

Este balance determina un volumen de agua de entrada en la MASb de 14,52 hm³/año procedentes de la infiltración de la precipitación en el conjunto de materiales permeables de la MASb. Las salidas correspondientes a extracciones por bombeo suponen 9,13 hm³/año y por manantiales 5,19 hm³/año. Las salidas subterráneas ocultas hacia la MASb 54105 Pliocuaternario de Guadahortuna, situada al sur, deben suponer unos 0,20 hm³/año. En la tabla adjunta se presenta este balance de manera esquemática.

Entradas	Volumen (hm ³)
Infiltración de agua de lluvia	14,52
TOTAL ENTRADAS	14,52
Salidas	Volumen (hm ³)
Bombeos ⁽¹⁾	9,13
Manantiales del acuífero de Gante-Los Chotos ⁽²⁾	1,15
Manantiales no contabilizados en los demás acuíferos ⁽²⁾	4,04
Salidas subterráneas al Pliocuaternario de Guadahortuna ⁽³⁾	0,20
TOTAL SALIDAS	14,52

Tabla 2: Balance hídrico de la MASb Gante-Santerga-Chotos

(1): Dato facilitado por D.H.G. (Proyecto ALBERCA)

(2): Según este estudio.

(3): Según la actualización de la Norma de explotación de la MASb 05.41 de 2001 (IGME-CHG).

5.2 Acuífero de Los Nacimientos-Sazadilla

En este acuífero, constituido por los niveles calcareníticos terciarios y materiales carbonatados mesozoicos, se pueden diferenciar dos sectores denominados Los Nacimientos y Sazadilla.

– Sector acuífero de Los Nacimientos: Litológicamente está integrado por materiales Aquitanienses–Burdigalienses, representados por calcarenitas, calizas lacustres y niveles conglomeráticos, con una superficie de afloramiento de 7,84 km², en cuya base se sitúan las margas blanquecinas rojizas que actúan de impermeabilizante de los niveles carbonatados superiores, produciéndose los drenajes a favor de este contacto.

La intensa fracturación de estos materiales origina descargas de pequeños caudales en los contactos permeable–impermeable. En el límite suroccidental, en la zona conocida como Los Nacimientos, se localizan dos manantiales (203920017 y 203920018), que drenan un caudal conjunto de unos 20 l/s, a una cota de 1.000 m s.n.m.. La intensa compartimentación estructural de este sector da lugar a pequeñas surgencias en el contacto

¹ Según el actual Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.

permeable–impermeable a cotas más elevadas, 1180 m s.n.m., como es el caso de los manantiales de los Laeros de Jesús y Las Cañadas (203870025 y 2038070026) o del Cortijo del Solana (203920025) a 1.095 m s.n.m..

- Sector acuífero de Sazadilla: Está constituido por materiales carbonatados mesozoicos. Desde el punto de vista litológico, está integrado por dolomías y carniolas del Trías superior-Lías inferior, a las que se le superponen calizas oolíticas con sílex del resto del Jurásico. Sus afloramientos se encuentran fosilizados por materiales cretácicos y terciarios y presenta una extensión de unos 3,15 km² para los carbonatos mesozoicos y de 1,64 km² para los materiales terciarios. Cabe suponer que exista continuidad de los carbonatos mesozoicos hacia el suroeste bajo los materiales terciarios y cuaternarios.

La alimentación se produce por infiltración directa del agua de lluvia, mientras que el drenaje visible se realiza a través de una serie de manantiales que a su vez hacen posible la diferenciación de dos subsectores. El primero de ellos, definido por los afloramientos mesozoicos de El Jaral, es el drenado por los manantiales del Cortijo de Béjar (203870023) a una cota de 1067 m s.n.m.) y del Cortijo de Metelos y Cújar (203870022, a 1108 m s.n.m.). El otro subsector, localizado al oeste del primero y definido por los afloramientos de Cañada Hermosa y Ayozo, se drena por los manantiales de Fuente Cañá Hermosa (203930027, a 1.170 m s.n.m.) y Cortijo Ayozo (203930016, a 1.215 m s.n.m.), entre otros.

Este balance hídrico determina un volumen de agua de entrada de 2,66 hm³/año procedentes de la infiltración de la precipitación en el conjunto de materiales permeables. Las salidas correspondientes a extracciones por bombeo suponen 1,36 hm³/año y por manantiales 1,30 hm³/año. En la tabla 3 se presenta este balance de manera esquemática.

Entradas	Volumen (hm ³)
Infiltración de agua de lluvia	2,66
TOTAL ENTRADAS	2,66
Salidas	Volumen (hm ³)
Bombeos ⁽¹⁾	1,36
Manantiales del sector de Los Nacimientos ⁽²⁾	0,73
Manantiales del sector de Sazadilla ⁽²⁾	0,57
TOTAL SALIDAS	2,66

Tabla 3: Balance hídrico del acuífero Los Nacimientos-Sazadilla.

(1): Dato facilitado por D.H.G. (Proyecto ALBERCA)

(2): Según este estudio.

En cuanto a las explotaciones por sectores, la explotación en el de Los Nacimientos está en torno a los 0,68 hm³/año para unas entradas por infiltración de la precipitación calculadas de 0,96 hm³/año y en un valor próximo a 0,41 hm³/año con unas entradas de 0,80 hm³/año en el de Sazadilla.

5.3 Acuífero de Cabra de Santo Cristo

Está constituido por dolomías de edad Triásico-Lías inferior y medio que afloran en las sierras del Buitre y de los Cangilones, muy próximas a la localidad de Cabra de Santo Cristo.

El conjunto se encuentra colgado sobre materiales impermeables de edad triásica pertenecientes a la Unidad Olistostrómica, si bien algunos sectores de su borde oriental y septentrional se encuentran fracturados, lo que puede facilitar un cierto grado de enraizamiento.

Al norte del Cortijo de los Barrancos, la base impermeable describe una especie de collado, a una cota superior a los 1200 metros, y desciende tanto al este como al oeste, constituyendo una divisoria hidrogeológica dividiendo los materiales permeables en dos sectores independientes, uno oriental, denominado Cerro de los Buitres y otro occidental denominado La Silleta. Las superficies respectivas son 8,45 y 4,31 km².

El sector del Cerro del Buitre presenta una base impermeable entre las cotas 1000 y 1200 m.s.n.m, a excepción del sector más próximo a Cabra de Santo Cristo, donde baja hasta los 900 m. El sector de La Silleta presenta gran parte de su base casi horizontal, a una cota de 1000 m.

La alimentación de ambos sectores se realiza exclusivamente a partir de la infiltración directa de las precipitaciones. En el sector del cerro del Buitre, las salidas tienen lugar fundamentalmente a través del manantial del Nacimiento de Cabra del Santo Cristo (203870002), que drena un caudal medio de unos 20 l/s, a una cota de 991 metros. En el sector de La Silleta no se conocen descargas puntuales de entidad, lo que puede indicar una descarga muy rápida hacia los arroyos que tienen su cabecera en estos carbonatos.

Los datos de evolución piezométrica y la surgencia del manantial del Nacimiento de Cabra del Santo Cristo (203870002) indican que al menos el sector Cerro del Buitre se encuentra en una situación de equilibrio. Esto queda corroborado con la surgencia continua del manantial anteriormente referido, al menos desde el año 2012 (ver figura 4.17.B). El otro sector, el de La Silleta, muy probablemente se encuentre en una situación similar si bien no es constatable al no existir puntos de control en el mismos.

El contenido en nitratos del agua del sector del Cerro del Buitre no supera los 16 mg/l, según la información disponible correspondiente al punto 05.41.01 de la Red Nacional, por lo que se puede considerar que, al respecto de este ión, el acuífero está en buen estado cualitativo.

Este balance hídrico de toda la MASb, denominada en el Plan Hidrológico de la Demarcación como 54102 "Cabra del Santo Cristo" y que engloba también al acuífero vecino de Loma Portero, determina un volumen de agua de entrada de 3,27 hm³/año procedentes de la infiltración de la precipitación en el conjunto de materiales permeables. Las salidas contabilizadas suponen 1,36 hm³/año de los que 0,56 hm³/año corresponden a extracciones por bombeo y 0,80 hm³/año a salidas

por manantiales. El resto de las salidas se atribuyen a salidas difusas a los cauces y, en menor medida, a manantiales de escaso caudal. En la tabla 4 se presenta este balance de manera esquemática.

Entradas	Volumen (hm ³)
Infiltración de agua de lluvia	3,27
TOTAL ENTRADAS	3,27
Salidas	Volumen (hm ³)
Bombeos ⁽¹⁾	0,56
Manantiales ⁽²⁾	0,80
Salidas a cauces y/o no contabilizadas por manantiales ⁽²⁾	1,91
TOTAL SALIDAS	3,27

Tabla 4: Balance hídrico de la MASb 54102 "Cabra del Santo Cristo".

(1): Dato facilitado por D.H.G. (Proyecto ALBERCA)

(2): Según este estudio

6 RECOMENDACIONES

Los acuíferos aquí descritos, Gante-Chotos, Los Nacimientos-Sazadilla y Cabra del Santo Cristo, son de gran importancia para el abastecimiento de las localidades próximas.

En el acuífero de Gante-Chotos, se recomienda continuar con el control de la evolución piezométrica en el Piezómetro Cortijo Hidalgo y del caudal del manantial del Molino del Barranco así como ampliar esta red de control en algún otro punto de observación piezométrica por determinar y al manantial del Cortijo de Gante.

En este acuífero, se deberá tener en cuenta para su gestión la nueva definición a que han dado lugar las investigaciones realizadas. Asimismo, las incógnitas respecto a la geometría en profundidad en sus sectores central y occidental siguen siendo relevantes por lo que sería recomendable la continuidad de la investigación geofísica y geológica. a la vez que hidrogeológica, encaminadas a cuantificar las reservas y recursos de este acuífero de nueva definición.

Por otra parte, la explotación del actual abastecimiento a Cabra del Santo Cristo desde el sondeo del Cerro de los Peones no debería aumentarse ya que, como se puede apreciar en los gráficos de evolución piezométrica de las figuras 3.10 y 4.22, si bien en los periodos de riego los descensos son significativos y las posteriores precipitaciones recargan el acuífero hasta alcanzarse los niveles previos a la explotación, la situación podría agravarse en el caso de un aumento de la extracción unido a un periodo de bajas precipitaciones, habituales en la esta zona climática.

En el acuífero de Los Nacimientos-Sazadilla, no se han observado importantes descensos en los caudales de los manantiales no atribuibles a factores distintos a la ausencia de precipitaciones. No obstante, la sectorización dentro del propio acuífero hace que se deban extremar los controles sobre nuevas captaciones.

El acuífero de Cabra del Santo Cristo presenta, según las observaciones realizadas en el presente proyecto, un buen estado cuantitativo ya que el manantial del Nacimiento de Cabra del Santo Cristo surge con normalidad. En este caso, las

recomendaciones deben ir en el sentido de mantener el grado de explotación a los niveles actuales ya que un aumento de las extracciones por bombeo aparejaría una disminución de los caudales drenados, de gran importancia para el abastecimiento de esa localidad.

7 REFERENCIAS

IGME, 1983: Proyecto de investigación hidrogeológica infraestructural de los sistemas acuíferos 30 y 31.

IGME-Diputación Provincial de Jaén, 2012: "Atlas Hidrogeológico de la provincia de Jaén"

ITGE, 1990: Plan de investigación de las unidades hidrogeológicas localizadas entre los ríos Guadalbullón y Jandullilla.

ITGE, 1990. Informe final de la perforación y aforo realizados para abastecimiento en el término municipal de Cabra del Santo Cristo (Jaén). 20 páginas.

ITGE, 1991. Informe hidrogeológico para la mejora del abastecimiento de Solera (Jaén). 13 páginas.

Molina, J.M, Vera, J.A., 1996. La Formación Milanos en el Subbético Medio (Jurásico superior): definición y descripción. Geogaceta, 20 (1), 39-42.

Pedley, R.C., Busby, J.P. y Dabeck, Z.K. (1993). British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R, 75p

Pérez-López, A., 1991. El Triás de facies germánica del sector central de la Cordillera Bética. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada, 400 pp.

Pérez-López, A., 1996. Sequence model of coastal-plain depositional systems of the Upper Triassic (Betic Cordillera, southern Spain). Sedimentary geology, 101, 99-117.

Roldán, F. J., J. Rodríguez-Fernández, and J. M. Azañón (2012), The Olistostromic Unit, a key formation to understand the Neogene history of the Betic Cordillera, external zones, Geogaceta 52, 9-12.

Ruiz Reig, P.; Alvaro López, M.; Hernández Samaniego, A.; del Olmo Zamora, P., 1988a. Mapa Geológico Nacional. Escala 1 : 50.000. Hoja 948 (Torres). IGME.

Ruiz Reig, P.; Díaz de Neira Sánchez, J.A.; Enrile Albir, A.; López Olmedo, F., 1988b. Mapa Geológico Nacional. Escala 1 : 50.000. Hoja 970 (Huelma). IGME.

Sanz de Galdeano, C.; Alfaro, P., 2004. Tectonic significance of the present relief of the Betic Cordillera. Geomorphology, Vol. 63, Issues 3-4, pages 175-190.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University press, 770 pp.

Vera, J.A., 2004a. Zonas externas Béticas. En: Vera, J.A. (Ed.), Geología de España. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, 354-389.

Vera, J.A. ed. 2004b. Proyecto Andalucía. Vol. XXV.

ANEXO: CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS
ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SED-T)



GAMA GEOFÍSICA
C/ Castillo de Fuensaldaña 2, P-3, 1ºK
28232 Las Rozas de Madrid
Madrid (España)
www.gama-geofisica.com

CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA
MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS
EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT) EN DOS
SIERRAS DE LA PROVINCIA DE JAÉN

Cliente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Fecha: Diciembre 2013



ÍNDICE

1. Introducción y objetivos	1
2. Metodología y equipo técnico	4
3. Resultados	14
4. Planos de resultados	16
Anexo 1: Instrumentación	62
Anexo 2: Reportaje fotográfico	65



1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.



1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

La presente campaña geofísica fue realizada durante el mes de Diciembre de 2013 por GAMA GEOFISICA, S.L., a petición del INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME), para la mejora del conocimiento geológico de dos sierras de la provincia de Jaén situadas en Cabra del Santo Cristo – Solera y Alcaudete (sierra del Ahillo).

Con este estudio se pretende alcanzar profundidades de varios centenares de metros por lo que se consideró que el método geofísico más adecuado eran los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT), técnica que aporta información sobre resistividades eléctricas y que, con un espacio relativamente pequeño en comparación con otras técnicas de información 1D como los sondeos eléctricos verticales SEVs, permiten alcanzar grandes profundidades de investigación. Por el tipo de geología presente en ambas sierras se espera que los contrastes de resistividad eléctrica entre las distintas litologías sea importante.

Por lo tanto con este estudio geofísico se pretendían conseguir como objetivo fundamental:

- Mejora en el conocimiento geológico de dos sierras de la provincia de Jaén basado en el contraste de resistividades eléctricas hasta profundidades de investigación de varios centenares de metros.

La información geológica presente en este estudio ha sido aportada por el cliente.



2.- METODOLOGÍA Y EQUIPO TÉCNICO.

2.- METODOLOGÍA Y EQUIPO TÉCNICO.

En el desarrollo de la campaña de prospección geofísica, objeto de este informe, han participado:

- D. Carlos Gata Maya, licenciado en CC. Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (especialidad de geofísica). Dirección, interpretación y elaboración de informe.
- D. Francisco Cabezas de la Faya, licenciado en CC. Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (especialidad de geofísica). Geofísico de campo.

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT)

El sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (SEDT) es un método geofísico de campo artificial perteneciente al grupo de los métodos electromagnéticos en el dominio del tiempo. En un bucle (espira cuadrada de dimensiones variables dependiendo del objetivo final, profundidad de estudio, ruido ambiental y topografía) se inyecta mediante un transmisor (figura 1) una corriente alterna que genera un campo magnético primario en el medio.



Figura 1.- Transmisor ZT-30 de Zonge Engineering and Research Organization.

En ausencia de campo primario, es decir, en momentos en que no se inyecta corriente por el bucle, el receptor junto con la antena de campo magnético (figura 2) miden la evolución

temporal del campo magnético secundario (campo magnético generado en el medio por el primario y que decae rápidamente en ausencia de éste). En este sentido es fundamental la correcta sincronización entre transmisor y receptor de forma que éste último comience los periodos de lectura en intervalos temporales sin inyección de corriente por parte del transmisor.



Figura 2.- Receptor GDP-32^{II} y antena TEM-3 de Zonge Engineering and Research Organization.

Del análisis de la curva de caída de este campo magnético secundario se obtiene, mediante modelos de inversión de suavizado, las variaciones de resistividad eléctrica con la profundidad (figura 3). Para la obtención de estos modelos de suavizado se variarán parámetros como el peso del modelo inicial o el peso de suavizado del modelo de forma que se obtengan resultados óptimos en la inversión.

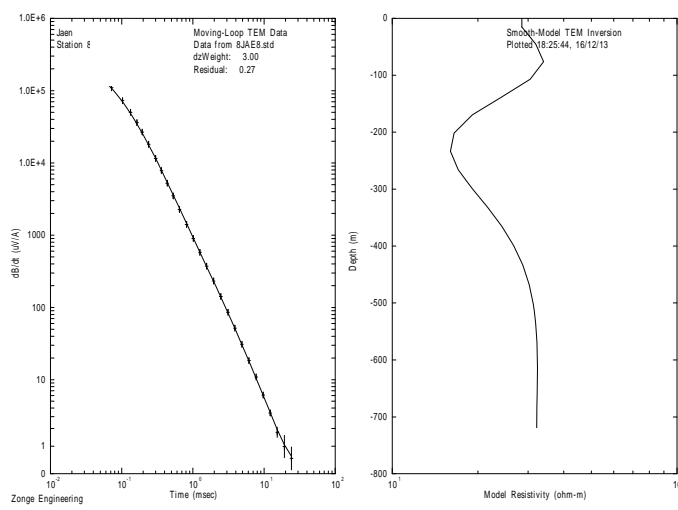


Figura 3.- Curva de caída y modelo de inversión de suavizado obtenido.



Para el estudio geofísico objeto de este informe se realizaron un total de 14 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo, 13 de ellos con bucles de 200m*200m y el SEDT restante mediante bucle de 100m*100m debido a lo escarpado de la topografía en esa zona. La posición de los SEDTs se tomaron en campo con GPS de mano marca Garmin etrex (ver coordenadas UTM ED50 junto con la zona y el tamaño del bucle en la tabla 1).

	X UTM	Y UTM	Zona de trabajo	Tamaño (m)
SEDT-1	474588	4168769	Cabra del Santo Cristo - Solera	200*200
SEDT-2	473653	4167977	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-3	473632	4167472	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-4	474444	4166888	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-5	473294	4166325	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-6	473492	4165168	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-7	472828	4164505	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-8	471650	4163882	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-9	470220	4162258	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-10	468153	4168894	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-11	466328	4168448	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
SEDT-12	466437	4167244	Cabra del Santo Cristo – Solera	200*200
AHILLO-1	407692	4161705	Alcaudete – Sierra del Ahillo	200*200
AHILLO-2	408048	4160644	Alcaudete – Sierra del Ahillo	100*100

Tabla 1.- Coordenadas y tamaño de bucle para los 14 SEDTs.

Para la realización del estudio electromagnético se empleó un equipo geofísico de ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION Inc. (para más detalle ver anexo 1).

La realización del trabajo de campo siguió estos pasos:

- Sincronización de transmisor y receptor.- Previamente a la toma de datos se calibra el receptor con el dispositivo XMT-32 que permitirá que transmisor y receptor estén sincronizados durante la adquisición.
- Ubicación del bucle.- Se elegirán preferiblemente zonas con escaso o nulo ruido electromagnético y con topografía suave.
- Colocación de dispositivo.- Se montará el bucle y se colocarán los instrumentos en su posición para el inicio de la adquisición.



- Toma de datos.- De acuerdo con el tamaño del bucle, tipo de transmisor, número de vueltas,..., se optimiza la intensidad de corriente de emisión. Se realizan lecturas para varias frecuencias (habitualmente se utilizan 4, 8, 16 y/o 32 Hz).
- El operador verá insitu la calidad de los datos obtenidos así como la estimación de profundidades alcanzadas de forma que decida posibles variaciones en la posición o configuración del SEDT (tamaño de bucle, número de vueltas, frecuencias,...).

El trabajo de campo no presentó problemas reseñables en la zona de Cabra del Santo – Solera. Se pudieron elegir zonas de muy bajo ruido electromagnético y topografía suave que proporcionaron SEDTs de alta calidad y excelente penetración para los tamaños de bucles empleados (200m*200m). Los dos bucles realizados en Alcaudete (sierra del Ahillo), especialmente el AHILLO-2 que además solo pudo realizarse con tamaño 100m*100m debido a la fuerte topografía, estuvieron afectados de más ruido electromagnético por lo que las curvas de caída son sensiblemente más “sucias”.

Una vez realizada la toma de datos en campo se vuelcan los mismos al ordenador mediante la conexión Ehternet de forma que puede iniciarse el procesado e inversión de los mismos. Dentro de esta etapa podemos destacar los siguientes pasos:

- Formato de datos.- Mediante programas diseñados por Zonge se modifica el formato de los datos brutos (datos de campo) de forma que se pueda trabajar con el programa de inversión STEMINV.
- Filtrado de datos.- Se deberán eliminar los datos con ruido electromagnético que se considere importante. Estos datos ruidosos pueden influir de manera notable en el proceso de inversión dando como resultado modelos falsos o con mal ajuste.
- Asignación de peso de modelo inicial y peso de suavizado.- El interpretador asignará valores de peso tanto para el modelo inicial como al suavizado. El peso de suavizado deberá permitir obtener modelos con buenos ajustes y condicionarán los valores de resistividad obtenidos para el modelo final.



-
- Finalmente se obtienen las gráficas dB/dt – Tiempo y Resistividad – Profundidad que permitirán observar gráficamente el modelo final obtenido y el ajuste con los datos de campo.

Para la zona de Cabra de Santo Cristo – Solera se han obtenido, en general, modelos con muy buenos ajustes y coherentes para las tres frecuencias gracias, entre otras cosas, a los excelentes datos de campo obtenidos. En la sierra del Ahillo los dos SEDTs realizados tuvieron bastante más ruido, especialmente el AHILLO-2, lo que dio como resultado modelos con pobres ajustes.



3.- RESULTADOS.



3.- RESULTADOS.

Los resultados obtenidos para este estudio geofísico se muestran en los planos 1 a 45. En ellos podemos ver los datos de campo reales (curvas de caída) representados por símbolos + en el gráfico dB/dt - Tiempo, junto con la curva teórica obtenida para el modelo final (curva en negro en el gráfico dB/dt - Tiempo) y el modelo final de suavizado obtenido para el SEDT (gráfica Profundidad - Resistividad eléctrica).

En los planos de resultados se muestran los modelos obtenidos para las tres frecuencias medidas en campo (4, 8 y 16 Hz) para que el cliente tenga toda la información disponible. Lógicamente unas frecuencias estuvieron aquejadas de mayor error que otras o sus modelos fueron más inexactos por lo que para la descripción de resultados que seguirá a continuación se ha tomado como base el modelo/s de la frecuencia/s consideradas como más fiables.

Se debe de tener en cuenta que los modelos geofísicos obtenidos para los SEDT son modelos de suavizado que marcan cambios de tendencia en la resistividad eléctrica por lo que no definen profundidades “exactas” para los contactos. Por otro lado las resistividades eléctricas que definen los modelos no coincidirán con las reales quedando éstas suavizadas por el proceso de modelado. Por este motivo lo realmente significativo serán los cambios de tendencia en la gráfica Profundidad - Resistividad hacia un aumento o disminución de la resistividad eléctrica de los materiales. Por lo tanto, los valores de profundidades y espesores como los de resistividades eléctricas definidos en la siguiente descripción de resultados son aproximados.

Las posibles atribuciones geológicas asignadas en la descripción de resultados han sido inferidas de acuerdo con la información geológica aportada por el cliente en cada una de las localizaciones. Quedan, por tanto, supeditadas a su futura revisión por parte del cliente.

Seguidamente haremos una descripción de los resultados obtenidos para los 14 SEDTs realizados junto con su posible atribución geológica.



Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-1

Coordenadas: 474588, 4168769.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Se presentan resultados para frecuencia de 16 Hz (menor ruido y mayor ajuste).

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	35	25		Cuaternario
2	42	125	25	
3	75	200	150	Jurásico?
4	40	200 o más	350	Triásico?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-2

Coordenadas: 473653, 4167977.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Se presentan resultados para frecuencia de 8 y 16 Hz.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	130	50		Neógeno – Cuaternario
2	550	240	50	Calizas y dolomías
3	18	310	290	Triásico
4	Más de 80	150 o más	550-600	¿?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-3

Coordenadas: 473632, 4167472.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos muy similares para las tres frecuencias con un excelente ajuste.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	35	100-120		Neógeno - Cuaternario
2	10	150-170	100-120	Lavas jurásicas
3	25	500 o más	260-300	Calizas y dolomías



Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-4

Coordenadas: 474444, 4166888.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos similares de muy buen ajuste.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	40-45	50		Neógeno – Cuaternario
2	7	150	50	Cretácico
3	28-32	350	200	Jurásico?
4	17-20	200 o más	550	Triásico?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-5

Coordenadas: 473294, 4166325.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos muy similares para las tres frecuencias con un excelente ajuste.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	28	30		Neógeno - Cuaternario
2	33	100	30	Calizas
3	17	190	130	Lavas jurásicas
4	33	360 o más	320	Calizas o triásico

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-6

Coordenadas: 473492, 4165168.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Mejores ajustes para 8 y 16 Hz. Se presentan resultados para 16 Hz por su curva de caída más limpia.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	210	90		Calizas
2	38	285	90	Volcánico
3	110	450 o más	375	Triásico?



Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-7

Coordenadas: 472828, 4164505.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos similares de ajuste parecido.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	15	50		Neógeno – Cuaternario
2	10	75	50	Volcánico o cuaternario
3	350	Más de 375	125	Calizas y dolomías
4	Desconocida	Desconocido	Más de 500	Triásico?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-8

Coordenadas: 471650, 4163882.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Buenos ajustes para las tres frecuencias. Se opta por mostrar resultados de 8 Hz.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	20	50		Neógeno – Cuaternario
2	15	140	50	Margas cretácicas
3	65	310	190	Calizas y dolomías
4	30	280 o más	500	Triásico

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-9

Coordenadas: 470220, 4162258.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos de 5 capas similares para las tres frecuencias. Muy buen ajuste de los modelos.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	30	30		Cretácico
2	38	60-80	30	Jurásico
3	27	190-210	90-110	Triásico
4	50-90	270-350	280-300	¿?
5	38-75	150 o más	550-630	¿?



Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-10

Coordenadas: 468153, 4168894.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Se presentan dos modelos para la frecuencia de 8Hz. Para la descripción se han tomado 8Hz int1 y 16 Hz que marcan cambios más abruptos (peso de suavizado de 3) y mejor ajuste.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	150-170	40		Calcarenitas miocenas
2	240-300	160	40	Calcarenitas miocenas
3	60	250	200	Triásico o margas miocenas
4	150	350 o más	450	Jurásico o triásico poco conductor?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-11

Coordenadas: 466328, 4168448.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos muy similares con las tres frecuencias lo que da gran fiabilidad a los resultados.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	40	40		Calcarenitas miocenas
2	80	120	40	Calcarenitas miocenas
3	6	230	160	Triásico o margas miocenas
4	30	410 o más	390	Jurásico o triásico poco conductor?

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo SEDT-12

Coordenadas: 466437, 4167244.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Modelos de 5 capas similares para las tres frecuencias.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	35	80		Calcarenitas y margas miocenas
2	12	100	80	Calcarenitas y margas miocenas
3	17	110	180	Calcarenitas y margas miocenas
4	6-12	210	290	Triásico o margas miocenas
5	15-20	300 o más	500	Jurásico o triásico poco conductor?



Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo AHILLO-1

Coordenadas: 407692, 4161705.

Tamaño del bucle: 200m*200m.

Bucle con ruido principalmente en 4 Hz. Esto provoca modelos con ajustes regulares que no impiden obtener resultados similares para 8 y 16 Hz.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	35-40	100-130		
2	800-1100	Más de 400m	100-130	
3	Conductor	Desconocido	Más de 500-600m	

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo AHILLO-2

Coordenadas: 408048, 4160644.

Tamaño del bucle: 100m*100m.

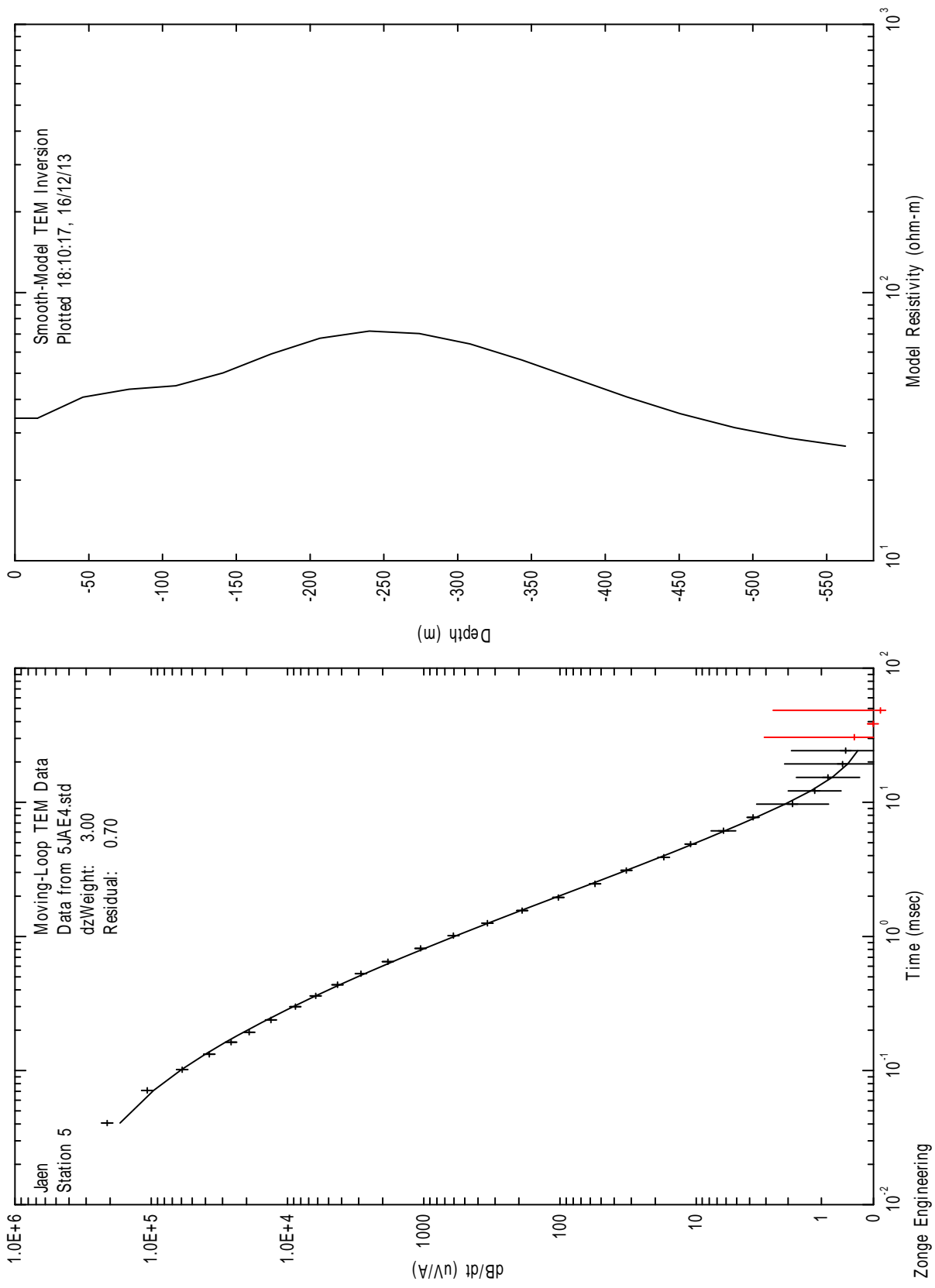
Bucle con mucho ruido para las tres frecuencias. Realizado en zona con topografía muy irregular lo cual introduce más error. Modelos con bastante mal ajuste y, por lo tanto, muy dudosos sobre todo en profundidad.

Capa	ρ (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Posible atribución
1	70-180	50		
2	2500-4000	380	50	
3	Desconocida	Desconocido	400 o más	

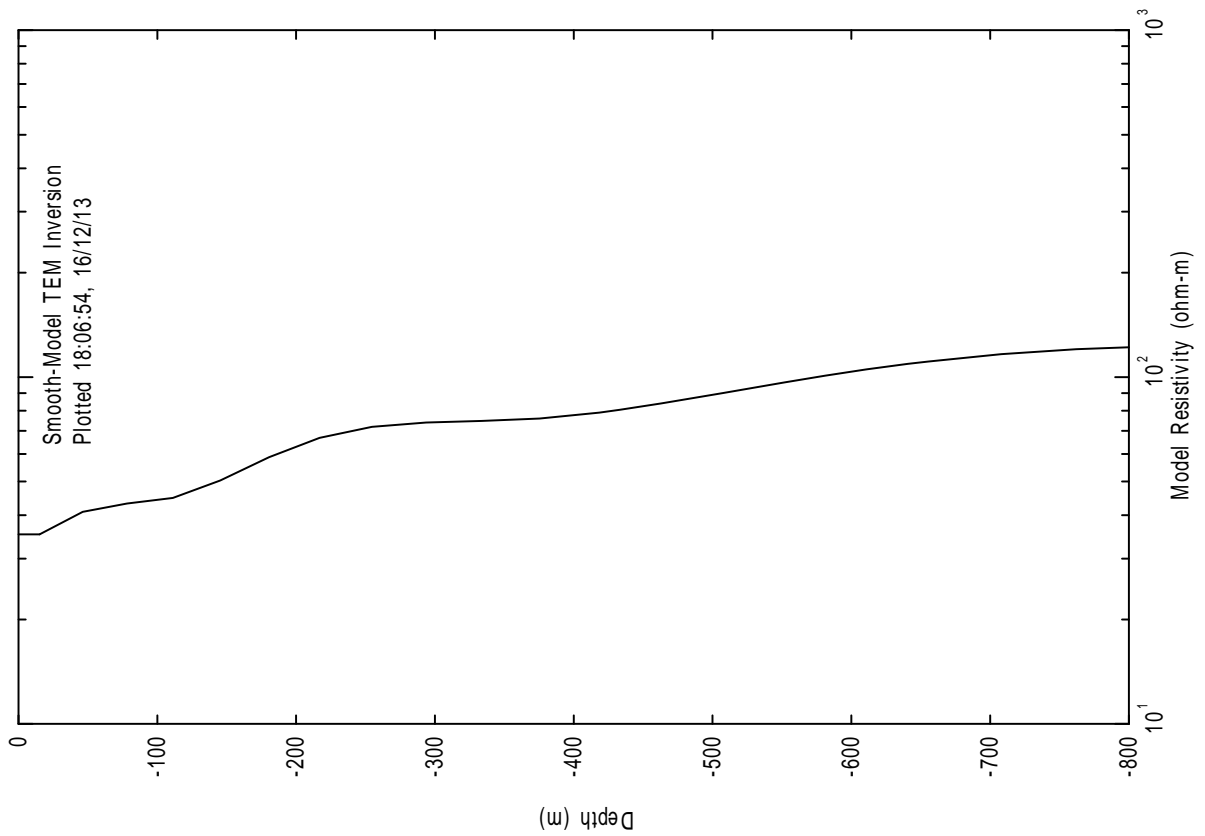
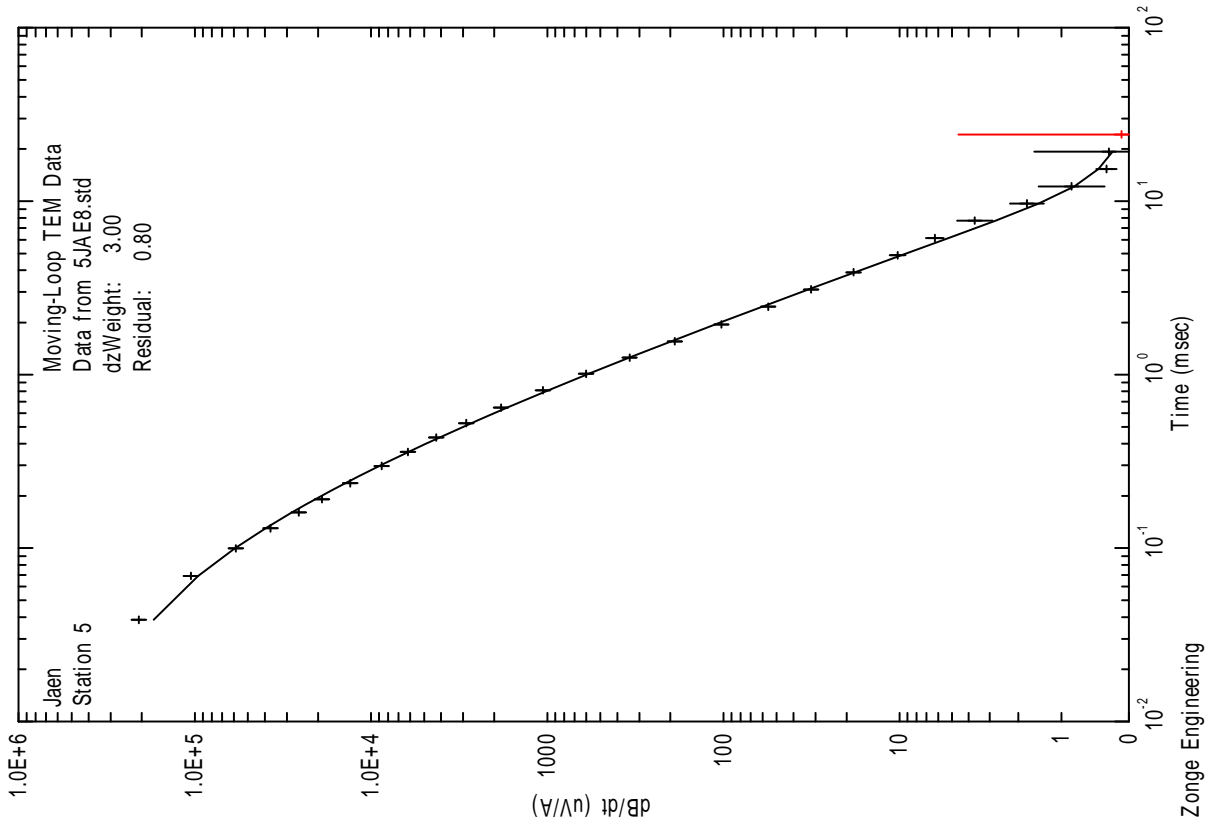


4.- PLANOS DE RESULTADOS.

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-1 (4Hz)



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-1 (8Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**

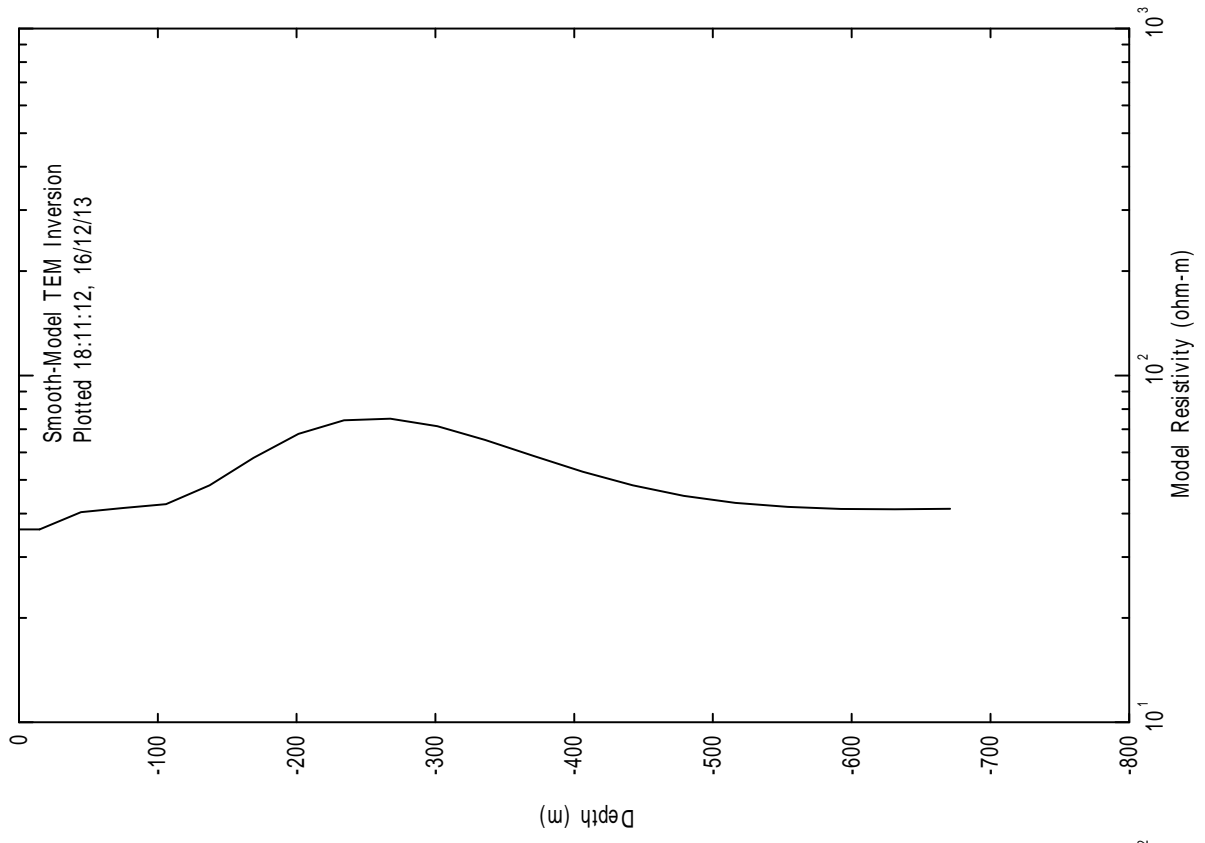
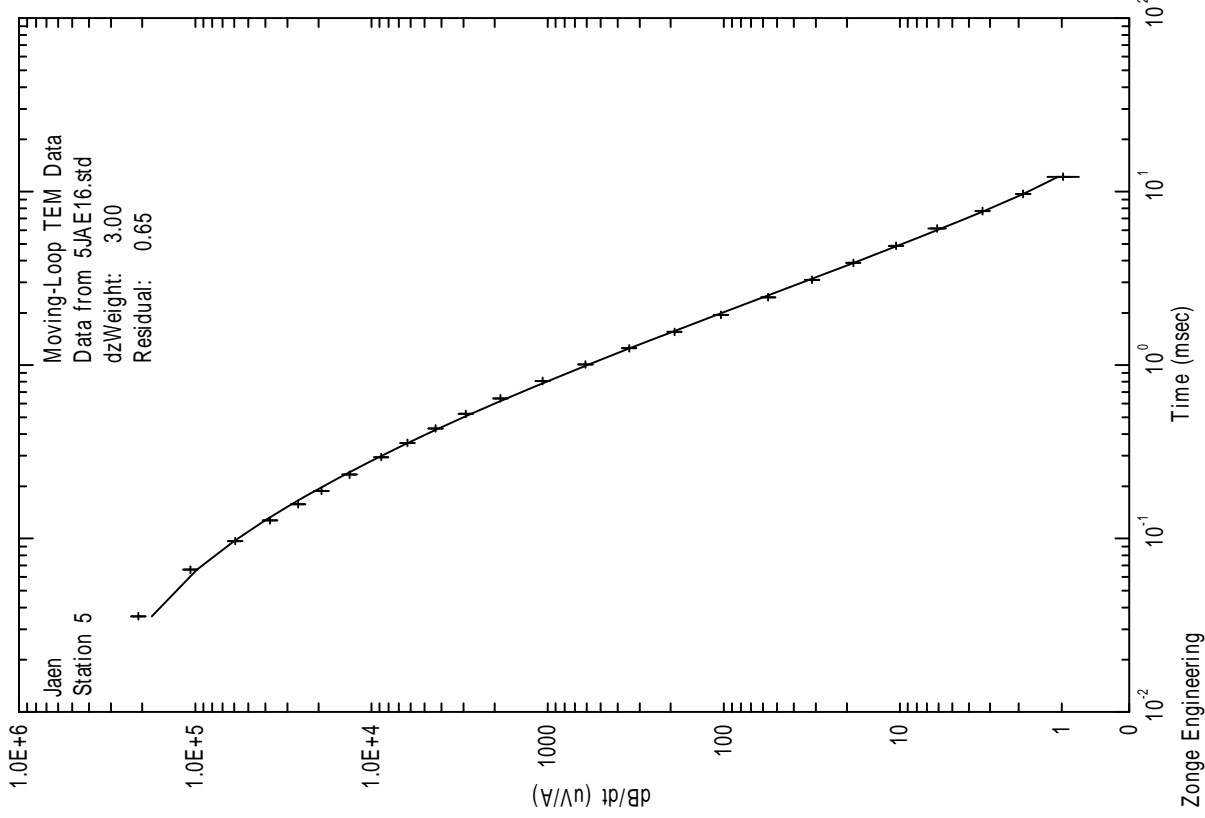


AUTOR:

FECHA: **DICIEMBRE 2013**

PLANO: **2**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-1 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



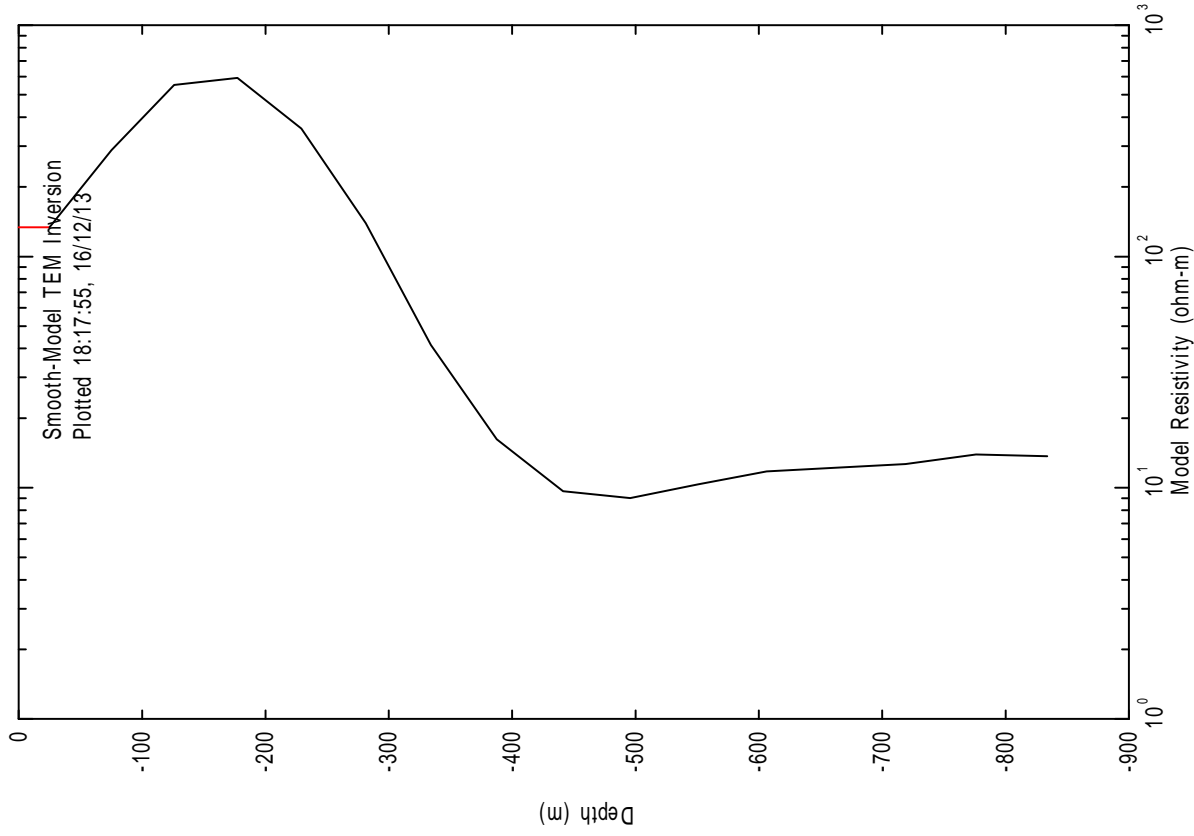
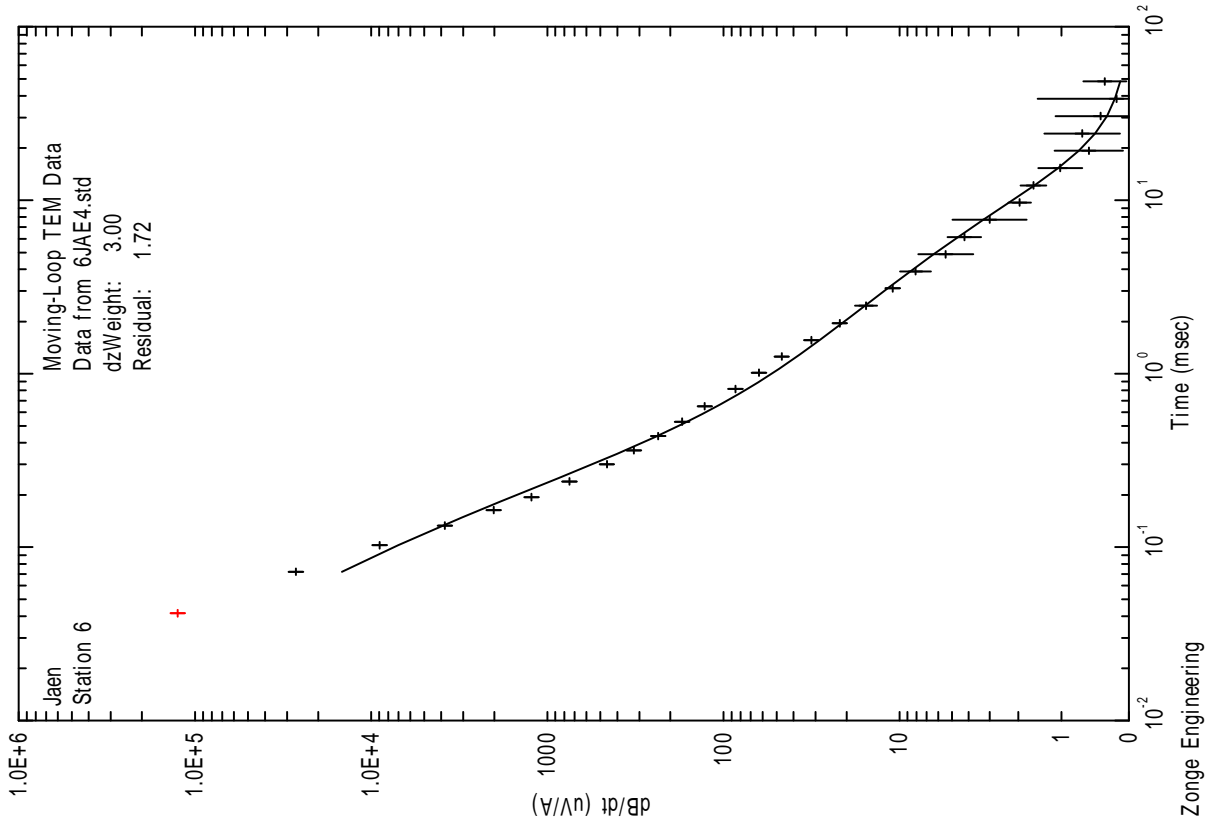
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

3

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-2 (4Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



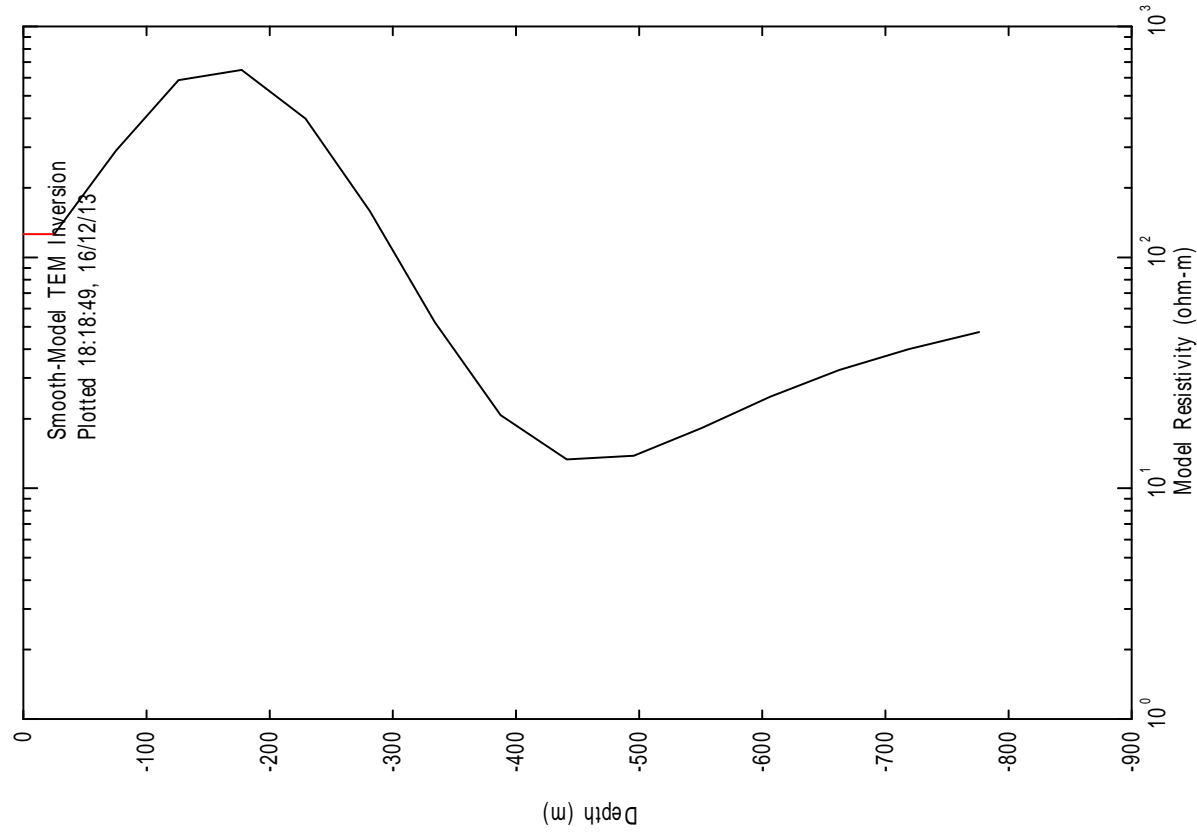
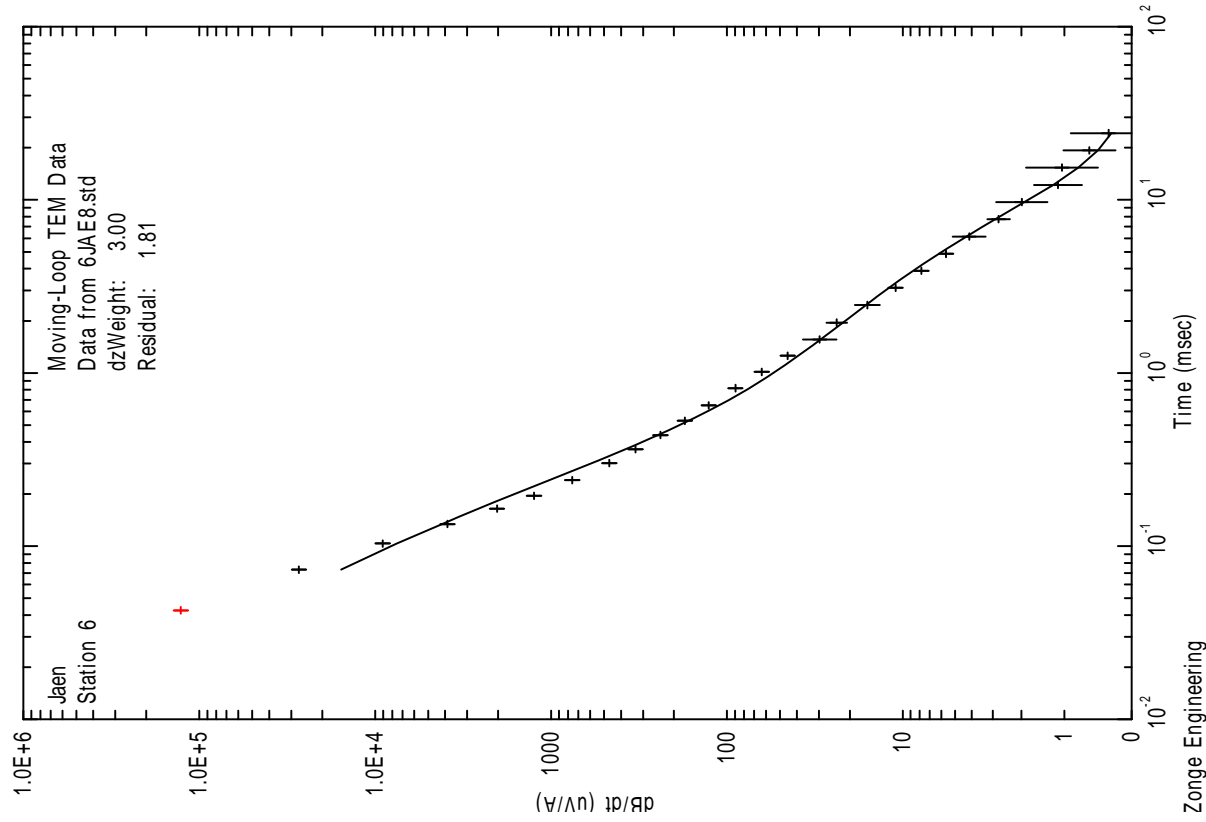
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

4

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-2 (8Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**



AUTOR:

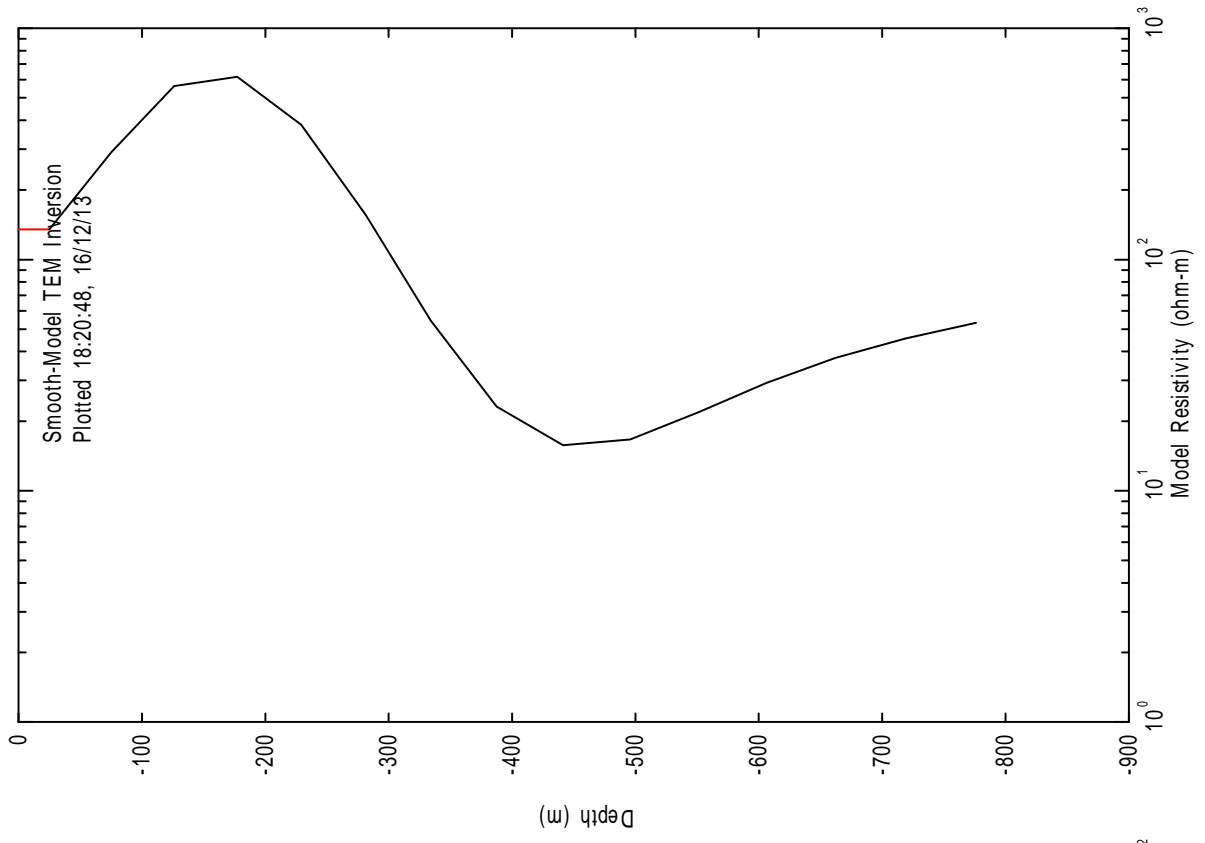
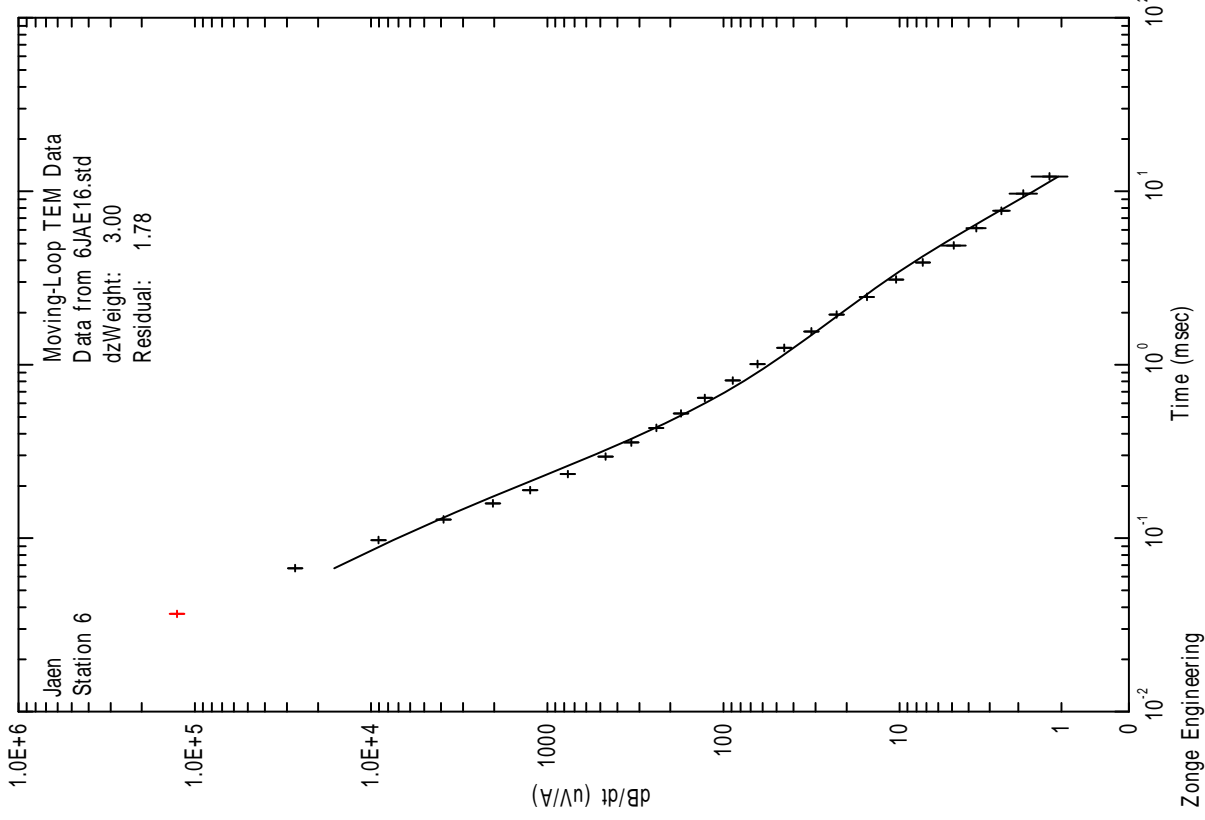
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

5

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-2 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

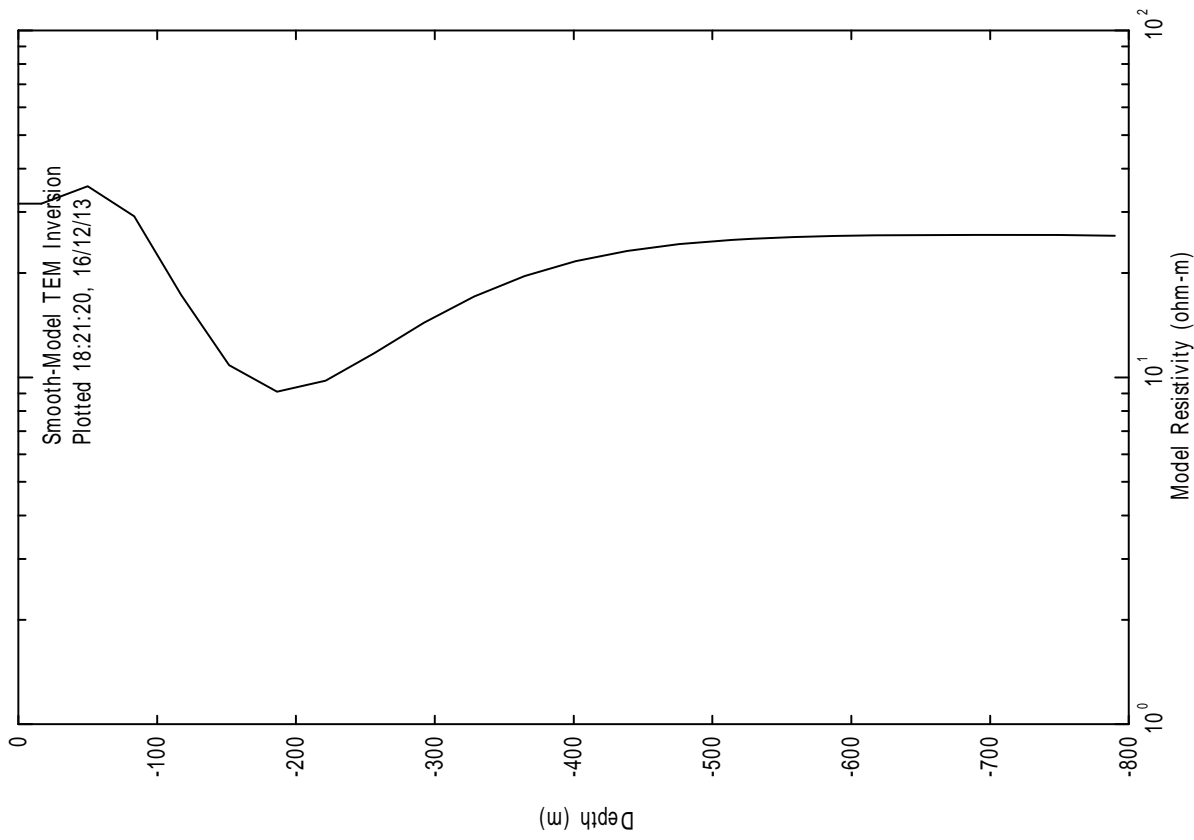
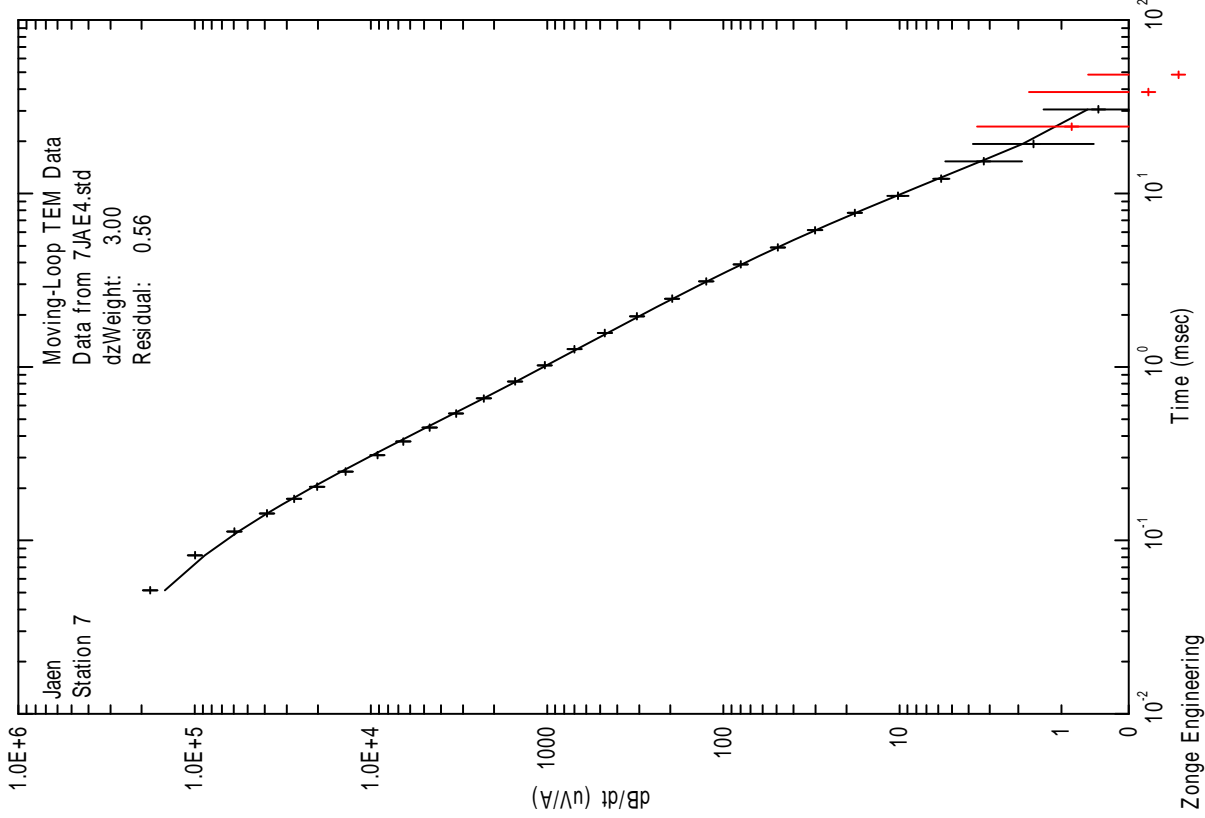
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

6

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-3 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

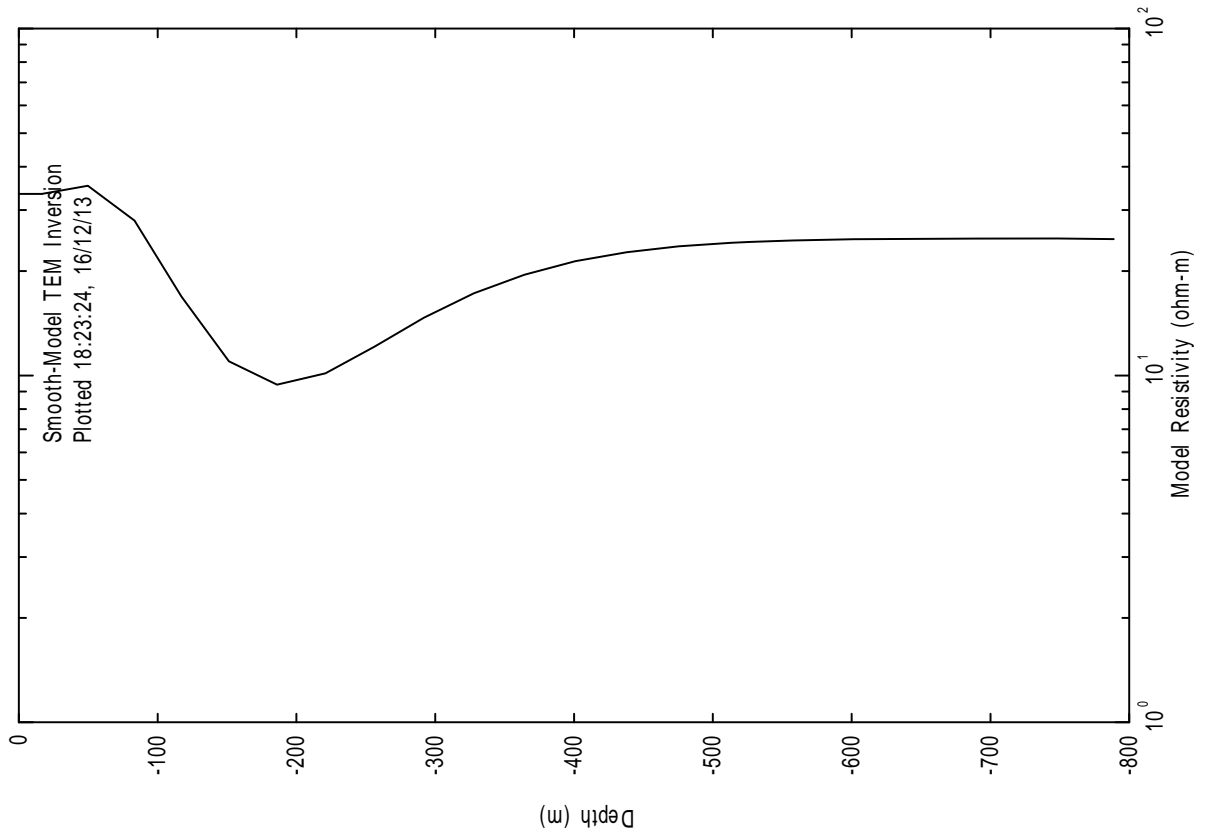
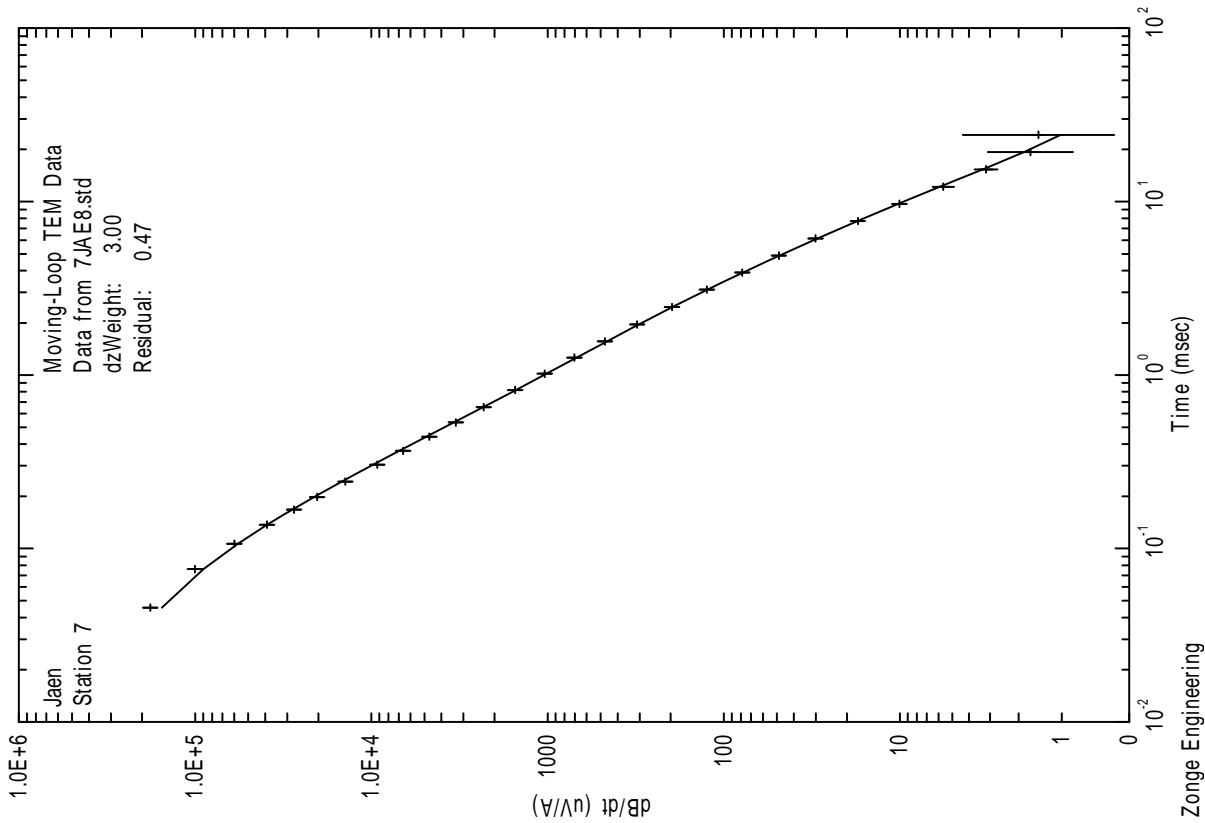
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

7

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-3 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

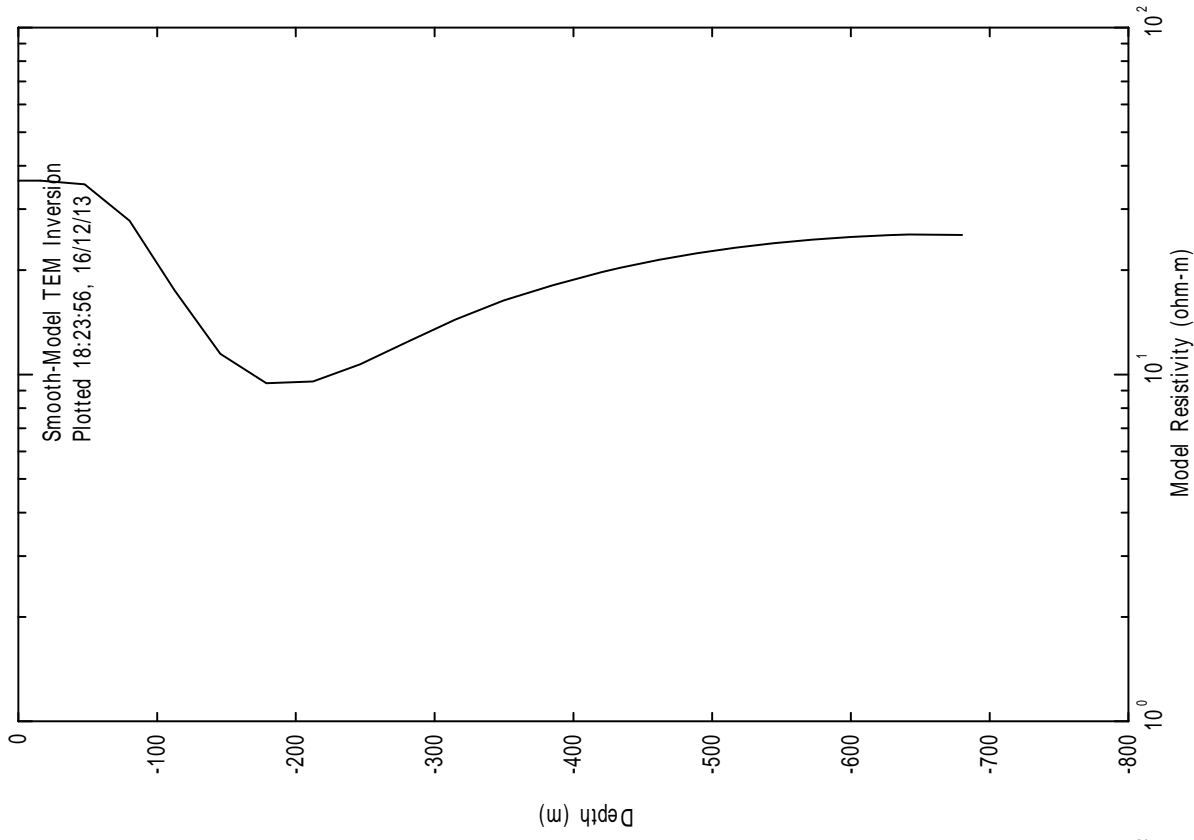
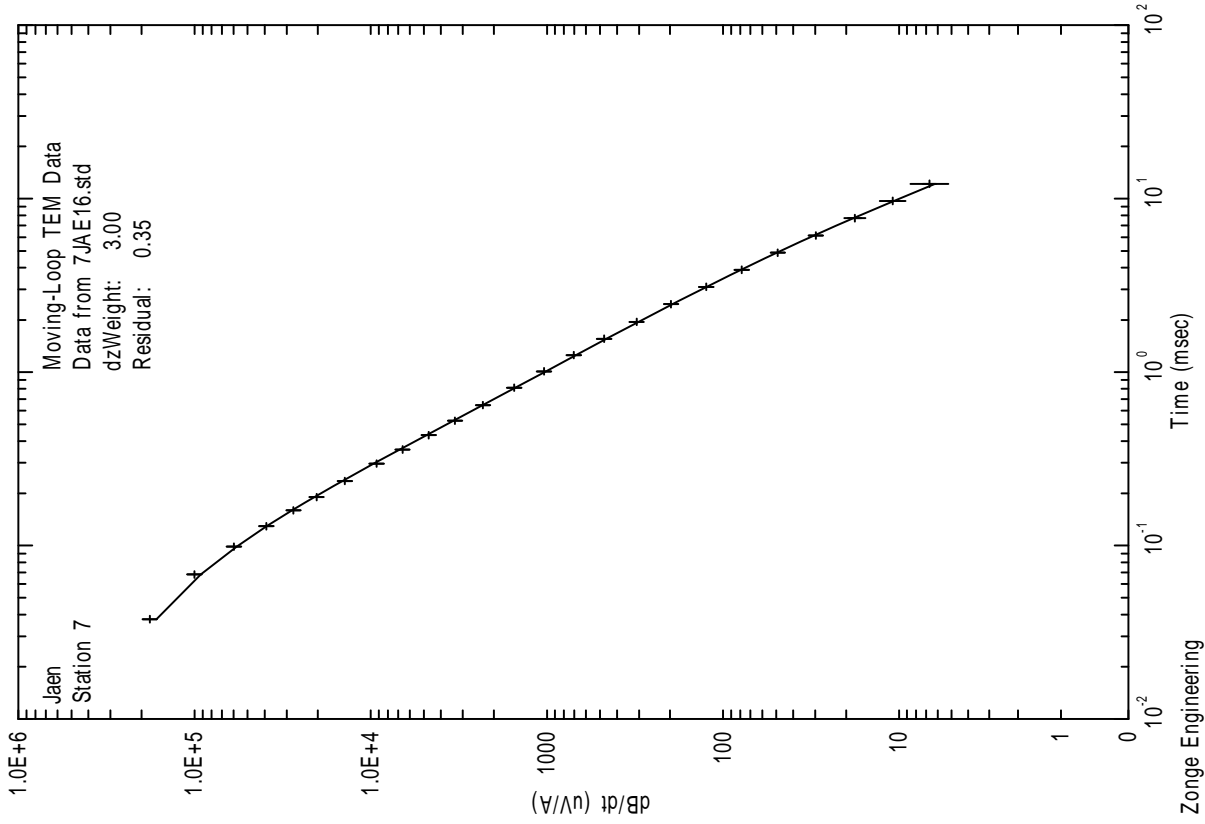
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

8

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-3 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



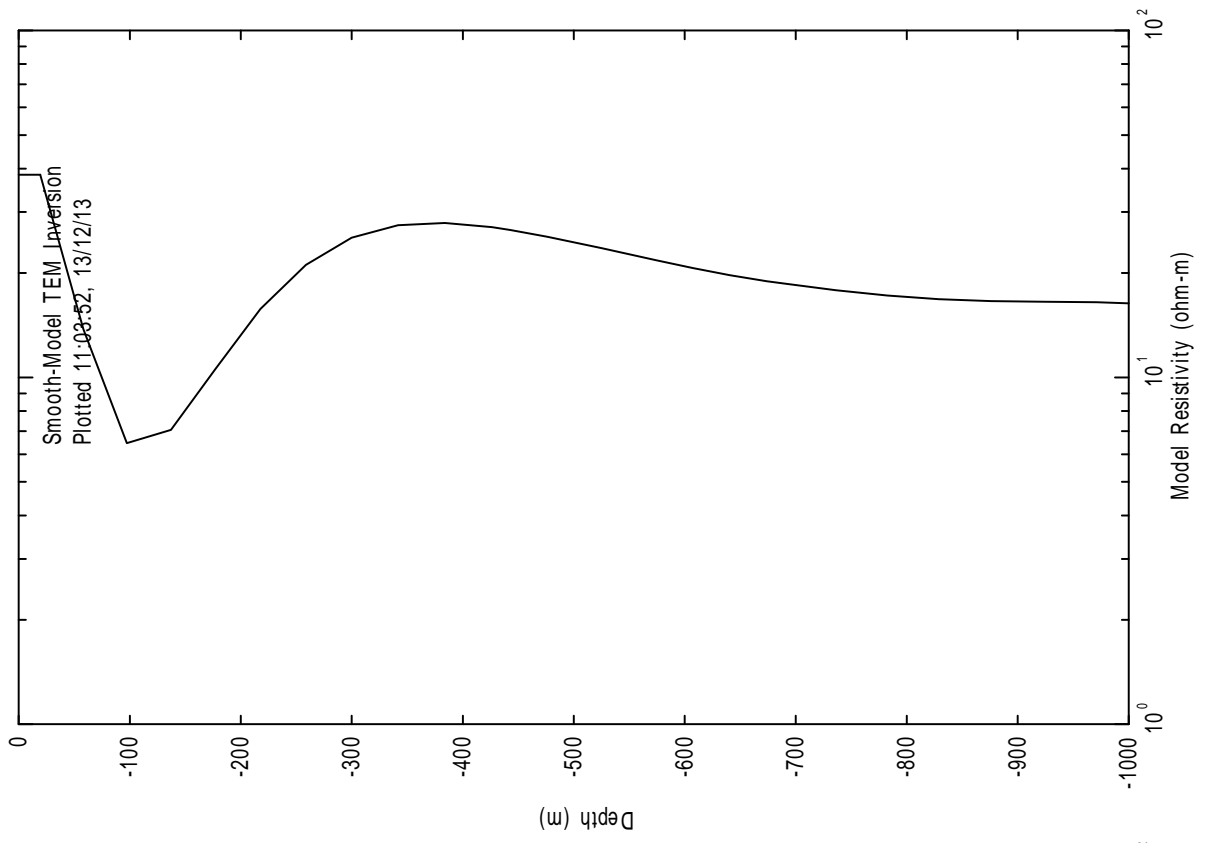
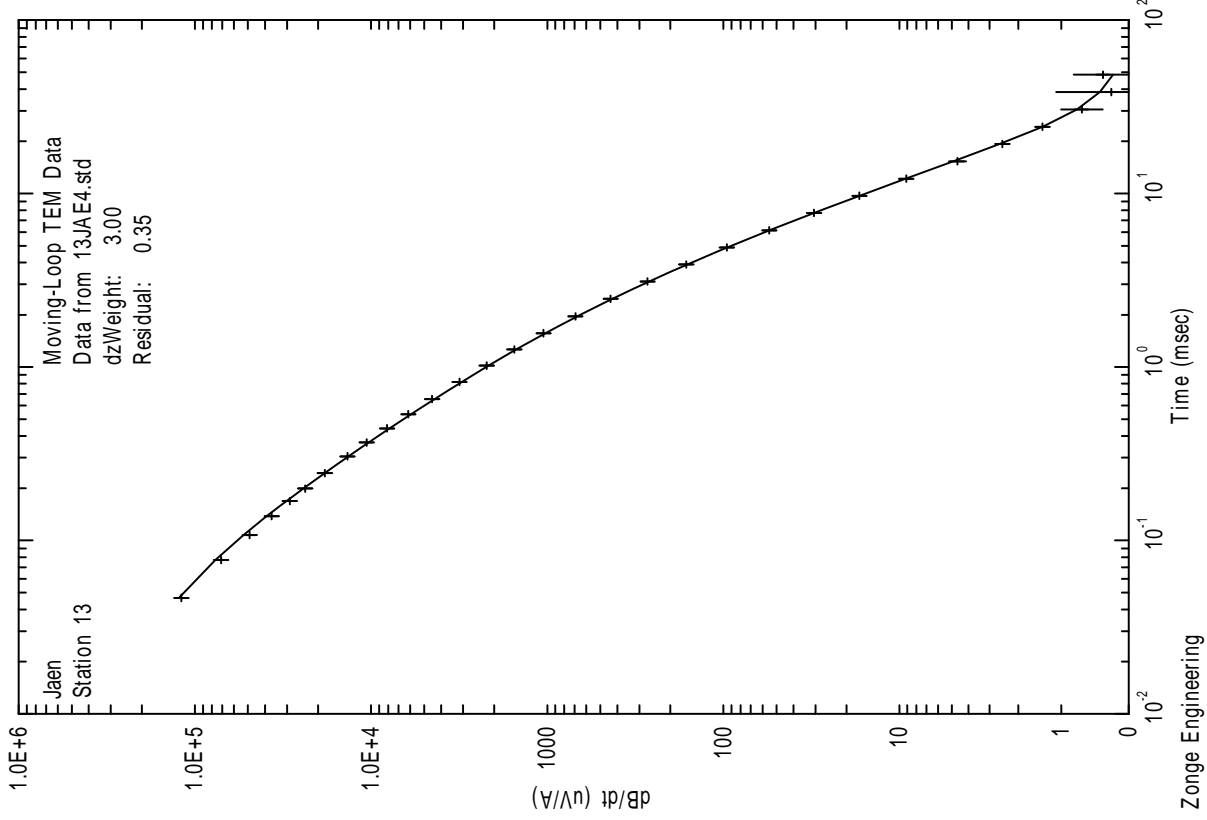
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

9

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-4 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

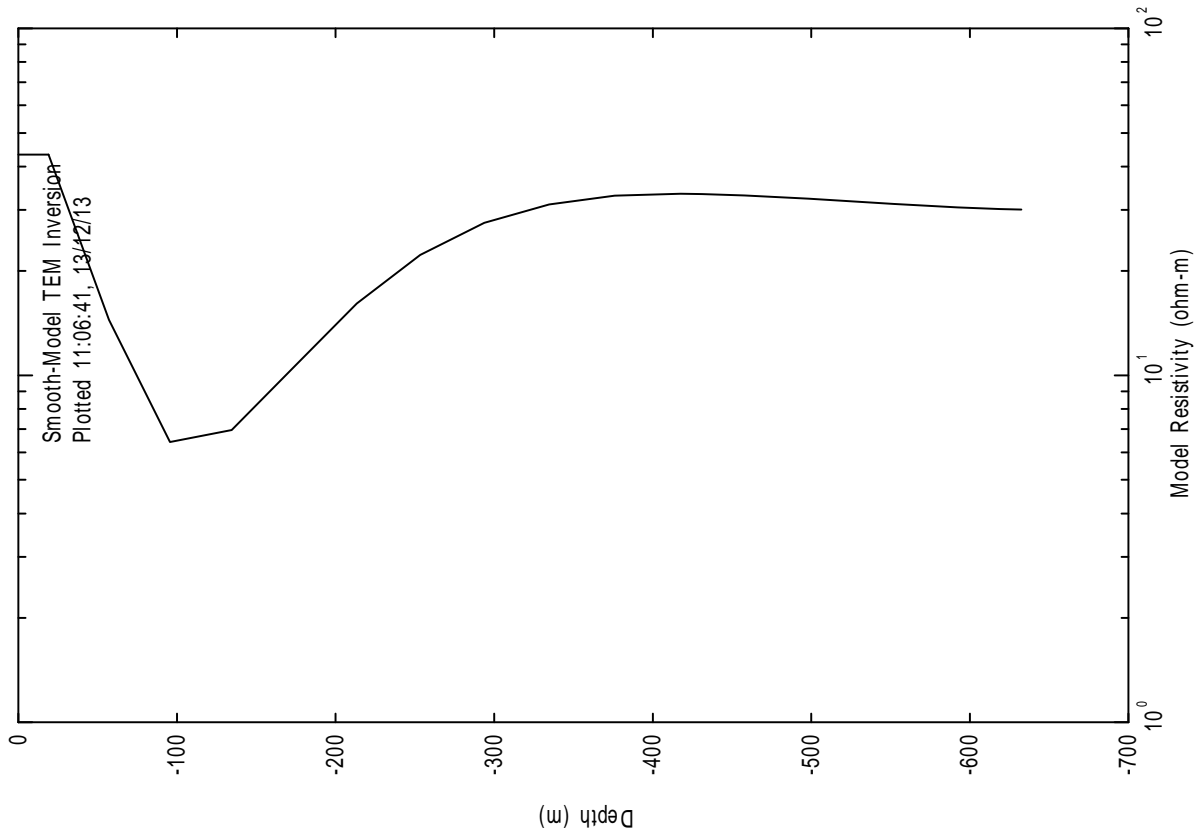
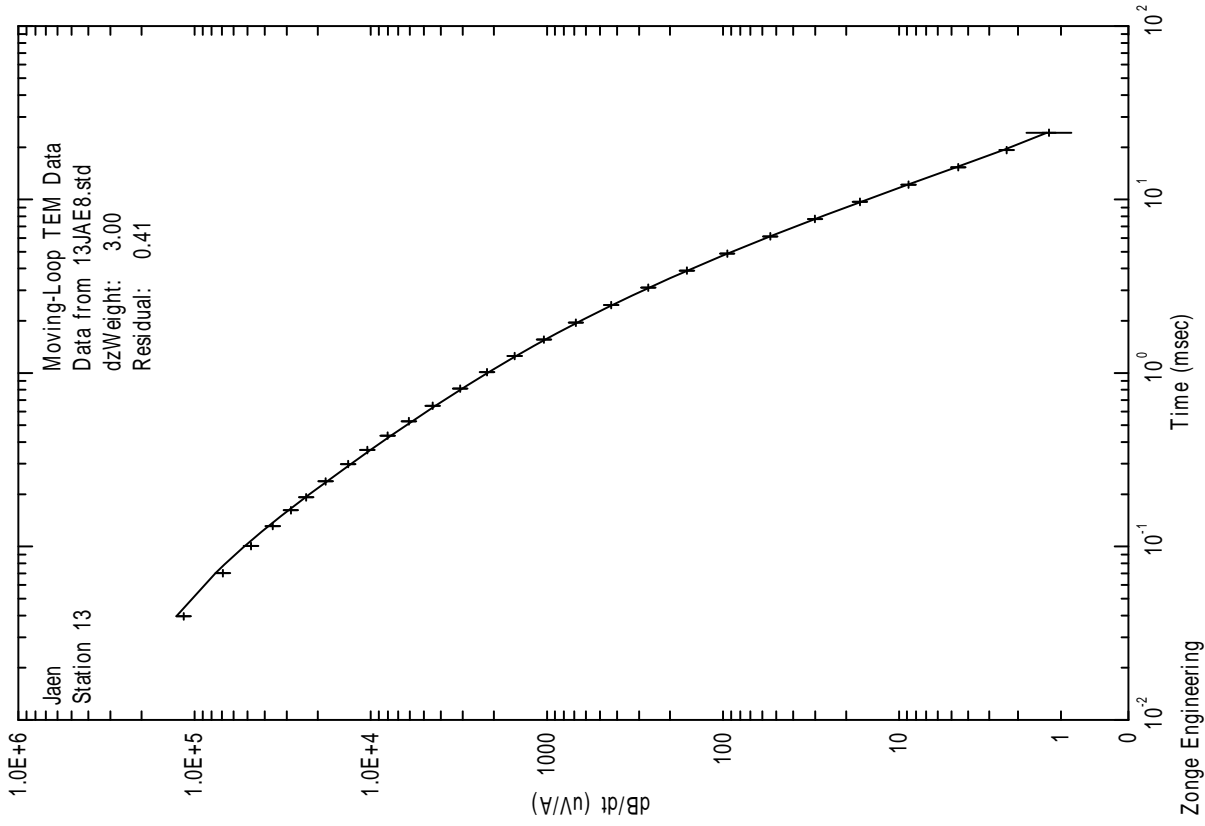
ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
10

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-4 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



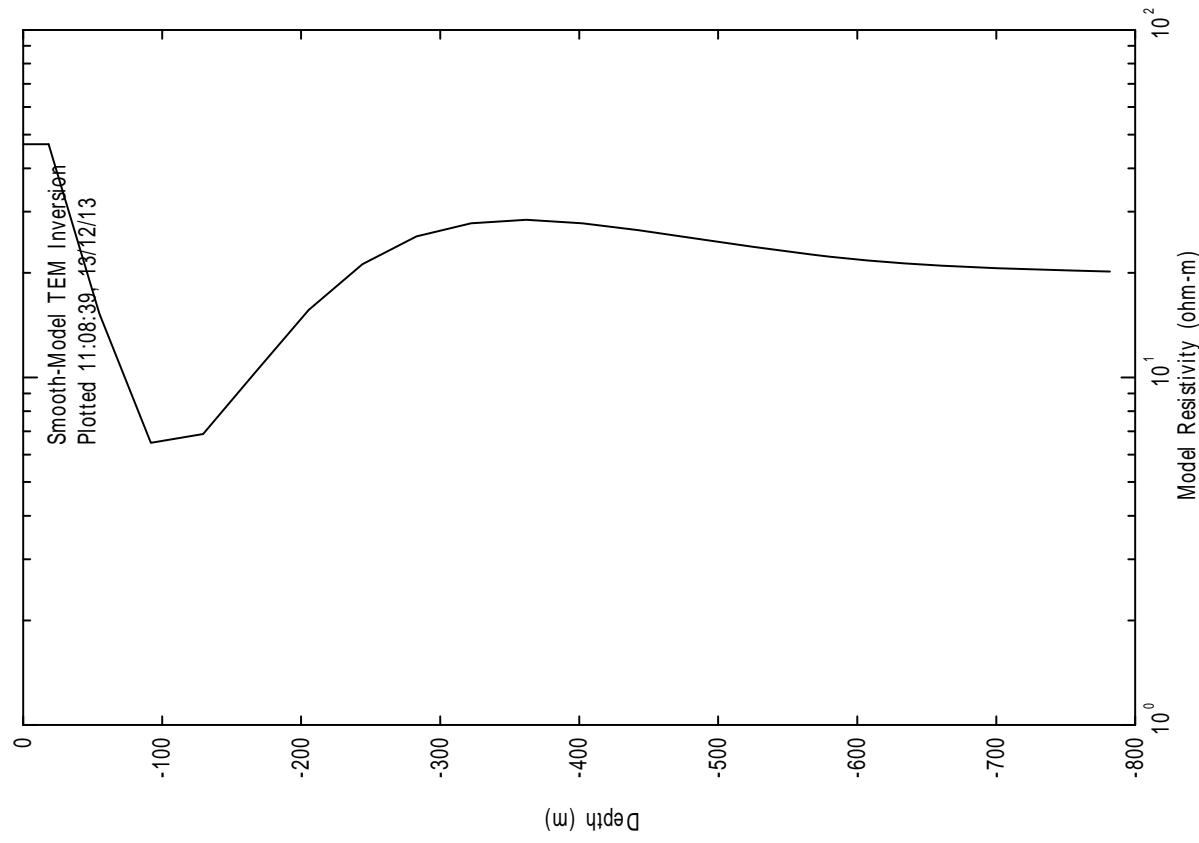
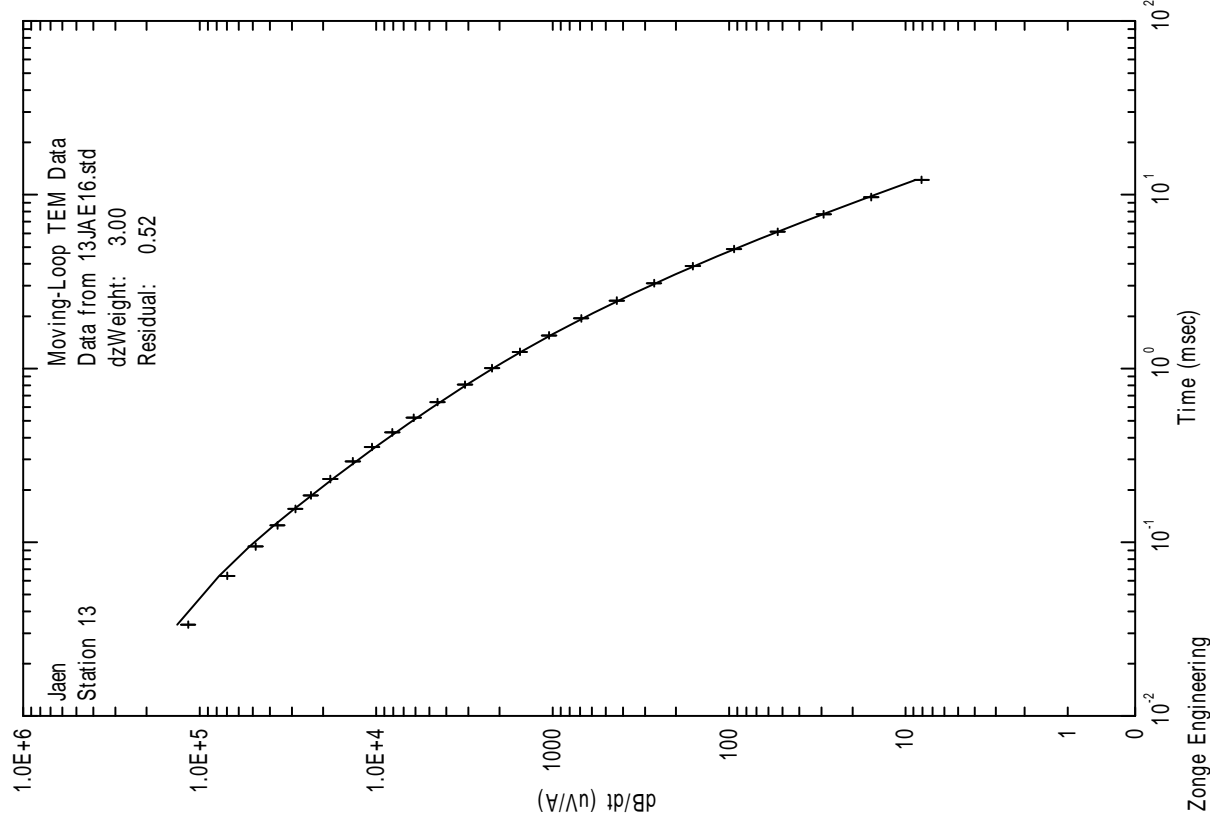
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

11

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-4 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

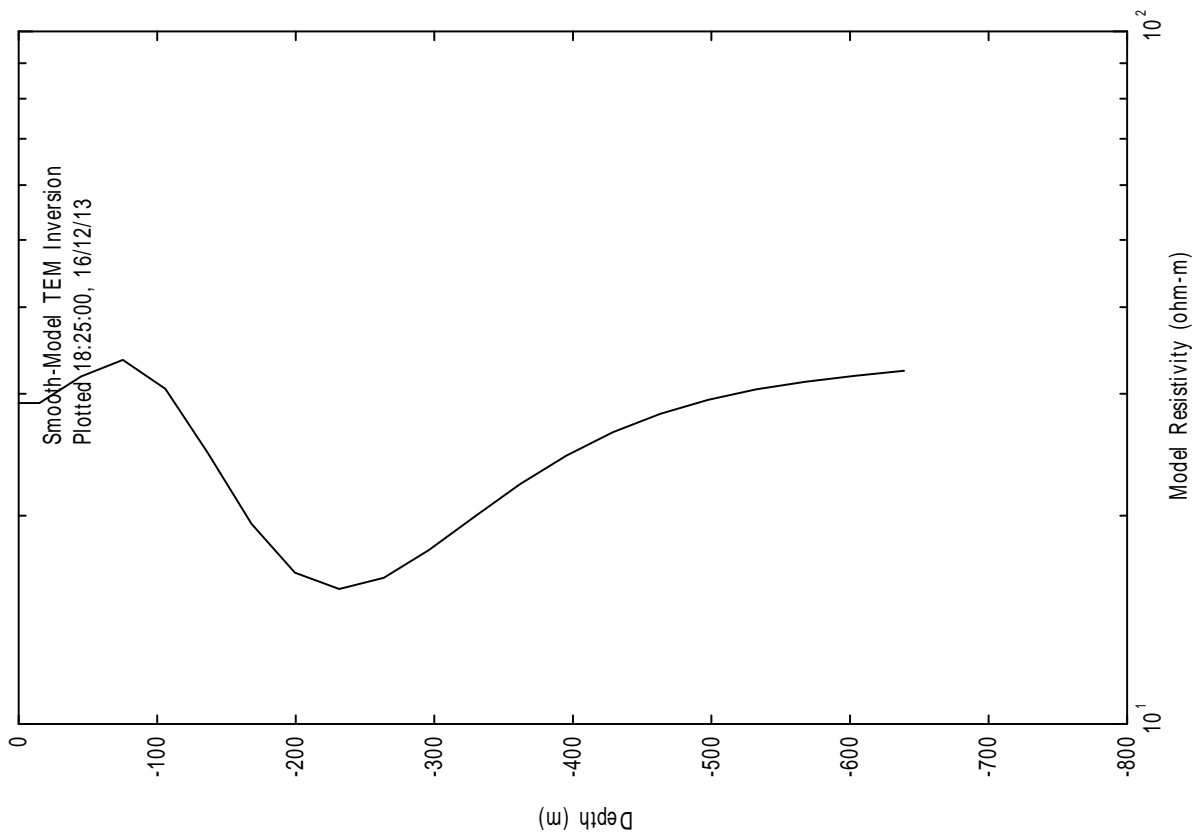
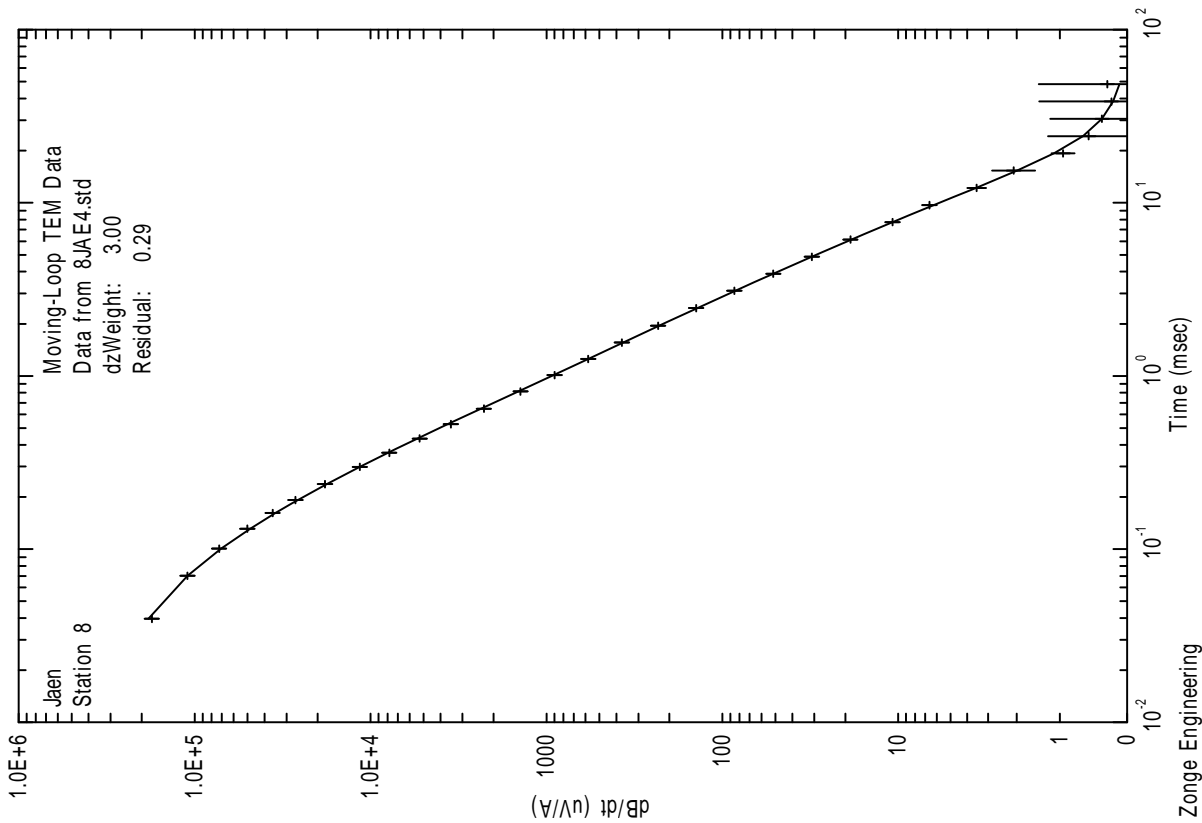
AUTOR:



FECHA:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
12

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-5 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:

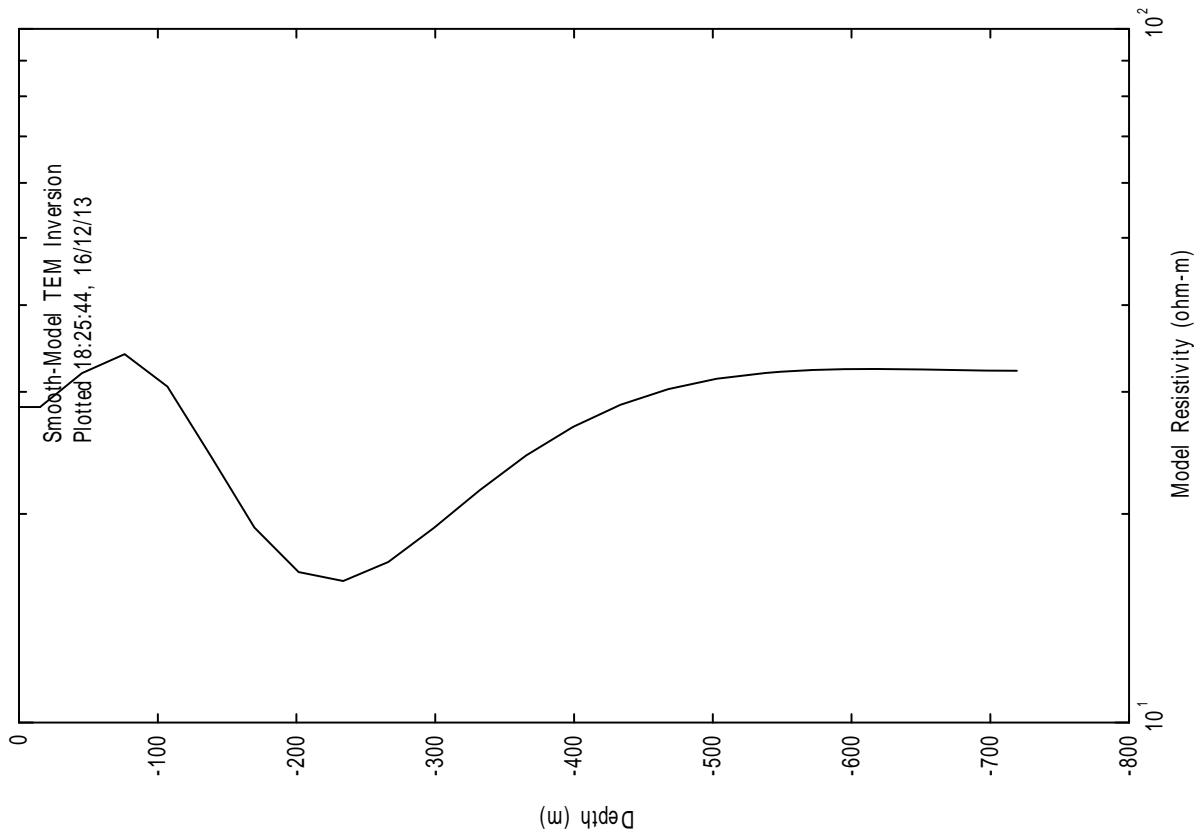
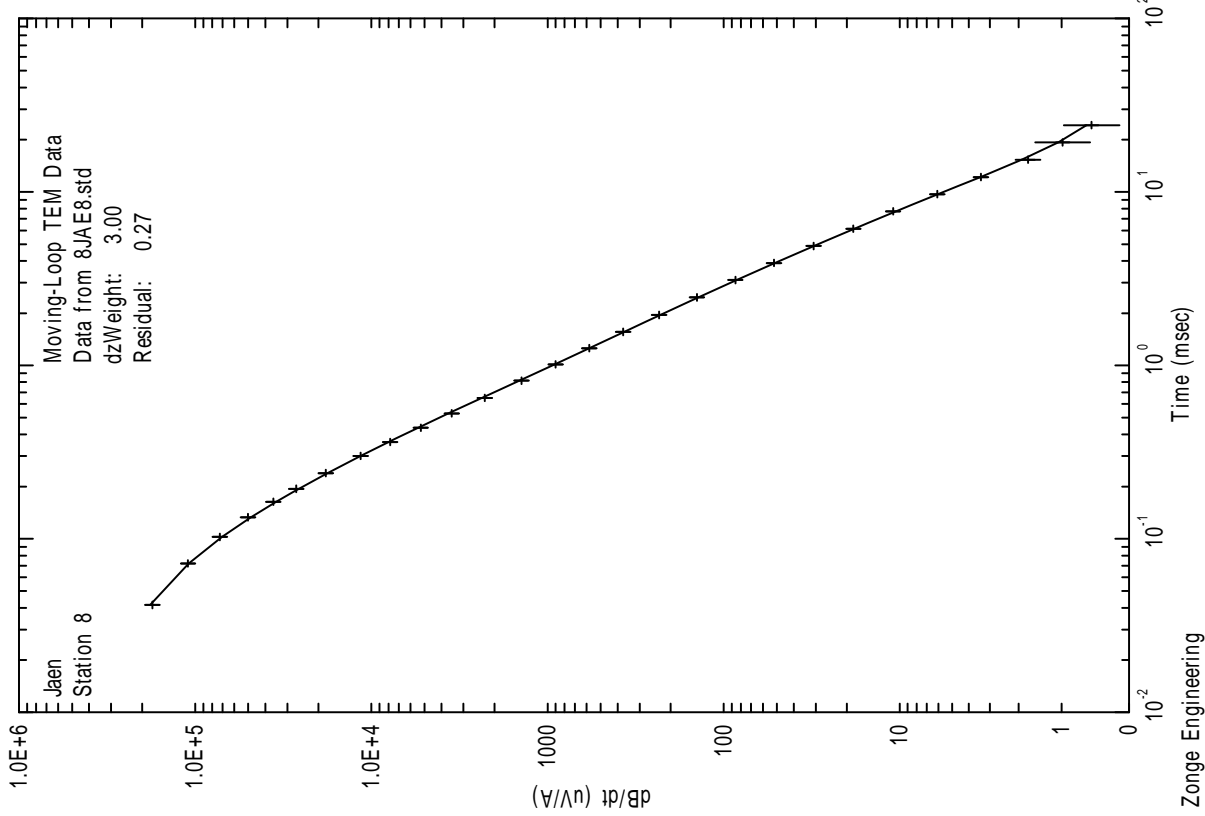


FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:
13

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-5 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



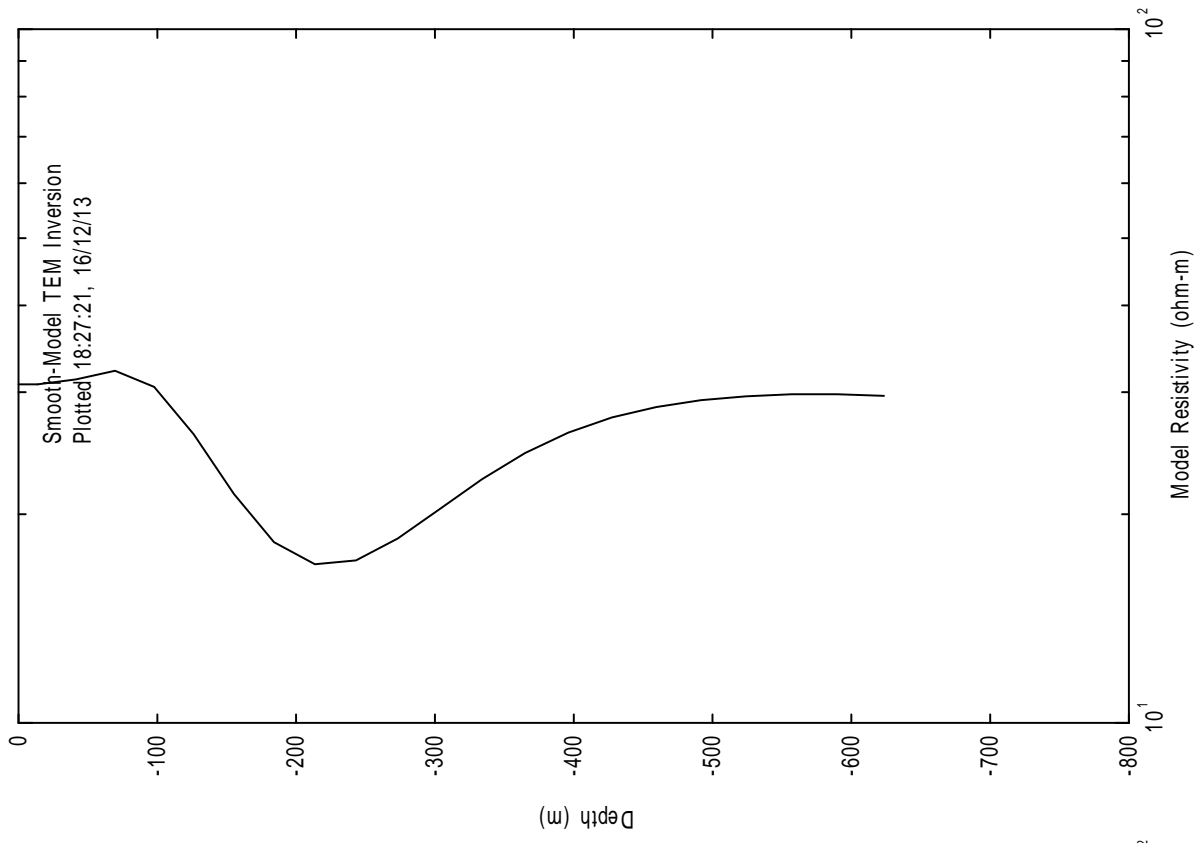
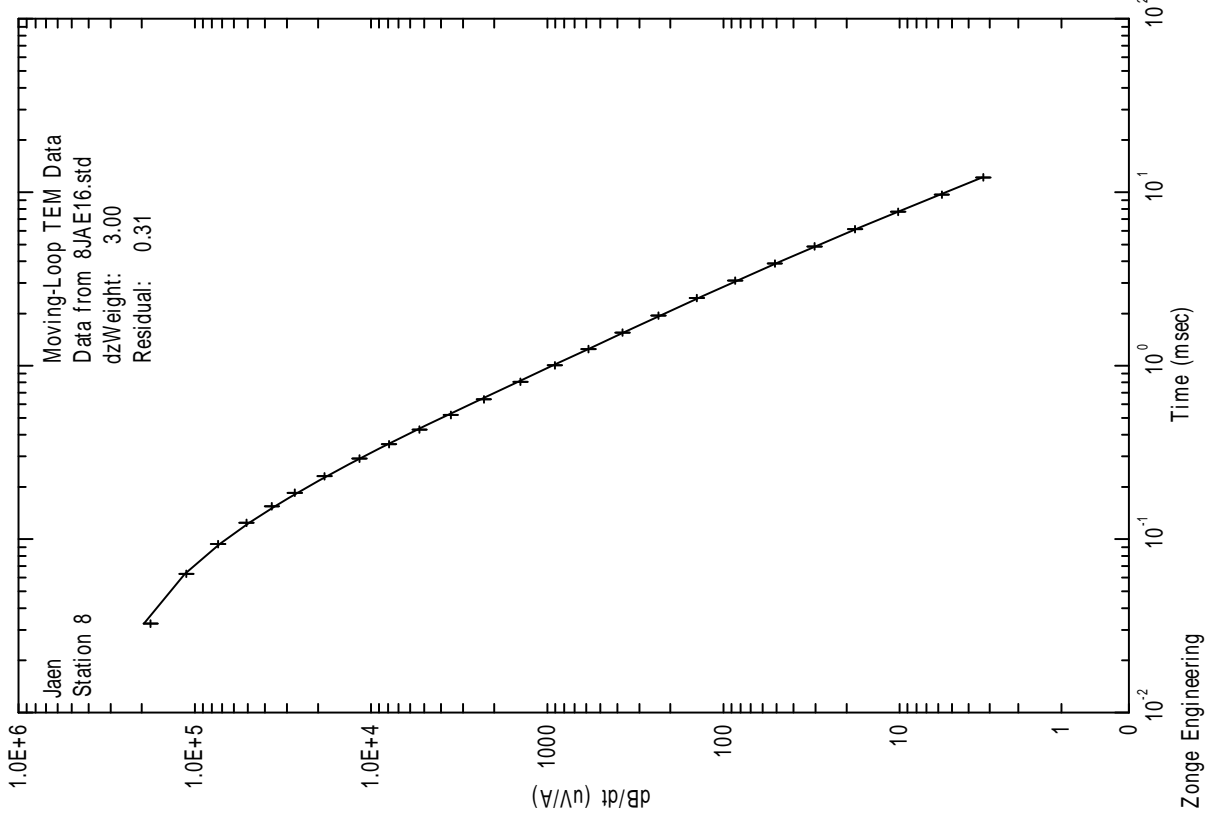
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

14

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-5 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:

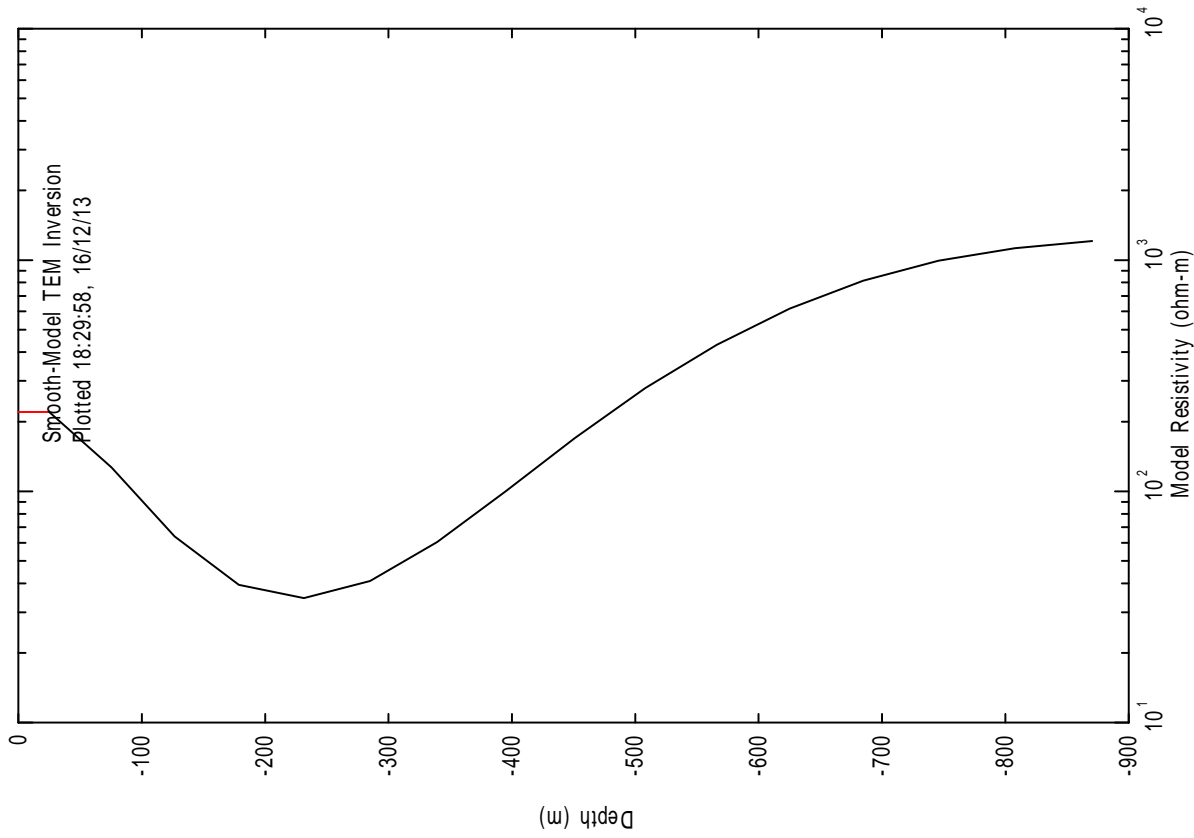
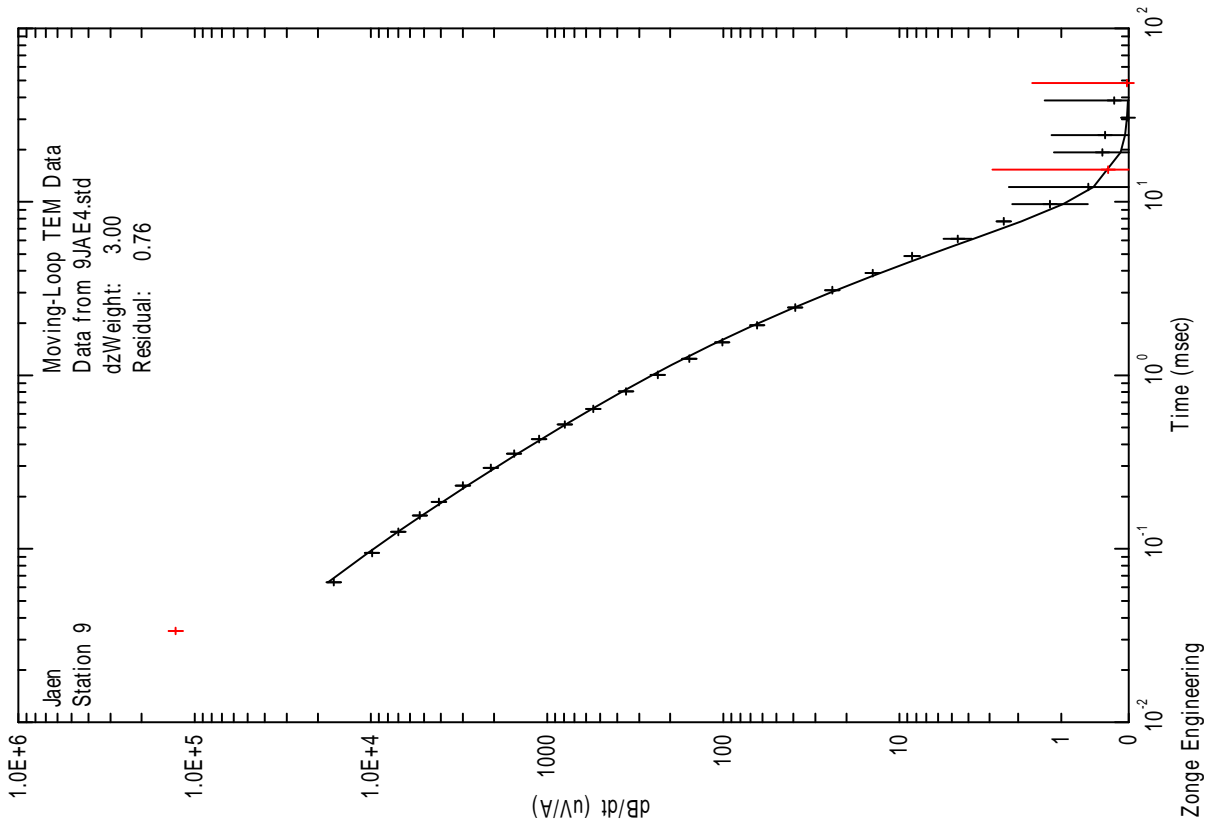


FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:
15

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-6 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



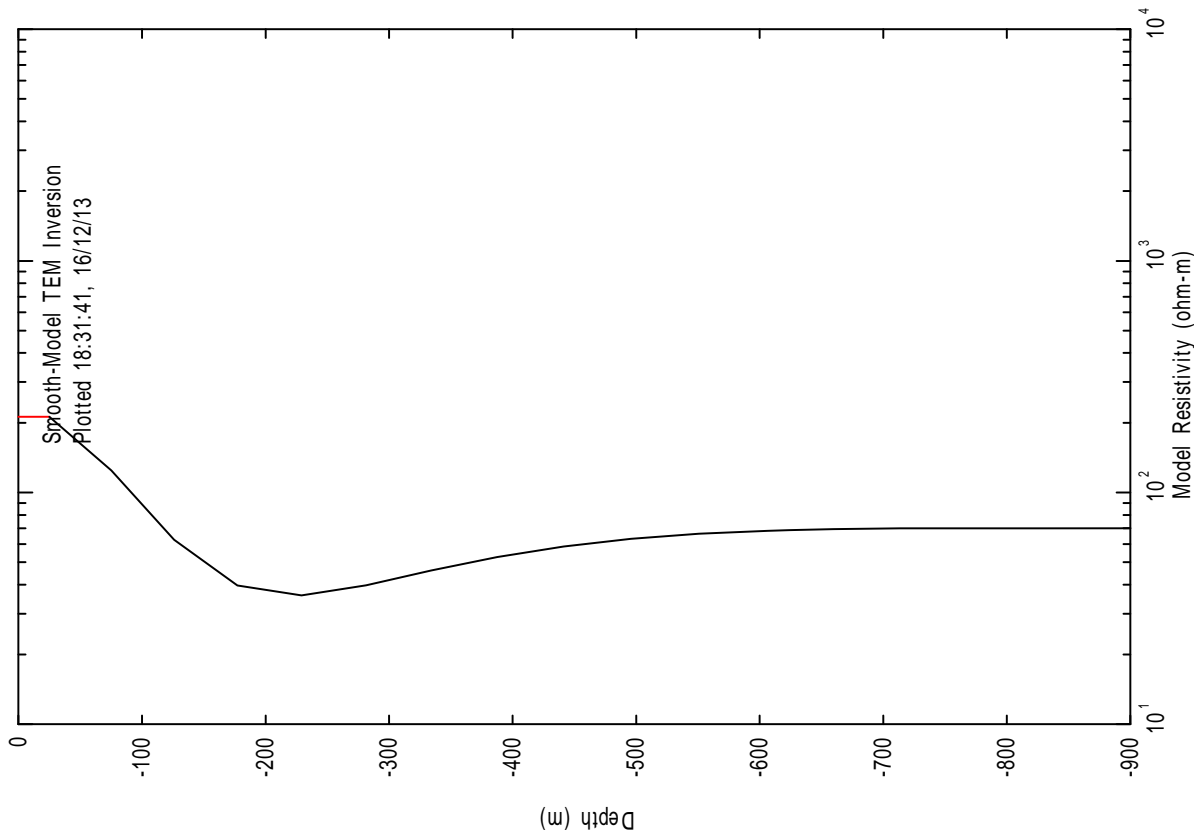
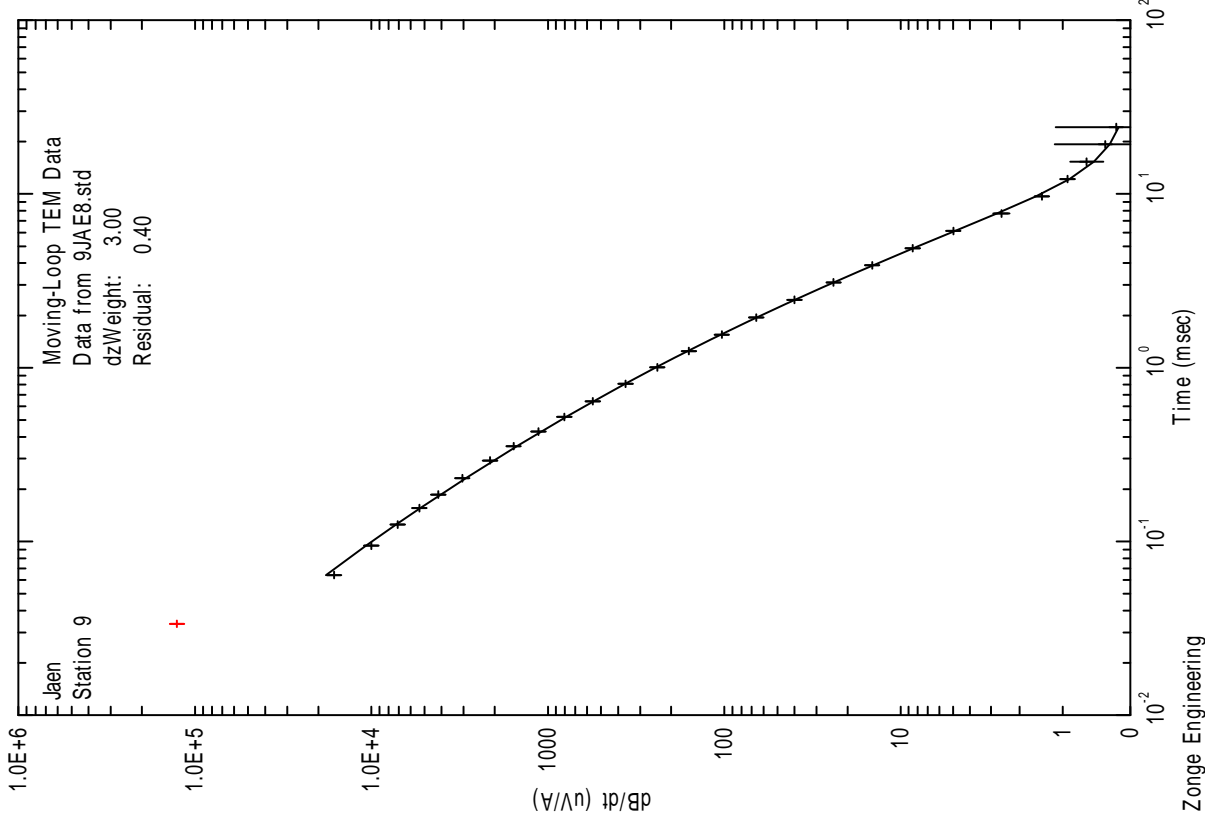
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

16

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-6 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



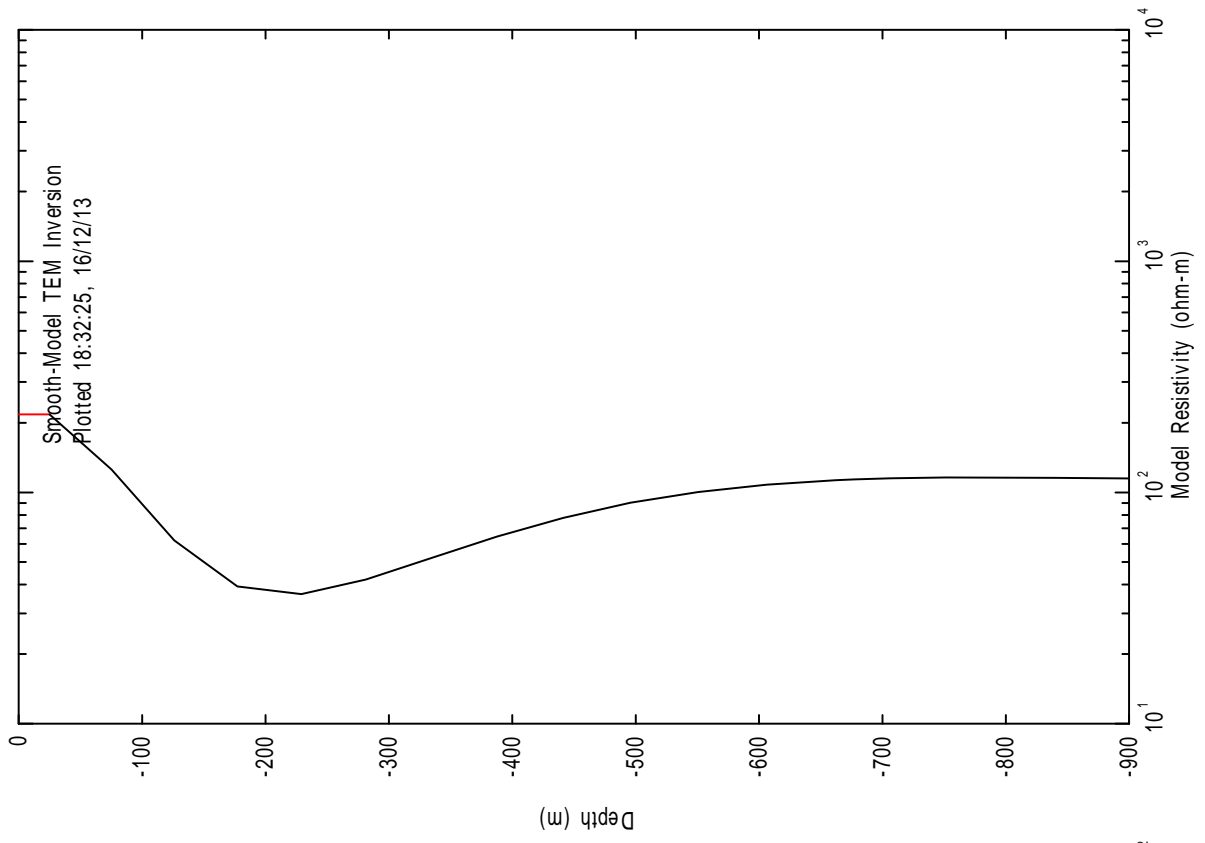
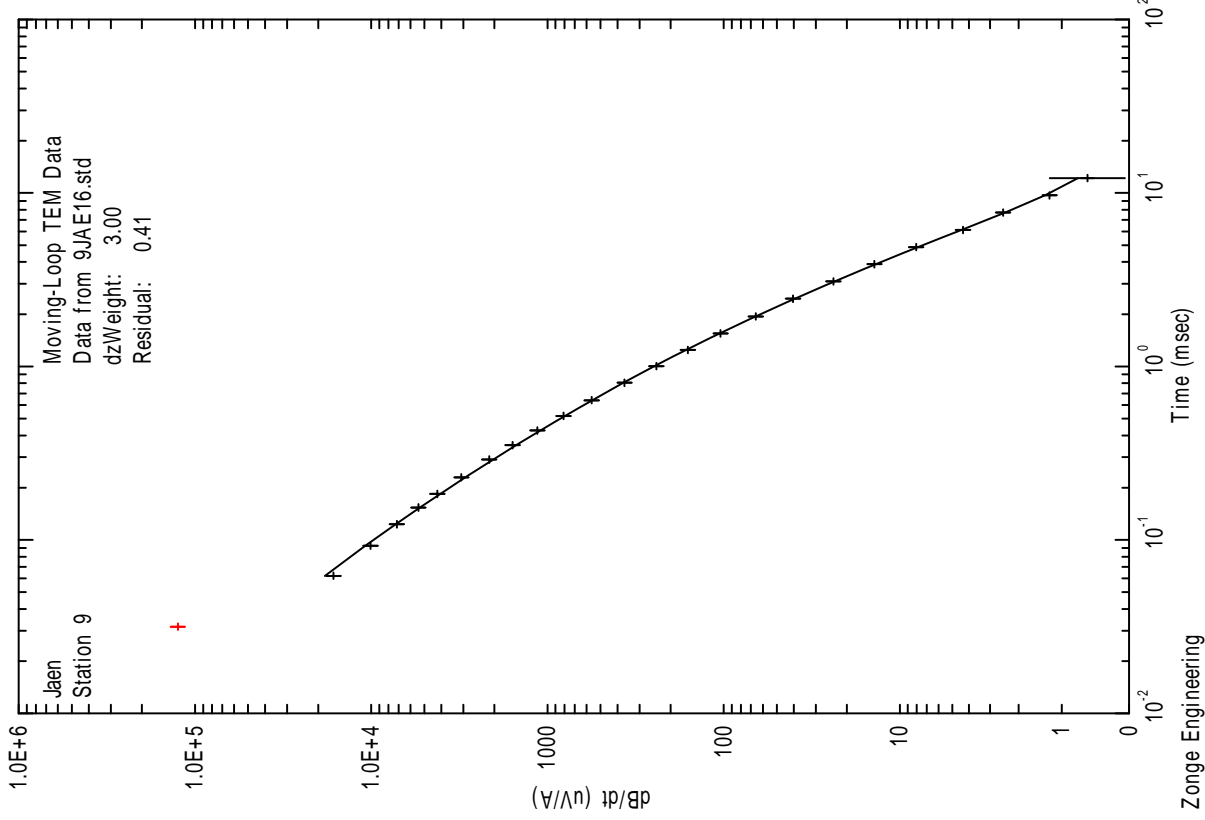
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

17

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-6 (16Hz)



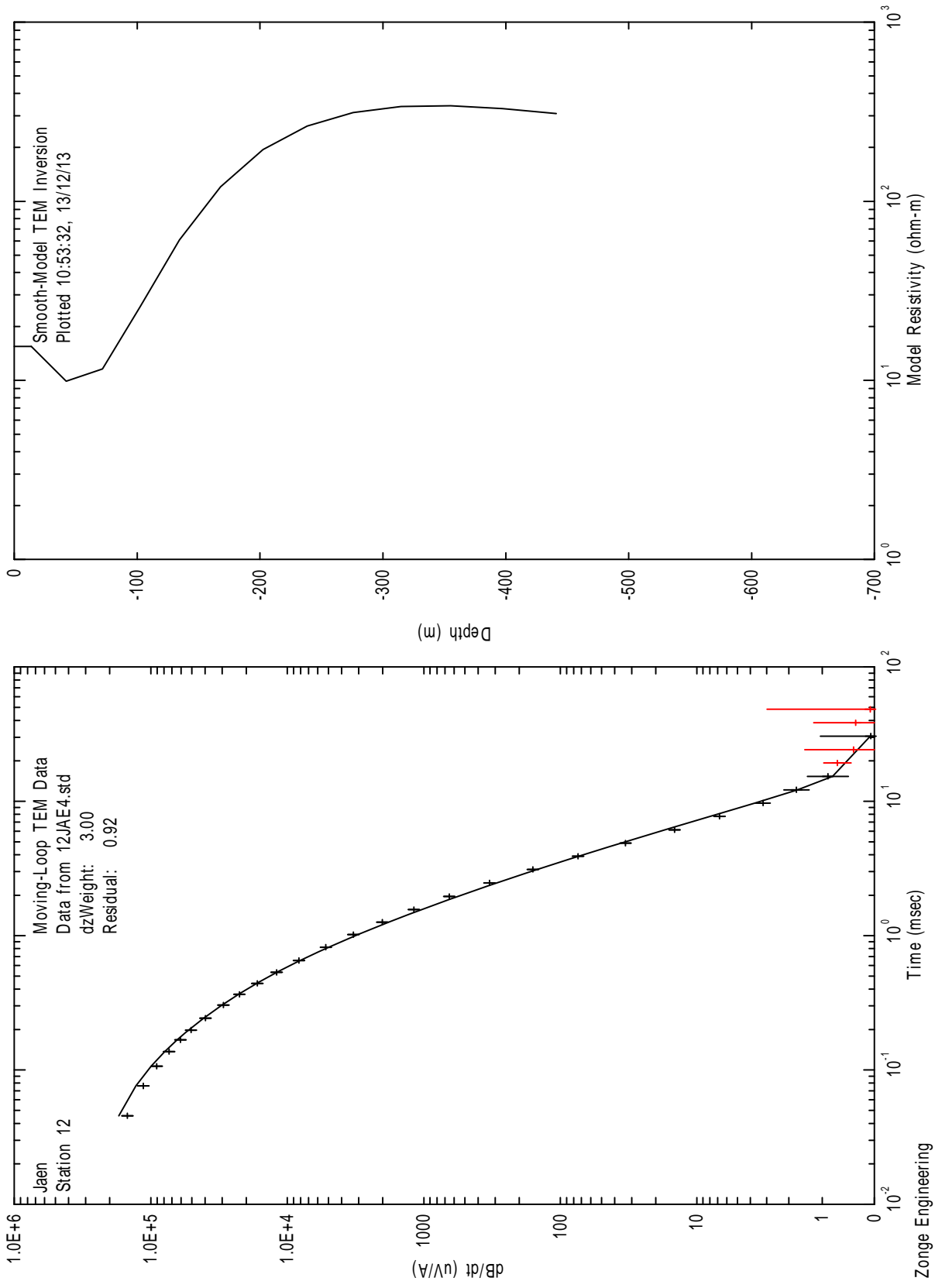
CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**



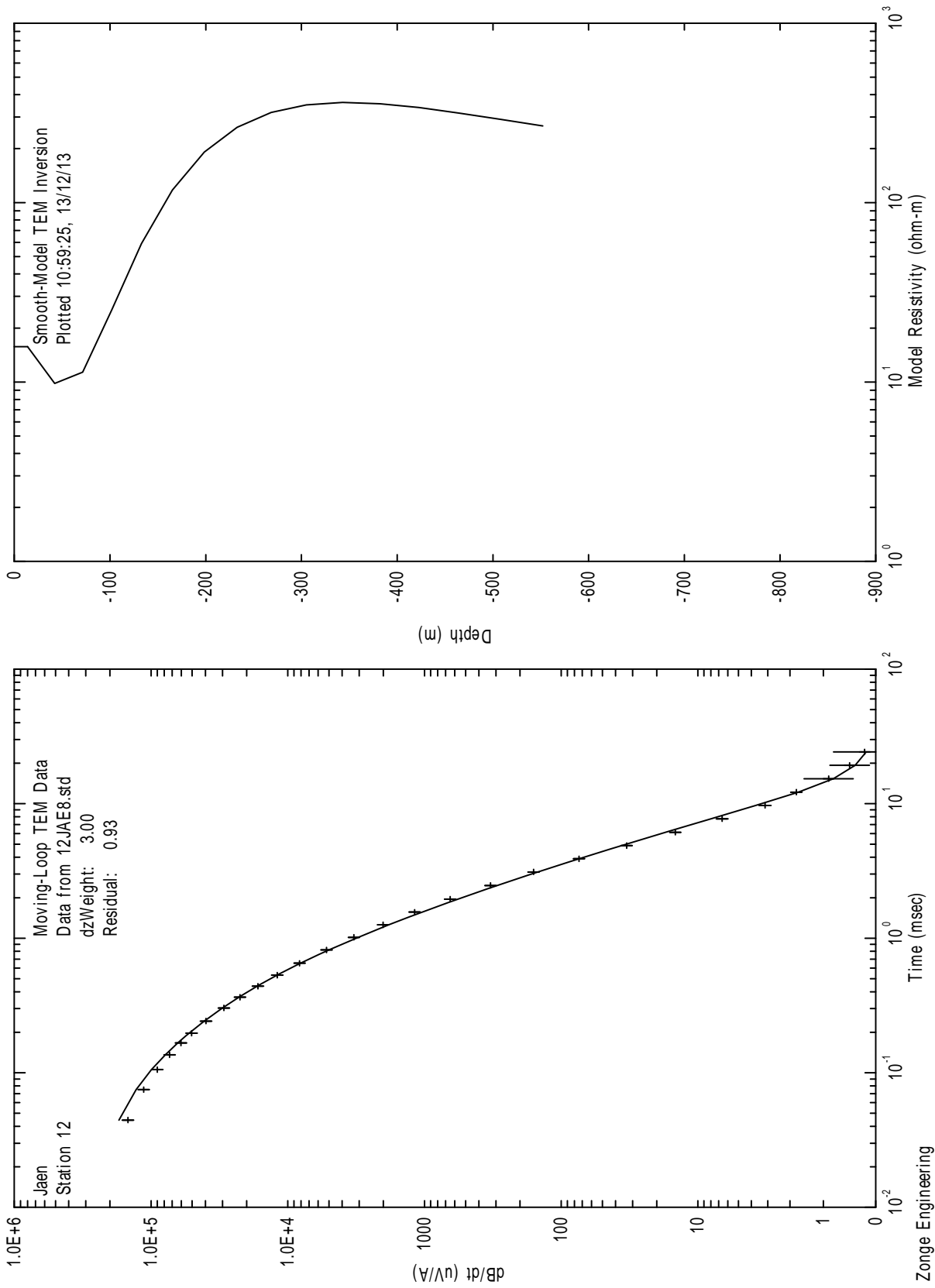
AUTOR: **IGME**
 FECHA: **DICIEMBRE 2013**
 PLANO: **18**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-7 (4Hz)



CLIENTE:	IGME	AUTOR:		FECHA:	DICIEMBRE 2013	PLANO:	19
ESTUDIO:	CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN						

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-7 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

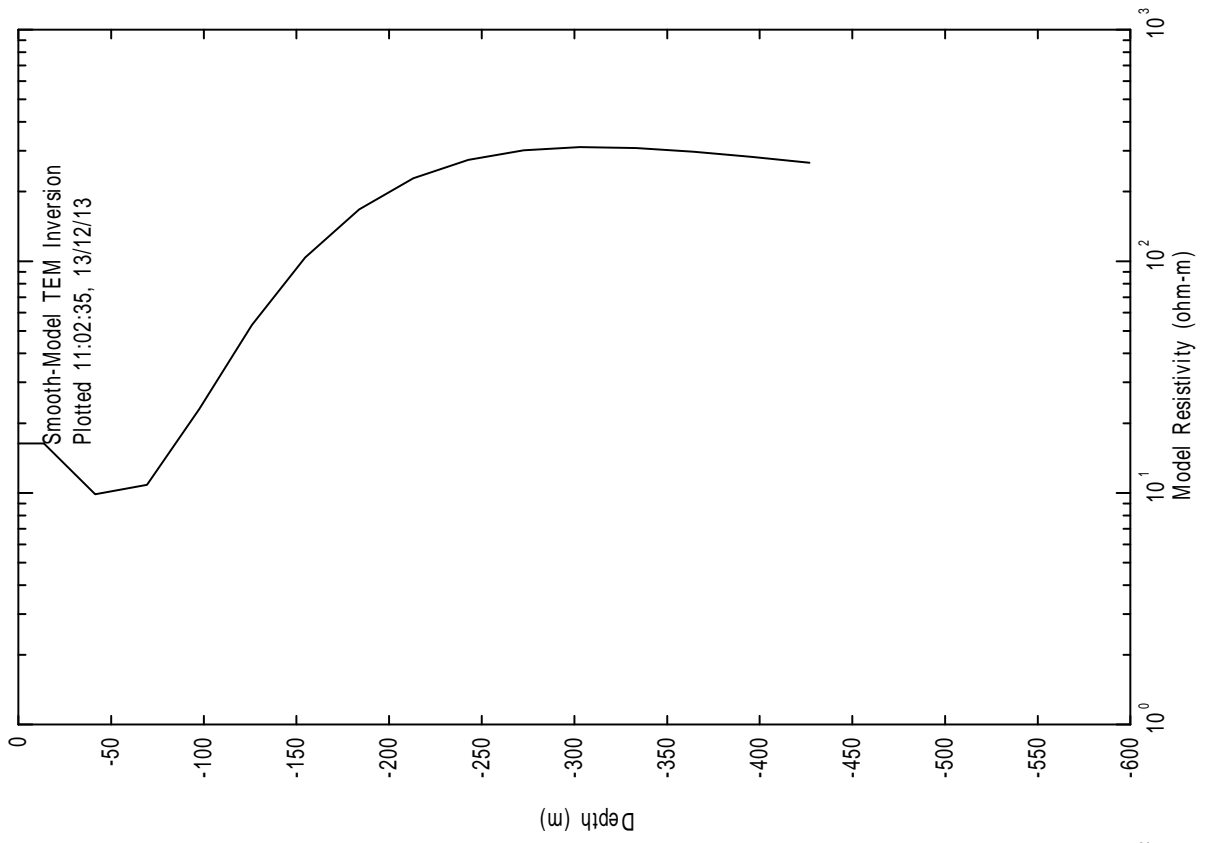
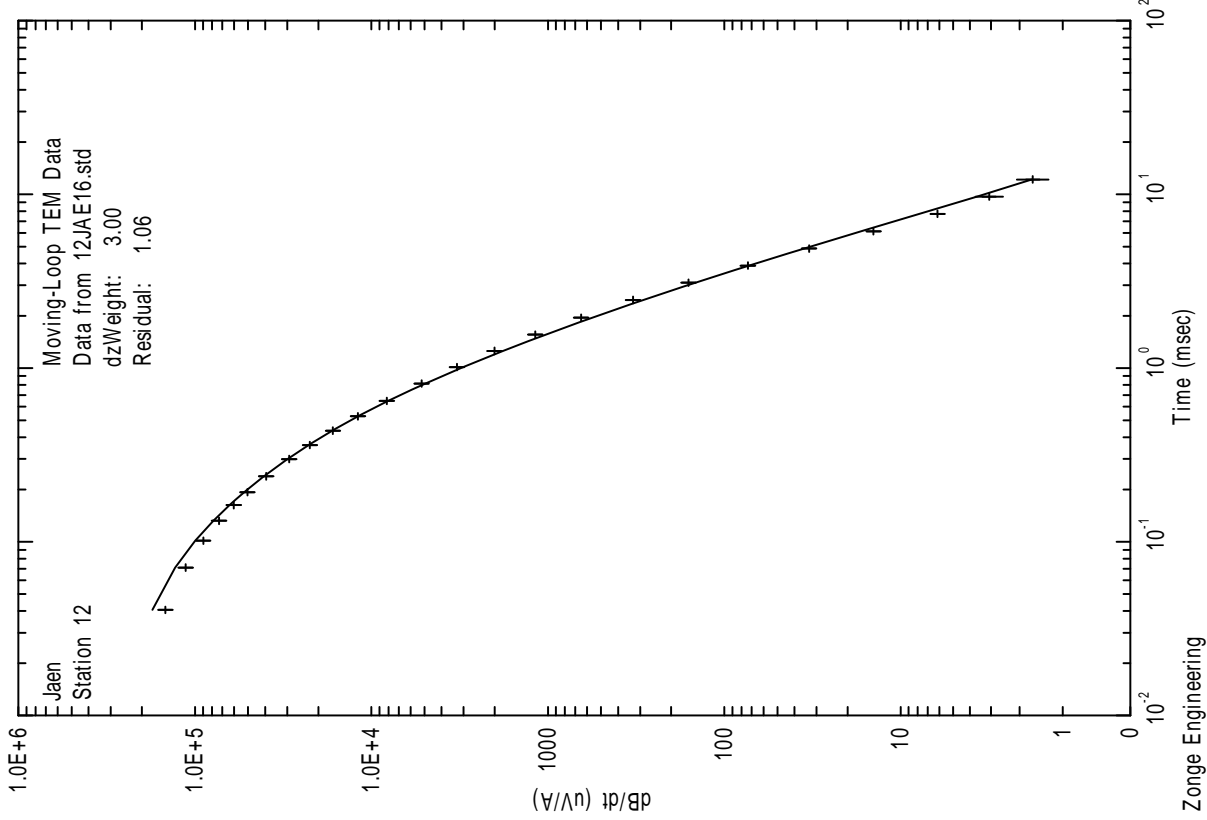
ESTUDIO:
 CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:
 DICIEMBRE 2013

PLANO:
20

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-7 (16Hz)



CLIENTE: **IGME**

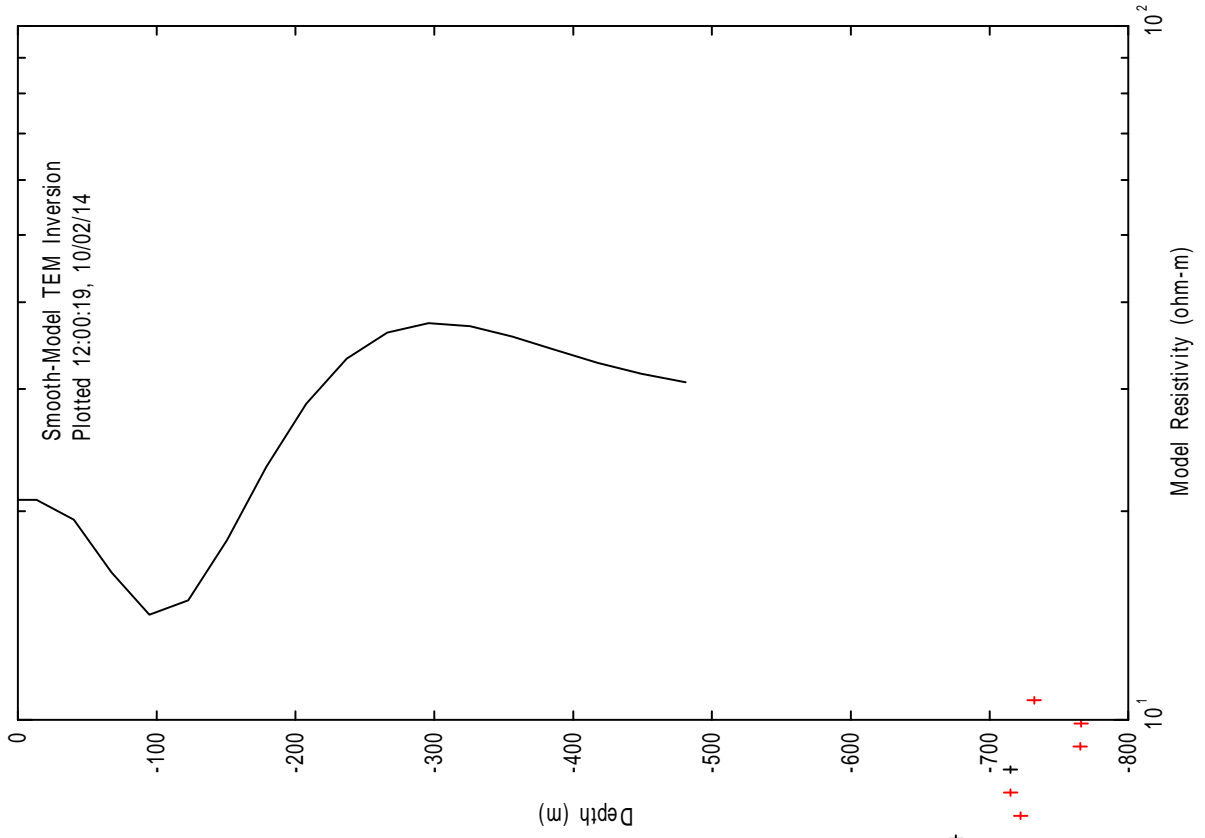
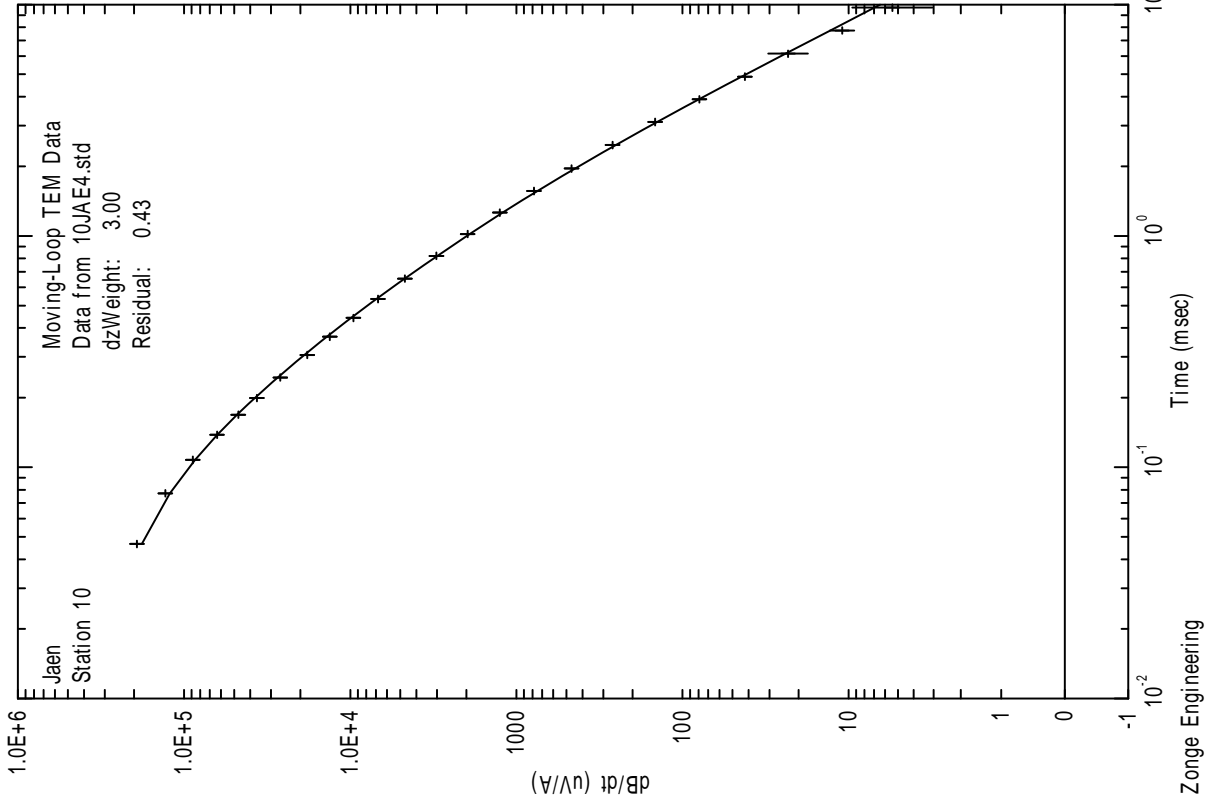
ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**



AUTOR: **DICIEMBRE 2013**

PLANO: **21**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-8 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

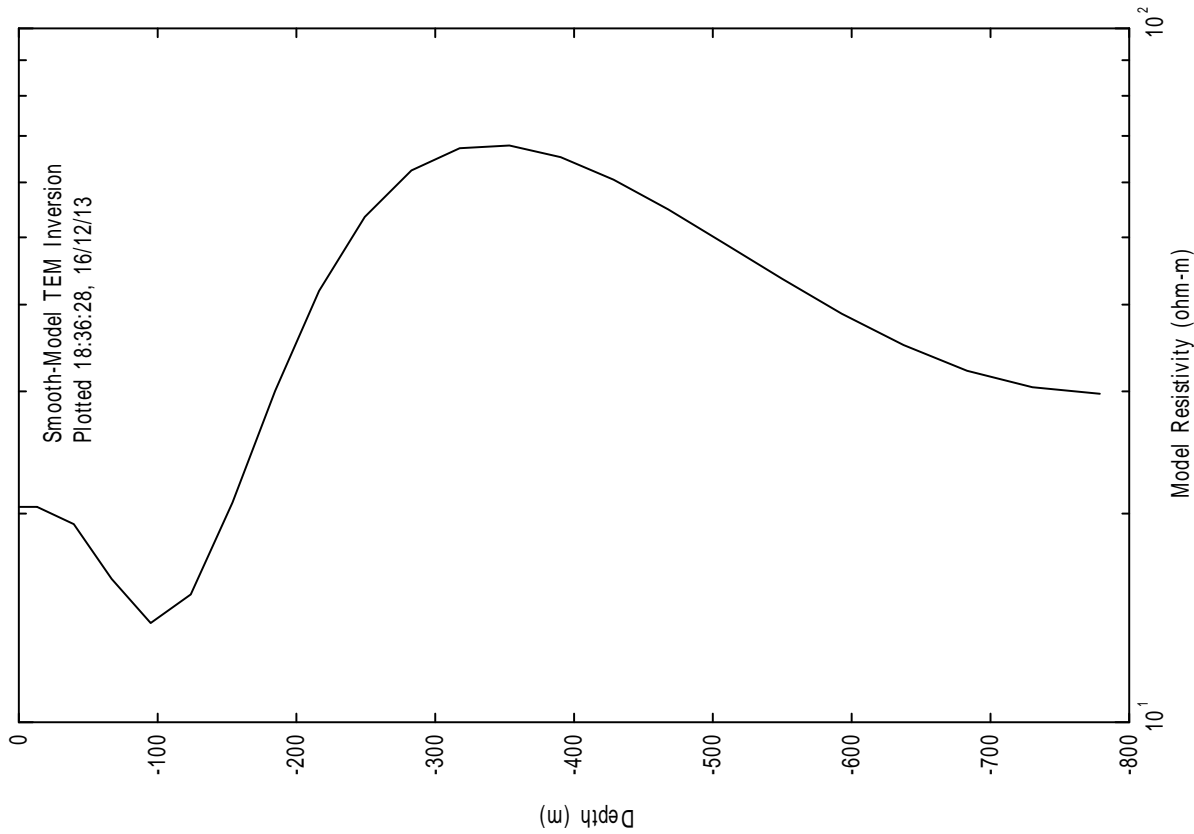
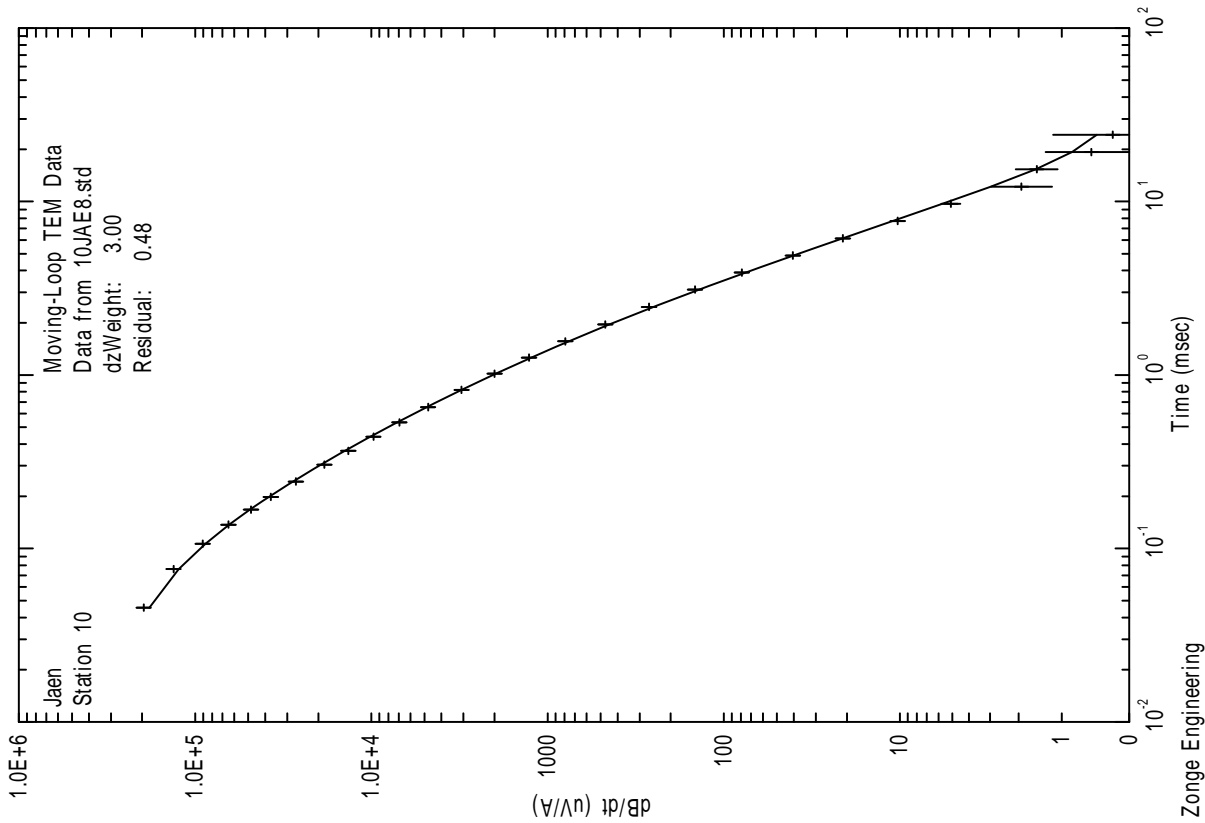
ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
22

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-8 (8Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

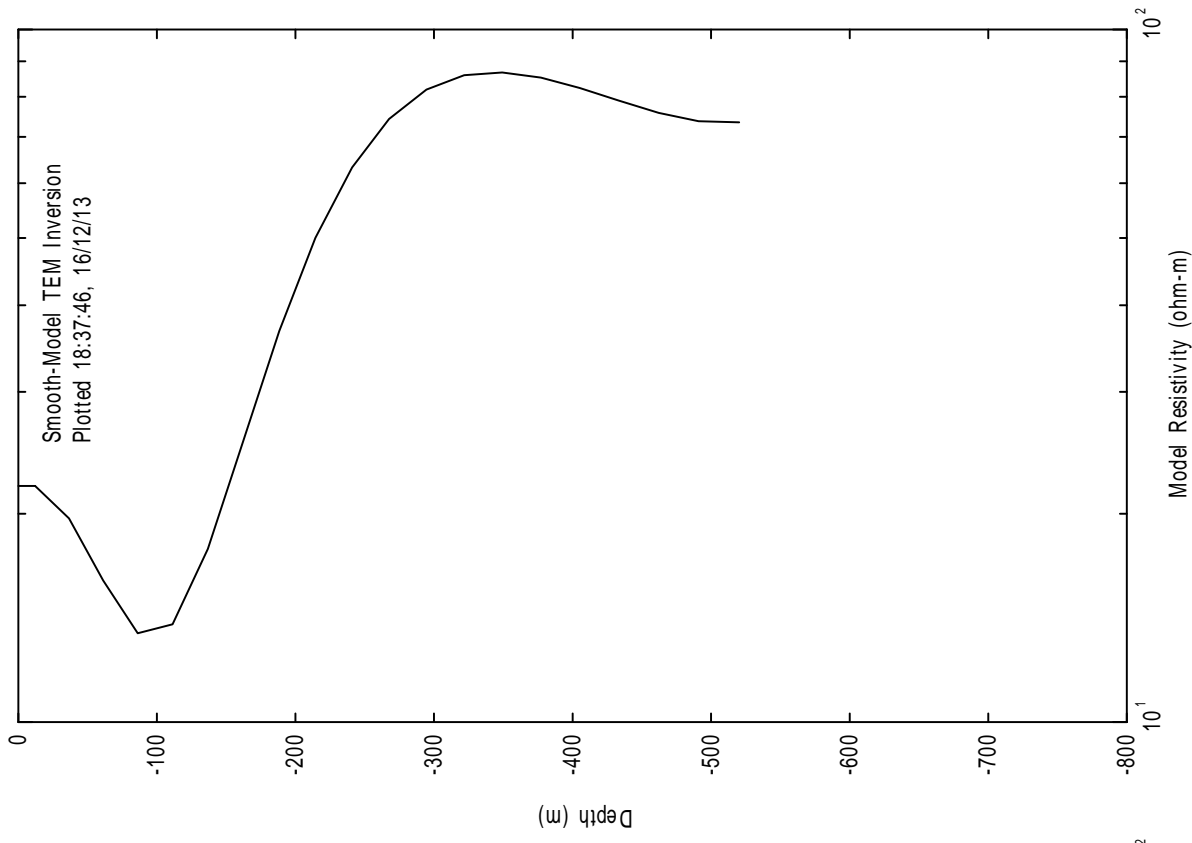
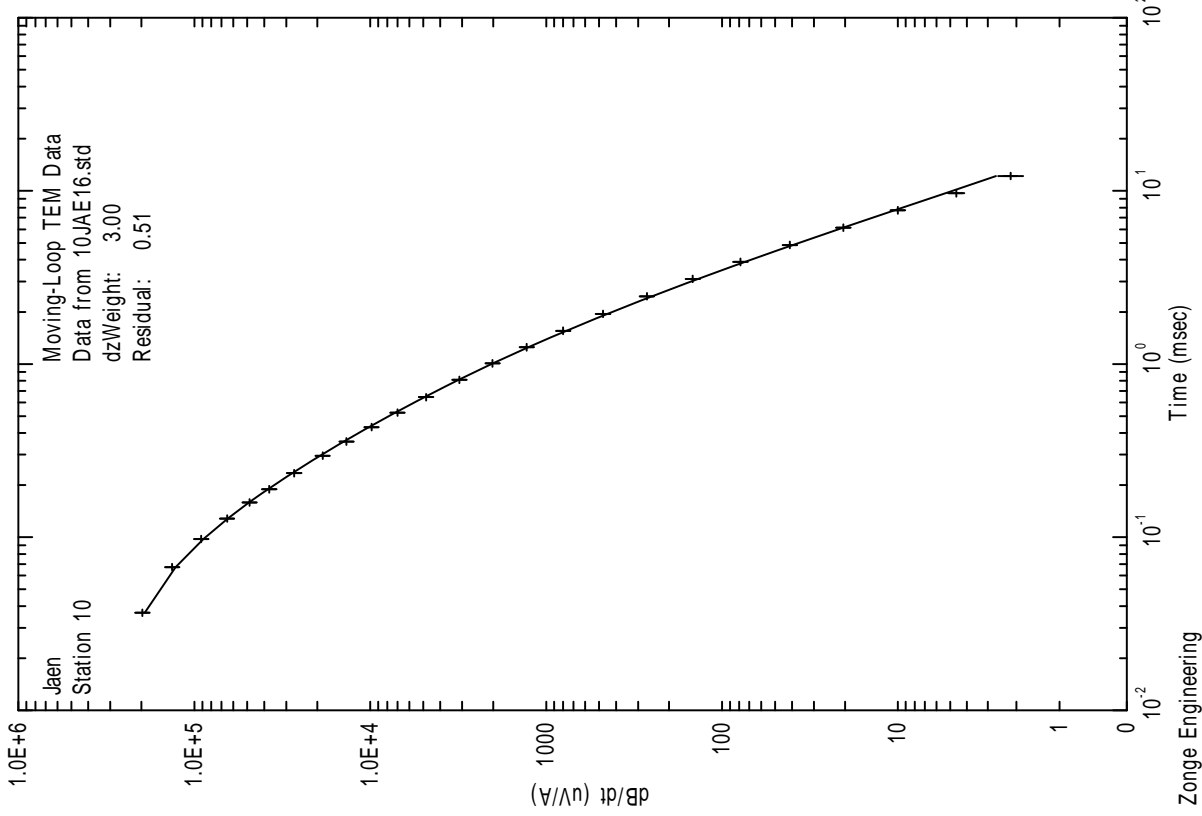
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

23

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-8 (16Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



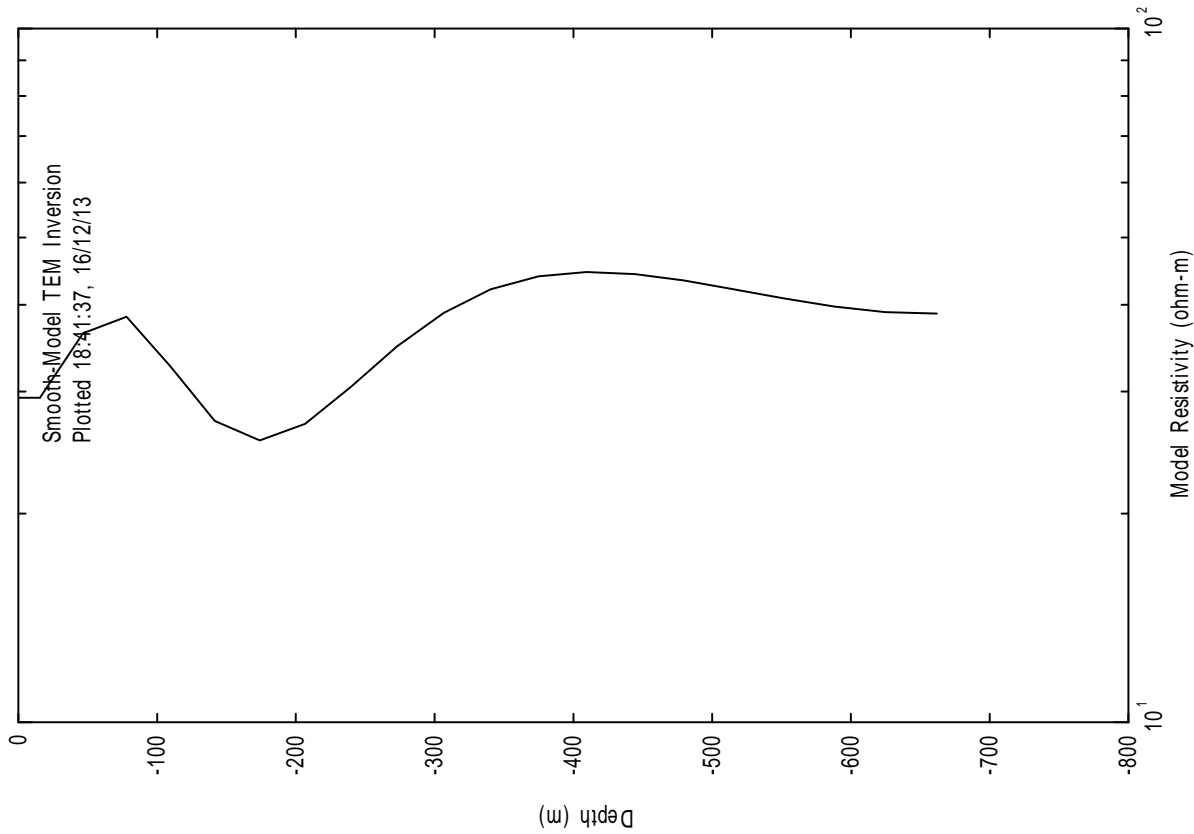
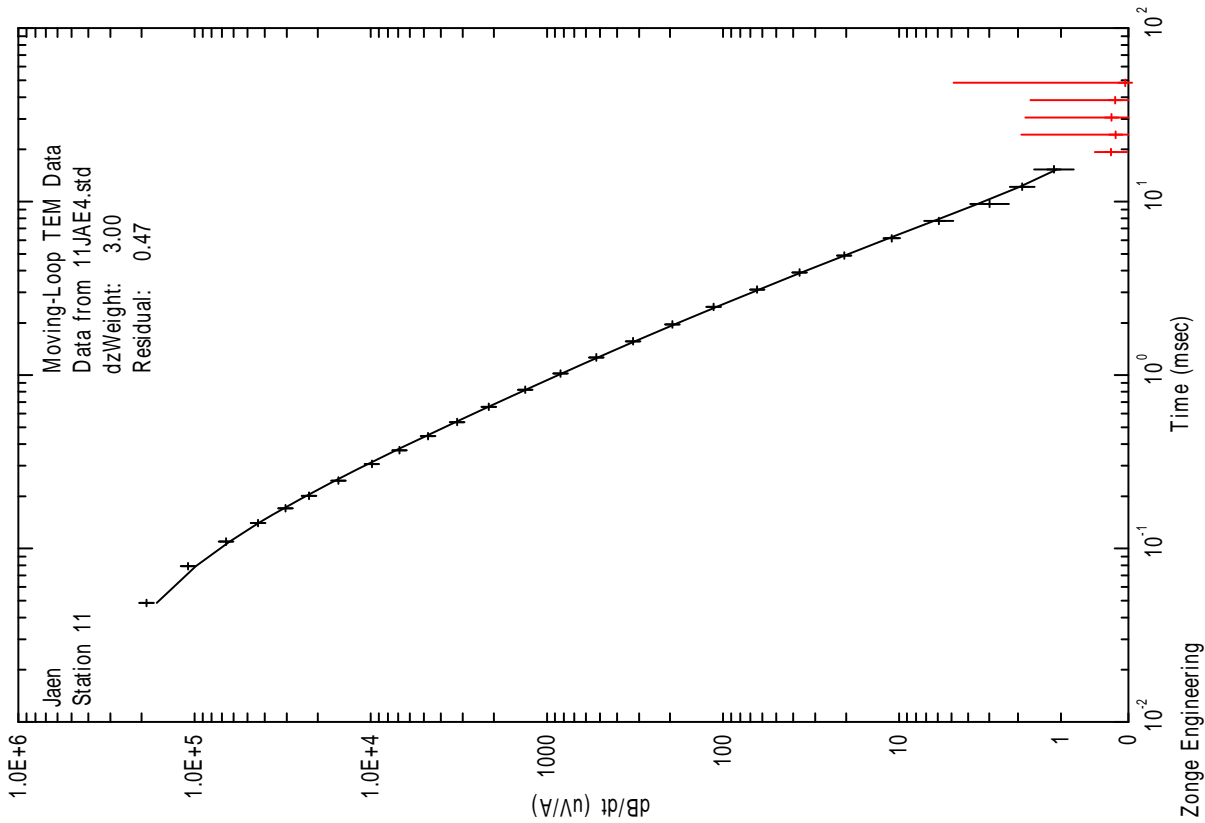
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

24

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-9 (4Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**

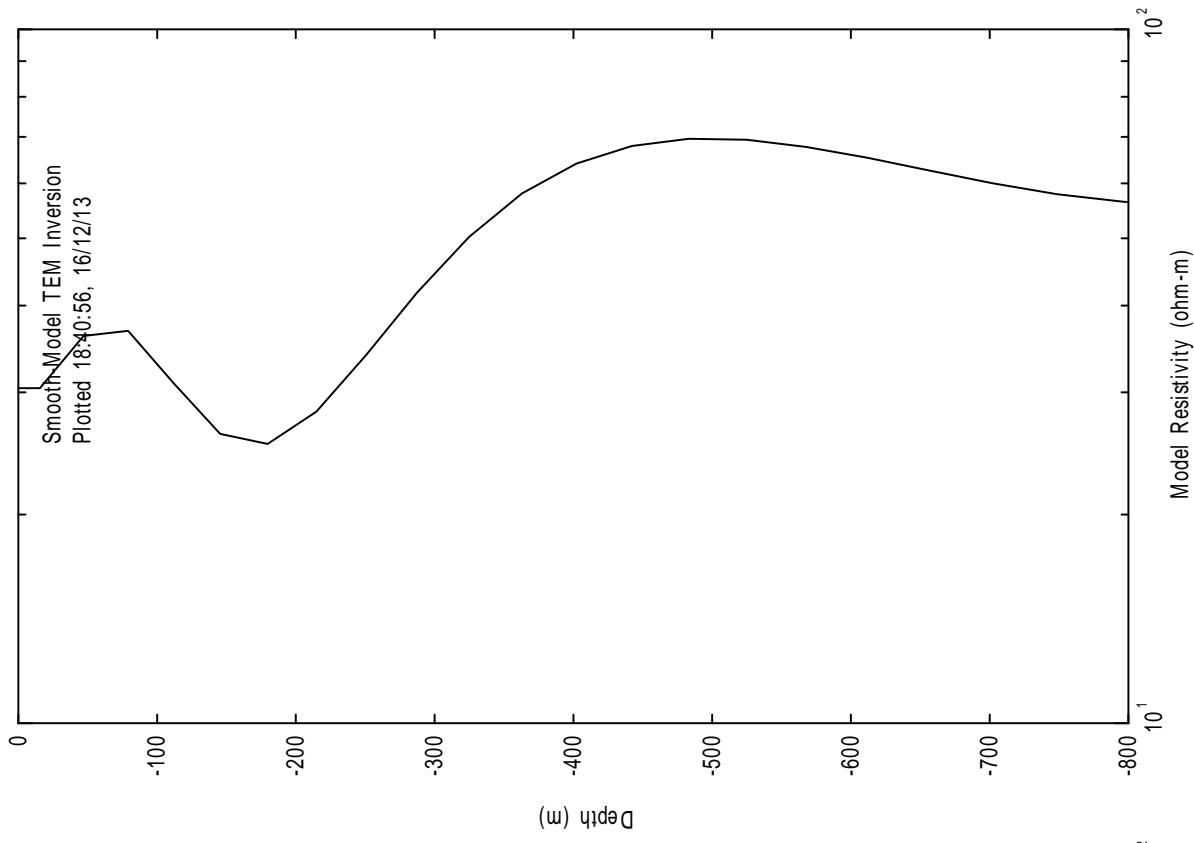
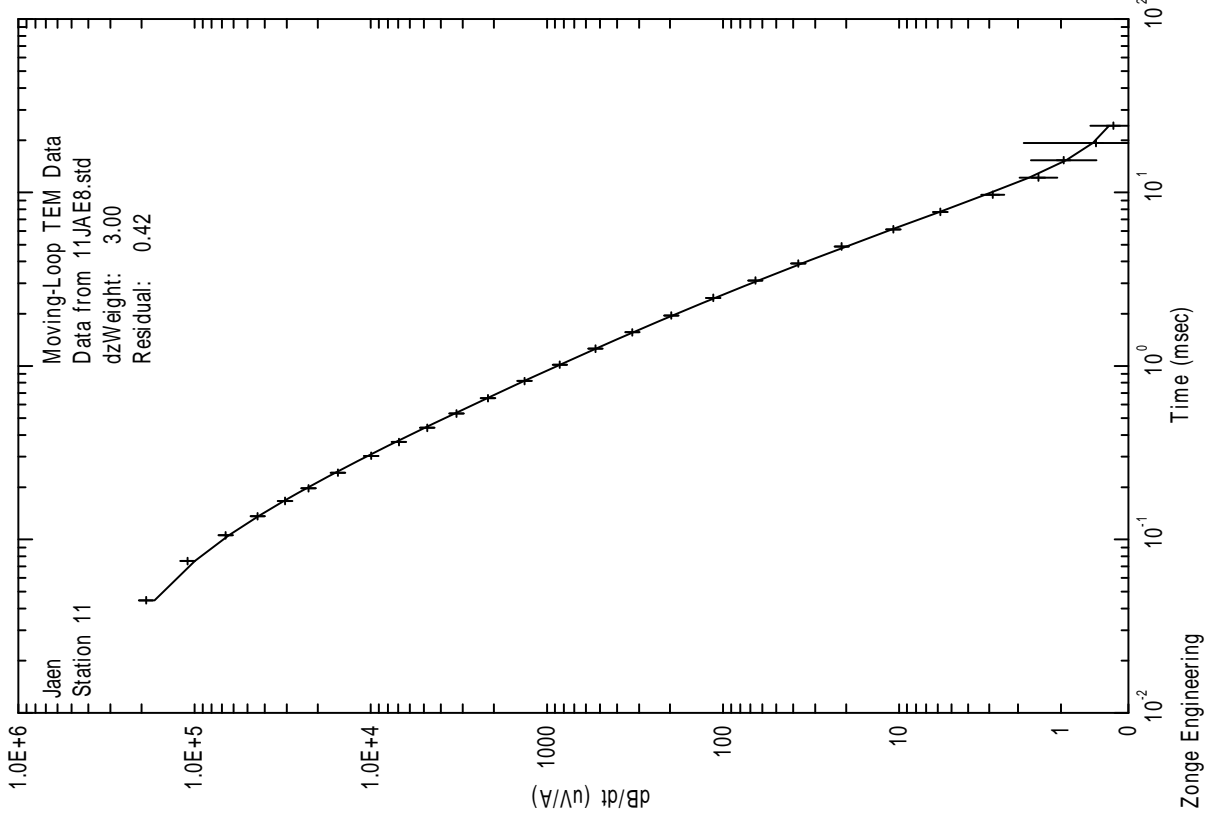


AUTOR:

FECHA: **DICIEMBRE 2013**

PLANO: **25**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-9 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

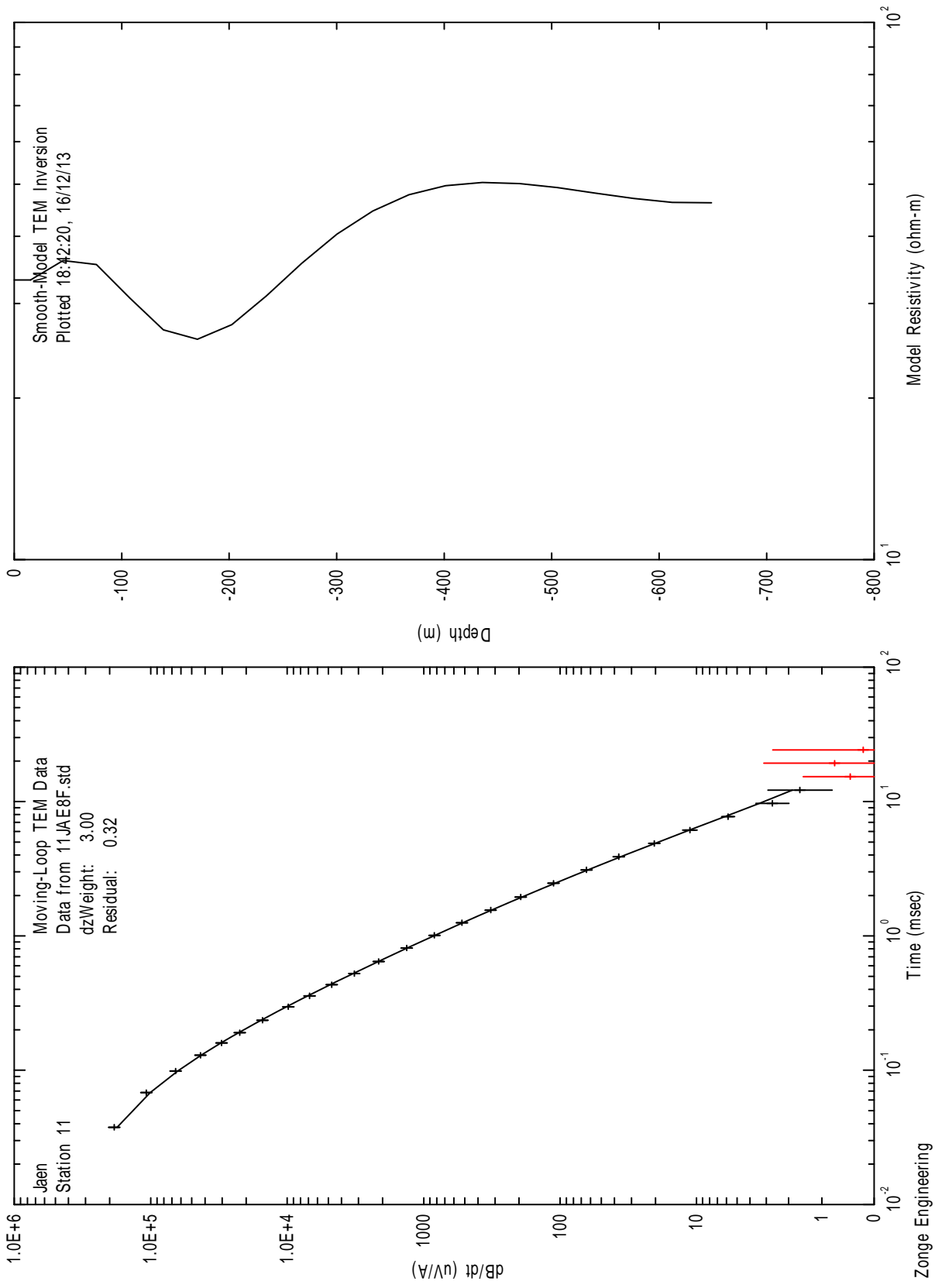


AUTOR:

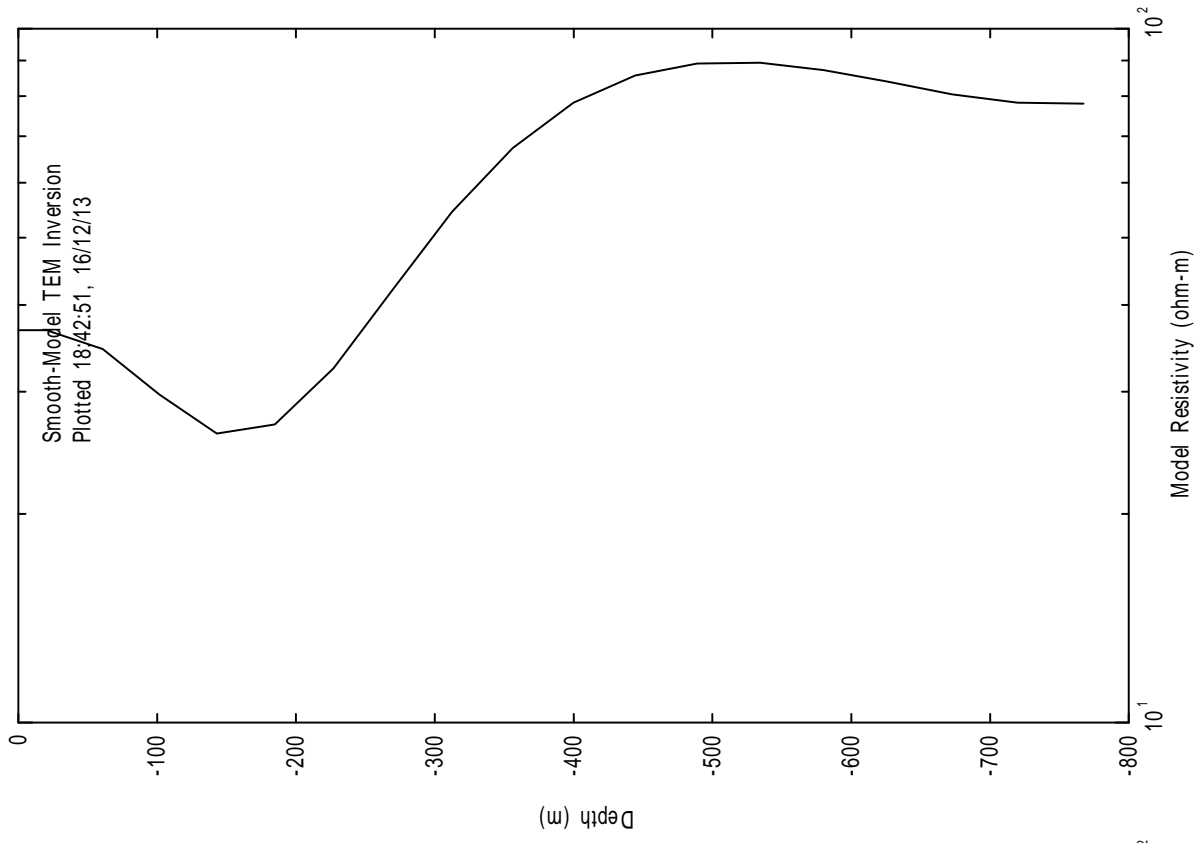
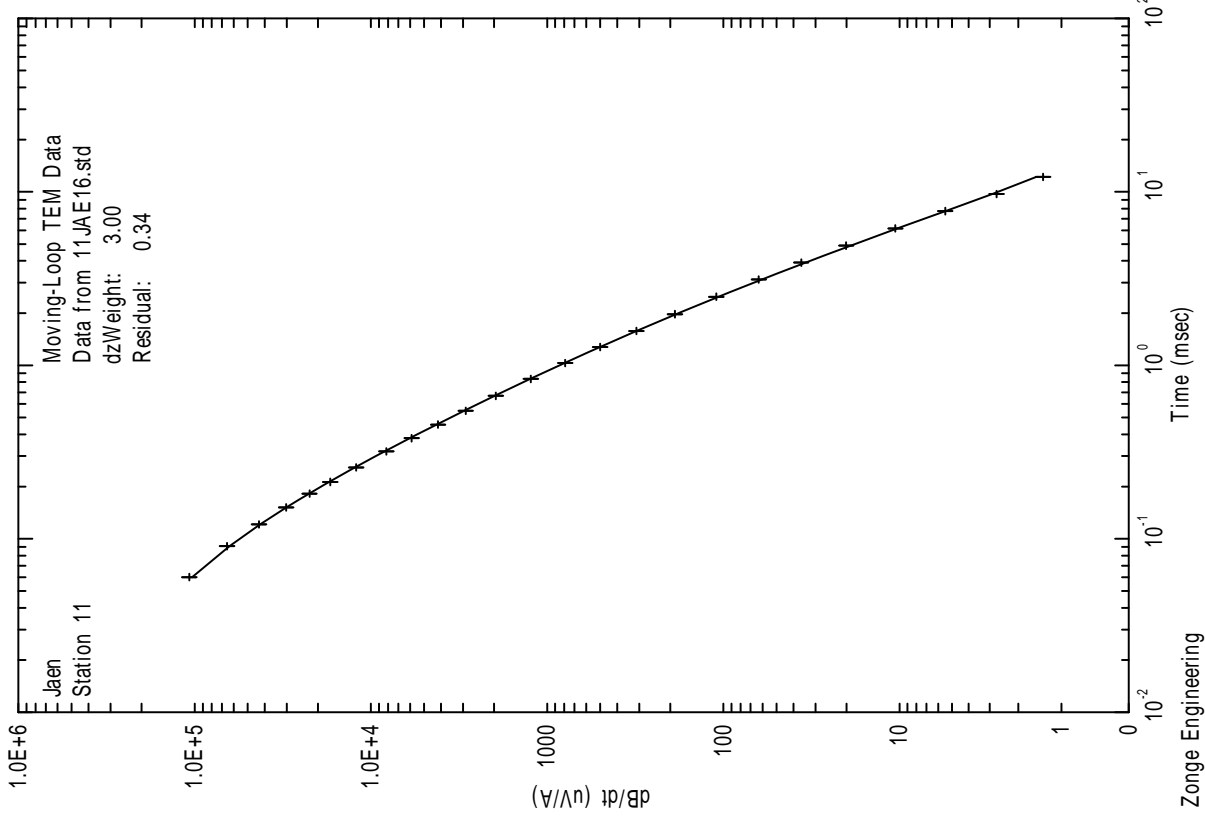
FECHA:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
26

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-9 (8Hz fiit)



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-9 (16Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**

AUTOR:



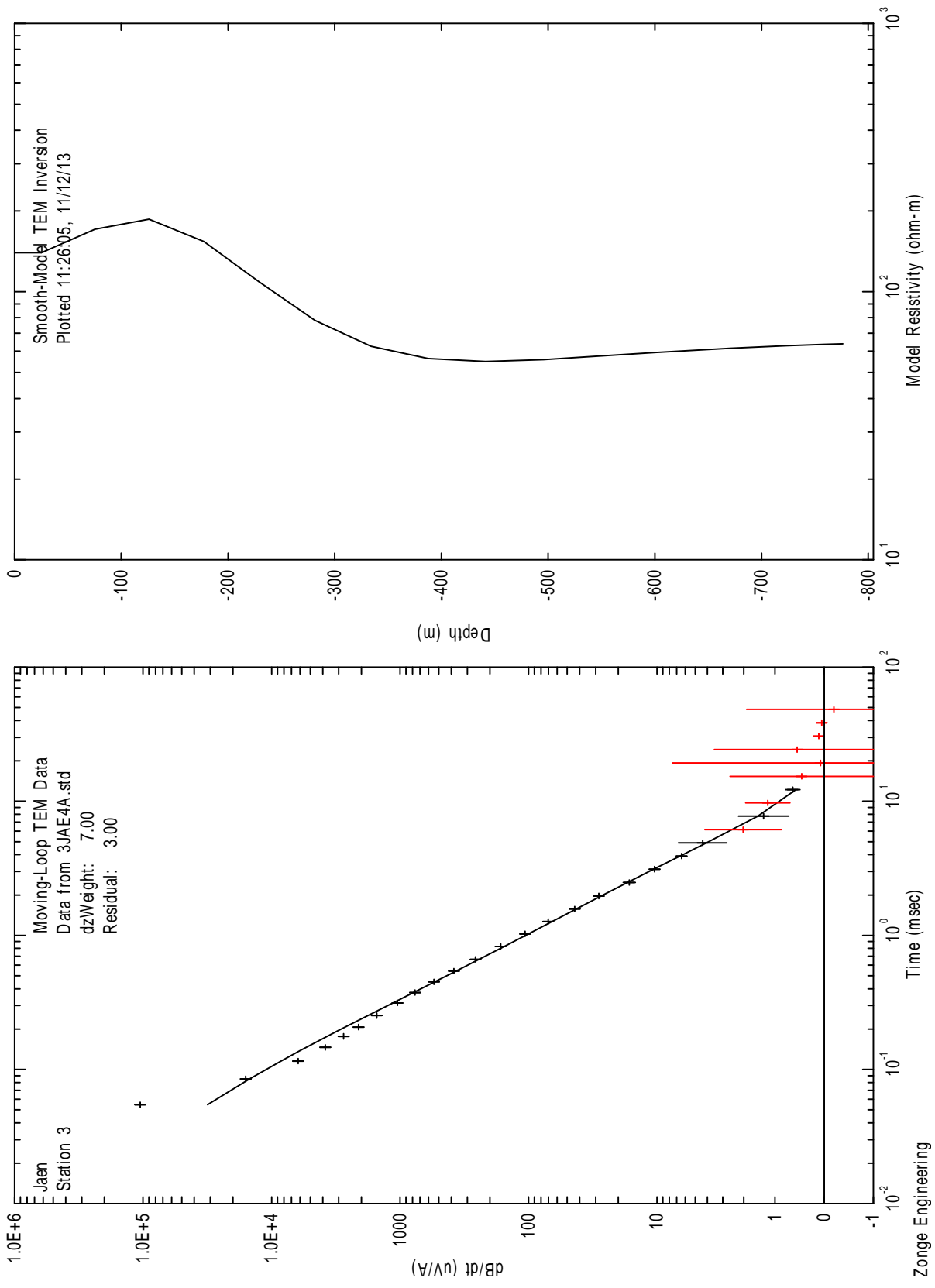
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

28

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-10 (4Hz)



CLIENTE: **IGME**

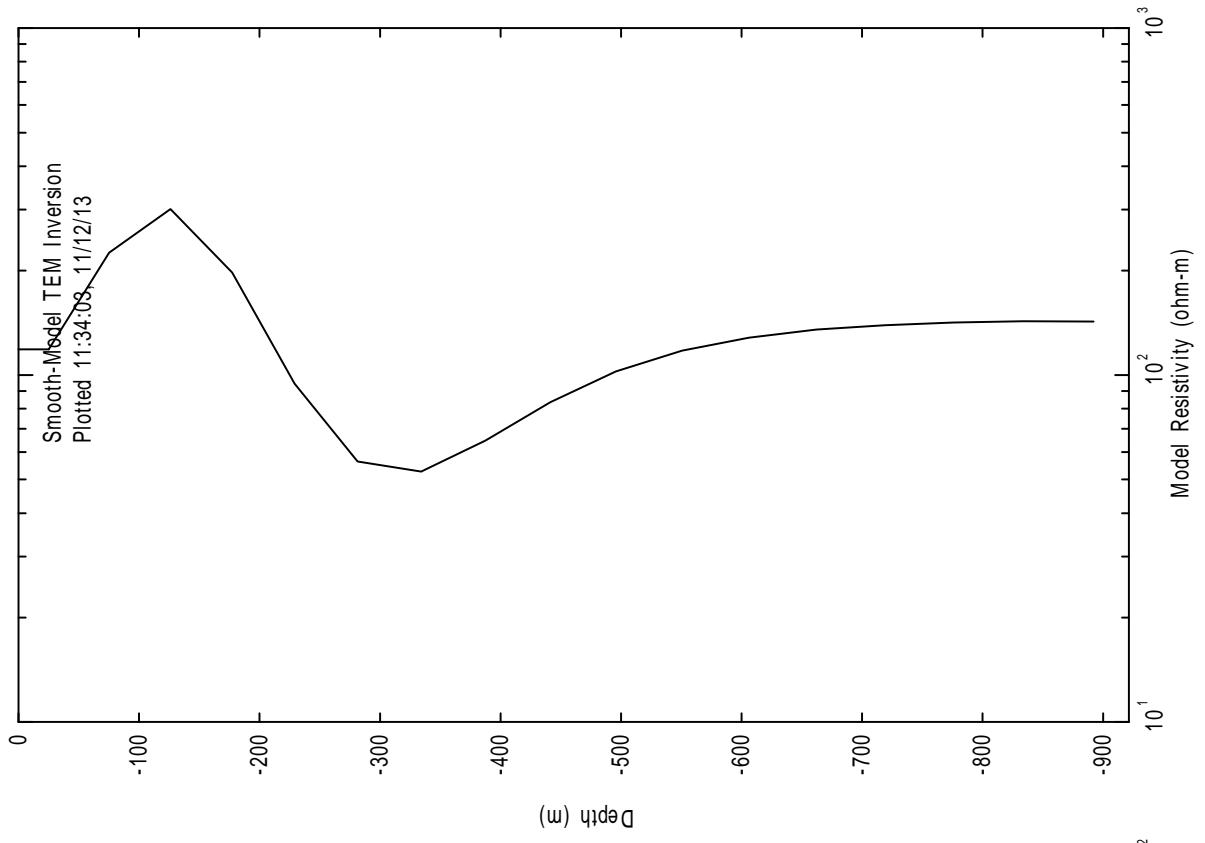
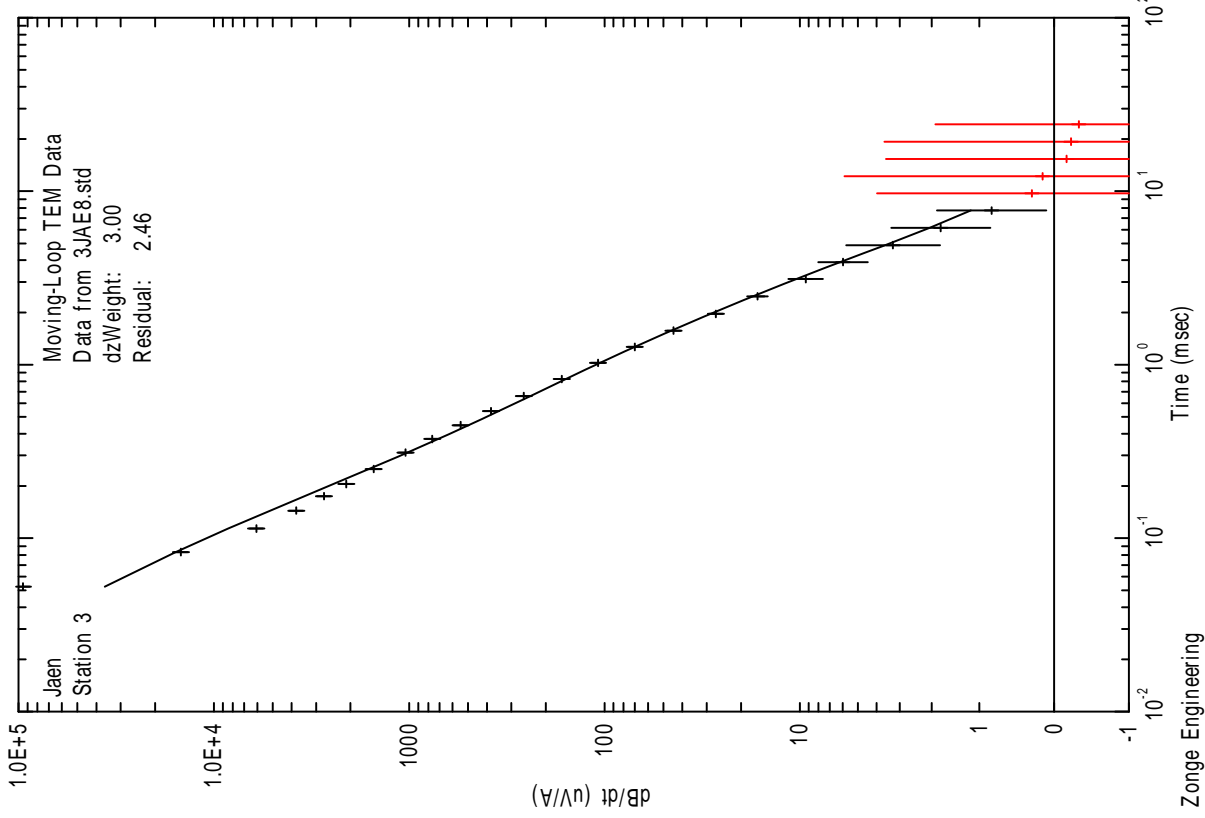
ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**



AUTOR: **DICIEMBRE 2013**

PLANO: **29**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-10 (8Hz int 1)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

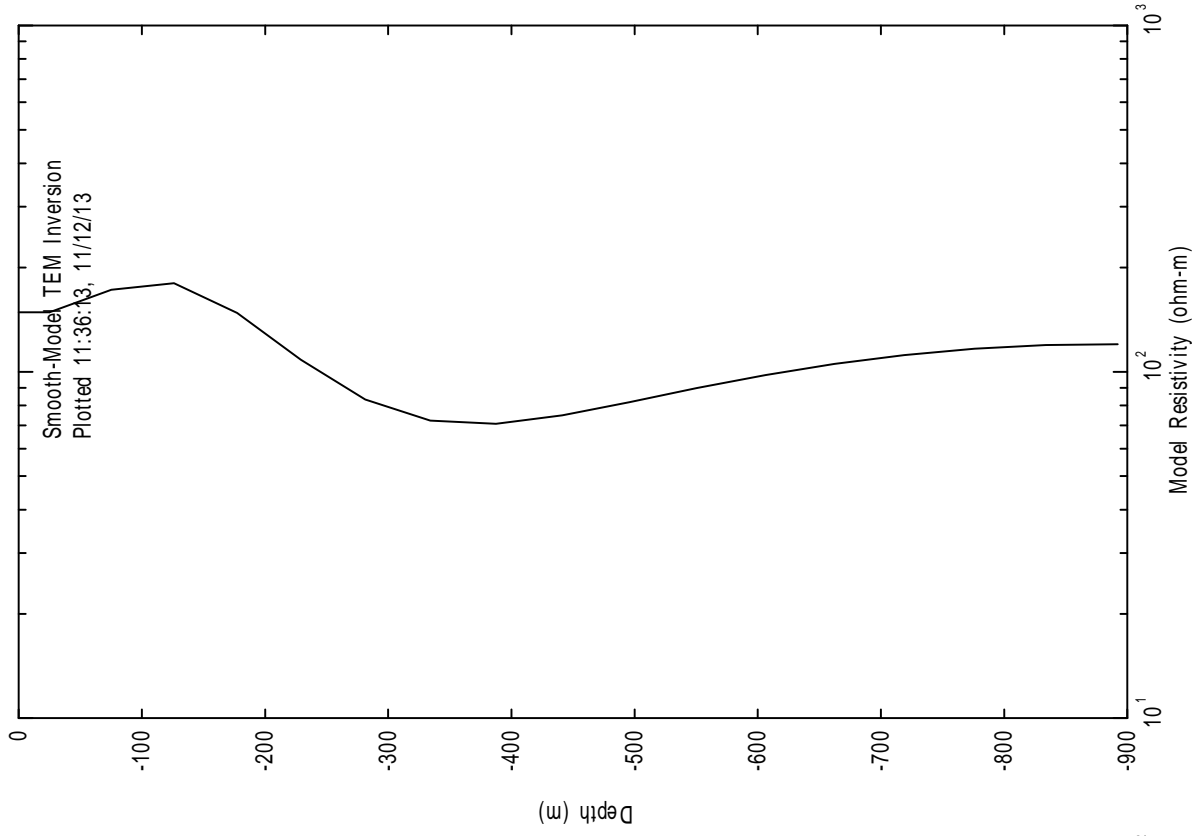
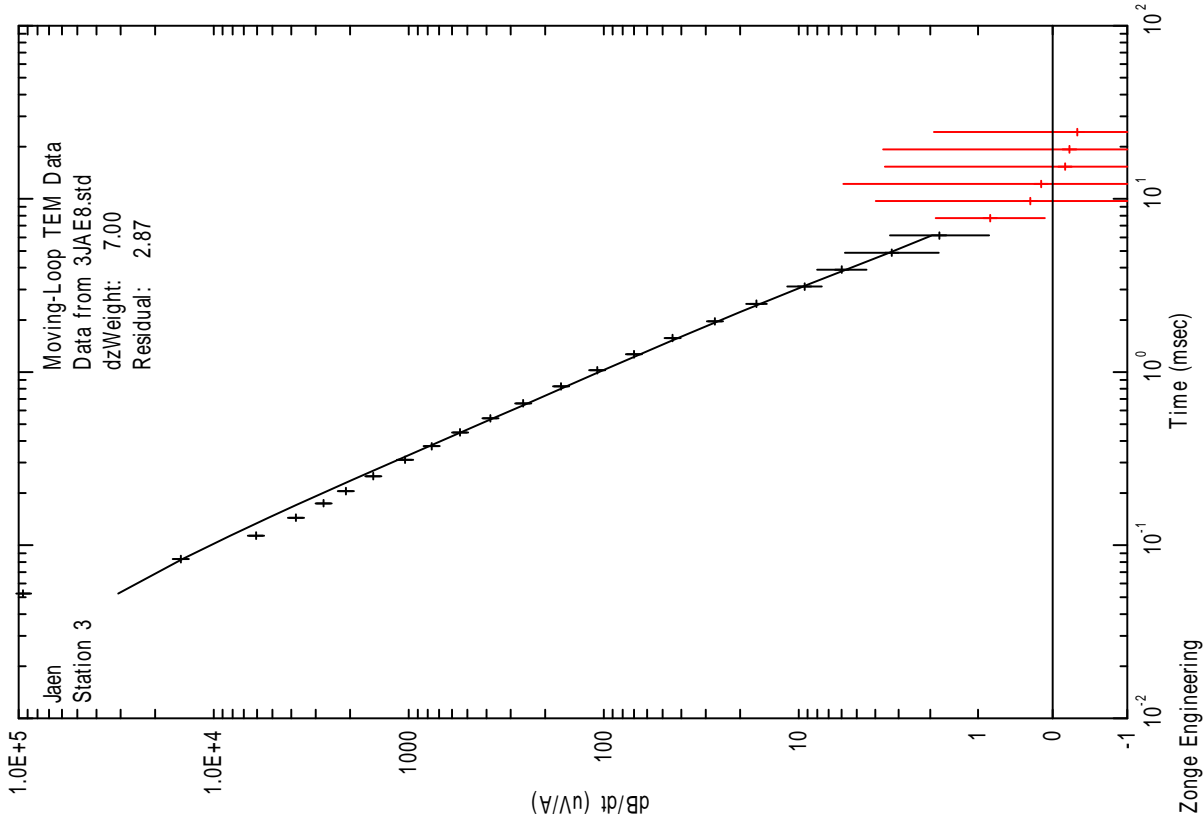
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

30

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-10 (8Hz int 2)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



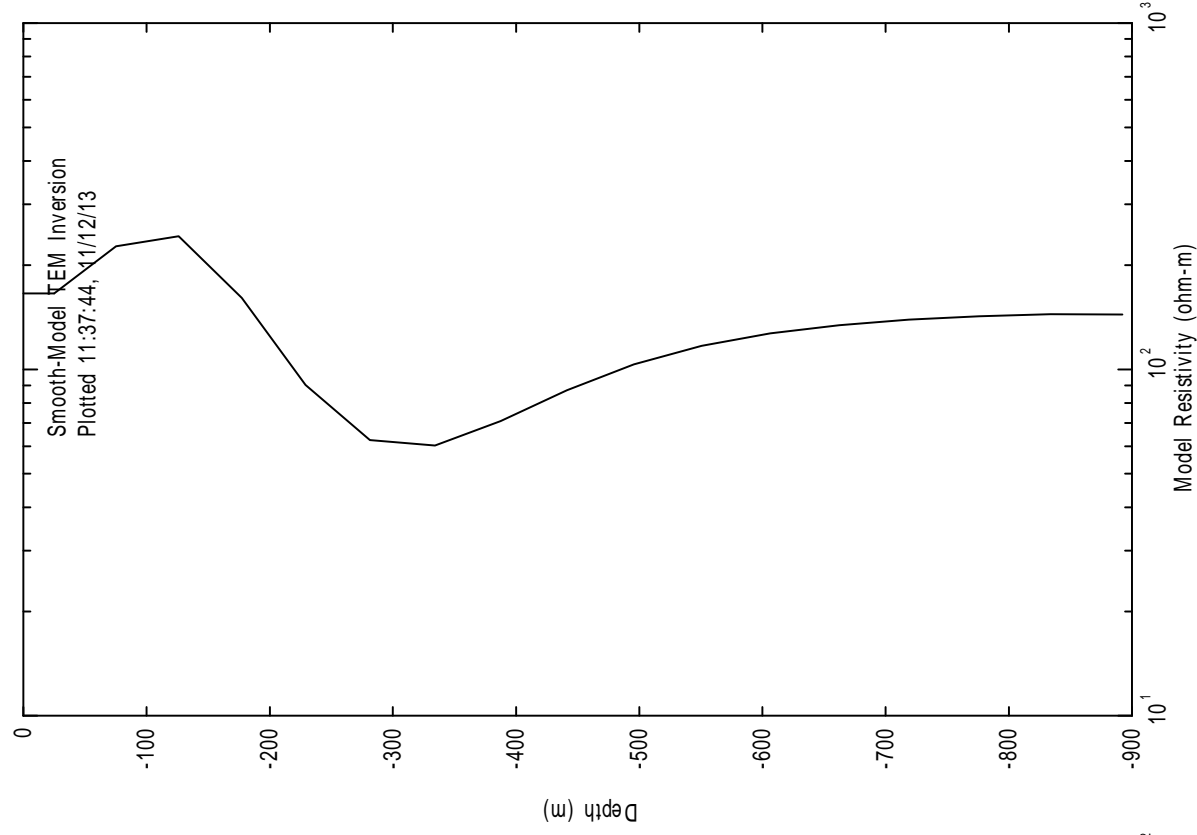
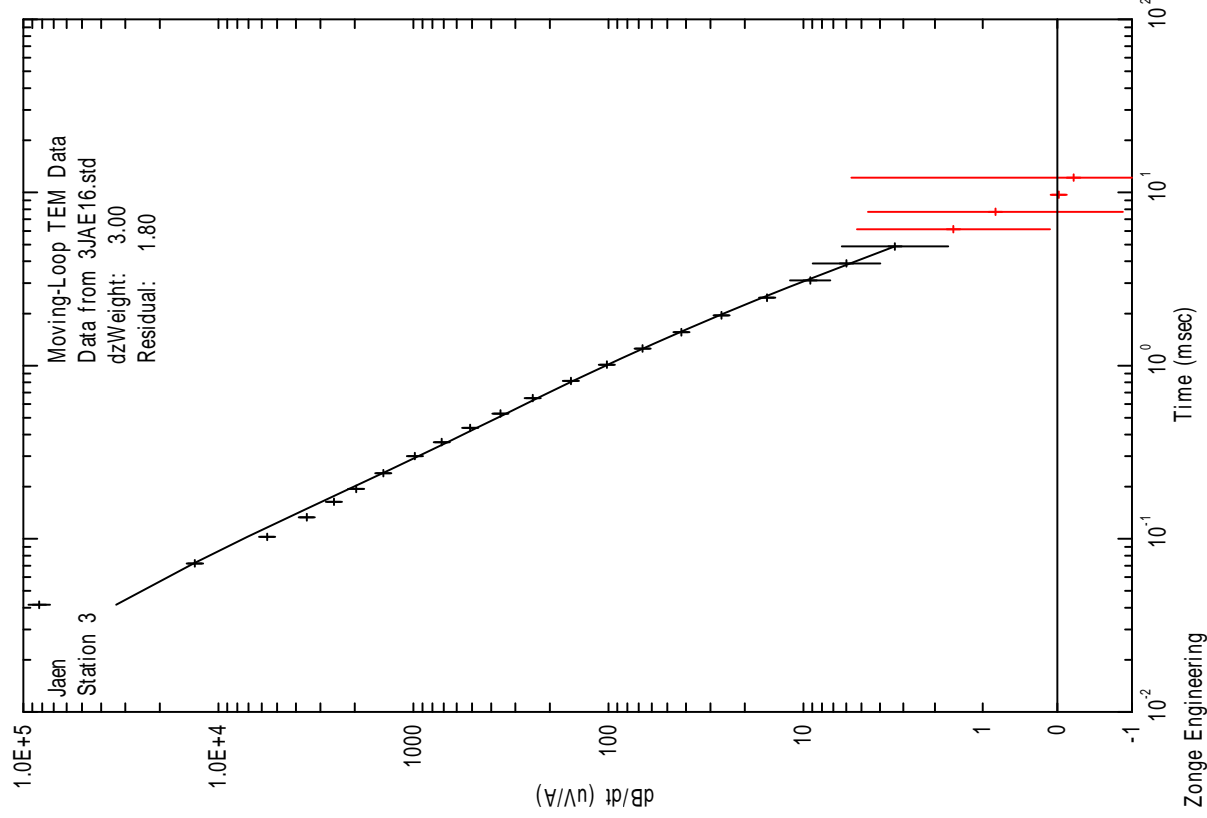
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

31

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-10 (16Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



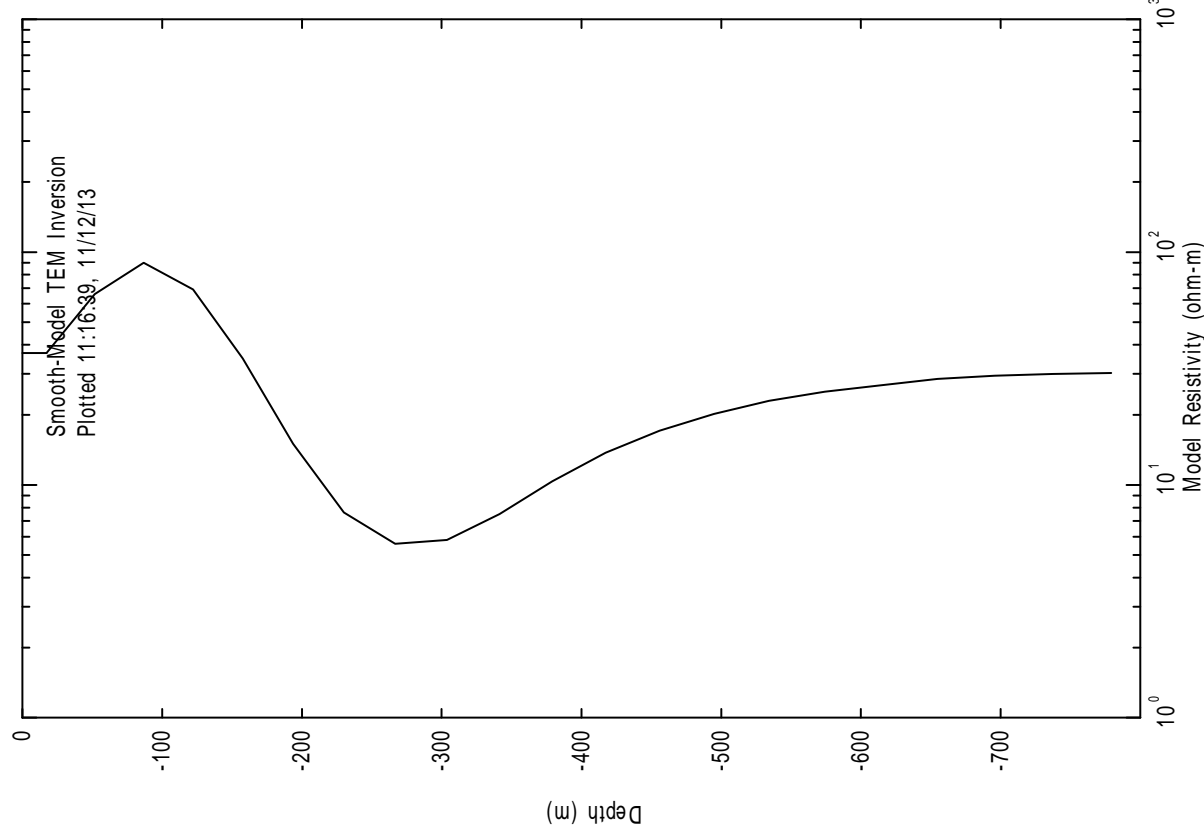
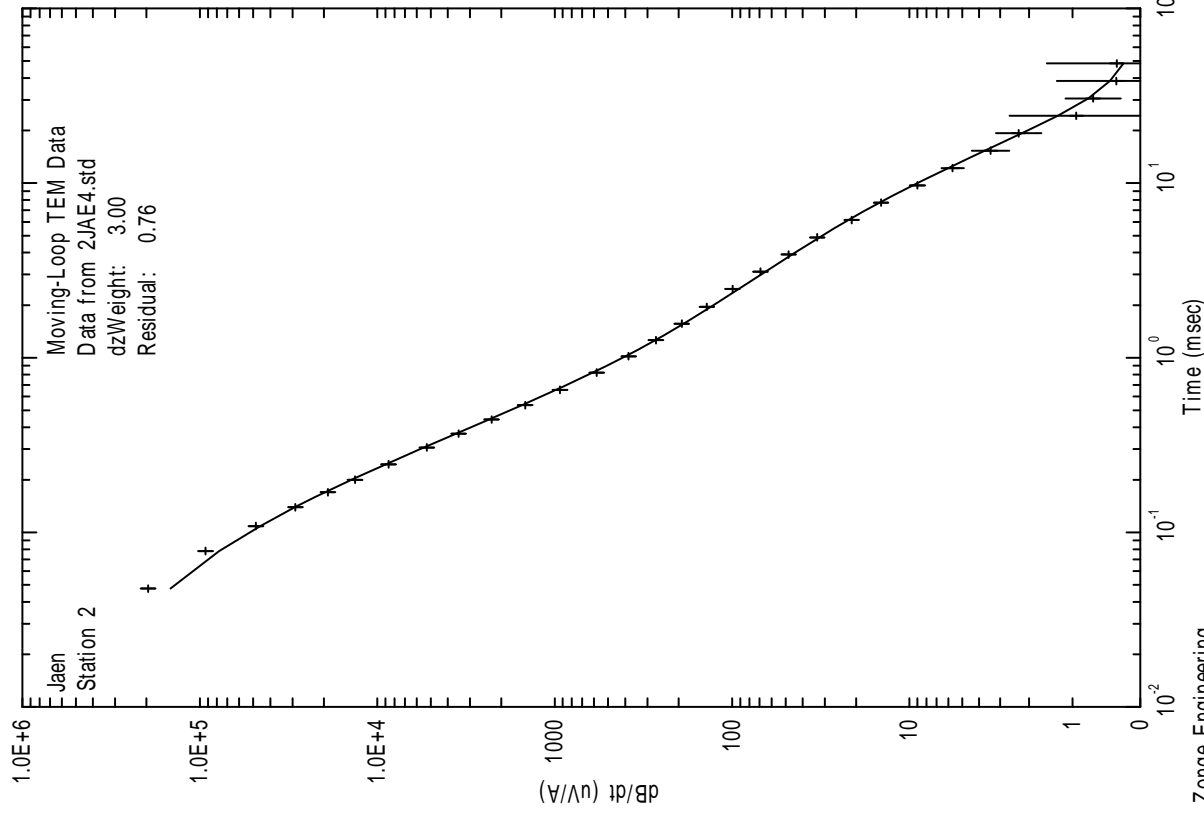
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

32

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-11 (4Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



FECHA:

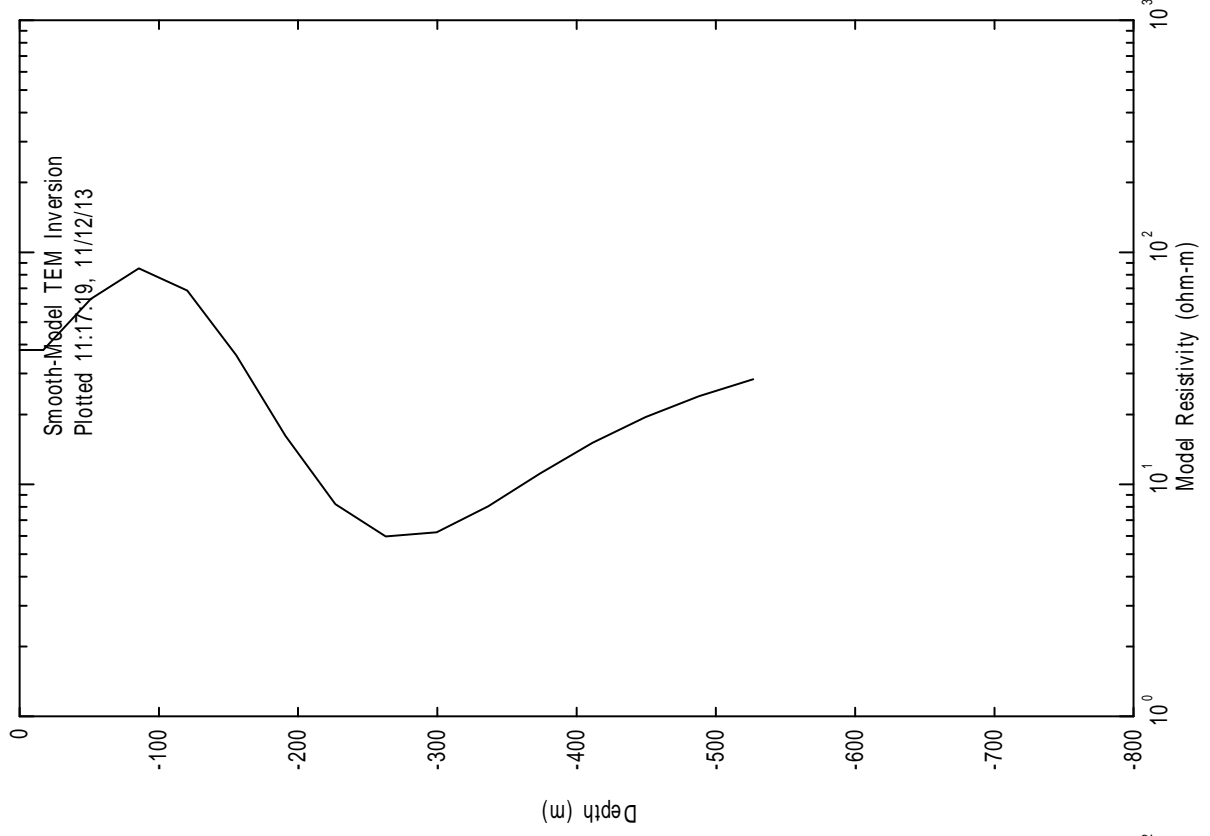
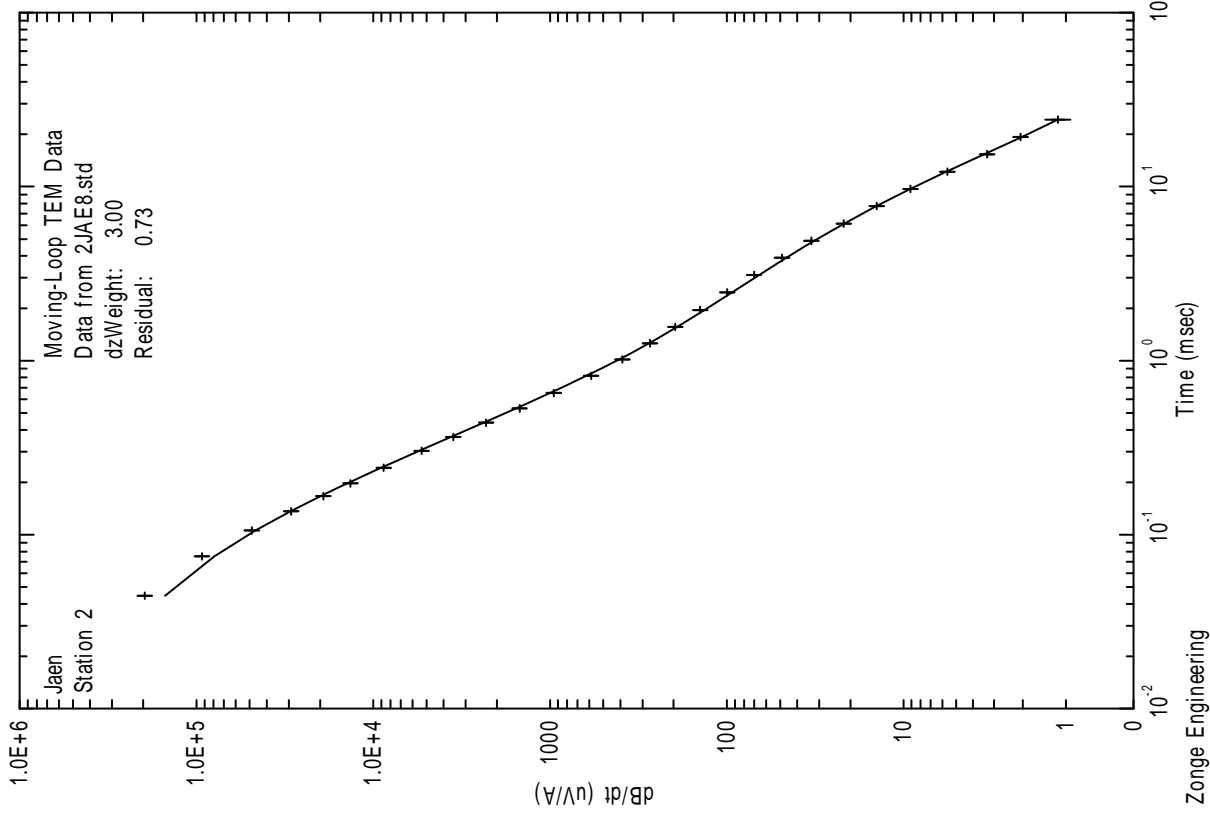
DICIEMBRE 2013

PLANO:

33

Zonge Engineering

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-11 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

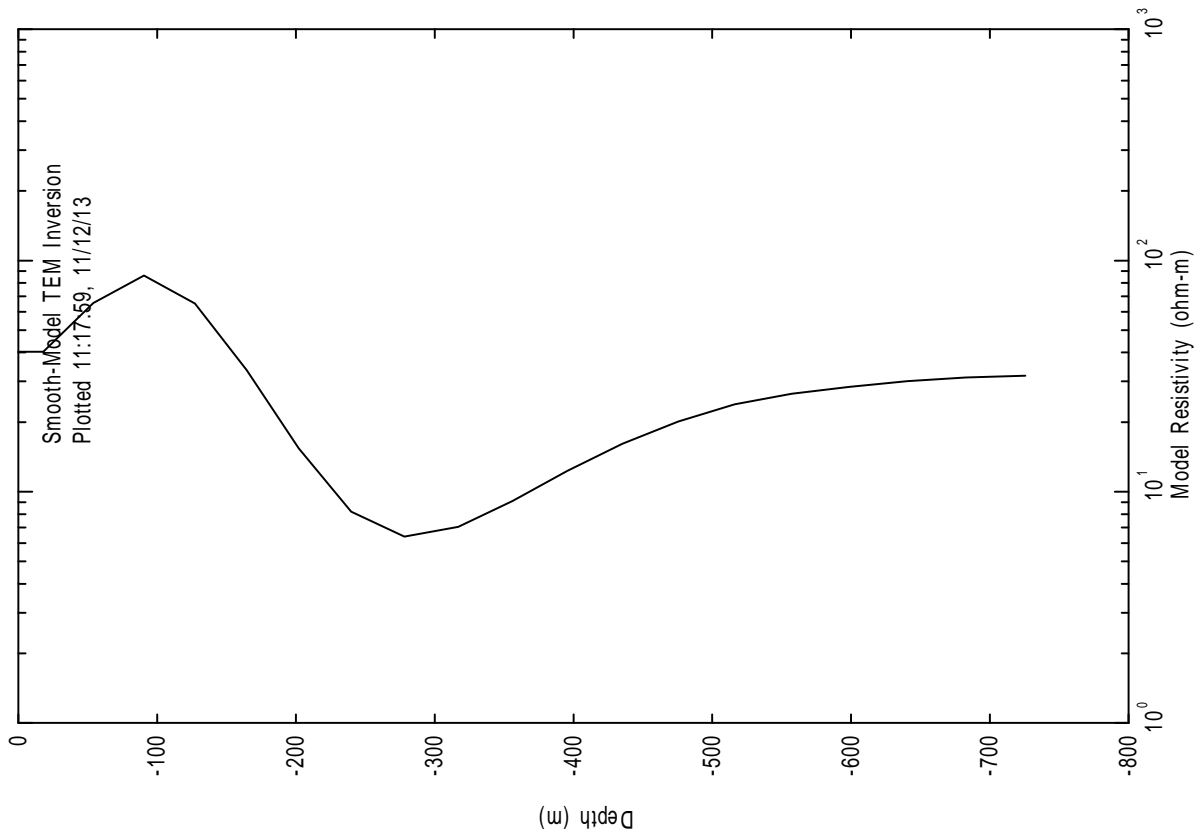
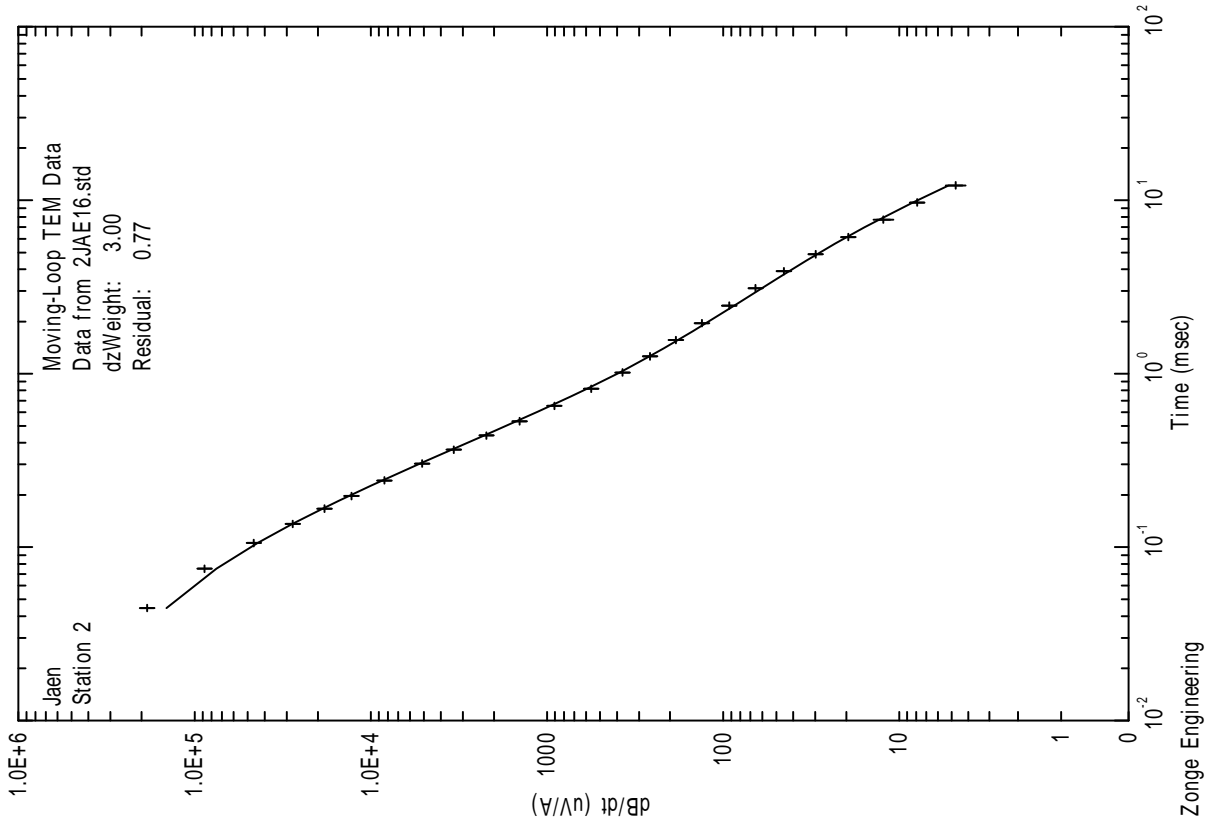


AUTOR:

FECHA:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
34

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-11 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

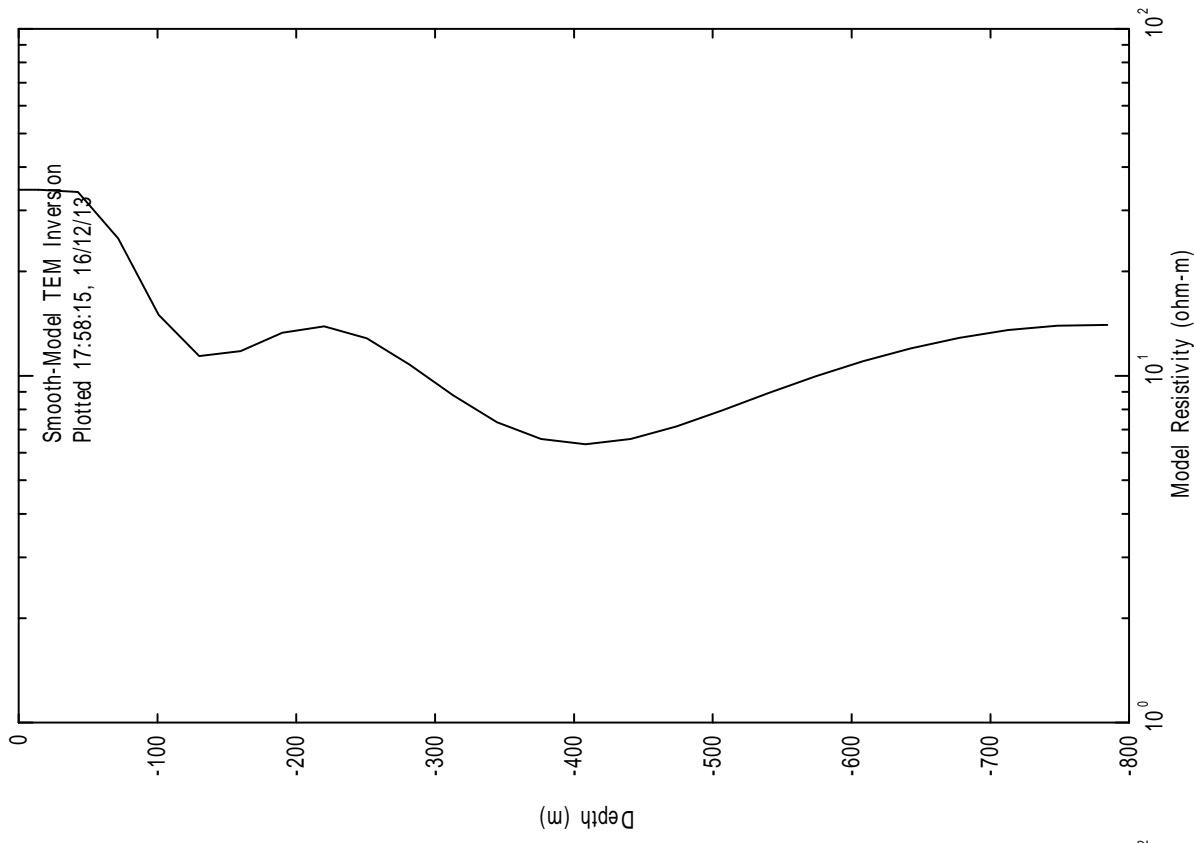
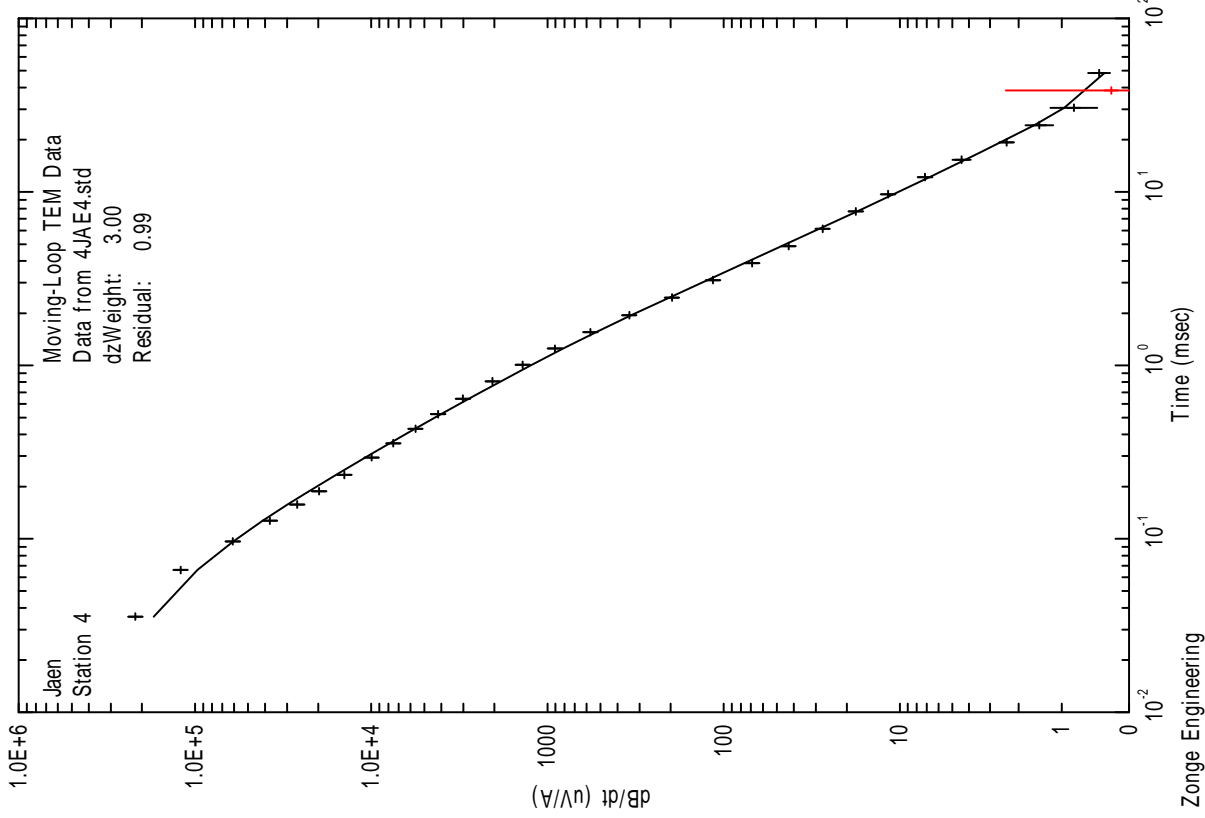
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

35

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-12 (4Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
 CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

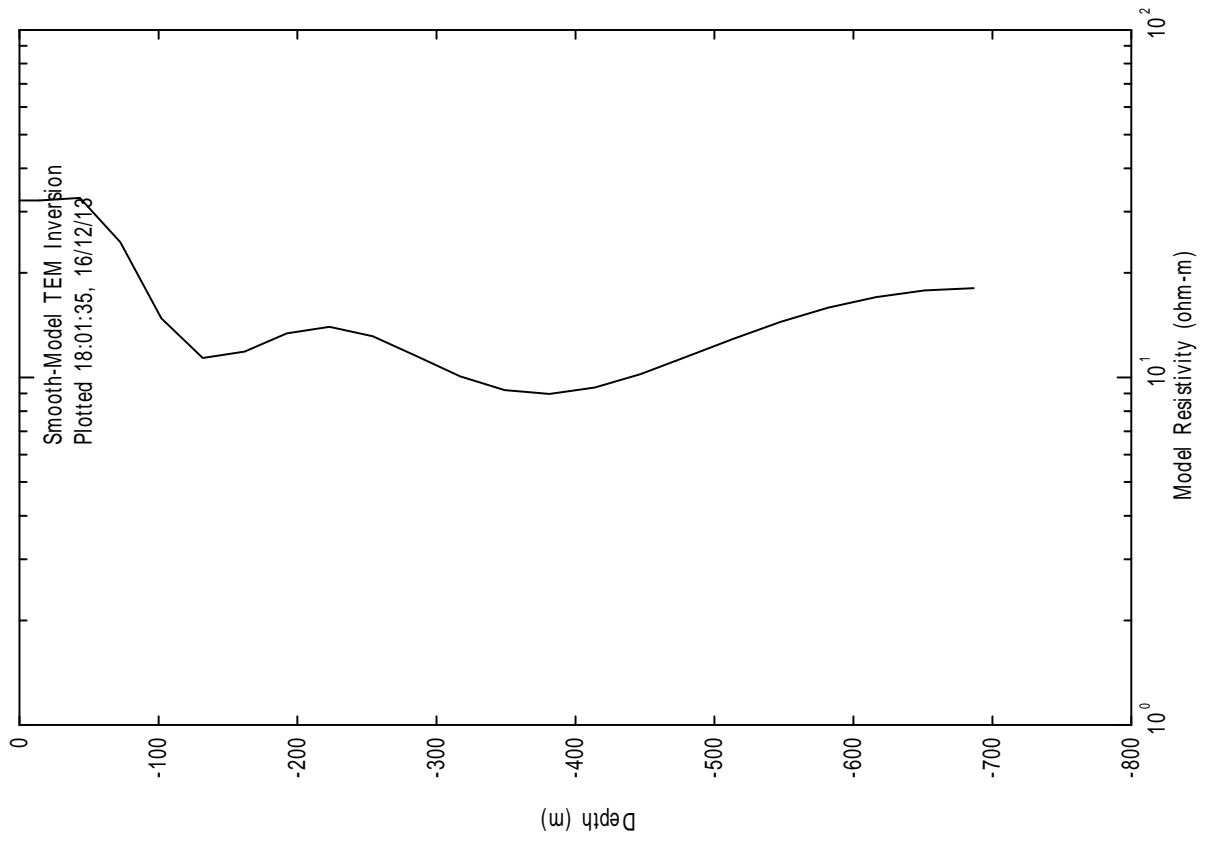
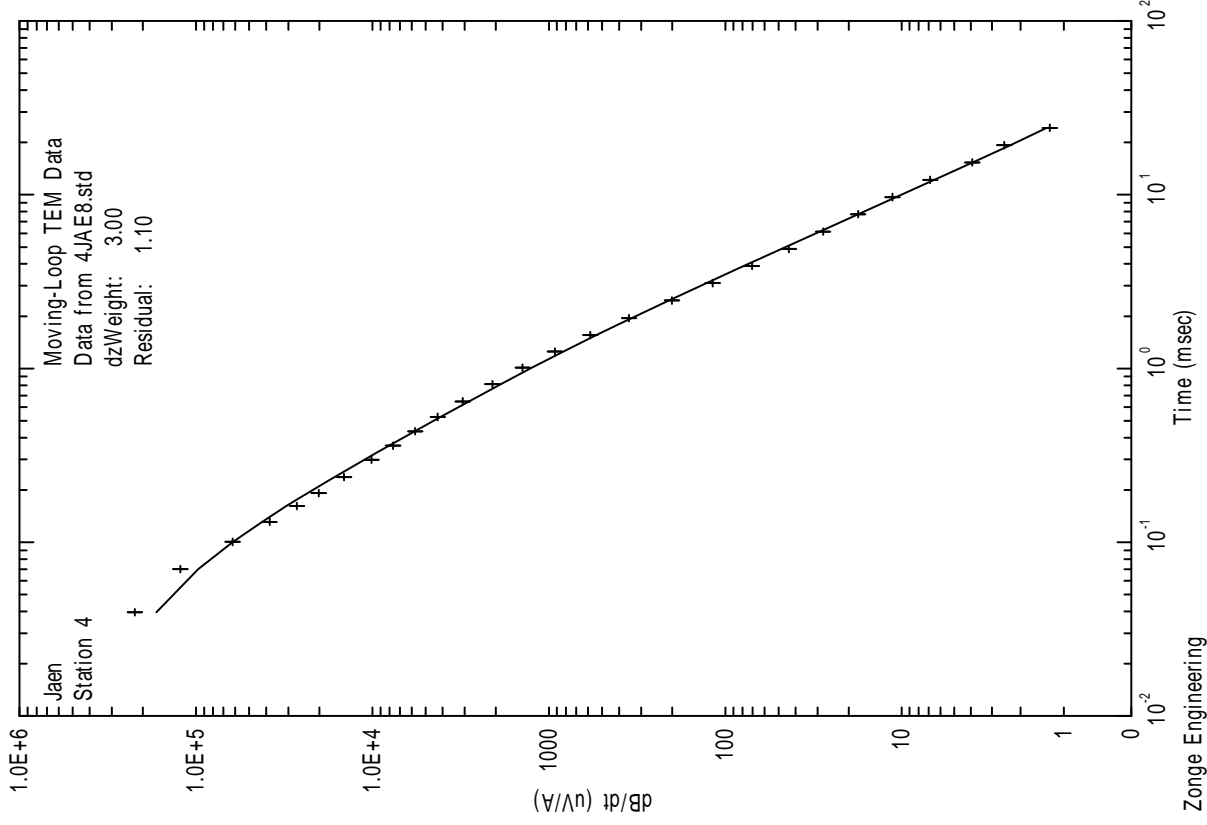
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

36

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-12 (8Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



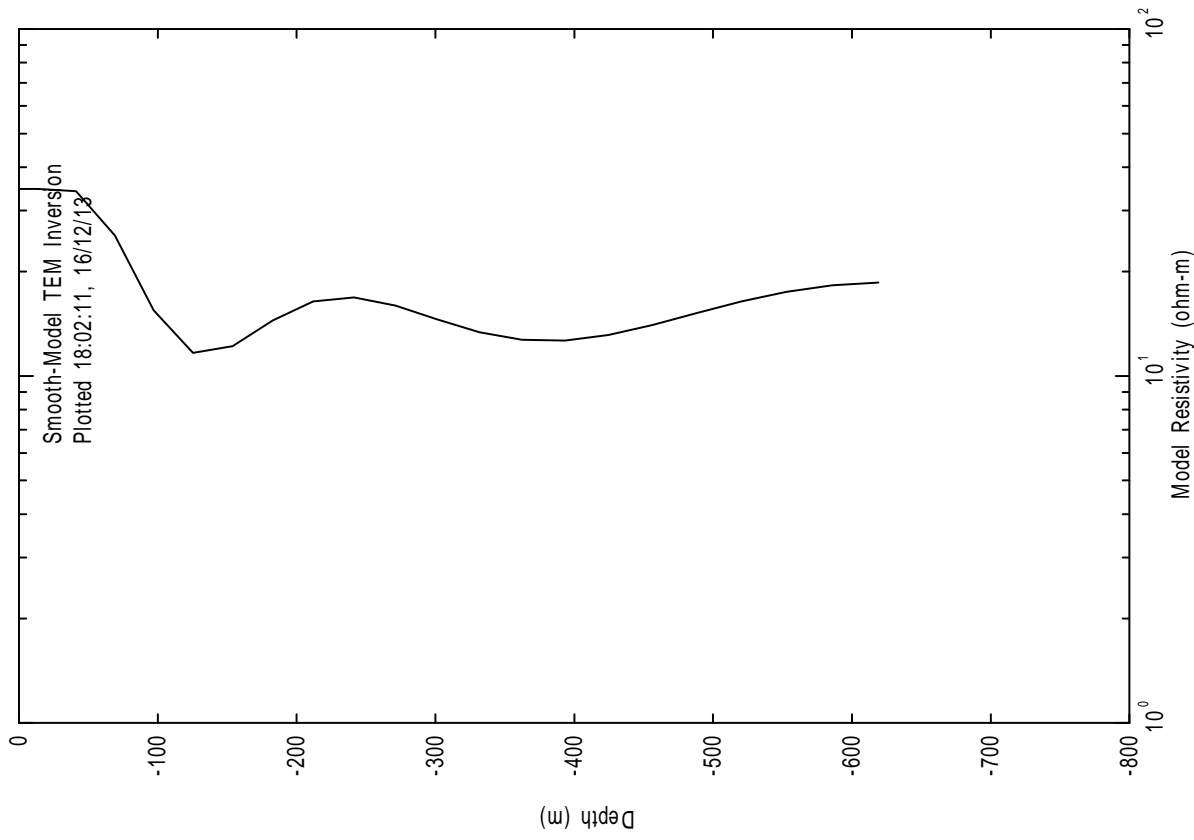
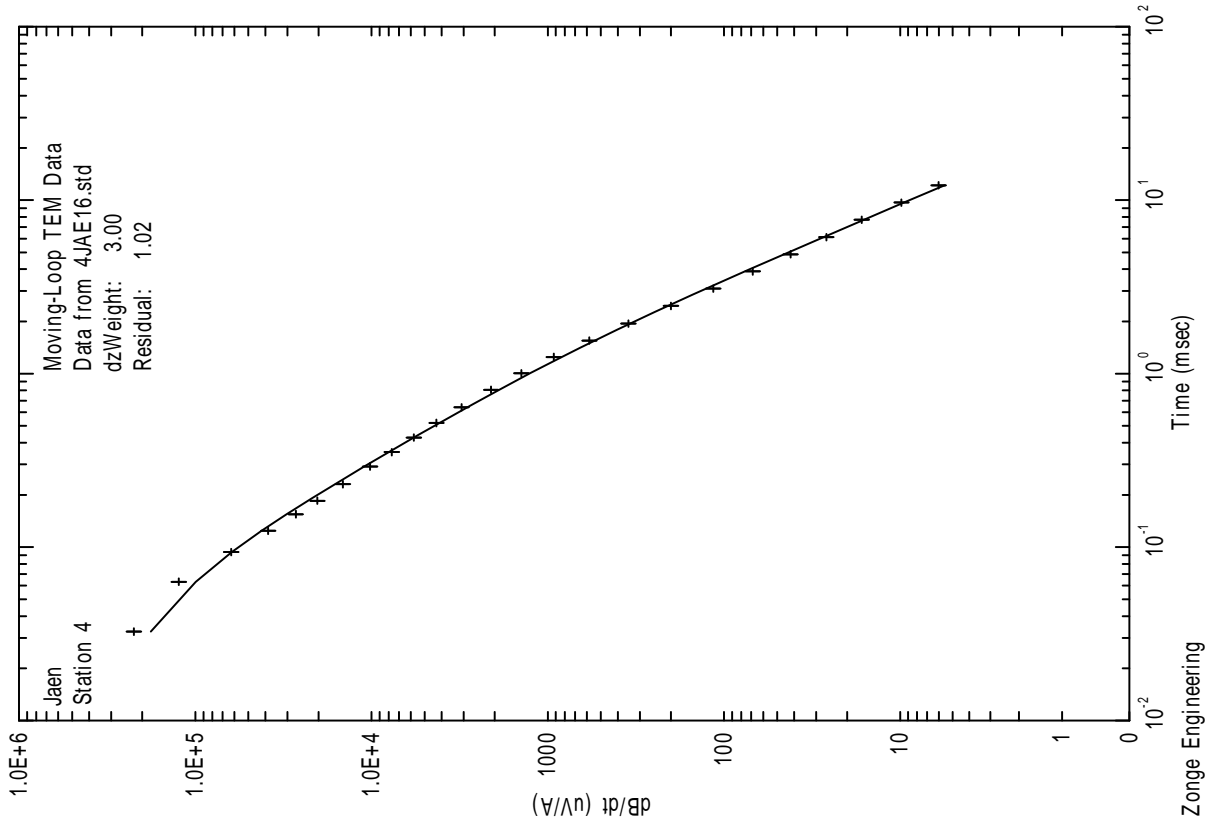
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

37

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-12 (16Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

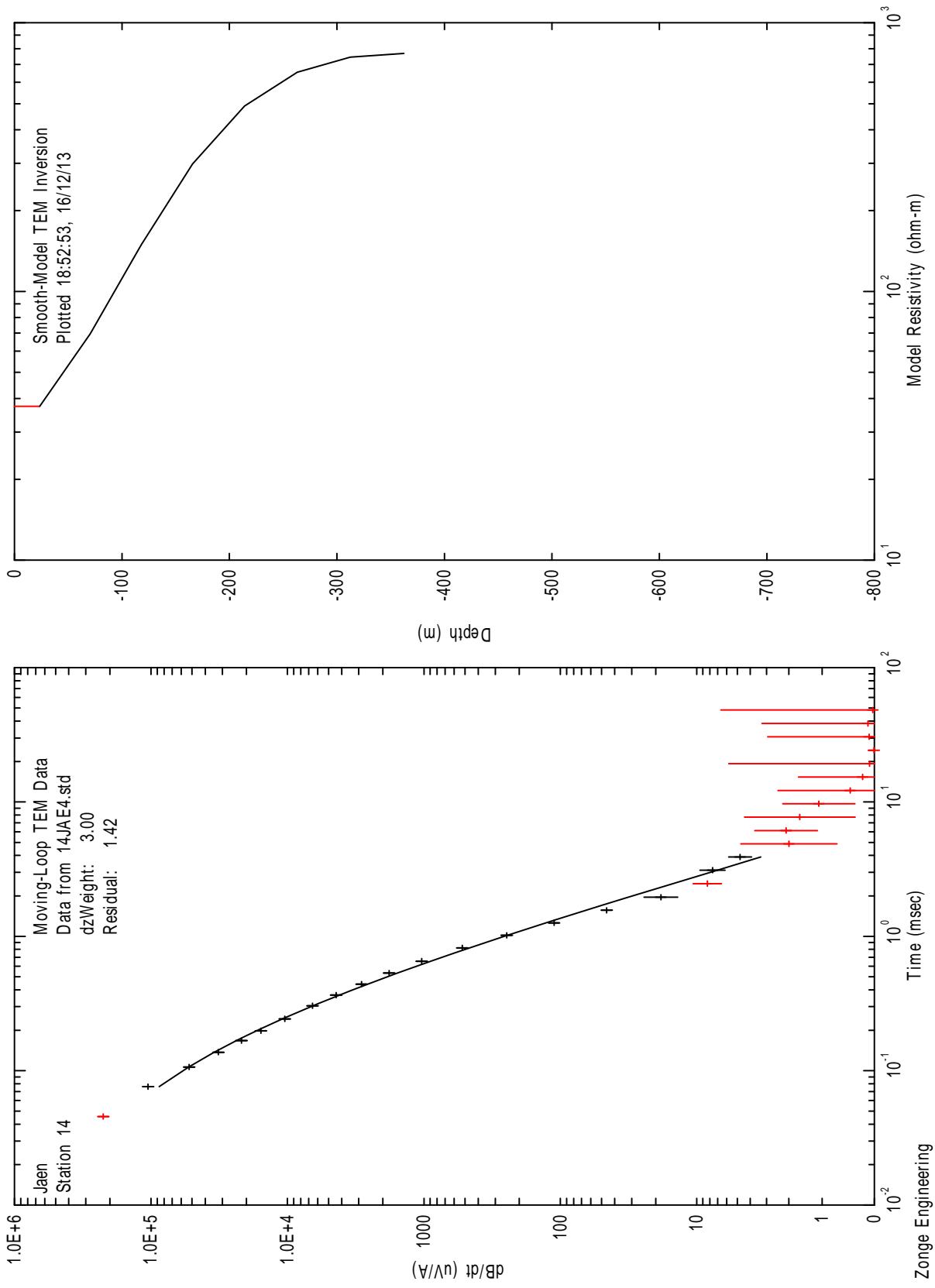
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

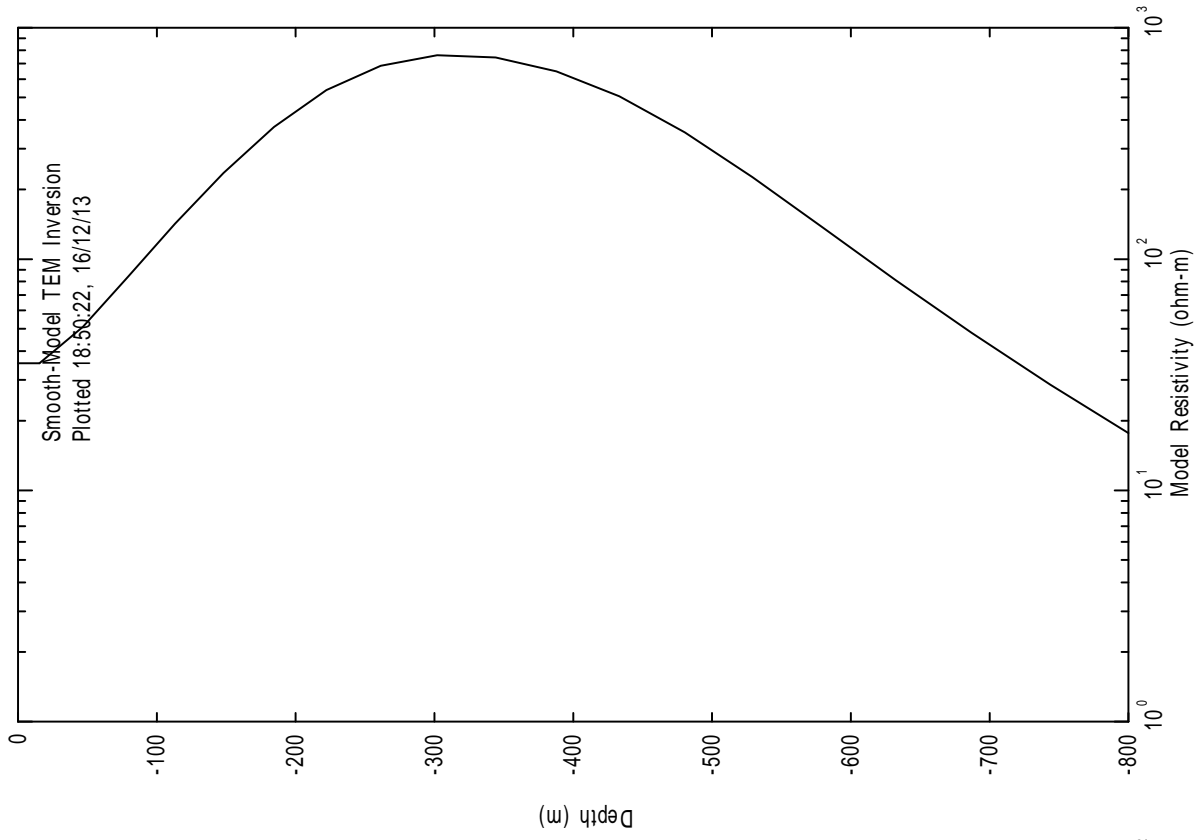
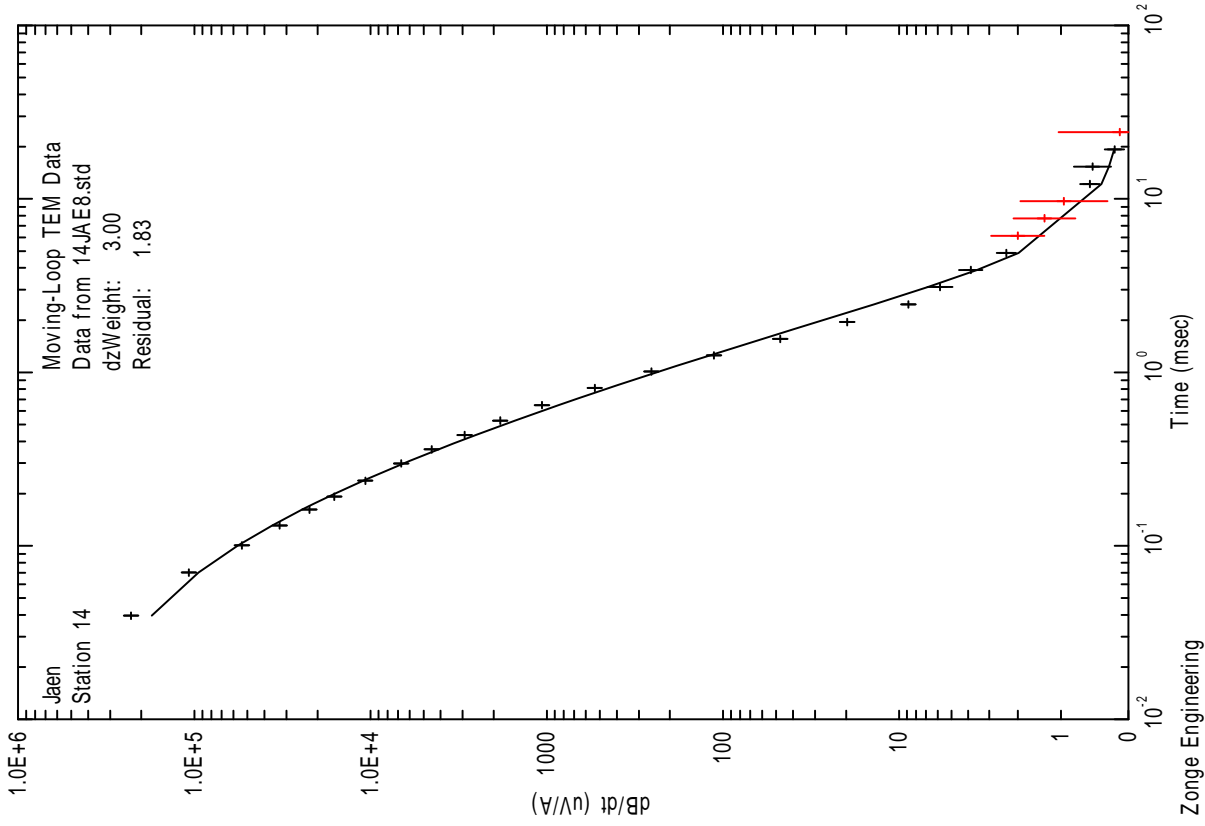
38

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-1 (4Hz)



CLIENTE:	IGME	ESTUDIO:	CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN	AUTOR:		FECHA:	DICIEMBRE 2013	PLANO:	39
----------	-------------	----------	---	--------	--	--------	----------------	--------	-----------

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-1 (8Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



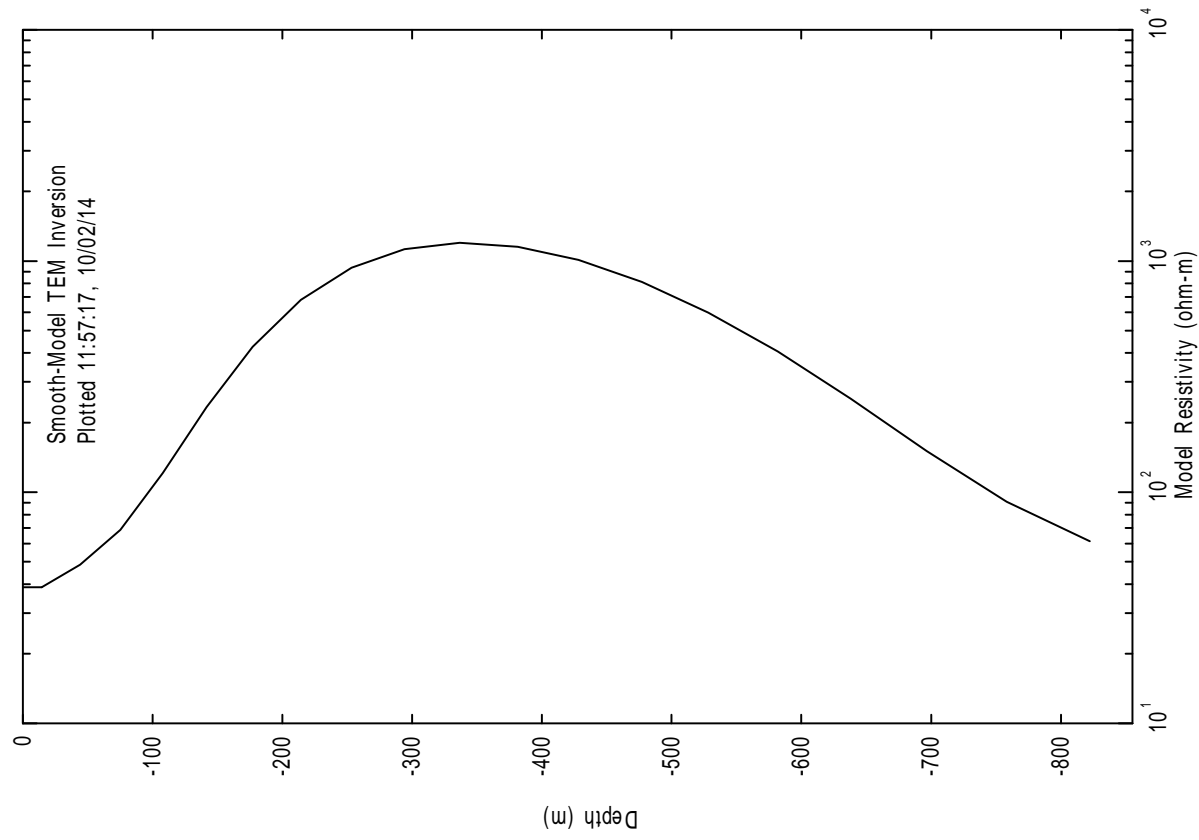
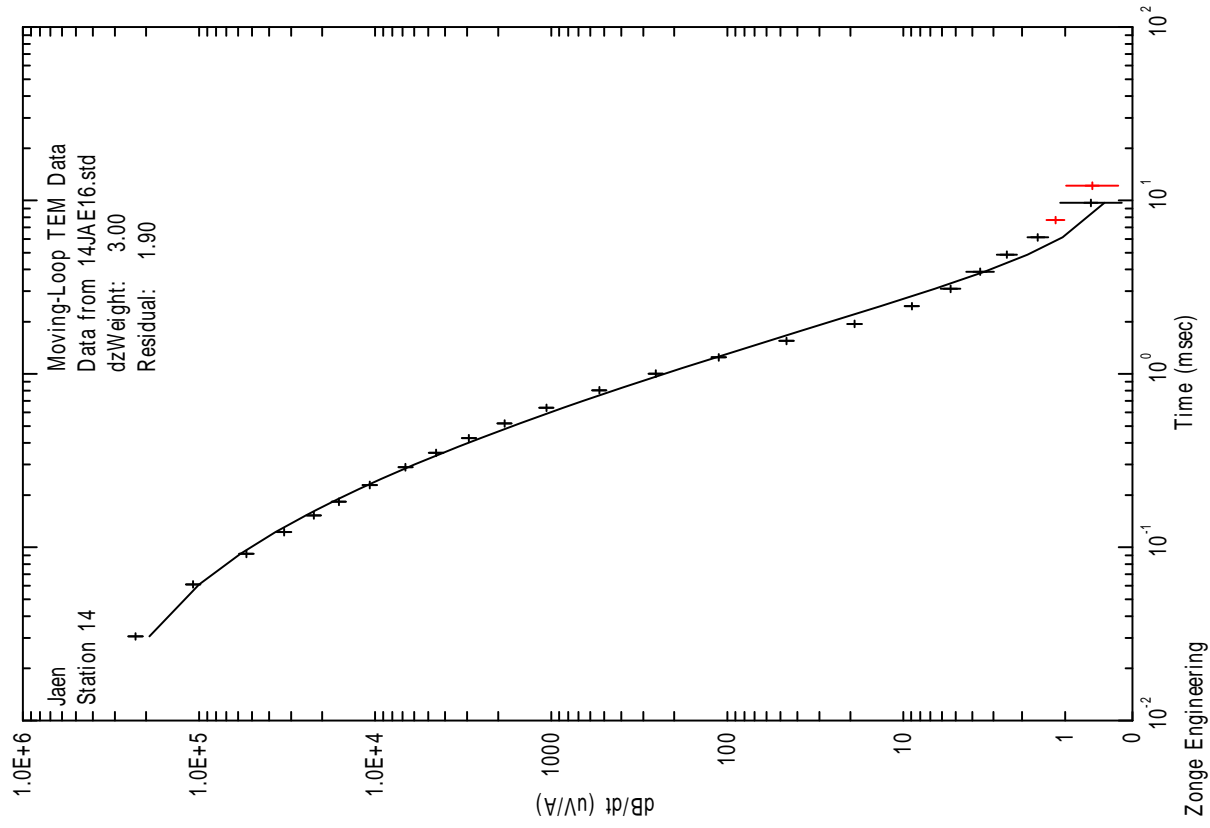
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

40

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-1 (16Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



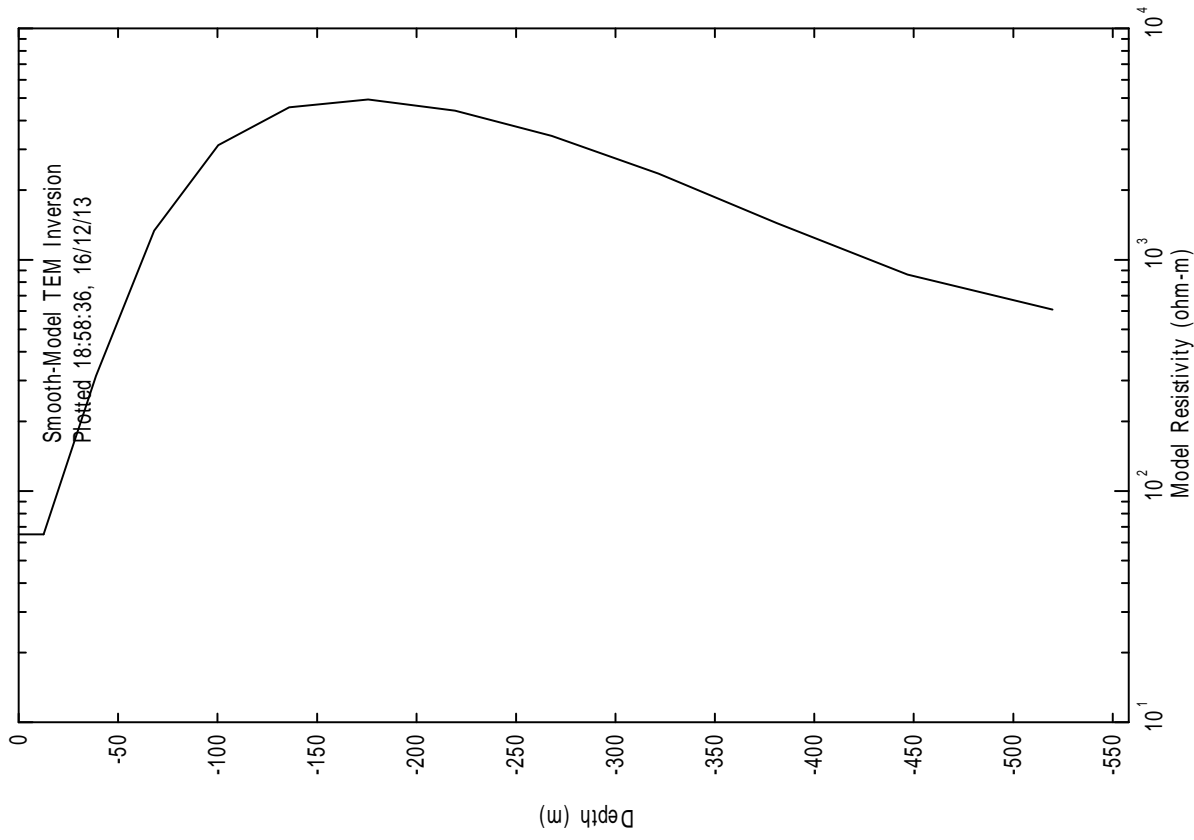
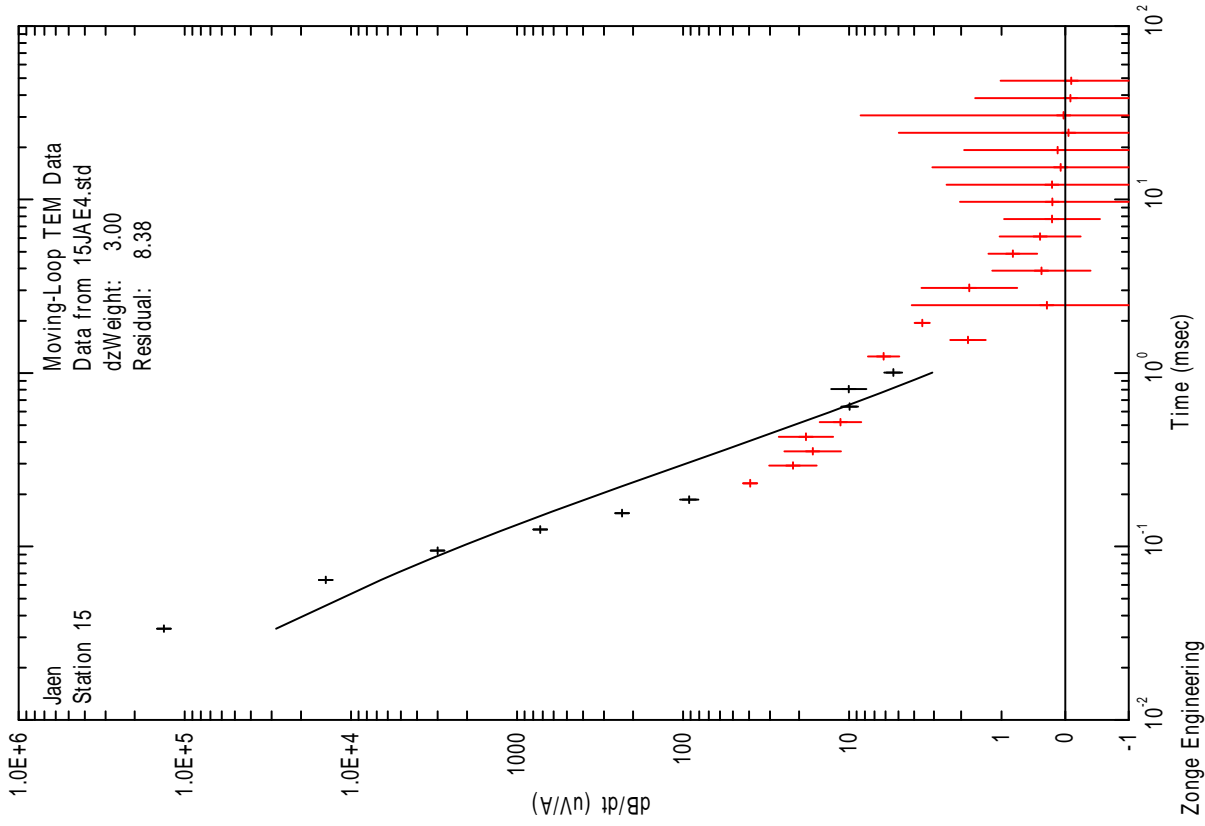
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

41

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-2 (4Hz)



CLIENTE:

IGME

ESTUDIO:

CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



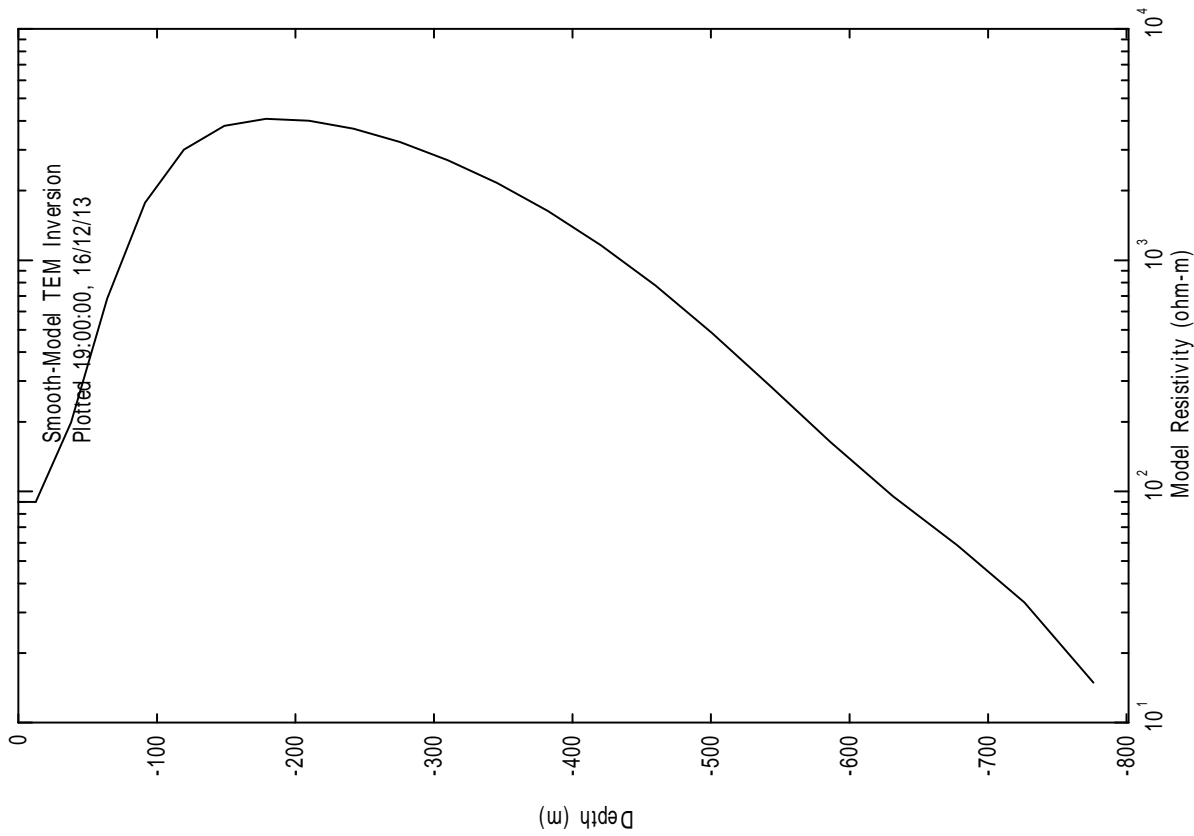
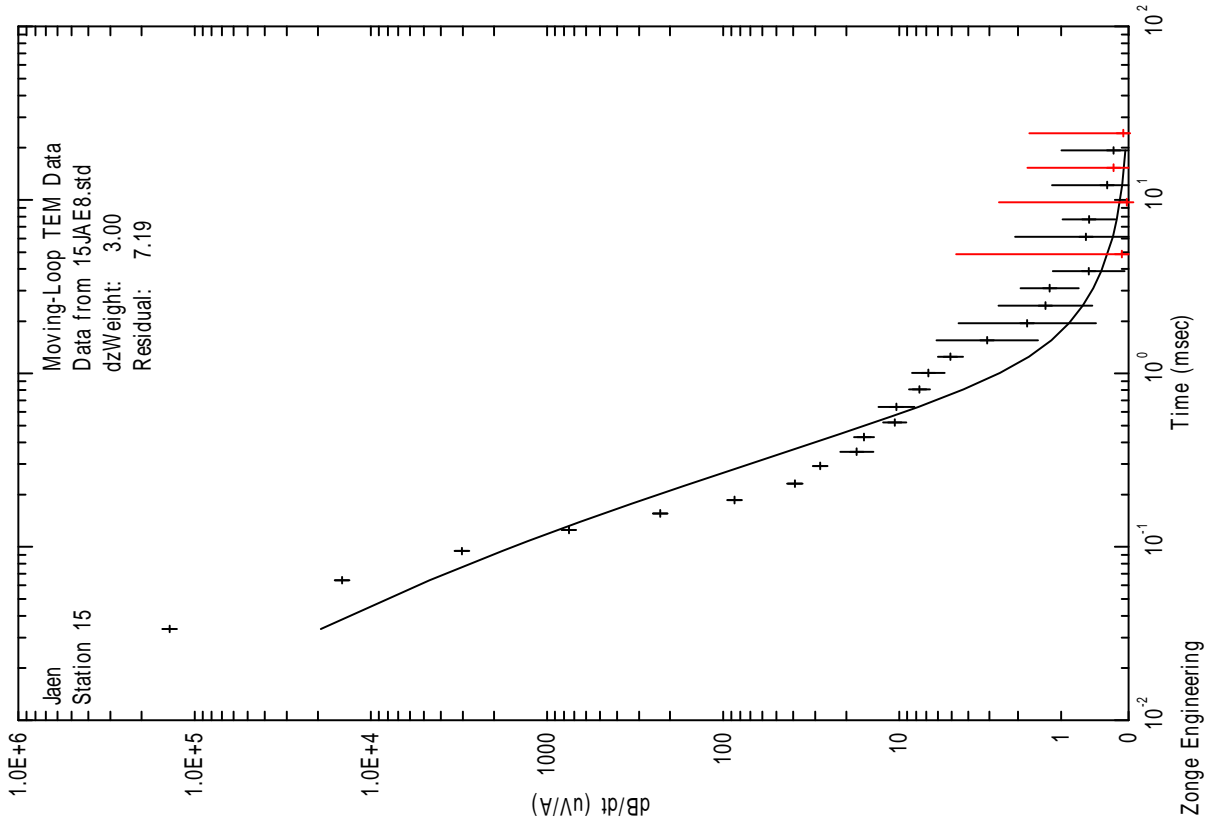
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

42

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-2 (8Hz)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:

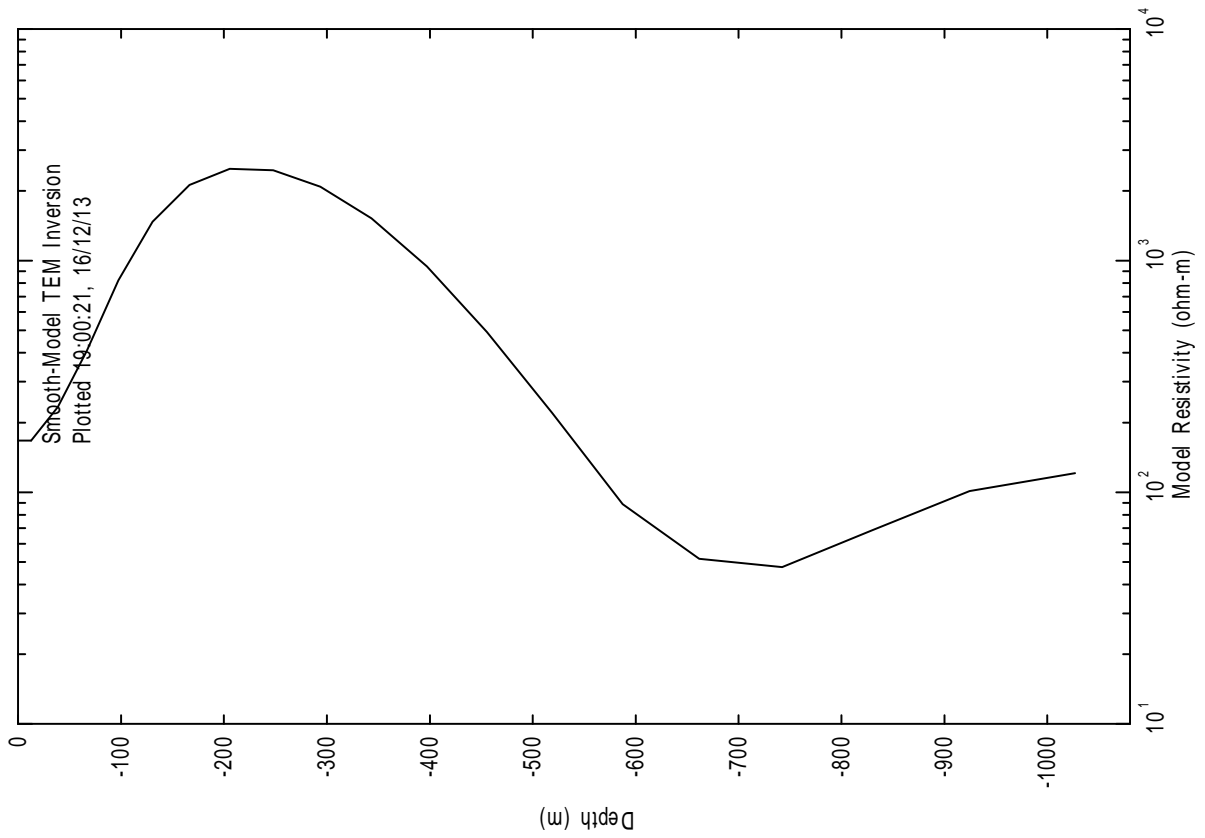
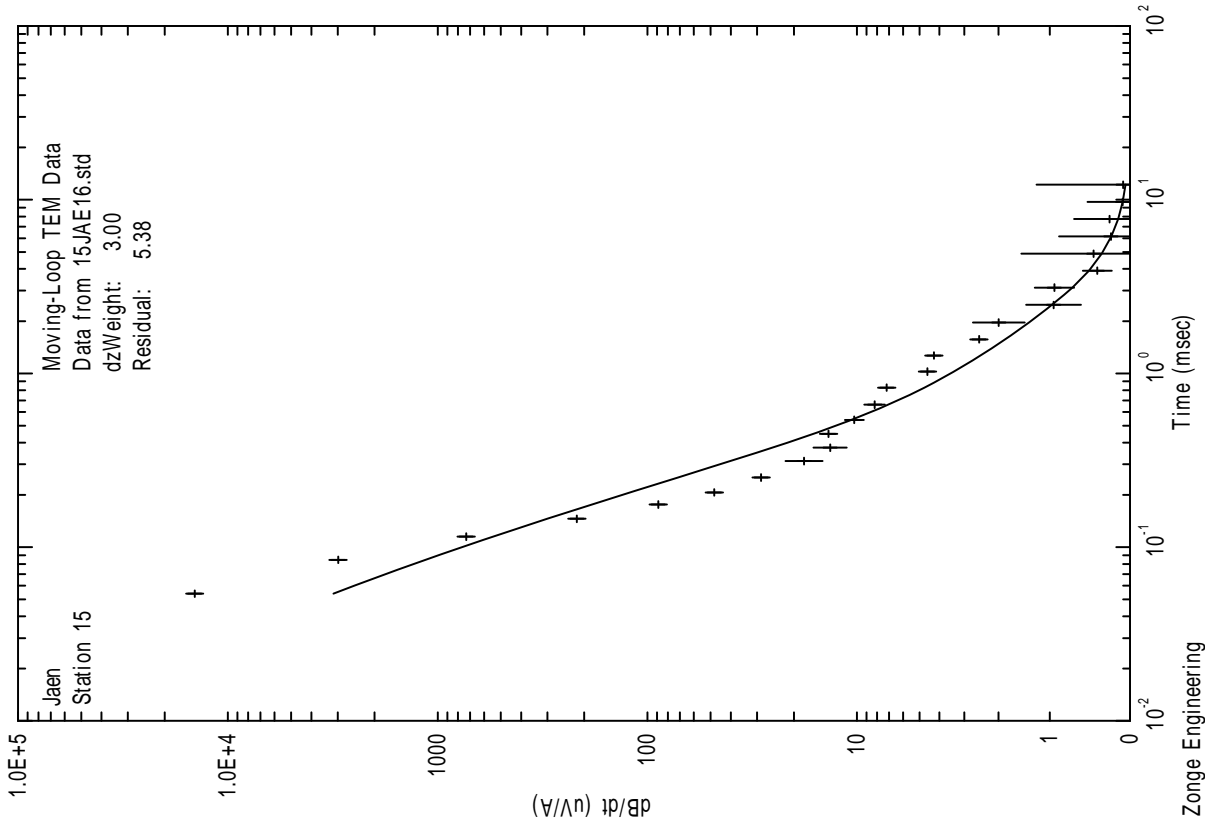
FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO:

43

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-2 (16Hz)



CLIENTE: **IGME**

ESTUDIO: **CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN**



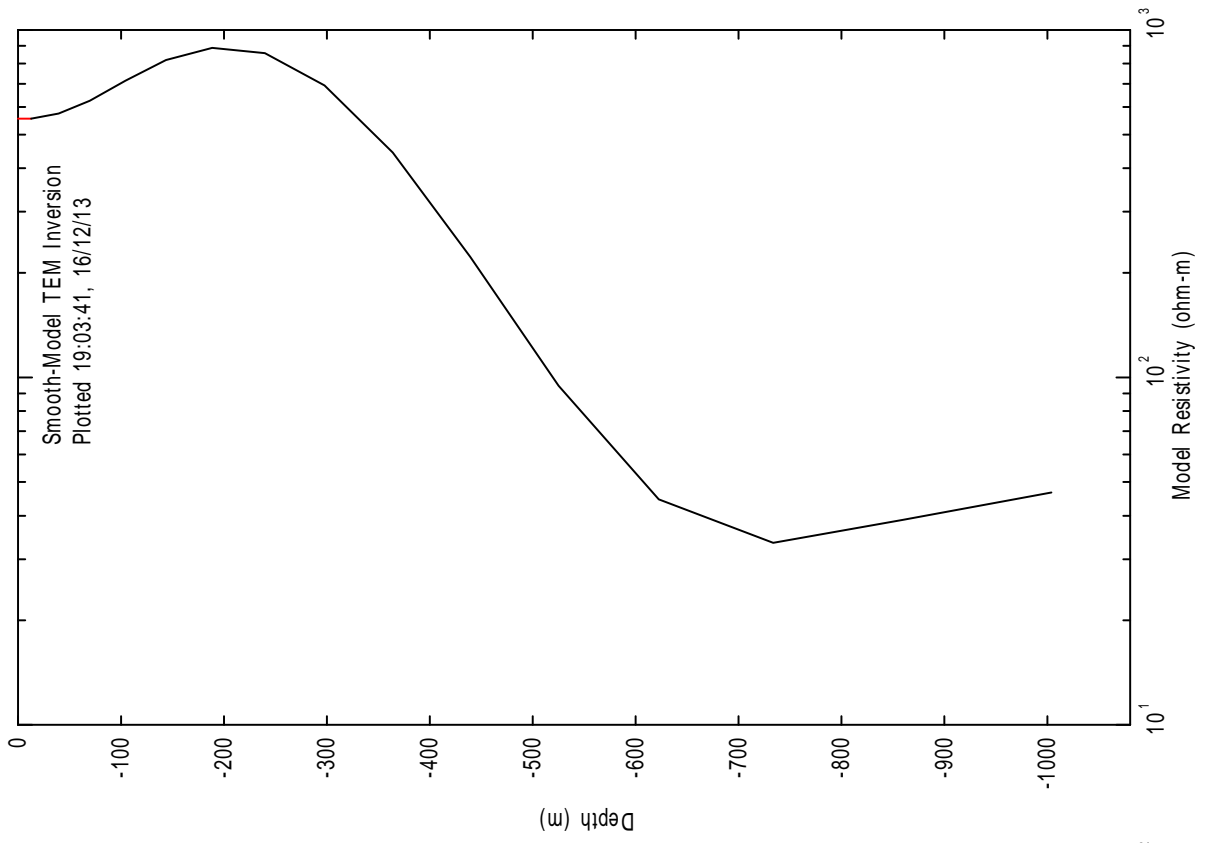
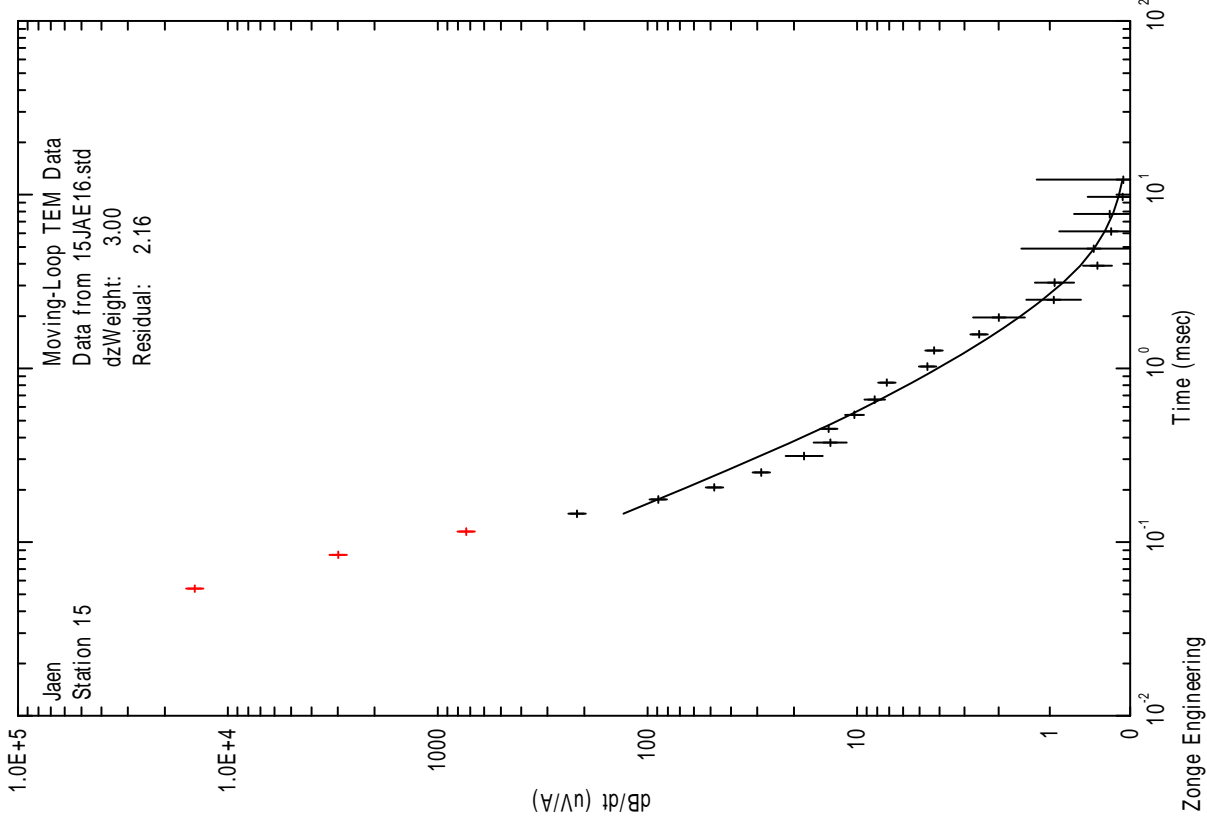
AUTOR:

FECHA:

DICIEMBRE 2013

PLANO: **44**

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-2 (16Hz int2)



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN



AUTOR:
DICIEMBRE 2013

PLANO:
45



ANEXO 1: INSTRUMENTACIÓN

El equipo empleado para este estudio de prospección electromagnética es un equipo de ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION Inc. cuyos principales componentes para la realización de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo son los siguientes:

➤ Receptor GDP32^{II}

Sistema receptor multi-canal digital electromagnético de banda ancha diseñado para todo tipo de estudios con campos eléctricos y magnéticos en el dominio de tiempos o frecuencias y tanto de fuente natural como artificial (SEDT, TEM, IP, MT, CSAMT, AMT, nanoTEM,...).



Figura 4.- Receptor GDP32^{II}.

Principales características del receptor GDP32^{II}:

- Sistema multicanal de hasta 16 canales analógicos cuya señal, condicionada por su ganancia y proceso de filtrado, es convertida a digital mediante convertidor analógico-digital de resolución $16 \text{ bits} \pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$ y $17 \mu\text{sec}$ de tiempo de conversión.
- Sincronización temporal con el controlador XMT-32 a través de un oscilador de cuarzo de alta precisión (deriva típica de menos de $5 \mu\text{s/hr}$).
- Visualización gráfica y numérica de datos y error SEM en pantalla LCD.
- Microprocesador de 586 MPU y 16 Mb de RAM.
- Control automático de ganancia y potencial espontáneo.

- Almacenamiento de hasta 4 Gb y volcado de datos a través de sistema Ethernet.

➤ Transmisor ZT-30

Dispositivo transmisor ligero y versátil desarrollado por Zonge para su empleo en estudios eléctricos o electromagnéticos (SEDT, IP,...).

- Alimentado por baterías externas de 12V.
- Máxima intensidad de salida para TEM de 30 A.
- Rango de frecuencias: DC-32 Hz (dominio de tiempos) y DC-512 Hz (dominio de frecuencias).



Figura 5.- Transmisor ZT-30.

➤ Antena TEM-3

Antena receptora de campo magnético de señal mínima detectable $0,007 \text{ gamma*Hz}$ y máxima señal sin saturación de 68.000 gamma*Hz . Area efectiva 10.000 m^2 .



Figura 6.- Antena TEM-3.



ANEXO 2: REPORTAJE FOTOGRÁFICO

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-1



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-2



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-3



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-4



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-5



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-6



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



FECHA:

DICIEMBRE 2013

LÁMINA:

1

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-7



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-8



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-9



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-10



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-11



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO SEDT-12



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



FECHA:

DICIEMBRE 2013

LÁMINA:

2

SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-1



SONDEO ELECTROMAGNÉTICO AHILLO-2



CLIENTE:
IGME

ESTUDIO:
CAMPAÑA GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO PARA EL ESTUDIO DOS SIERRAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN

AUTOR:



FECHA:

DICIEMBRE 2013

LÁMINA:

3