

CAPÍTOL 7: APLICACIONS DE LA TOMOGRAFIA ELÈCTRICA

7.1 – INTRODUCCIÓ

La tomografia elèctrica és àmpliament utilitzada per determinar les variacions laterals de la resistivitat elèctrica del subsòl sobre aquelles àrees amb una certa complexitat geològica.

En aquest capítol es mostren les interpretacions de les dades adquirides en diferents contextos i que serveixen per a comprovar el bon funcionament dels programes de modelització i d'inversió que han estat desenvolupats en la tesi.

En primer lloc s'ha aplicat el programa d'inversió per a la detecció d'estructures de molt elevada resistivitat elèctrica, i per tant, d'un contrast important. Aquest treball es va emmarcar dins d'un projecte de localització i estudi geofísic de cavitats en la part occidental de la Ciutat de Mèxic D.F.

La segona aplicació ha consistit en la modelització i detecció d'una cavitat buida en una zona arqueològica propera a la Ciutat de Mèxic D.F.

Finalment, s'ha realitzat una campanya de tomografia elèctrica per a la identificació de cossos fluvials de gres en el subsòl de la Formació Caspe (Saragossa), dins un projecte de caracterització de reservoris sedimentaris.

En els tres casos els resultats han estat molt satisfactoris i la bona correlació amb altra informació, permet confiar en el bon funcionament dels programes elaborats per a la modelització i la inversió en dues dimensions per a la interpretació de les dades procedents de la tomografia elèctrica. A més a més, els models obtinguts han estat contrastats amb els resultats procedents d'altres programes comercials d'inversió.

7.2 – DETECCIÓ D'ESTRUCTURES

Actualment, un dels camps més importants en els quals s'aplica la prospecció elèctrica és l'estudi dels problemes mediambientals, però també s'utilitzen per a la caracterització i localització d'estructures anòmales com poden ser les cavitats buides. En aquesta part de la tesi es pretén posar a prova el programa desenvolupat per tal d'identificar estructures d'una resistivitat elèctrica molt elevada, i per això, s'utilitzen unes mesures realitzades a prop de la Ciutat de Mèxic D.F.

7.2.1 – ESTUDI SOBRE LA DETECCIÓ DE CAVITATS

El programa d'inversió desenvolupat en el capítol anterior va servir per reinterpretar unes dades adquirides en una campanya de tomografia elèctrica en la Ciutat de Mèxic D.F.

La Ciutat de Mèxic D.F. és una de les ciutats amb una concentració més gran d'activitat humana. Durant els anys quaranta es va produir un augment molt important de la població provocant un dèficit del nombre d'habitatges. Així, el sector de la construcció va patir un augment important i, per cobrir la falta de material, es van començar a explotar il·legalment unes mines situades a l'oest de la ciutat: Delegación de Álvaro Obregón. Quan a principis dels anys seixanta aquesta indústria decau, moltes de les explotacions utilitzades van ser abandonades o reomplertes amb deixalles. Inclús, anys després, aquestes cavitats van ser utilitzades com a refugis per a famílies senceres que arribaven a la ciutat. Actualment, aquesta zona es troba totalment edificada i suposa un important perill degut a l'enfonsament del terreny o al col·lapse que s'han produït en algunes ocasions.

La localització d'algunes d'aquestes cavitats era desconeguda per les autoritats de la Ciutat de Mèxic D.F. Per aquest motiu, la Universidad Autónoma de México, UNAM, i altres institucions van iniciar un projecte conjunt per identificar aquestes zones perilloses amb la realització de diverses campanyes de geofísica.

L'adquisició de les dades es va iniciar l'any 1995 i mitjançant estudis de tomografia elèctrica i radar (GPR), es van poder localitzar moltes d'aquestes coves buides o reomplertes amb material alternatiu (Tejero *et al.*, 2002). La majoria de les explotacions van ser localitzades a una profunditat entre 5 i 10 metres, però en algun cas extrem es van localitzar a una profunditat de 25 metres. La dimensió de les cambres era variable, des de 2 o 3 metres fins a 30 metres.

L'accés a aquestes dades va permetre considerar la possibilitat d'utilitzar el programa d'inversió desenvolupat en aquesta tesi per obtenir una reinterpretació del subsòl i comparar el resultat amb els models adquirits amb altres programes d'inversió en dues dimensions. En concret, amb el programa RES2DINV (Loke i Barker, 1996b).

Les dades que es van considerar corresponen a dos perfils realitzats en la Delegación de Álvaro Obregon, sobre dos carrers paral·lels en la direcció N-S els quals en l'actualitat estan totalment edificats, figura 7.1: perfil Puerto Mazatlán i perfil Madero. Aquests perfils de tomografia elèctrica es va efectuar entre els diferents blocs de cases, tal com mostra el mapa de la figura 7.1.

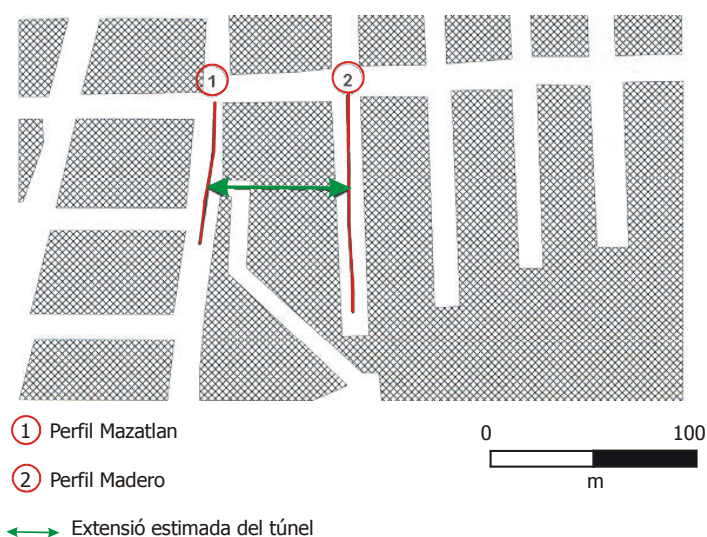


Figura 7.1. Localització dels perfils Mazatlán i Madero en la Delegación Álvaro Obregon i localització del túnel (Modificat de Tejero *et al.* 2002).

7.2.1.1- PERFIL PUERTO MAZATLÁN

El perfil de tomografia elèctrica que es va realitzar en aquest carrer presenta una llargada de 72 metres i es van utilitzar 20 elèctrodes separats una distància de 4 metres en la configuració Wenner-Schlumberger. Es van mesurar 8 nivells de profunditat i en total es disposaven de 80 mesures, les quals es mostren en la pseudosecció de la figura 7.2.

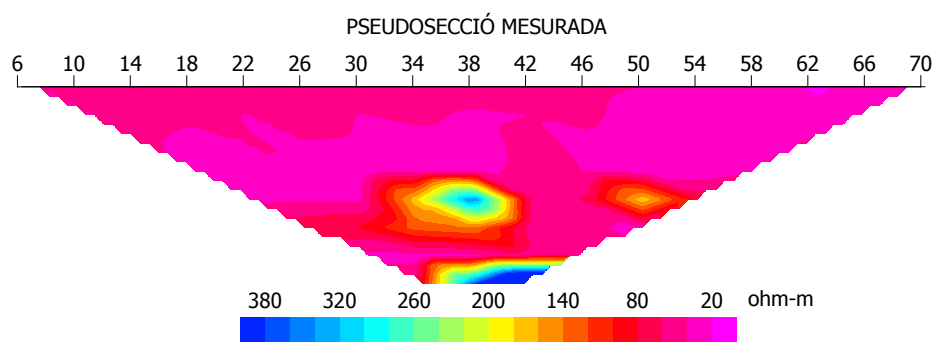


Figura 7.2. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger sobre el carrer de Puerto Mazatlán.

El model que s'havia obtingut amb l'algorisme RES2DINV descrivia una zona de $2000 \Omega \cdot m$ de resistivitat a 39 metres de l'inici del perfil i a una profunditat de 10 metres, la qual es va identificar com una d'aquestes cavitats. Els resultats van ser molt satisfactoris, perquè posteriorment es va realitzar una perforació que va confirmar l'existència d'aquesta estructura buida (Tejero *et al.* 2002).

Les mateixes dades experimentals es van utilitzar per a verificar el funcionament del programa d'inversió que es presenta en aquest treball i veure les diferències amb les interpretacions ja existents. El programa d'inversió va ser adaptat a les característiques concretes de la configuració del perfil Puerto Mazatlan. El resultat es mostra en la figura 7.3, on s'observa un model que reproduïx una zona d'una resistivitat elèctrica molt alta, $20000 \Omega \cdot m$, la qual representa la cavitat buida situada horitzontalment a 40 metres i a una profunditat de 6 metres. L'elevada resistivitat elèctrica associada a la cavitat buida emmascara la resta de la informació i les altres característiques del model no poden ser identificades.

Així, el model final és molt assemblat al que resulta de la inversió amb el programa RES2DINV. La localització de l'estructura coincideix en ambdós casos, tant a nivell horitzontal com en profunditat. La diferència més remarcable seria la determinació de la resistivitat elèctrica, sent molt més elevada en l'algorisme d'inversió que es presenta en aquesta tesi. Aquests resultats són molt satisfactoris ja que representen d'una manera molt real el que hauria de ser una cavitat on l'únic medi existent és l'aire. L'aire és un medi totalment aïllant, de manera que la resistivitat elèctrica obtinguda de $20000 \Omega \cdot m$ és més ajustada que la resistivitat obtinguda en els models del programa RES2DINV de $2000 \Omega \cdot m$, la qual pot representar a un nombre divers de materials del subsòl.

La pseudosecció calculada presenta certa discrepància respecte les dades mesurades, però s'ha de tenir present que la presència de l'anomalia d'uns $300 \Omega \cdot m$ en la part central de la pseudosecció de la figura 7.2, deguda a una sola dada, pot ser conseqüència d'un error en la mesura en el camp. En qualsevol cas, la inversió ajusta els trets més generals de la pseudosecció.

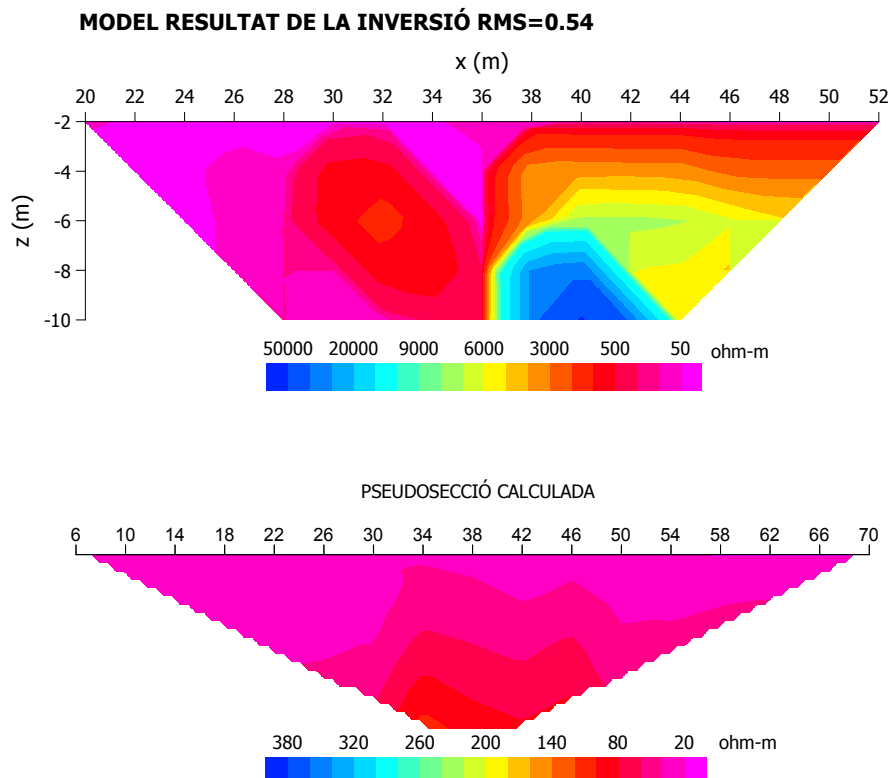


Figura 7.3. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.54 i representació de la pseudosecció calculada.

7.2.1.2 - PERFIL MADERO

Un segon perfil situat al costat est del perfil Puerto Mazatlán i realitzat de forma paral·lela, es va dur a terme per a comprovar si existia una continuïtat del túnel detectat en el perfil anterior. La configuració d'aquest perfil també és Wenner-Schlumberger, però la seva longitud és una mica superior. En aquest cas es van disposar 26 elèctrodes separats una distància de 4 metres, de manera que el perfil cobria una longitud de 100 metres. Es van mesurar fins a 11 nivells de profunditat de la pseudosecció per tal d'obtenir un nombre elevat de dades experimentals, 143 en total, i arribar a una profunditat superior.

Una imatge bidimensional d'aquestes 143 dades es mostra en la figura 7.4 amb la representació de la pseudosecció mesurada.

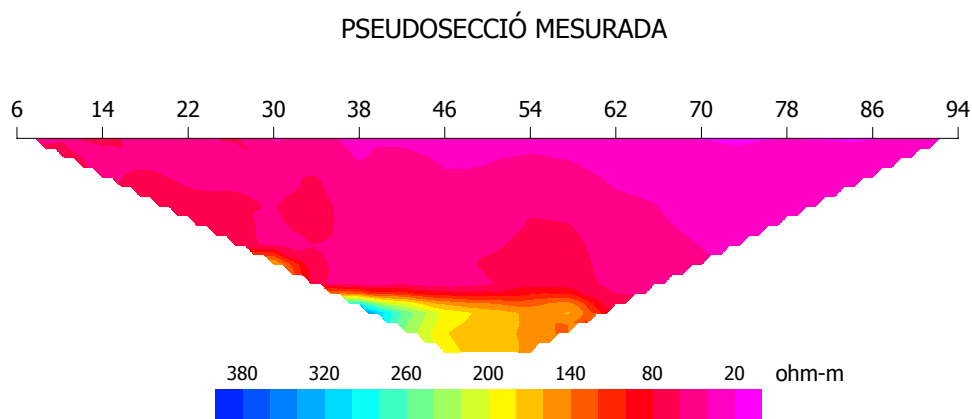


Figura 7.4. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger pel perfil realitzat en el carrer Madero.

En el model obtingut amb el programa d'inversió RES2DINV s'observava una zona d'uns $400 \Omega \cdot m$ de resistivitat a uns 48 metres i a una profunditat d'uns 10 metres. En aquest cas no es va poder identificar aquesta estructura com una cavitat buida degut al baix valor de la resistivitat elèctrica que s'havia determinat. Aquest fet s'explica, perquè les autoritats de la Ciutat de Mèxic D.F. havien reomplert amb cendres volcàniques i pumita algunes d'aquestes explotacions per disminuir el risc de col·lapse o d'enfonsaments del terreny (Tejero *et al.* 2002).

Els resultats de la inversió amb el programa propi es presenten en la figura 7.5, on

s'observa una zona de més elevada resistivitat elèctrica, aproximadament $1000 \Omega \cdot m$, en la part central del model a uns 45 metres de l'origen del perfil i a una profunditat d'uns 8 metres. La interpretació del model final s'acosta molt al model presentat per Tejero *et al.* 2002, identificant igualment una zona amb una resistivitat elèctrica més elevada, però sense arribar als valors d'una cavitat buida com era en el cas del perfil Puerto Mazatlán.

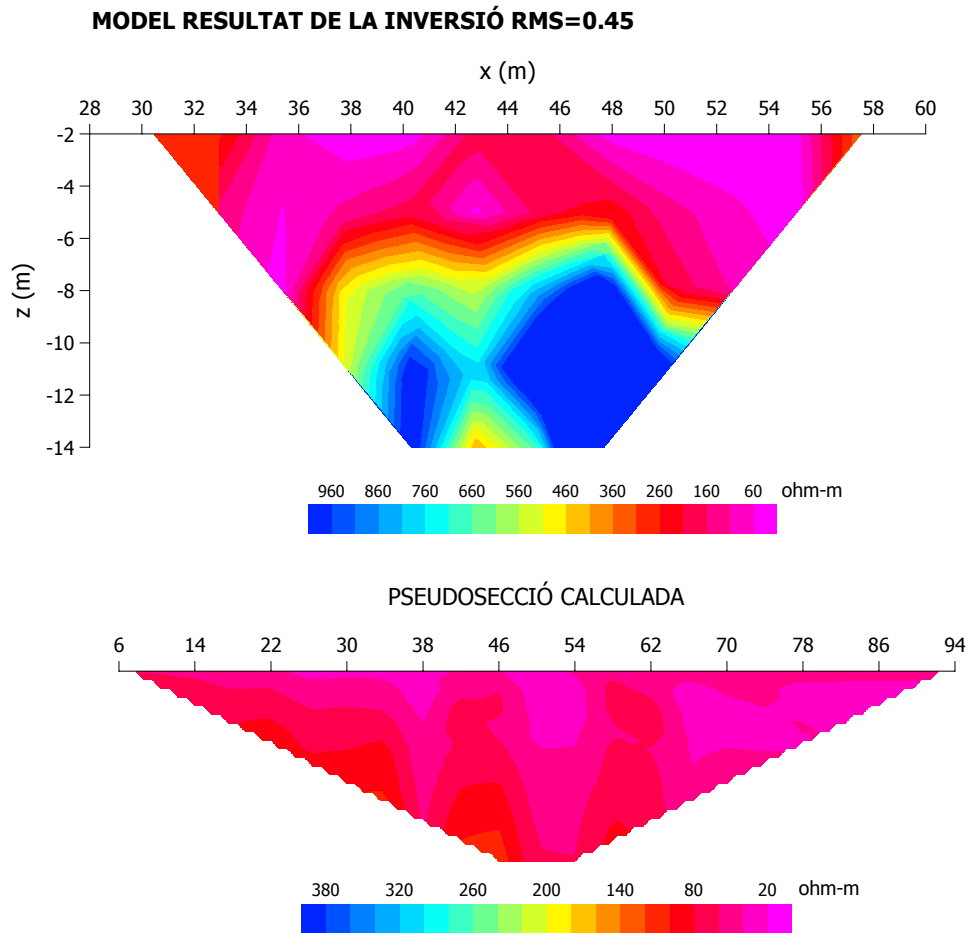


Figura 7.5. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.45 i representació de la pseudosecció calculada.

Així, es confirma el bon funcionament del programa d'inversió per identificar tant estructures de molt elevada resistivitat com és el cas de les cavitats buides (perfil Puerto Mazatlán), com per a estructures de menor contrast de resistivitat elèctrica (perfil Madero).

L'algorisme matemàtic implementat en aquest programa i utilitzat per a interpretar

aquestes dades reals permet obtenir uns models realistes. Els models presentats per Tejero *et al.* 2002 no mostraven una resistivitat tan elevada pel cas de les estructures buides. En general es pot dir que aquest algorisme obté bons resultats quan el contrast de resistivitat elèctrica entre les estructures és elevat, és a dir, que recupera tant la geometria com les propietats físiques de les estructures.

7.2.2 - ESTUDI D'UNA ZONA ARQUEOLÒGICA

Una altra aplicació del programa d'inversió implementat es va realitzar sobre les dades adquirides en una zona arqueològica a prop de la Ciutat de Mèxic D.F.

Diferents mètodes geofísics, magnetometria, GPR i tomografia elèctrica, van ser aplicats per tal d'identificar la continuació d'un túnel descobert sota l'entrada principal de la Piràmide del Sol (Chavez *et al.*, 2001). Aquesta zona és d'elevat interès arqueològic, i l'objectiu principal era localitzar i definir les característiques d'aquesta cavitat, la qual va ser realitzada per les antigues cultures pre-hispàniques, els homes Teotihuacans, per extreure material per a la construcció de la seva ciutat.

El perfil de tomografia elèctrica es va realitzar amb la configuració Wenner-Schlumberger. Es van disposar 15 elèctrodes col·locats a una distància constant de 3 metres entre ells per recórrer 42 metres de longitud i arribar fins a 6 nivells de profunditat de la pseudosecció. Amb aquestes característiques un baix nombre de dades experimentals, figura 7.6, es disposaven per aplicar el procés de la inversió. En concret 42 mesures.

En aquest cas, el model final que s'obté després de la inversió mostra una zona amb una resistivitat elèctrica propera a un valor de $2000 \Omega \cdot m$, figura 7.7.

L'estructura que s'esperava identificar, cavitat buida o túnel, queda representada amb aquesta anomalia de més elevada resistivitat, però per coherència amb els resultats anteriors es preveia una resistivitat molt més elevada ($\approx 20000 \Omega \cdot m$).

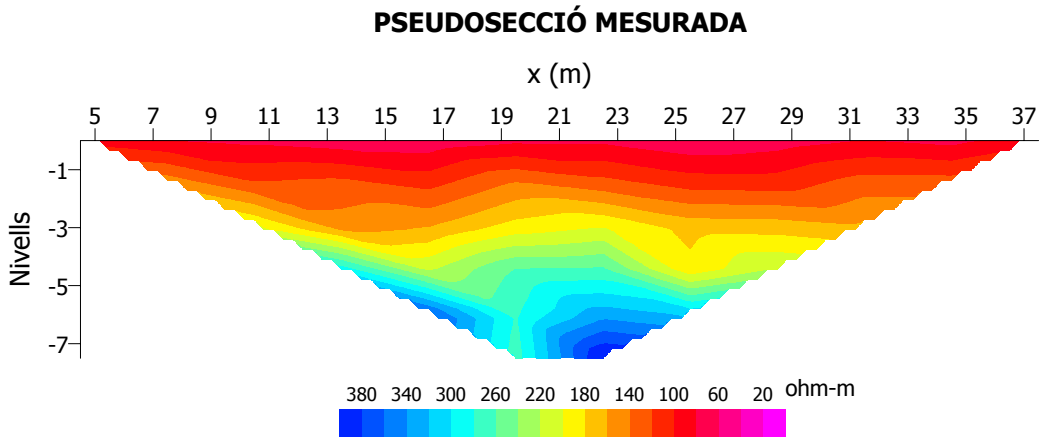


Figura 7.6. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger per a 15 elèctrodes separats 3 metres entre ells i fins a 6 nivells de profunditat.

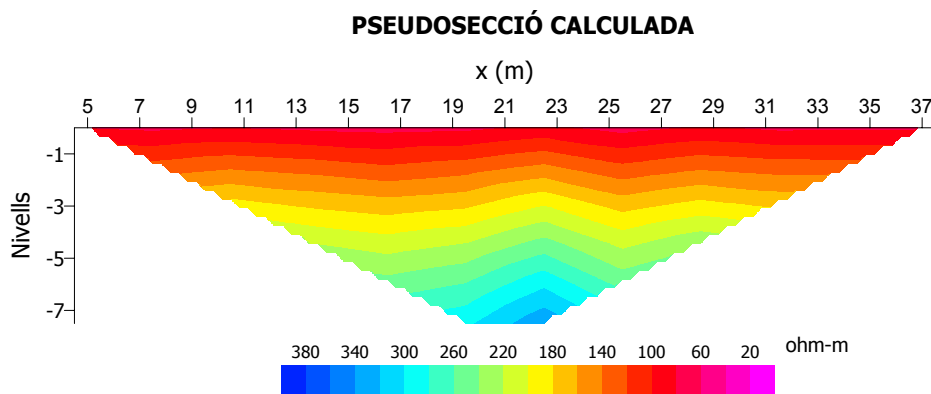
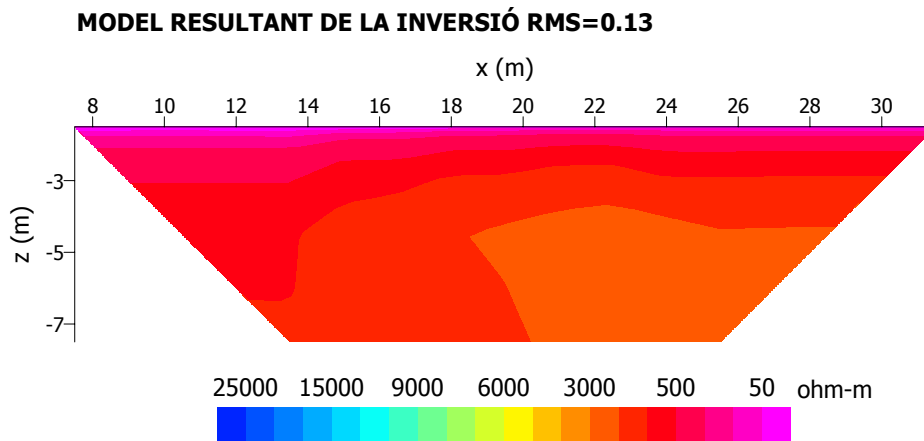


Figura 7.7. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.13 i representació de la pseudosecció calculada.

7.2.2.1 – SIMULACIÓ D'UNA CAVITAT ARQUEOLÒGICA

L'anàlisi de la configuració del perfil fa pensar que les característiques utilitzades no van ser les més adequades per obtenir una bona resposta elèctrica de l'estructura del subsòl. En primer lloc, 42 dades experimentals representen un nombre reduït de mesures per obtenir un model adequat. Cal tenir present que 15 elèctrodes separats una distància de 3 metres permeten una profunditat d'investigació d'uns 7 metres, ara bé, la composició del terreny afecta de forma important a la profunditat a la qual arriben les línies de corrent que permeten determinar el potencial elèctric en la superfície.

Per tal d'investigar amb més detall els resultats de la inversió, s'utilitza el problema directe per a realitzar una simulació de les respostes elèctriques. Es pretén obtenir la resposta teòrica amb un nombre més elevat d'elèctrodes que permeti accedir a una profunditat més elevada. L'objectiu d'aquesta modelització és verificar que les característiques del dispositiu elèctric del perfil pot ser la causa que el model resultant de la inversió, figura 7.7, mostri una zona de tan baixa resistivitat per a representar una cavitat d'aire, la qual s'associa a un valor aproximat de $20000 \Omega \cdot m$. És a dir, que el procés invers no té prou informació per trobar un model que s'ajusti millor a les dades experimentals.

Per representar correctament el túnel o cavitat, s'augmenta la resistivitat elèctrica a uns $15000 \Omega \cdot m$, figura 7.8, i es modelitza un perfil amb una configuració Wenner-Schlumberger de 20 elèctrodes separats una distància de 3 metres i amb 8 nivells de la pseudosecció, figura 7.9 b). Amb aquest disseny del perfil s'obtenen 80 dades amb les quals és possible trobar com a resultat de la inversió, una millor representació de la cavitat buida.

Amb aquest mateix model també es determina la pseudosecció per a un perfil Wenner-Schlumberger amb 15 elèctrodes separats una distància de 3 metres i 6 nivells de profunditat, tal com eren les característiques del perfil inicial, figura 7.9 a), per verificar que la imatge bidimensional de la resistivitat aparent és molt propera a la imatge de les dades experimentals, figura 7.6.

Aquests resultats permeten confirmar la importància del disseny previ d'una campanya de prospecció elèctrica.

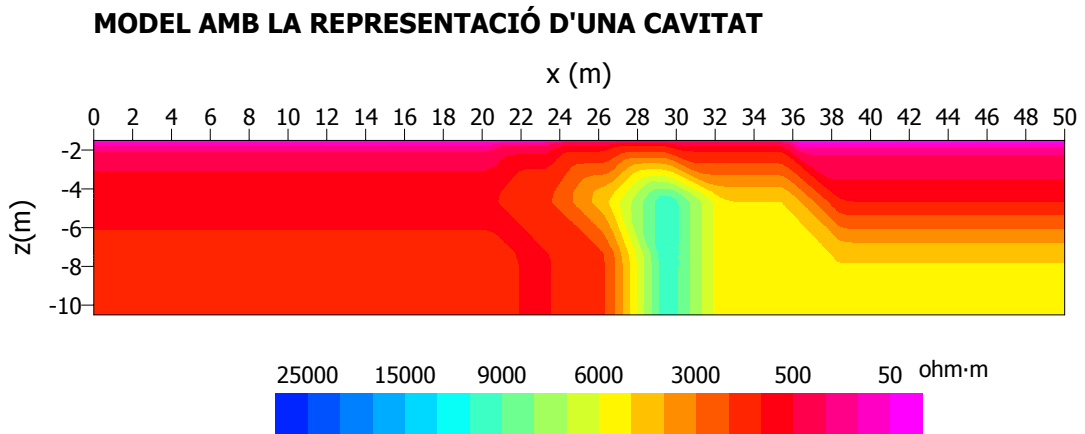


Figura 7.8. Model que representa la cavitat buida amb una elevada resistivitat elèctrica (15000 $\Omega \cdot m$).

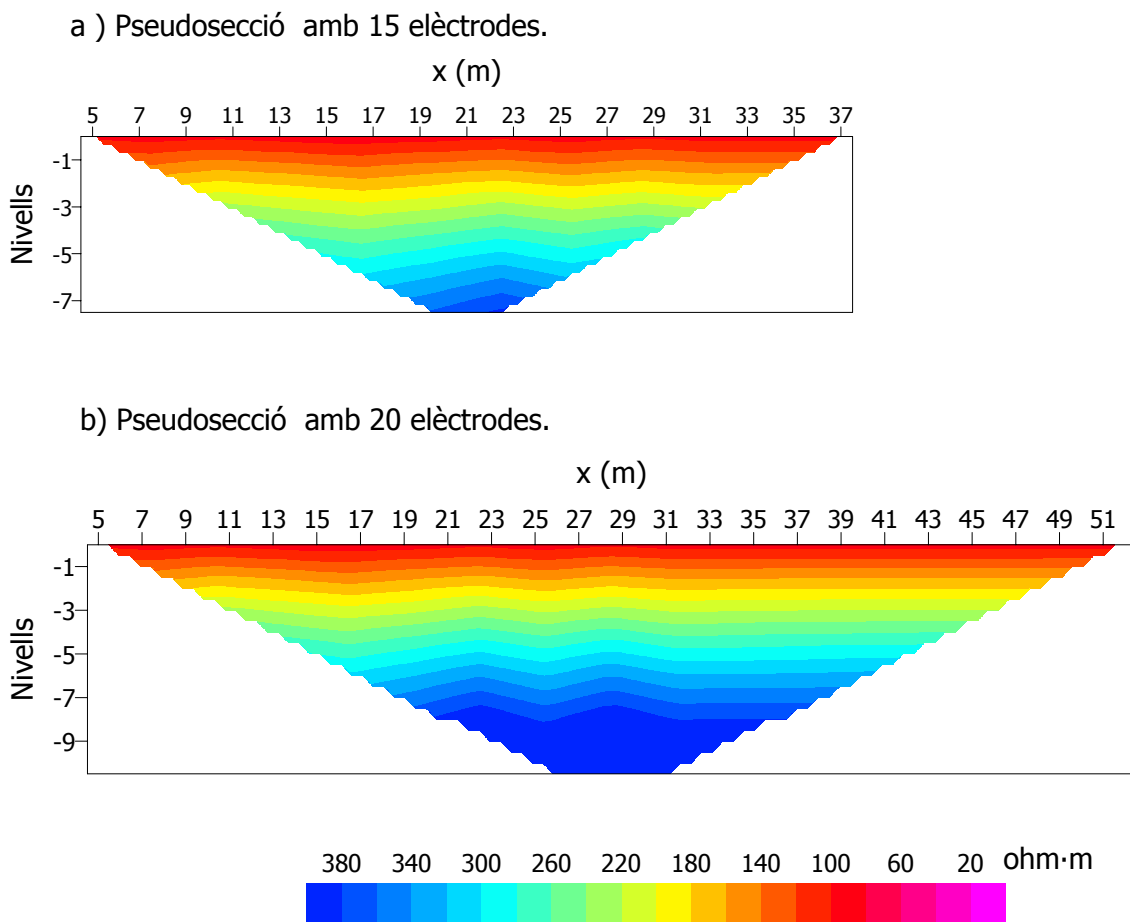


Figura 7.9. Representació gràfica de la resposta elèctrica del model de la figura 7.8 per a dos perfils diferents: Per a 15 elèctrodes, $a=3$ m i 6 nivells de profunditat. Per a 20 elèctrodes, $a=3$ m i 8 nivells de profunditat.

Posteriorment, es tornen a invertir les dades calculades amb el perfil de 20 elèctrodes. El resultat es mostra en la figura 7.10, on s'observa que és possible recuperar un model que representa la cavitat buida amb una resistivitat molt elevada ($17000 \Omega \cdot m$). Al mateix temps, s'observa com la pseudosecció presenta una imatge molt propera a la de la figura 7.9 b), indicant un bon ajust en la inversió.

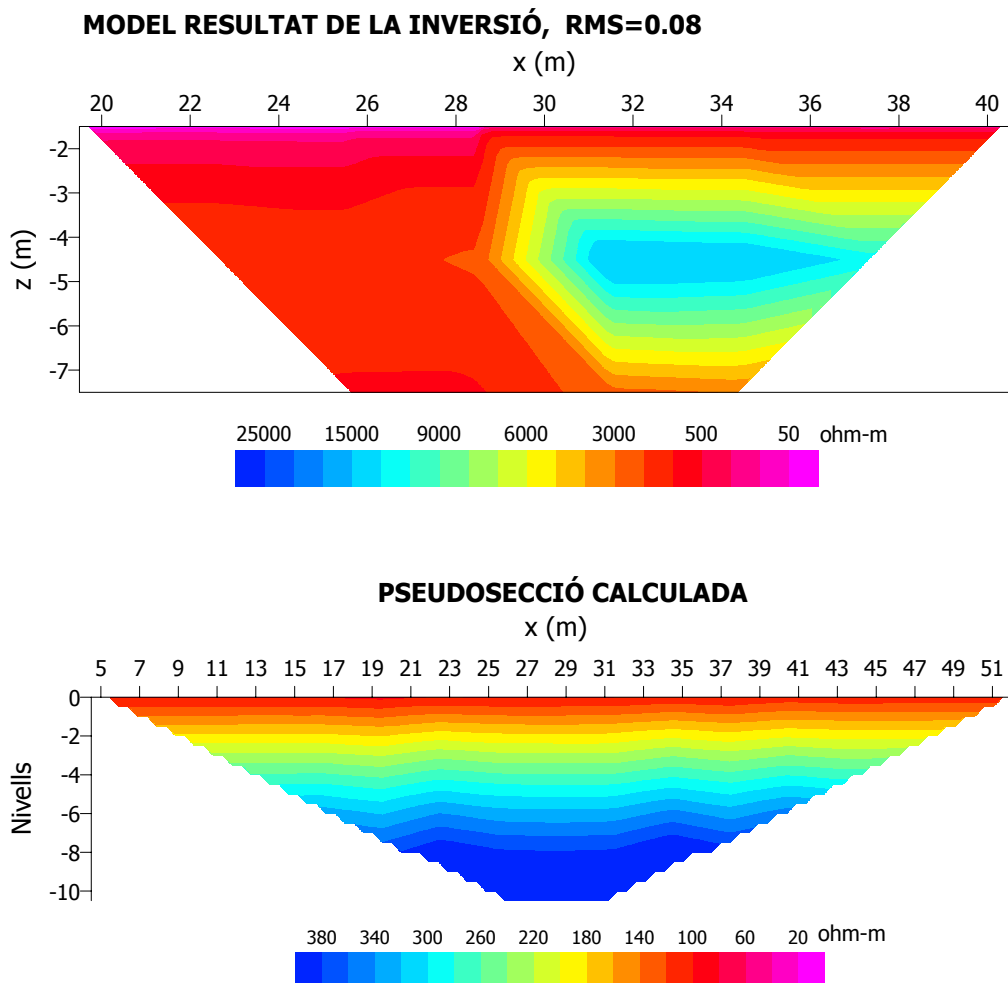


Figura 7.10. Model recuperat després de la inversió i valors de la pseudosecció calculada, la qual es compara amb la resposta de la modelització per a determinar i observar l'ajust de la inversió.

7.2.3 – DISCUSSIÓ

La tomografia elèctrica s'està desenvolupant amb gran èxit dins el camp de la geofísica per la seva gran capacitat per a resoldre problemes amb diferents problemàtiques. Aquest primer exemple ha estat una mostra de la capacitat del mètode, de les seves limitacions i del tractament de les dades experimentals, sobre estructures complexes. La utilització dels programes d'inversió per interpretar aquestes dades és també, un dels punts fonamentals per a realitzar un bon treball d'investigació.

Els bons resultats obtinguts en les inversions mostren que l'algorisme del problema invers desenvolupat en aquest treball és adequat per obtenir un contrast elevat de la resistivitat elèctrica, sense que comporti problemes de convergència en el procés iteratiu de la inversió.

7.3 – CAMPANYA DE TOMOGRAFIA ELÈCTRICA A CASPE

En aquest apartat es presenten els resultats d'aplicar aquest mètode en el subsòl de la Formació Caspe (Saragossa) per a la caracterització de reservoris sedimentaris. Les estructures que es pretenen identificar són cossos de gresos fluvials, els anomenats paleocanals. Aquesta estructura pot ser identificada a través de la tomografia elèctrica, perquè presenta variacions laterals de la resistivitat, però les condicions no són les més òptimes, ja que les estructures de gres són cossos resistents mentre que el medi argilós que els envolta és més conductor.

7.3.1 – MARC GEOLÒGIC

La Formació Caspe es troba localitzada al SE de la Conca avantpaís de l'Ebre i pertany al Sistema Guadalupe-Matarranya (SGM). Aquest és un sistema sedimentari aluvial datat de l'Oligocé-Miocé que s'estén per una ampla zona, des del SE de la Serralada Ibèrica fins al SE de la Conca de l'Ebre. Les fàcies fluvials distributives de la Formació Caspe es presenten de forma important en la zona Caspe-Alcañiz i en les zones distals més allunyades, a uns 60 km cap al nord, es converteixen en fàcies lacustres.

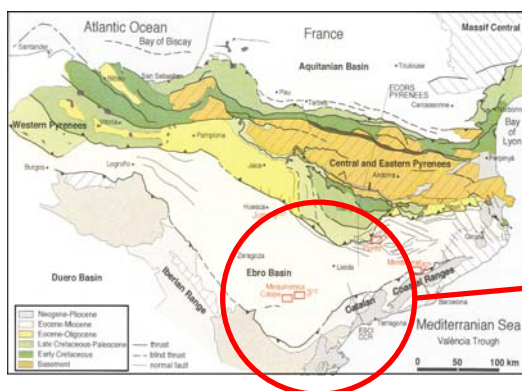


Figura 7.11. Mapa tectònic del NE de la península Ibèrica on se situen els Pirineus, la Carena Costanera Catalana i la Carena Ibèrica, envoltant la Conca d'avantpaís de l'Ebre. En vermell s'assenyala la zona d'estudi de Caspe. (Vergés, 1992).

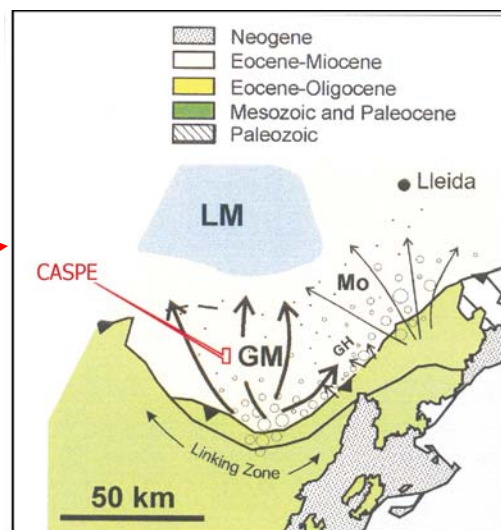


Figura 7.12. Situació deposicional de la Formació Caspe en el Sistema Guadalupe-Matarranya (GM) localitzat al sud dels sistemes Los Monegros (LM) i Montsant (Mo).

7.3.2 – SIMULACIÓ

Un pas previ a la realització de la campanya de tomografia elèctrica va consistir en la simulació de la resposta que tindria una estructura amb les característiques que descriuen, de forma general, a un paleocanal. Aquest estudi previ va permetre escollir la configuració electròdica més adient, en funció del contrast de resistivitat elèctrica entre l'estructura i el medi que l'envolta, la dimensió del cos i la profunditat a la qual es troba.

Els resultats de la modelització es presenten en aquest apartat del capítol i es pot observar la resposta teòrica obtinguda amb les dues configuracions amb les quals treballa el programa: Dipol-Dipol i Wenner-Schlumberger. La distància de separació entre els elèctrodes es va variar entre 2 i 5 metres per tal d'observar les diferències en la detecció de l'estructura geològica.

7.3.2.1 – SIMULACIÓ EN LA CONFIGURACIÓ DIPOL-DIPOL

Les primeres proves es van realitzar amb la configuració Dipol-Dipol utilitzant un nombre elevat d'elèctrodes. Es va calcular la resposta elèctrica que tindria el subsòl amb la presència de diferents geometries del paleocanal:

- 1 paleocanal
- 2 paleocanals sense contacte
- 2 paleocanals amb contacte

En tots els casos es va utilitzar un alt contrast entre la resistivitat elèctrica de l'estructura i el medi que l'envolta. El paleocanal presenta una composició amb gresos, als quals se'ls associa una resistivitat elèctrica aproximada de $4000 \Omega \cdot m$, i l'entorn és un terreny argilós amb una resistivitat variable entre 1 i $100 \Omega \cdot m$.

- **1 PALEOCANAL**

S'inicia la modelització amb el cas més senzill, el qual serveix per conèixer el tipus de resposta elèctrica de l'estructura en la seva totalitat. Per això es construeix la representació d'un paleocanal, en forma de conca fluvial, situada a 2 metres de profunditat i amb una amplada de 16 metres. La configuració escollida és de 24 elèctrodes i la distància característica entre els elèctrodes és de 2 metres. El cos central s'associa a una resistivitat elèctrica de $4000 \Omega \cdot m$, mentre que pel medi es tria una resistivitat elèctrica de $50 \Omega \cdot m$. La resposta elèctrica obtinguda es mostra en la següent figura 7.13, on es pot observar com el cos modelitzat queda representat per una anomalia de $160 \Omega \cdot m$ pràcticament situada en el centre de la pseudosecció.

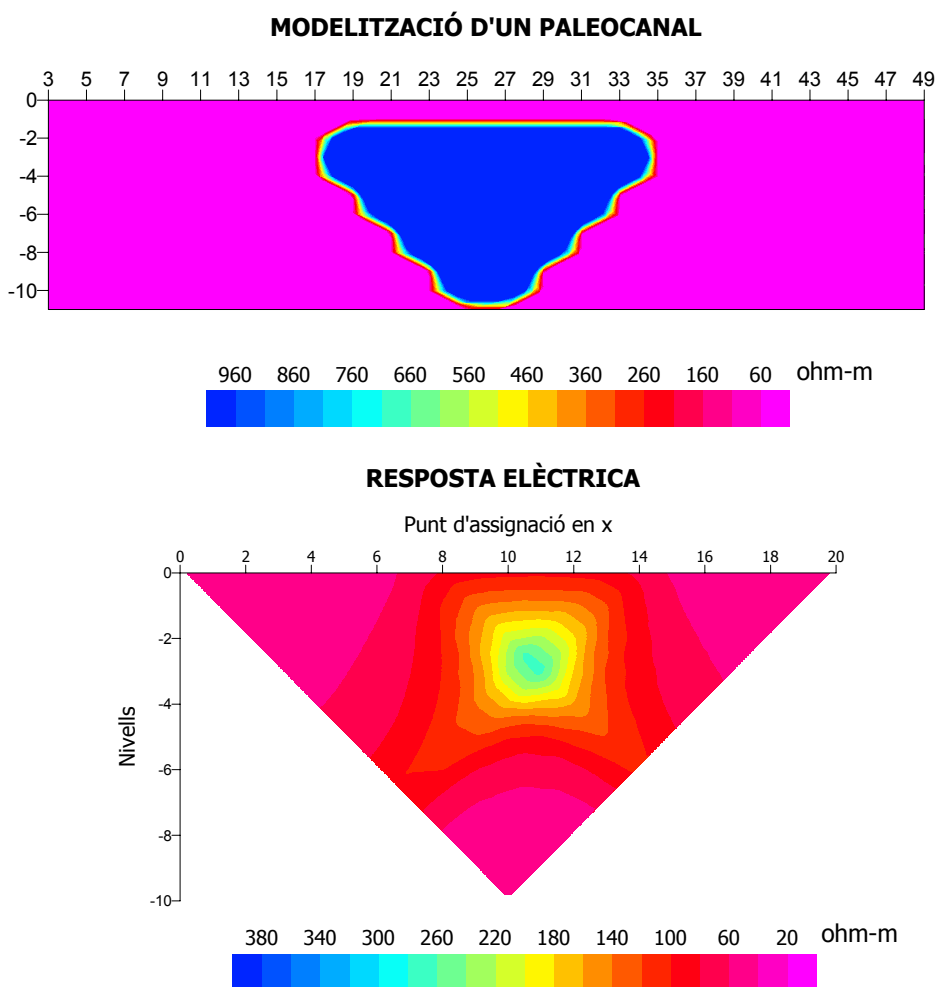


Figura 7.13. Model que representa l'estructura d'un paleocanal i la seva corresponent resposta elèctrica en forma de pseudosecció.

Per tal de conèixer la resposta elèctrica de les ales del paleocanal, és a dir, de la seva extensió lateral, es modelitzen dues geometries diferents de l'ala del paleocanal, figura 7.14. El primer model representa una ala amb una extensió relativament curta, la qual va disminuint amb la profunditat. La part més superficial de l'ala, situada a 1 metre de la superfície, té una extensió de 24 metres, i en canvi, la base presenta una extensió d'aproximadament 6 metres. La resposta elèctrica mostra una zona amb una anomalia de més alta resistivitat, $400 \Omega \cdot m$, en un costat de la pseudosecció i amb una forma triangular. El segon model té una extensió més elevada, uns 34 metres la part més superficial i uns 6 metres la base del paleocanal situada a uns 9 metres de profunditat, i la resposta té un comportament molt assemblat a l'anterior, però amb una dimensió més elevada.

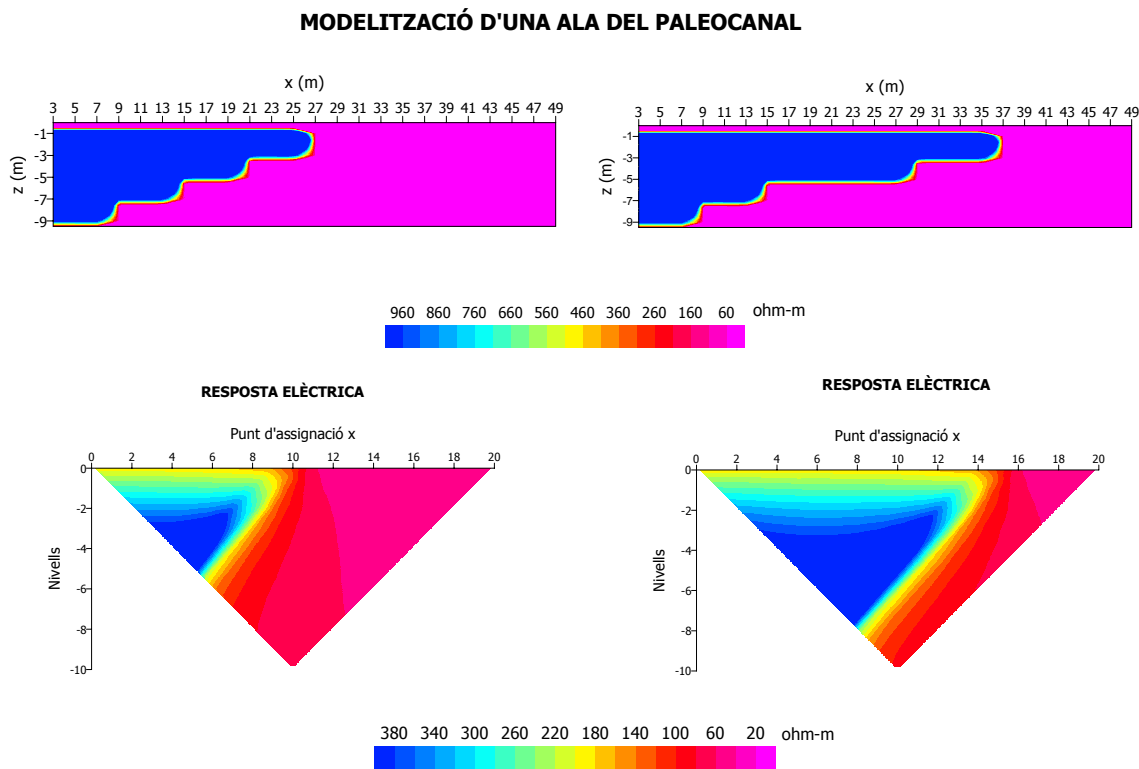


Figura 7.14. Representació de dues geometries de l'ala d'un paleocanal i la seva corresponent resposta elèctrica en forma de pseudosecció.

• **2 PALEOCANALS SENSE CONTACTE**

Igualment, per estudiar el cas on el subsòl conté dos paleocanals es modelitzen diferents casos, els quals es caracteritzen per presentar diferents geometries dels paleocanals. La resistivitat elèctrica utilitzada és igualment de $4000 \Omega \cdot m$ per a les estructures resistents que representen els paleocanals i de $50 \Omega \cdot m$ pel medi que l'envolta.

El primer model presenta dos paleocanals separats 5 metres entre ells i amb unes mides de 40 i 30 metres d'amplada en la part més superficial del paleocanal, i de 10 i 7.5 metres respectivament en la seva base. Els dos cossos es troben situats a 1 metre de la superfície del subsòl i tenen una extensió vertical de 8 metres.

Les respostes elèctriques per a diferents configuracions Dipol-Dipol es mostren en la figura 7.15, on es presenten les pseudoseccions calculades quan s'utilitza diferent nombre d'elèctrodes (32 ó 24 elèctrodes) i diferent distància entre ells (5 ó 2 metres).

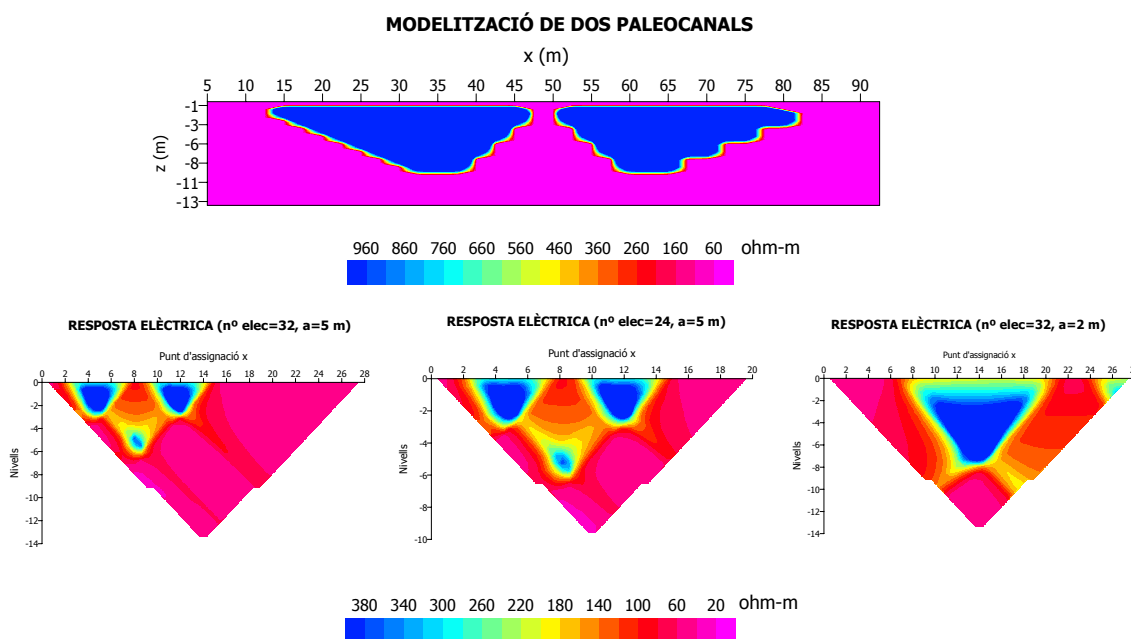


Figura 7.15. Model on apareixen dos paleocanals de $4000 \Omega \cdot m$ de resistivitat elèctrica en un medi de $50 \Omega \cdot m$, i les respostes elèctriques que s'obtenen en la configuració indicada en cada pseudosecció.

En les dues primeres pseudoseccions de la figura 7.15 es determinen perfectament els dos cossos amb una resistivitat d'aproximadament $400 \Omega \cdot m$, perquè la distància de 5 metres entre els elèctrodes permet tenir una llargada de 145 metres pel primer perfil i 105 metres pel segon.

En la tercera resposta elèctrica es pot observar com la distància de 2 metres no aconsegueix recórrer tot el model inicial. La llargada del perfil és de 58 metres, la qual no és suficient per a mesurar els dos paleocanals. La pseudosecció mostra com es determina molt bé el primer cos i com cap al final d'aquesta, es pot intuir la presència del segon paleocanal.

Finalment, es presenten els resultats per a un model on els dos paleocanals tenen unes dimensions més reduïdes, 20 metres d'amplada en la part més superficial, per tal de poder ser detectats amb el dispositiu Dipol-Dipol on la distància entre els elèctrodes és de 2 metres, figura 7.16.

Així, es modelitzen dos paleocanals de 20 metres d'amplada, separats una distància de 5 metres entre ells i situats a 1 metre de profunditat. A més, s'aprofita per a veure les

diferències en la resposta quan un dels dos paleocanals es troba situat a una profunditat superior.

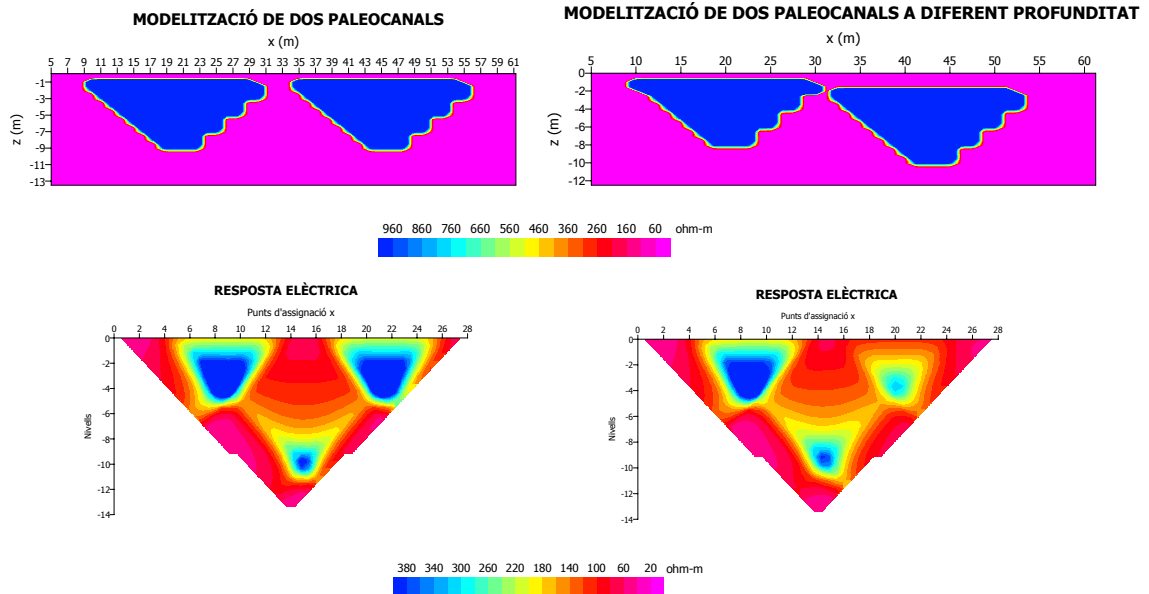


Figura 7.16. Representació de dos paleocanals i les seves respectives respostes elèctriques en funció de la profunditat a la que es troben.

En el primer cas els dos paleocanals són exactament de la mateixa mida i estan col·locats a la mateixa profunditat, 1 metre. La resposta elèctrica que s'obté després de resoldre el problema directe, representa amb la mateixa intensitat els dos cossos del subsòl. En canvi, si s'observa la resposta elèctrica corresponent al segon model, es veu com el paleocanal situat més a la dreta i que es troba a una profunditat de 2 metres presenta una resposta més dèbil amb una anomalia una mica més reduïda d'uns $300 \Omega \cdot m$.

• 2 PALEOCANALS EN CONTACTE

El darrer cas que es modelitza és el cas on dos paleocanals es troben en contacte. El model de la figura 7.17 mostra l'ala d'un paleocanal, costat esquerra del model, per sota del qual apareix un segon paleocanal de 36 metres d'amplada.

El primer paleocanal se situa a 1 metre de profunditat mentre que el segon s'ajunta amb l'ala del primer a una profunditat de 3 metres.

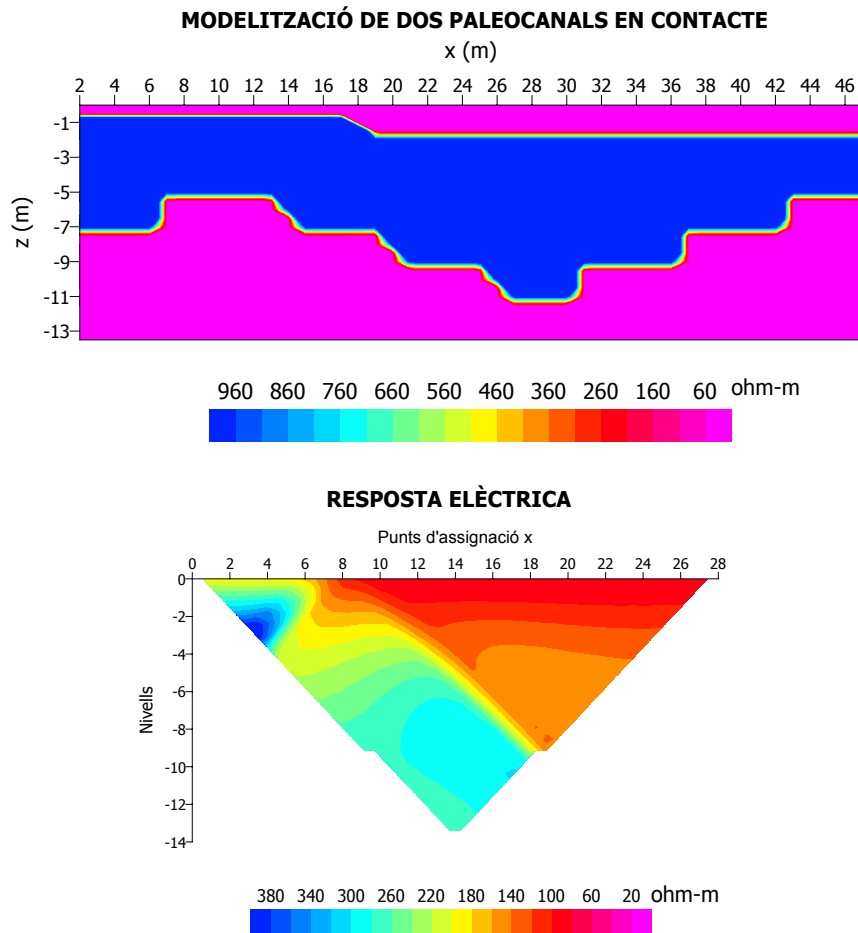


Figura 7.17. Representació de dos paleocanals en contacte directe i resposta elèctrica per a un perfil Dipol-Dipol amb 32 elèctrodes.

El dispositiu que mesura aquesta resposta elèctrica utilitza 32 elèctrodes separats una distància de 2 metres entre ells, i es calculen fins a 14 nivells de profunditat.

La pseudosecció presenta una zona anòmala de resistivitat més elevada, $400 \Omega \cdot m$, en la part esquerra que descriu el paleocanal més superficial. El segon paleocanal queda representat per la zona en blau més clar, amb una resistivitat elèctrica de $300 \Omega \cdot m$. La connexió entre els cossos no queda reflectida, perquè és impossible determinar on acaba un cos i on comença l'altre.

7.3.2.2 – SIMULACIÓ EN LA CONFIGURACIÓ WENNER-SCHLUMBERGER

El mateix procés va ser realitzat per a conèixer la resposta elèctrica per a un dispositiu Wenner-Schlumberger. L'estudi se separa igualment en funció de la geometria dels models i del nombre de paleocanals que intervenen en cadascun:

- 1 Paleocanal
- 2 Paleocanals sense contacte
- 2 Paleocanals en contacte

Igualment, en aquests models es representen els paleocanals com una estructura triangular i amb una resistivitat elèctrica de $4000 \Omega \cdot m$. El medi que envolta el paleocanal presenta una resistivitat de $50 \Omega \cdot m$.

- **1 PALEOCANAL**

El primer model només pretén caracteritzar la resposta del paleocanal, ja que com es va comentar en els capítols anteriors, configuracions diferents aporten respostes elèctriques també diferents.

En aquest cas es modelitza una estructura triangular a 2 metres de profunditat utilitzant 24 elèctrodes amb una distància entre ells de 2 metres, figura 7.18. La resposta teòrica que es presenta en la mateixa figura 7.18 mostra una anomalia molt dèbil amb una resistivitat de $130 \Omega \cdot m$.

Posteriors models mostren el comportament de les ales del paleocanal, figura 7.19. S'han modelitzat dues geometries diferents. En el primer model l'ala del paleocanal en la seva part més superior té una llargada de 24 metres i es redueix cada 2 metres fins arribar a una base de 6 metres. En el segon model es representa una ala molt més extensa, ja que la part més superficial arriba a tenir una longitud de 34 metres. La llargada de l'ala es tradueix en una millor determinació del paleocanal tal com mostra la figura 7.19. Aquesta pseudosecció presenta una zona amb una anomalia propera als $400 \Omega \cdot m$, mentre que en la pseudosecció que correspon a l'altre model, l'anomalia s'acosta a un valor de $300 \Omega \cdot m$ sense presentar una detecció clara del paleocanal.

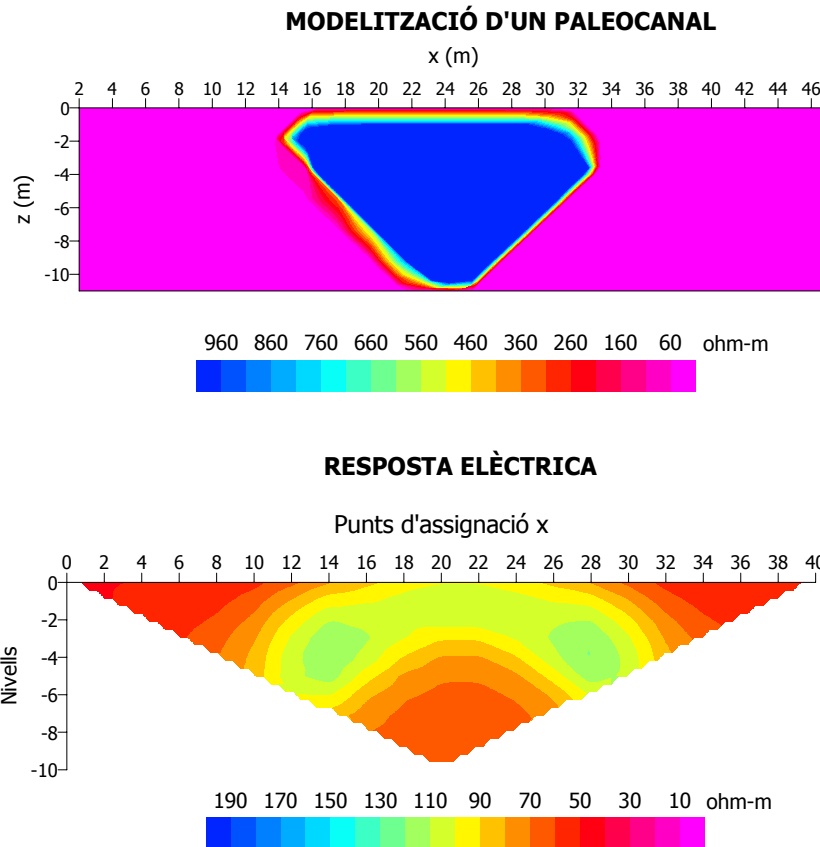


Figura 7.18. Representació d'un paleocanal i la seva resposta elèctrica amb el dispositiu Wenner-Schlumberger.

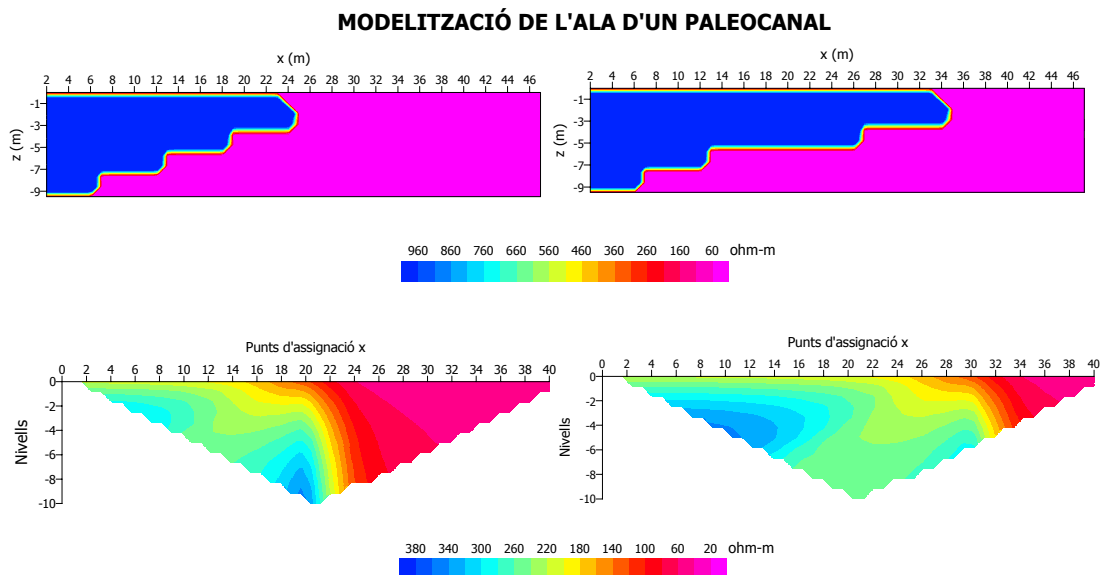


Figura 7.19. Representació de l'ala d'un paleocanal amb diferents geometries i les seves corresponents pseudo-seccions.

• **2 PALEOCANALS SENSE CONTACTE**

La modelització amb la configuració Wenner-Schlumberger per a detectar dos paleocanals separats una certa distància es presenta en la següent figura 7.20.

Els dos primers models de la figura mostren els resultats de dos paleocanals que es troben a la mateixa profunditat, 1 metre, quan la distància característica del dispositiu té valors de 5 metres i de 2 metres. En el segon cas, les dimensions dels paleocanals es redueixen per tal que el perfil pugui recórrer les dues estructures.

Finalment, el darrer model presenta la resposta en el cas que un paleocanal estigui situat a una profunditat superior. Aquesta pseudoacció mostra clarament com es perd la seva detecció d'una manera molt important.

La simulació de la resposta elèctrica d'aquests models ens permet tenir present les limitacions que presenta aquesta configuració.

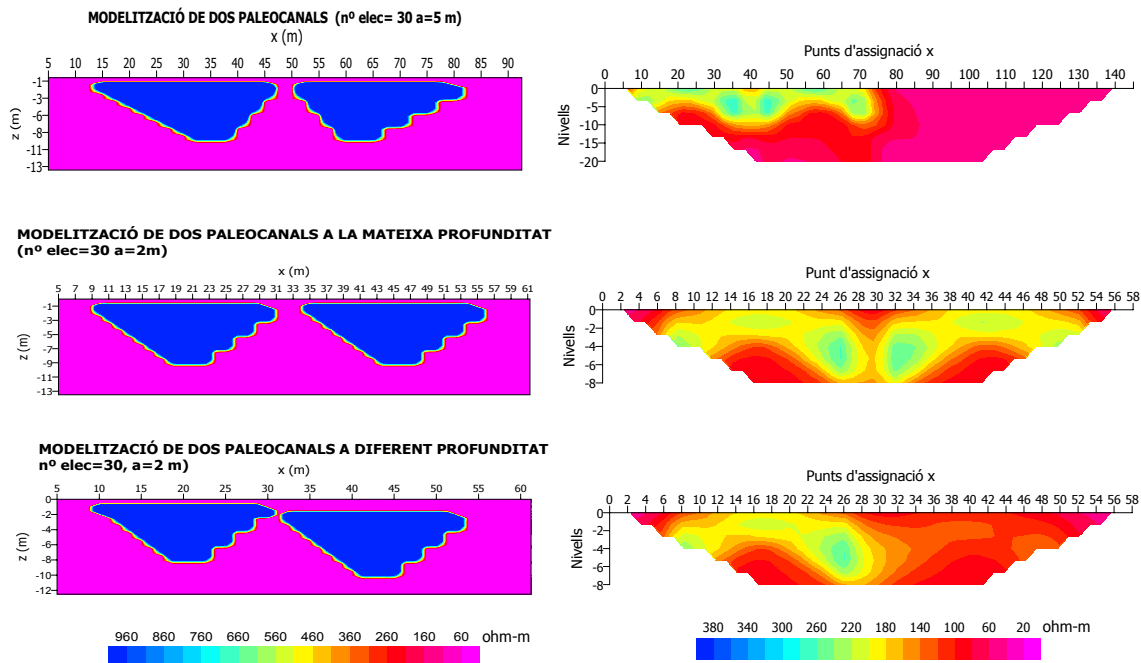


Figura 7.20. Representació de dos paleocanals a igual profunditat i a profunditats diferents, i la seva resposta elèctrica (part dreta de la figura). La pseudoacció del primer model està determinada amb un dispositiu electròdic $a=5$ m, mentre que les altres dos tenen una $a=2$ m.

• 2 PALEOCANALS EN CONTACTE

El darrer exemple presenta les pseudoseccions quan dos paleocanals es troben relacionats entre ells. En la figura 7.21 es mostra el model que s'ha utilitzat per a la configuració Wenner-Schlumberger i la corresponent resposta elèctrica.

En aquest cas s'observa com la detecció del segon paleocanal connectat directament amb l'ala del primer té una detecció molt pobre en la base de la pseudosecció, amb una resistivitat aparent d'uns $200 \Omega \cdot m$. Al mateix temps el lateral del paleocanal més superficial queda detectat per una anomalia de resistivitat superior en la part esquerra de la pseudosecció, uns $400 \Omega \cdot m$.

La configuració utilitzada només permet obtenir 9 nivells de profunditat, els quals limiten d'una manera important la detecció de les dues estructures, però evidentment, es pot optimitzar la resposta elèctrica amb un dispositiu electròdic que presenti uns nivells de profunditat més elevats, i en conseqüència un nombre superior d'elèctrodes.

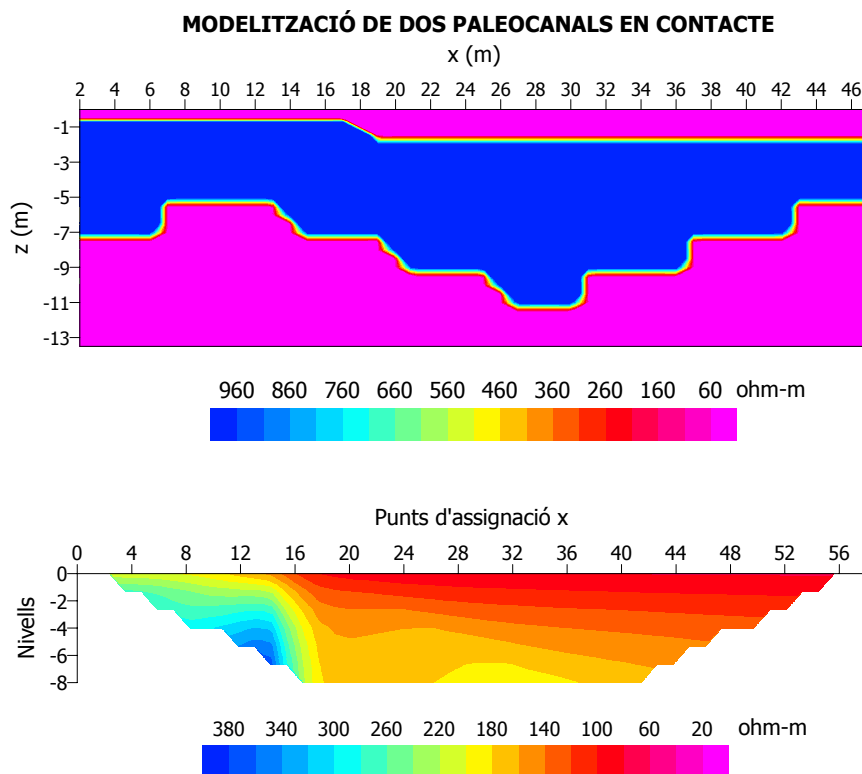


Figura 7.21. Representació de dos paleocanals en contacte i mostra de la seva resposta elèctrica per a una configuració Wenner-Schlumberger de 24 elèctrodes, 2 metres de separació entre aquests i 9 nivells de profunditat.

7.3.2.3 – DISCUSSIÓ

Aquesta modelització o simulació de la resposta elèctrica va servir en primer lloc per a conèixer els valors de la resistivitat mesurada que es podien esperar pel tipus d'estructura sobre la qual s'anava a organitzar una campanya de prospecció. A més a més, s'observa clarament, en les pseudoseccions calculades, que la configuració Dipol-Dipol aporta una millor resolució dels paleocanals, sobretot quan es troben a més profunditat. Per aquesta raó, en l'organització de la campanya de tomografia elèctrica en va optar per dissenyar els perfils amb aquest dispositiu electròdic.

En la taula 7.1 es mostra un esquema que sintetitza la informació que es pot extreure de les modelitzacions anteriors en funció de la configuració utilitzada i de les característiques del dispositiu.

| MODELS | MÈTODE | CARACTERÍSTIQUES | DETECCIÓ |
|------------------------------|---------------------|---|-----------------|
| 1 Paleocanal | Dipol-Dipol | Nº elec=24, a=2 m | Bona |
| | Wenner-Schlumberger | Nº elec=24, a=2 m | Baixa |
| Ala paleocanal | Dipol-Dipol | Nº elec=24, a=2 m | Bona |
| | Wenner-Schlumberger | Nº elec=24, a=2 m | Bona |
| 2 Paleocanals sense contacte | Dipol-Dipol | Nº elec=24, a=5 m | Bona |
| | | Nº elec=32, a=2 m (Dif. Profunditat) | Bona |
| | Wenner-Schlumberger | Nº elec=30, a=2 m | Bona |
| | | Nº elec=30, a=2 m (Dif. Profunditat) | Baixa |
| 2 Paleocanals amb contacte | Dipol-Dipol | Nº elec=32, a=2 m | Baixa |
| | Wenner-Schlumberger | Nº elec=24, a=2 m | Baixa |

Taula 7.1. Quadre explicatiu dels resultats obtinguts en la modelització dels paleocanals amb la tomografia elèctrica.

7.3.3 – DISSENY DE LA CAMPANYA

L'estudi realitzat sobre el subsòl de la Formació Caspe es va iniciar amb la idea d'estudiar una petita àrea i d'explorar-la al màxim utilitzant diferents dispositius electrònics i realitzant perfils paral·lels entre ells.

L'equip que s'utilitza per a fer la tomografia elèctrica, RS-100M ResisStar, pertany a l'Institut Cartogràfic de Catalunya i consisteix en un equip transportable de corrent continu dissenyat per a realitzar mesures de resistivitat elèctrica i potencial espontani, figura 7.22 . Aquest instrument conté una bateria interna de 100 W de potència que subministra el corrent elèctric necessari per a realitzar les mesures. En el cas que es necessiti una potència superior, existeix la possibilitat de connectar una bateria externa fins a una potència de 1000 W. Els elèctrodes es connecten a l'aparell central, RS-100M Resistar, a través d'un cable multi-electròdic, ME-100, que permet augmentar la longitud del perfil geoelectric. El sistema de transmissió és ràpid, segur i efectiu i permet adquirir una quantitat important de dades experimentals amb una bona resolució espacial.



Figura 7.22. Fotografia de l'equip RESISTAR (RS-100M) utilitzat per a realitzar la tomografia elèctrica en el camp.

A la pràctica la configuració que es va poder dur a terme va ser la Wenner-Schlumberger. L'altre dispositiu, Dipol-Dipol, no es va poder utilitzar, perquè la font d'alimentació del corrent elèctric, bateria interna, presentava problemes quan es feien les mesures amb distàncies grans entre els dos dipols.

Es van organitzar dues campanyes de prospecció elèctrica, la primera al març i la segona a l'octubre del 2002.

En la primera campanya, a part de realitzar una primera caracterització de l'estructura en qüestió, es pretenia fer un reconeixement del terreny i triar les zones sobre les quals es podia dur a terme l'estudi en detall dels paleocanals.

Es van escollir dues zones:

- 1) La primera àrea tenia com a objectiu detectar la continuació d'un paleocanal el qual s'observa en superfície, i que sembla continuar per sota d'un camp.

Aquesta àrea se situa en el quilòmetre 266 de la carretera d'Alcañiz, on es van realitzar dues campanyes de tomografia elèctrica. Entre les dues campanyes es van obtenir un total de 9 perfils cobrint una àrea d'uns 800 m².

La disposició dels perfils es pot observar en la fotografia aèria de la figura 7.23.

Amb l'objectiu de realitzar el seguiment del paleocanal, es va començar per un perfil paral·lel a la seva secció en la direcció SW-NE, i posteriorment, una sèrie de perfils paral·lels que s'allunyaven cada vegada més del primer. Així, es va realitzar una primera fase amb un total de 5 perfils paral·lels en la direcció SW – NE.

Després, per tal de completar la informació, es va optar per a la realització de 4 perfils en la direcció perpendicular als primers, perfils transversals a la secció del paleocanal.

El conjunt de tots aquests perfils de tomografia elèctrica permet construir una malla en aquesta petita àrea d'investigació. La integració de tota la informació aporta una imatge tridimensional a través dels models bidimensionals que resulten de la inversió de les dades.

- 2) La segona àrea d'estudi és una zona plana entre mig de dos paleocanals, i l'objectiu en aquest cas, era conèixer si existia alguna connexió entre aquests dos a

través d'alguna altra estructura del mateix tipus, però situada a més profunditat. Aquesta zona d'estudi se situa en el quilòmetre 39 de la carretera de Mocado.

Un únic perfil amb una extensió de 80 metres entre els dos paleocanals i en la direcció NW - SE es va realitzar amb el propòsit de detectar la presència d'alguna connexió entre aquests, figura 7.24.

A causa que la resposta elèctrica del subsòl és totalment uniforme, és a dir, que no apareix cap indicatiu de la presència d'un cos resistent, no es va procedir a la realització de més perfils de tomografia elèctrica.

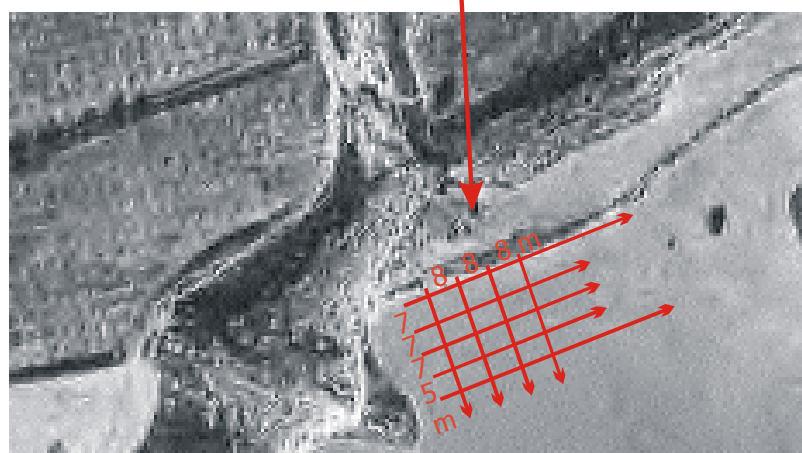


Figura 7.23. Fotografia aèria de la zona d'estudi en el quilòmetre 266 de la carretera d'Alcañiz, i representació de la malla construïda amb els 9 perfils de tomografia elèctrica (fletxes vermelles de la fotografia inferior).

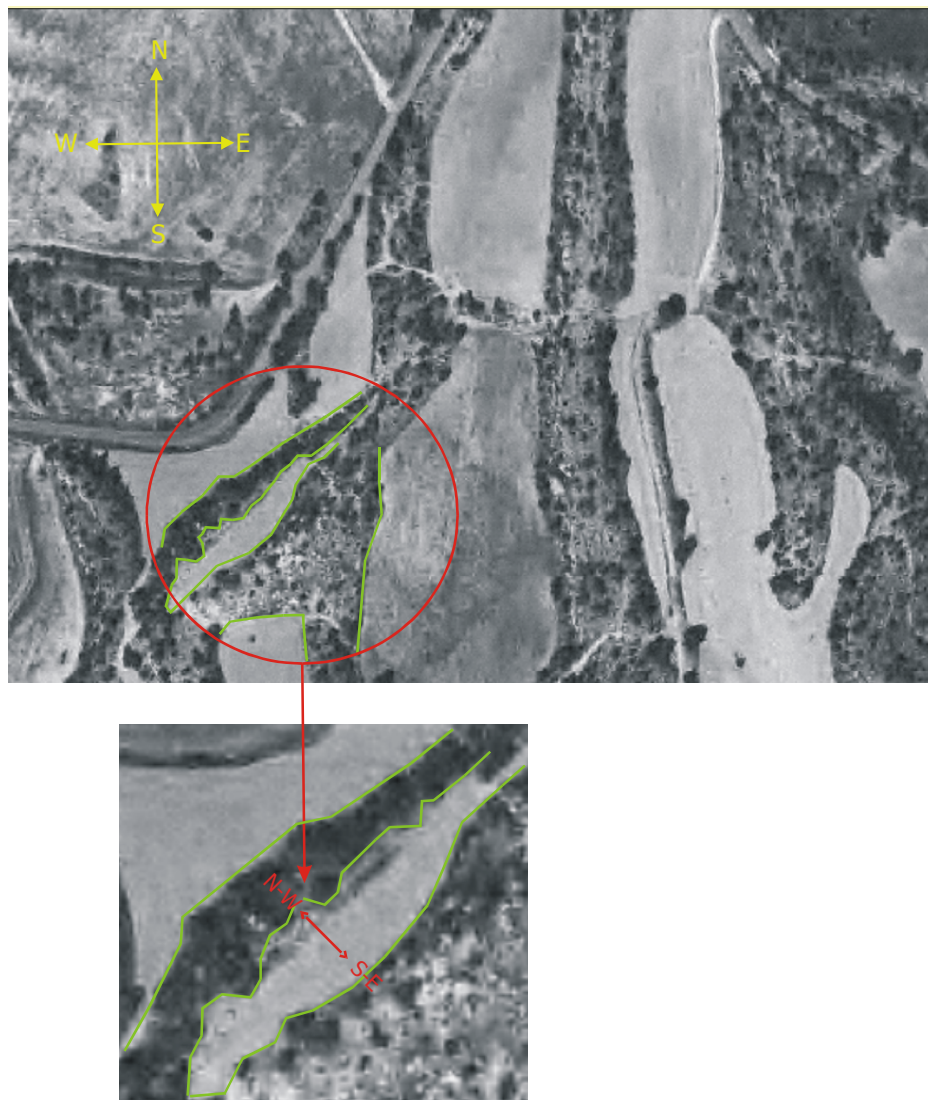


Figura 7.24. Fotografia aèria de la zona d'estudi en el quilòmetre 39 de la carretera de Mocado, i localització del perfil elèctric realitzat en aquesta zona (fotografia inferior) en la direcció NW – SE.

7.3.4 – TRACTAMENT DE LES DADES MESURADES, INVERSIONS I INTERPRETACIÓ

En aquest apartat es presenten les dades mesurades en forma de pseudosecció pels diferents perfils realitzats en les dues àrees d'estudi de la Formació Caspe. Les dades

obtingudes amb el RS100-M ResiStar es canvien de format per poder representar la pseudosecció mitjançant el programa SURFER, i preparar el fitxer d'entrada del programa d'inversió desenvolupat.

7.3.4.1 - 1ª ZONA: ALCANIZ

En el quilòmetre 266 de la carretera d'Alcañiz, figura 7.25, es van realitzar 9 perfils de tomografia elèctrica amb la configuració Wenner-Schlumberger amb una separació de 2 metres entre els elèctrodes.



Figura 7.25. Fotografia de la zona d'estudi en la carretera d'Alcañiz. El Paleocanal que s'observa a un nivell inferior és que desapareix després de contactar amb el paleocanal superior que s'observa al costat dret de la fotografia en una direcció totalment diferent.

Cada perfil elèctric s'ha processat de forma individual utilitzant el programa d'inversió presentat en aquest treball i pel seu tractament, ha estat necessari respectar les característiques electròniques utilitzades en el camp.

Les mesures del camp es presenten en forma de pseudoseccions pels dos grups de dades amb els quals es pot dividir aquesta campanya: els perfils transversals i els perfils axials.

Els perfils transversals són els perfils perpendiculars a la direcció del paleocanal, i els perfils axials són els paral·lels a l'estructura que s'està estudiant. En aquest cas es van

obtenir 5 perfils transversals i 4 perfils axials els quals es presenten en les figures 7.26 i 7.27.

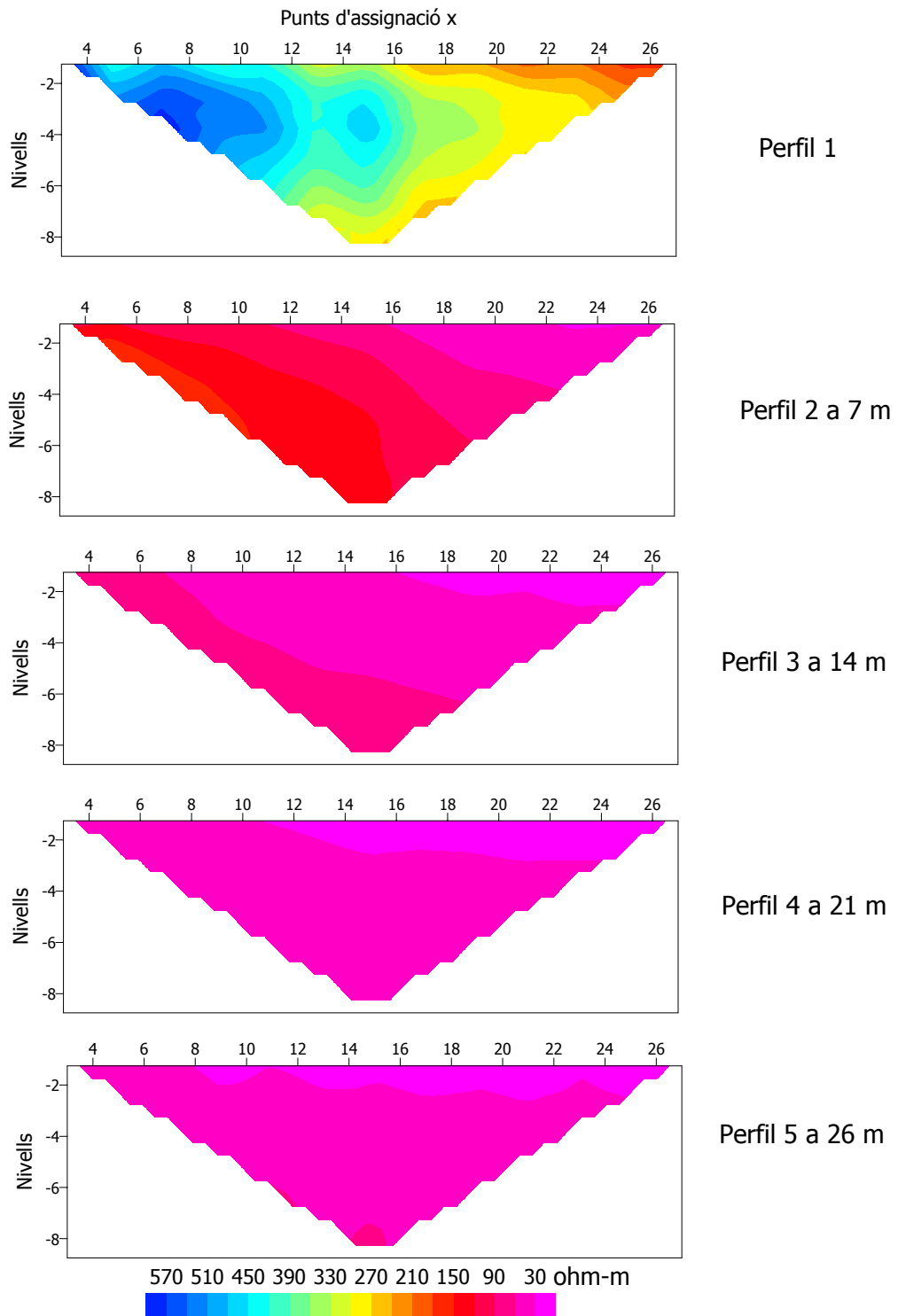


Figura 7.26. Seqüència de les pseudo-seccions mesurades en els perfils paral·lels a la secció del paleocanal, en la direcció SW-NE, perfils transversals.

Com es pot observar en la seqüència de les pseudoseccions dels perfils transversals de la figura 7.26, la presència d'una anomalia resistent en el primer perfil va desapareixent a mesura que els perfils es van allunyat del primer. Aquesta anomalia disminueix significativament en el segon perfil, on només es detecta una zona més resistent d'uns 150 $\Omega \cdot m$. Finalment, es pot dir que a partir del tercer perfil paral·lel, situat a 14 metres, ja no es detecta cap presència d'una estructura amb resistivitat elevada.

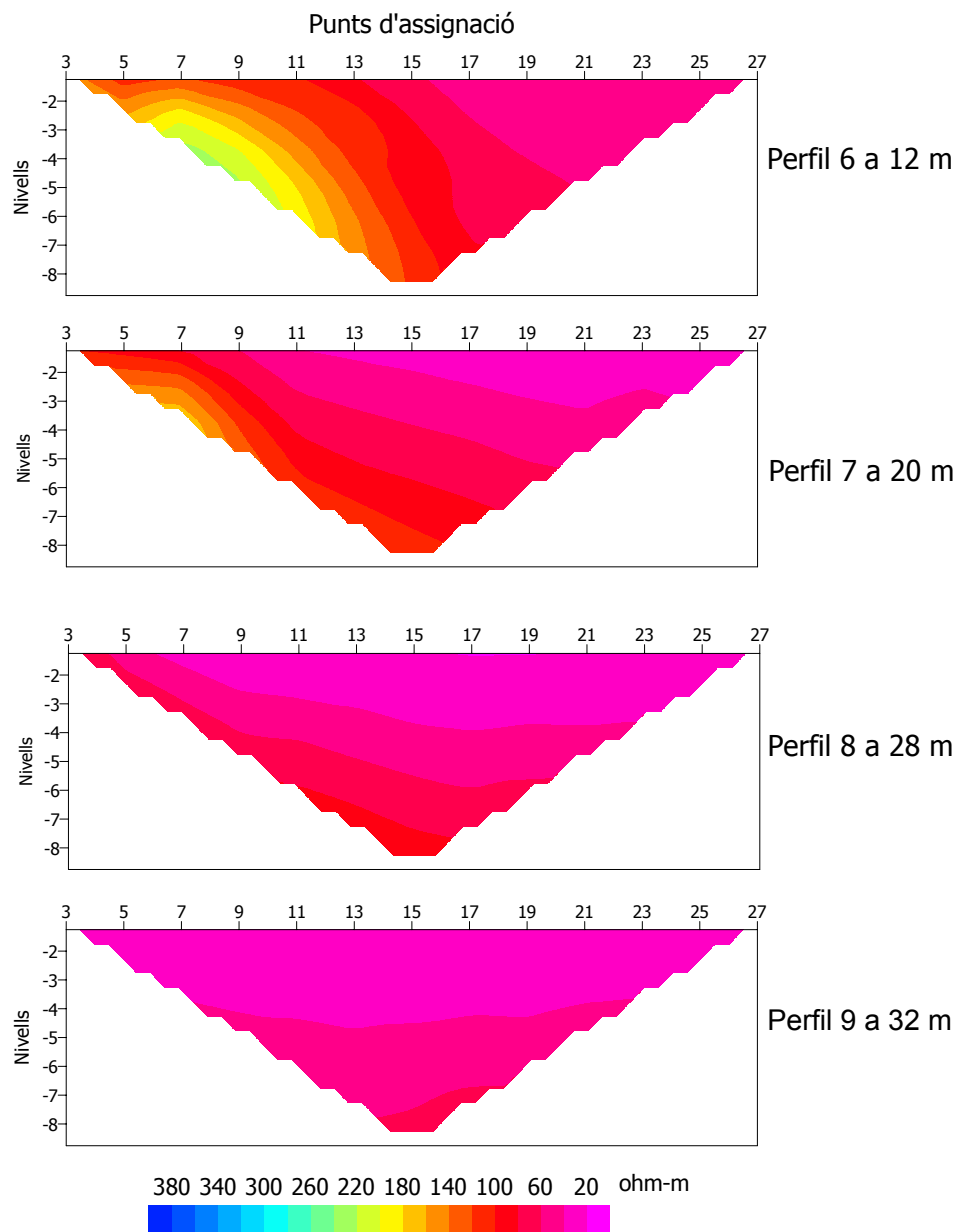


Figura 7.27. Seqüència de les pseudoseccions mesurades en els perfils perpendiculars a la secció del paleocanal, perfils axials.

Pel cas de la seqüència de perfils axials, les dues primeres pseudoseccions presenten una zona de més elevada resistivitat en el seu inici d'uns $200 \Omega\cdot\text{m}$, però, en les successives pseudoseccions el valor de la resistivitat disminueix fins a representar pràcticament un medi homogeni de $10 \Omega\cdot\text{m}$, figura 7.27.

Per tal d'obtenir uns models que s'ajustin a aquestes dades observades i es pugui interpretar el subsòl, es procedeix a aplicar el procés de la inversió. La figura 7.28 mostra el resultat dels 5 perfils de tomografia elèctrica que es van prendre de forma transversal al paleocanal.

El primer model s'interpreta amb la presència de dos paleocanals, perquè apareixen dues zones de resistivitat aparent molt elevada, d'uns $3000 \Omega\cdot\text{m}$. La part esquerra del model representa l'efecte lateral del paleocanal que es distingeix en superfície. A la part dreta del model apareix d'una manera destacada el paleocanal que es troba situat per sota i del qual volem conèixer la seva continuació.

Un fet sorprenent es va produir quan en el perfil paral·lel situat només a 7 metres de distància del primer, representava la pèrdua del paleocanal més profund. Els tres perfils elèctrics posteriors van confirmar aquesta idea, de manera que el que havia de ser un estudi de la direcció que prenia el paleocanal, es va transformar en una nova interpretació. El paleocanal inferior desapareixia fent molt més complexa la interpretació dels resultats.

L'anàlisi dels models obtinguts després de la inversió pels 4 perfils axials, també van confirmar la mateixa idea, figura 7.29.

El primer perfil es va realitzar en la part més cap a l'oest, proper al paleocanal en superfície. El model resultat de la inversió només presentava una zona d'alta resistivitat en els inicis del perfil. Posteriorment, el model es converteix en la representació d'una zona poc resistent i molt homogènia, la qual s'interpreta com el medi argilós que envolta aquestes estructures.

Resultats posteriors, els quals es desplacen més cap a l'est presenten a grans trets el mateix tipus de model, però amb alguns canvis respecte de la resistivitat elèctrica.

El segon perfil, que es troba a 8 metres del primer perfil axial, és el que presenta una resistivitat elèctrica més elevada amb un valor aproximat de $5000 \Omega\cdot\text{m}$. Després aquesta zona va disminuint de valor situant-se a uns $2000 \Omega\cdot\text{m}$ en el tercer perfil localitzat a 16 metres respecte del primer, i desapareix quasi totalment en el darrer perfil, localitzat a 24 metres.

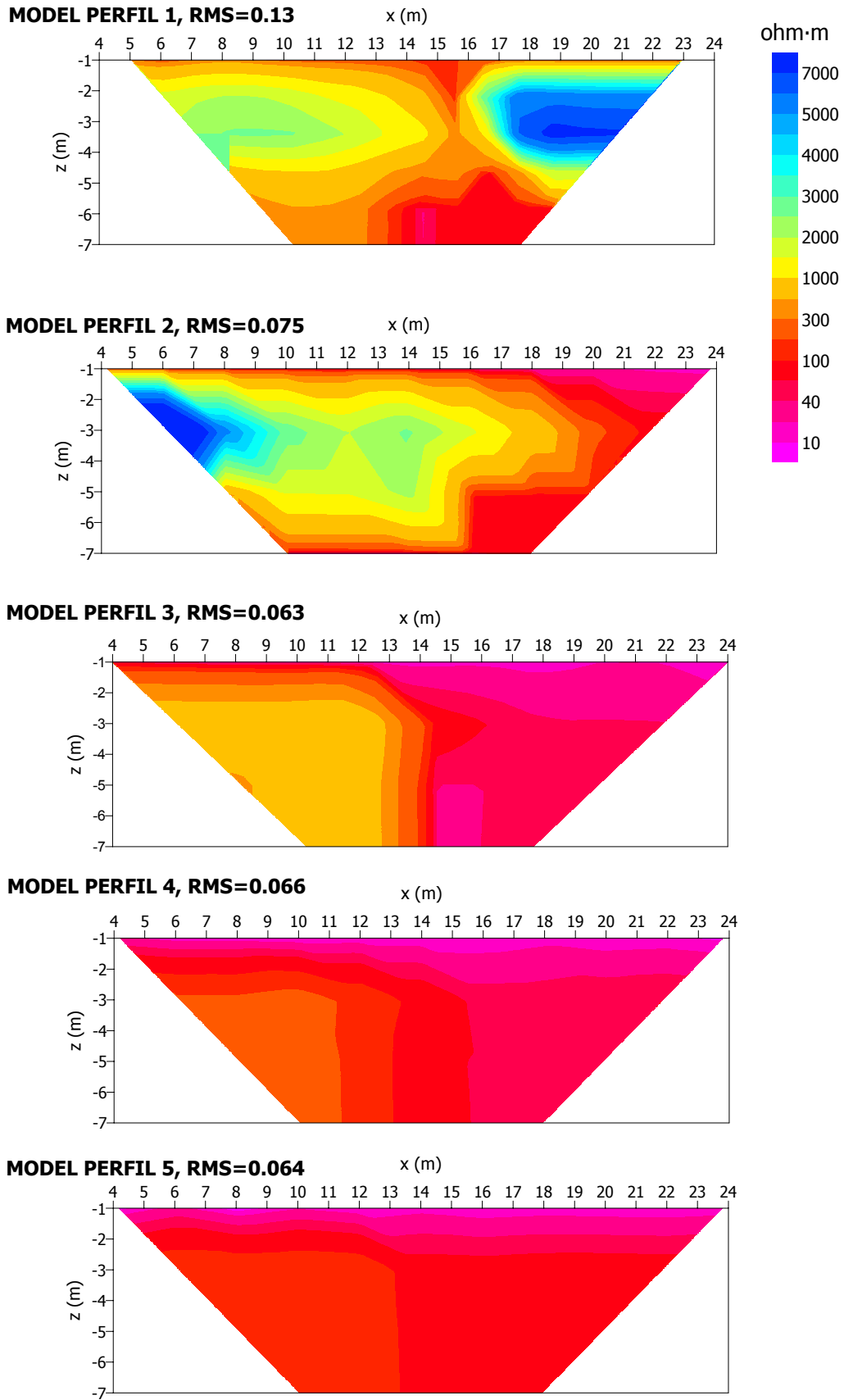


Figura 7.28. Models que resulten de la inversió acompanyats del valor del RMS corresponent, (perfils transversals).

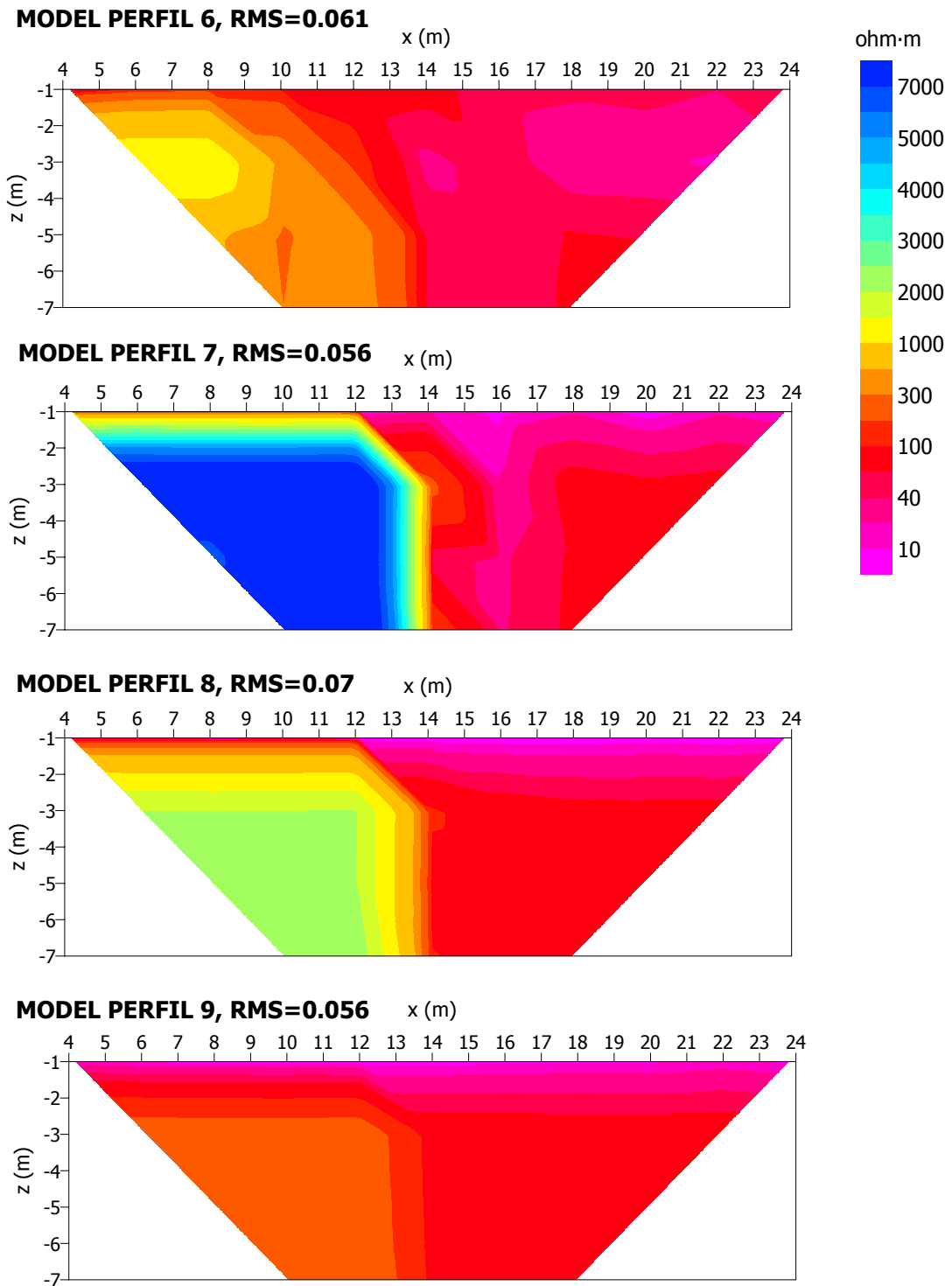


Figura 7.29. Models que resulten de la inversió acompanyats del valor del RMS corresponent, que mostra l'ajust d'aquests models amb les dades mesurades (perfils axials).

Finalment, els models obtinguts es van integrar per obtenir una representació gràfica de tots els paràmetres dels models i mostrar una imatge en tres dimensions, figura 7.30. Aquesta imatge està formada a partir de models finals de les inversions

bidimensionals. Malgrat això, la imatge que s'obté del paleocanal és una bona interpretació del subsòl real. Aquests resultats però, fan més complex l'estudi dels paleocanals en la Formació de Caspe, perquè és molt difícil de predir el seu comportament quan aquestes estructures no es veuen en superfície.

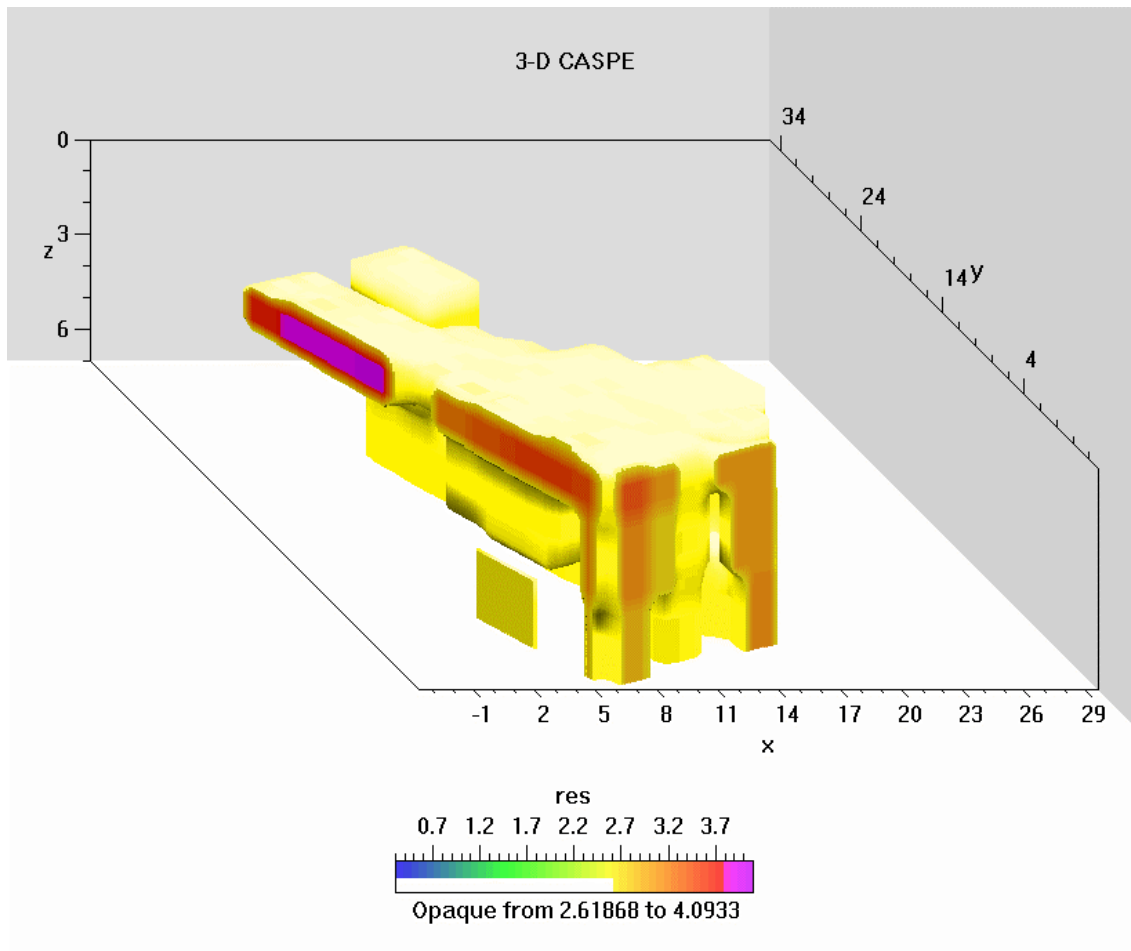


Figura 7.30. Visió en tres dimensions del paleocanal en una direcció NE-SW. La resistivitat elèctrica es dona en escala logarítmica.

7.3.4.2 - 2^a ZONA: MOCATERO

En aquesta zona es van realitzar tres perfils de forma contínua des d'un paleocanal a l'altre cobrint una llargada d'uns 80 metres aproximadament, en la direcció NW-SE, figura 7.31. La configuració utilitzada per a la tomografia elèctrica va ser el dispositiu

Wenner-Schlumberger amb una separació entre els elèctrodes de 2 metres. Els dos primers perfils es van realitzar amb 22 elèctrodes, perquè una línia no funcionava adequadament. Finalment, en el tercer perfil es van utilitzar només 16 elèctrodes disminuint significativament la profunditat d'investigació. Cada perfil es troba superposat 4 metres amb l'anterior per poder obtenir una imatge continua del subsòl.



Figura 7.31. Fotografia d'un perfil de tomografia elèctrica en la zona de Mocado, entre els dos paleocanals.

L'anàlisi de les dades de resistivitat aparent que es van mesurar en aquesta zona i que es poden observar en la següent imatge, figura 7.32, van permetre deduir que no existeix cap indicatiu de la presència d'un paleocanal en profunditat, ja que el valor de la resistivitat aparent en les respectives pseudoseccions, presenta un comportament molt uniforme en tota la zona central. L'anomalia de resistivitat més elevada localitzada en la part esquerra del perfil s'interpreta com l'efecte del paleocanal que existeix just en aquesta zona, i que s'observa en superfície. Després, la resistivitat va disminuint fins arribar a un valor del $10 \Omega \cdot m$ i es manté més o menys estable en tota la resta de les mesures.

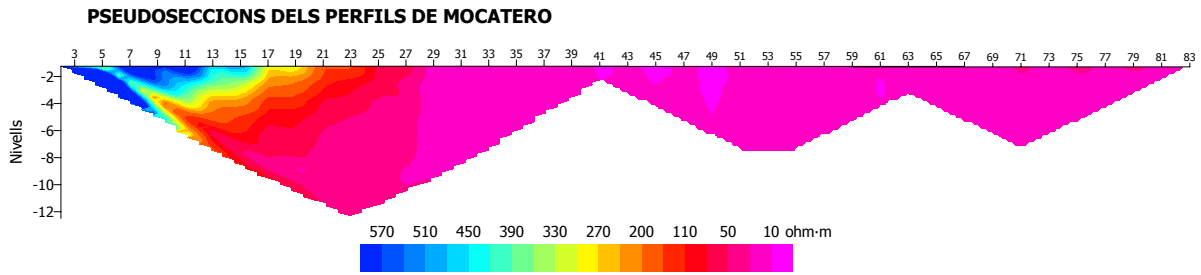


Figura 7.32. Imatge bidimensional de les tres pseudoseccions mesurades en la zona de Mocatero.

És evident que aquesta imatge no és el model de resistivitat elèctrica del subsòl, ja que encara no ha estat aplicat el procés de la inversió sobre les dades mesurades. Malgrat això, aquesta imatge permet obtenir una idea del que s'espera trobar en els models, i permet prendre decisions en el camp. En aquest cas, a l'observar d'una manera tan clara que no existia cap indicati de trobar un paleocanal, es va procedir a realitzar altres estudis optimitzant el temps i els recursos. El resultat de les inversions pels tres perfils de tomografia elèctrica realitzats en aquesta zona es presenten en la figura 7.33. En l'imatge de la figura 7.34 es pot apreciar la resposta elèctrica d'aquests models resultants de la inversió i la similitud amb les dades observades de la figura 7.32. Tal com s'esperava, els models no mostren cap indicati de l'existència d'un paleocanal en profunditat que connecti els altres dos que s'observen en superfície. Tot i aquesta interpretació, s'ha de tenir present que els models dels perfils 2 i 3 es limiten a una profunditat de 5 metres pels problemes que van aparèixer en l'equip de mesura.

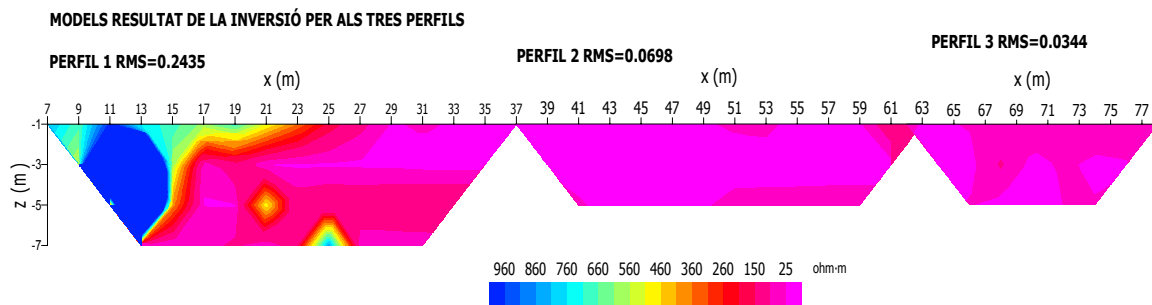


Figura 7.33. Composició dels models obtinguts en la inversió de les dades pels tres perfils Wenner-Schlumberger realitzats en la zona de Mocatero.

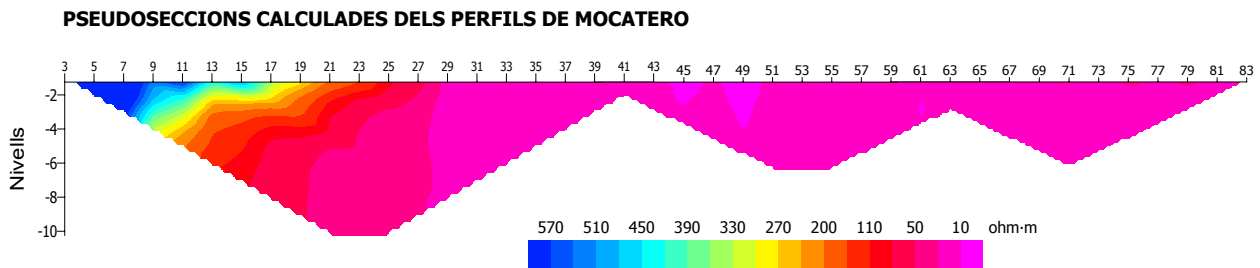


Figura 7.34. Imatge bidimensional de les tres pseudoseccions calculades a partir dels models de la figura 7.33.

7.3.5 – CONCLUSIONS

Inicialment, la modelització del paleocanal va permetre confirmar que l'estructura resistiva en un medi més conductor era detectable mitjançant la tomografia elèctrica. Els models finals obtinguts amb el programa d'inversió bidimensional, van permetre determinar en la zona d'Alcañiz la discontinuïtat del paleocanal que se suposava evolucionava en alguna direcció a certa profunditat. Per altra banda, en la campanya de la zona de Mocado no es va poder identificar cap presència d'una estructura resistiva en profunditat. Cal tenir present, però, que les configuracions electròdiques que es van poder realitzar en el camp van limitar de manera important la profunditat d'investigació de les pseudoseccions, factor important per a la determinació dels models que interpreten les dades mesurades.

Després d'aquestes aplicacions, es pot afirmar que els resultats obtinguts amb la utilització dels programes de modelització i d'inversió a dades experimentals han estat molt satisfactoris. Les inversions presenten un comportament estable i convergeixen cap a una resposta que representa tant la geometria com les característiques físiques del model fins i tot quan el contrast de resistivitat elèctrica és elevat, exemple de les cavitats buides.