

# APLICACIÓ DE TÈCNiques GEOFÍSiques ELECTROMAGNÈTIQUES A LA LOCALITZACIÓ DE ZONES AFECTADES PER ABOCAMENTS INCONTROLATS DE RESIDUS

Rogelio Linares, Lluís Pallí, David Brusi i Carles Roqué

Àrea de Geodinàmica. Dept. de Ciències Ambientals. Universitat de Girona. Campus de Montilivi.  
17071 Girona.

---

## RESUM

La necessitat de nous espais per edificar, motivada pel creixement urbanístic de les ciutats, està generant una progressiva ocupació de zones que anteriorment havien estat destinades a altres usos territorials. En aquests indrets, habitualment situats als afores dels nuclis urbans, els abocaments incontrolats de tota mena de residus ha estat, durant molts anys, una pràctica constatada.

L'anàlisi qualitativa del comportament elèctric del subsòl, a partir de la realització de mapes i/o seccions de conductivitat aparent, aporta una informació força acurada de la localització de les anomalies provocades per aquests abocaments. Així mateix, la utilització de tècniques electromagnètiques (instruments EM-31 i EM-34 GEONICS) representa una notòria reducció dels costos econòmics respecte dels ocasionats utilitzant altres mètodes de reconeixement.

Es presenten dos exemples, situats al campus universitari de Montilivi –extrem meridional de la ciutat de Girona–, representatius de la problemàtica ambiental i alhora exemplificadors de la potencialitat del mètode geofísic utilitzat.

## RESUMEN

La necesidad de nuevos espacios para edificar, motivada por el crecimiento urbanístico de las ciudades, está generando una progresiva ocupación de terrenos que anteriormente estaban destinados a otros usos. Algunos de estos lugares, casi siempre situados en la periferia de los núcleos urbanos, han sido, durante muchos años, vertederos incontrolados de toda clase de residuos.

El análisis cualitativo del comportamiento eléctrico del subsuelo, a partir de la realización de mapas y/o secciones de conductividad aparente, aporta una información bastante exacta de la localización de las anomalías provocadas por estos vertidos. Asimismo, la utilización de técnicas electromagnéticas (instrumentos EM-31 y EM-34 GEONICS) permite una notoria reducción de los costes económicos respecto de otros métodos de reconocimiento.

Se presentan dos casos, situados en el campus universitario de Montilivi –extremo meridional de la ciudad de Girona– representativos de esta problemática ambiental y, al mismo tiempo, ejemplificadores de la potencialidad del método geofísico utilizado.

## ABSTRACT

Increase of the metropolitan area of cities provoking a progressive settlement of zones that previously had a different territorial use. These zones are usually located within city boundaries and for many years have been affected by the waste of many kinds of residues. Qualitative analysis of the electrical behaviour of soil, based on maps and cross sections of apparent conductivity, allows us to locate anomalies generated by the wastes. Moreover, the electromagnetic techniques (EM-31 and EM-34 Geonics devices) are cheaper than other survey methods. Two examples in the campus of the University of Girona, in the southern area of Girona city, illustrate the environmental problem and the applicability of the geophysical method.

---

## INTRODUCCIÓ: LA PROBLEMÀTICA AMBIENTAL

Els abocaments incontrolats de diferents tipus de residus en zones perimetrals en nuclis urbans importants ha estat, malauradament, una pràctica habitual. Actualment, en la majoria dels casos, aquest tipus d'actuacions han estat quasi totalment eradicades i, per tant, cal considerar-les com una herència d'una incorrecta gestió mediambiental.

No obstant això, les conseqüències o problemàtiques ocasionades per aquests abocaments incontrolats no finalitzen en el moment en què es deixen de produir. Segons els factors condicionants, com les característiques del medi natural en el qual s'insereixen, la tipologia dels residus abocats i els usos a què són destinats els terrenys afectats, es poden derivar situacions greus de risc i/o impacte.

Una situació com la que s'ha detectat en el tram baix del riu Besòs, a la rodalia de la ciutat de Barcelona, és prou il·lustrativa de l'abast potencial d'aquesta problemàtica ambiental heretada. Durant la dècada dels 70, els dipòsits al·luvials d'aquest riu, localitzats entre les poblacions de Montmeló i Montcada i Reixac, van ser objecte d'exploració intensiva per a l'obtenció d'aïdrius naturals. A mesura que les activitats extractives eren abandonades, les depressions generades eren reemplaçades amb residus de diferents tipus, incloent-hi els residus sòlids urbans i els d'origen industrial. Aproximadament un 30 % de la superfície ocupada per aquests dipòsits al·luvials va ser reemplaçada pels abocaments incontrolats, amb un volum total d'uns 3,4 Hm<sup>3</sup> de residus (Navarro, 1989). Les darreres dades recopilades posen de manifest que la contaminació provocada per aquests residus en el medi hídic subterrani (microcontaminants orgànics i metalls pesants, principalment) persisteix encara avui dia (Font et al., 1996).

El cas concret de la urbanització de nous sectors en terrenys afectats per abocaments incontrolats és una problemàtica present a les principals ciutats d'Espanya. La necessitat de més espais, motivada pel creixement urbanístic dels municipis, ha generat l'ocupació de zones en les quals coexistien diferents usos territorials: explotacions de roques industrials, zones industrials i aprofitaments agrícoles, principalment. En aquestes zones, habitualment situades als afores dels nuclis urbans i considerades com a marginals, els abocaments incontrolats de tota mena de residus ha estat, durant molts anys, un fet constatat.

Moltes vegades, l'existència d'aquests abocaments en zones de nova urbanització suposa un greu problema, tant des d'un punt de vista tècnic com econòmic. Per valorar-ne la incidència en els projectes constructius, cal considerar tant els aspectes geotècnics com els de risc ambiental (Granda i Cambero, 1998).

El comportament geotècnic deficient d'aquests dipòsits limita la possibilitat de dur a terme cimentacions superficials, cosa que fa necessari adoptar solucions especials del tipus pilotatge o bé realitzar l'excavació i la retirada dels residus abocats.

Quant als aspectes ambientals, la mala olor i les emissions de metà són dos factors importants que cal tenir en compte a l'hora de dissenyar els projectes d'urbanització en zones d'aquests tipus. En el cas de les emissions de metà, la seva acumulació en el subsòl pot provocar explosions i incendis.

En ambdós, l'existència d'aquests abocaments incontrolats de residus es tradueix en un increment del cost inicialment previst, que pot arribar a ser prou impor-

tant per desestimar un projecte. Quan es tracta d'inversions públiques, la decisió per dur a terme una determinada actuació en una zona afectada per aquests abocaments es tradueix en un sobrecost que paga la comunitat.

Cal, en definitiva, actuar de manera preventiva. El coneixement previ de la distribució i les característiques d'aquests residus aporta una informació imprescindible per a la correcta execució del projecte constructiu.

En aquest sentit, la cartografia de conductivitats mitjançant mètodes electromagnètics s'ha convertit en la darrera dècada en una tècnica d'exploració que proporciona bons resultats i alhora reduïx notòriament els costos econòmics respecte dels ocasionats amb els mètodes convencionals de reconeixement directe (sondejos mecànics) o indirecte (geofísics) del subsòl (Zalasiewicz et al., 1985; Pehme et al., 1992; Jordan i Costantini, 1995; Font et al., 1998; Granda i Cambero, 1998).

En aquest treball es presenten els resultats obtinguts en l'estudi de diverses zones afectades per aquesta problemàtica ambiental, mitjançant aquests tipus de tècniques geofísiques.

### TÈCNiques ELECTROMAGNÈTIQUES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA

A grans trets, el mètode es basa en la generació elèctrica d'un camp magnètic primari mitjançant una antena emissora situada a les proximitats de la superfície del terreny. Aquest camp magnètic primari induïx un camp magnètic secundari en el subsòl. La mesura de la relació entre ambdós, valorada en una antena receptora situada a certa distància, permet valorar la conductivitat aparent dels diversos cossos geològics del subsòl.

Aquestes tècniques es troben ben documentades en els treballs de McNeill (1979, 1980a i 1980b).

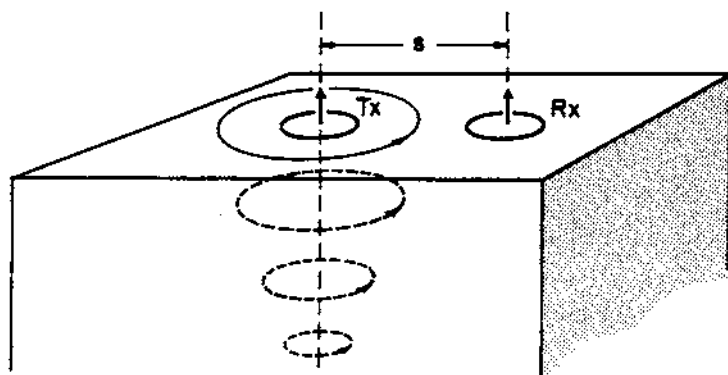


Figura 1. Flux de corrent induït en un semiespai, segons McNeill (1980a).

## Principis bàsics

Seguint l'esquema expositiu de McNeill (1980b), considerem una situació (figura 1) en la qual una antena transmissora  $T_x$  es troba col·locada sobre un terreny considerat uniforme i connectada amb una altra antena receptora  $R_x$  que es localitza a certa distància  $s$ . La variació al llarg del temps del camp magnètic causada pel corrent altern amb una freqüència d'àudio en l'antena transmissora induïx petits corrents elèctrics en el terreny. Aquests corrents generen un camp magnètic secundari  $H_s$  que és detectat, conjuntament amb el camp primari  $H_p$ , per l'antena receptora.

En general, aquest camp magnètic secundari constitueix una funció complexa que depèn de l'espaiament entre antenes  $s$ ; de la freqüència d'operació  $f$ ; i de la conductivitat del terreny  $\sigma$ . Sota certs requeriments, tècnicament definits com a "operació a valors baixos d'inducció", el camp magnètic secundari pot ésser considerat com una funció simple d'aquestes variables. Aquests requeriments estan incorporats en el disseny dels aparells geofísics i, per tant, el camp magnètic secundari pot expressar-se com a:

$$(H_s/H_p) \approx (i\omega\mu_0\sigma s^2/4)$$

on:

$H_s$  = camp magnètic secundari en l'antena receptora

$H_p$  = camp magnètic primari en l'antena receptora

$\omega = 2\pi f$ , on  $f$  és la freqüència (Hz)

$\mu_0$  = permeabilitat en l'espai lliure

$s$  = separació entre antenes (m)

$i = \sqrt{-1}$

$\sigma$  = conductivitat (mho/m)

La relació entre els camps magnètics secundari i primari és, així, linealment proporcional a la conductivitat del terreny. Aquest fet permet interpretar, a partir de lectures directes, la mesura de la conductivitat del terreny a partir de la simple mesura d'aquesta relació. Atesa la proporcionalitat  $H_s/H_p$  (component en quadratura), la conductivitat aparent ( $\sigma_a$ ) indicada per l'instrument pot ser definida per l'equació següent:

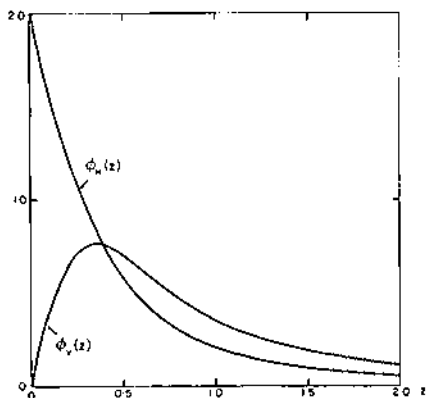
$$\sigma_a = (4/i\omega\mu_0\sigma s^2 / (H_s/H_p))$$

### Característiques dels equips utilitzats

Per a la realització d'aquesta experimentació han estat utilitzats els conductímetres EM-31 i EM-34 GEONICS.

L'instrument EM-31 presenta un espaiament entre antenes fix de 3,7 m i una freqüència de 9,8 kHz, que permet assolir fondàries d'investigació màximes de l'ordre de 6 m. El registre dels components en quadratura i en fase dels camps electromagnètics generats es realitza de manera automàtica. L'equip està dissenyat perquè sigui portàtil i el pugui utilitzar una sola persona, que pot fer mesurats en punts predeterminats o bé de manera contínua.

L'aparell EM-34, que es pot emprar mitjançant dos operadors, presenta dues antenes connectades de manera flexible a través d'un cable. L'espaiament entre



**Figura 2.** Comparació de la resposta relativa de les configuracions d'antenes vertical i horitzontal, segons McNeill (1980a).

antenes horitzontals, la màxima resposta relativa s'obté per als materials situats a profunditat aproximadament igual a 0,4s (figura 2).

antenes és mesurat electrònicament, fent servir el component en fase, i és preseleccionat per a separacions de 10, 20 i 40 m (corresponent a freqüències de 6.400 Hz, 1.600 Hz i 400 Hz, respectivament). D'acord amb Stewart (1982) i McNeill (1980a), s'aconsegueixen diferents fondàries d'exploració dominants, segons la separació entre antenes i la seva orientació (tipus de dipòls).

Ambdós equips permeten treballar amb dipòls horitzontals (configuracions d'antenes verticals) i dipòls verticals (configuracions d'antenes horitzontals). La disposició d'antenes verticals és més sensible als materials més superficials i la seva resposta decreix amb la fondària. En el cas d'una configuració d'ante-

### ALGUNS EXEMPLES REPRESENTATIUS

La zona estudiada es localitza a l'extrem meridional de la ciutat de Girona, al voltant del campus universitari de Montilivi. Es tracta d'una de les àrees que estan experimentant un major creixement urbanístic.

Fins a la dècada dels 90, les activitats agrícoles i forestals del sector coexistien amb localitzades explotacions de roques industrials. Aquests usos del territori van ser substituïts de manera progressiva per una ocupació de tipus residencial, principalment.

En determinats llocs, l'existència de residus encara es pot reconèixer pels canvis de morfologia ocasionats pels abocaments. En altres llocs, però, passen completament desapercebuts; és el cas, per exemple, dels rebliments de les depressions originades per les explotacions de roques industrials. En aquests últims, només s'identifiquen quan es realitzen estudis geotècnics o excavacions.

Per a aquest treball han estat seleccionades dues zones que són representatives, al nostre entendre, d'aquesta problemàtica ambiental.

#### Exemple 1

Es tracta d'una parcel·la de propera urbanització, d'una extensió aproximada de 14.000 m<sup>2</sup>.

Es disposa de la informació geològica facilitada per tres sondejos de reconeixement. Segons aquestes perforacions, el subsòl està constituït per dues unitats litològiques principals. La formació superficial està constituïda per nivells d'argiles i llims

amb còdols dispersos, el gruix inferior dels quals és 1,5 m. Els dipòsits atribuïts al substrat corresponen principalment a dipòsits argilosos, fins a fondàries de l'ordre d'uns 7-8 m. A partir d'aquestes profunditats, referides al nivell del terreny, i fins al final de les perforacions, es desenvolupa una unitat constituïda per grava i sorres amb intercalacions de nivells d'argiles. Aquest tram més profund es troba saturat d'aigua.

Si bé els abocaments incontrolats no afecten la parcel·la investigada, mitjançant els sondejos mecànics de reconeixement en determinants sectors propers a la zona, encara es poden reconèixer pels canvis de pendent originats.

Les mesures electromagnètiques realitzades en aquesta parcel·la, no afectada pels abocaments, posen de manifest que els materials que conformen el subsòl es caracteritzen pel fet de presentar valors de conductivitat aparent inferior als 30 mS/m, segons les mesures realitzades amb l'equip EM-34, amb una separació entre anelles de 10 m i configuracions horitzontals i verticals.

Per a la caracterització geofísica de l'àrea afectada pels abocaments incontrolats, s'ha utilitzat el conductímetre de superfície EM-31. L'elecció d'aquest equip és condicionada pel poc gruix, inferior als 6 m de potència, que presenten les diferents plataformes previsiblement constituïdes per residus.

Es van fer un total de 362 punts de mesura, en menys de dues hores, seguint diferents transectes prèviament definits. En cadascun d'aquests punts es van registrar els valors en quadratura (conductivitat aparent) i en fase del camp magnètic secundari, per a dipòls verticals. Les variacions més significatives s'han observat en els registres de conductivitat aparent (figura 3). Així, les zones afectades pels abocaments presenten valors de conductivitats aparents compresos entre els 25-40 mS/m. Els màxims enregistrats han estat de 43 mS/m.

En general, les zones que presenten els valors més alts de conductivitat també presenten les anomalies més importants dels component en fase. Probablement, aquest fet és indicatiu de la presència d'elements metàl·lics. En conjunt, i d'acord amb els valors mesurats, s'opina que es tracta principalment de residus inerts.

Així mateix, els baixos valors de conductivitat que caracteritzen les parts frontals de les plataformes situades en els sectors E i NE, similars als observats pels materials de la zona, ens menen a opinar que un percentatge important d'aquests abocaments corresponen a terres procedents de l'excavació de terrenys propers.

## Exemple 2

En aquest cas s'ha estudiat una zona localitzada dins un conjunt urbanitzat que, amb forma de planta rectangular, ocupa una extensió d'uns 2.500 m<sup>2</sup>.

L'anàlisi de fotografies aèries dels anys 1956 i 1978 indica que en aquest sector hi havia hagut explotacions de roques industrials. Actualment la morfologia de la zona és planera i només resten com a indicis d'aquestes activitats algunes construccions dèrriuïdes, que han estat pràcticament cobertes per reblliments antròpics.

Com hem apuntat anteriorment, les depressions originades per les extraccions de matèries primeres acostumaven a ser zones utilitzades per a l'abocament incontrolat de residus. Per aquest motiu, es va considerar oportú investigar aquesta àrea.

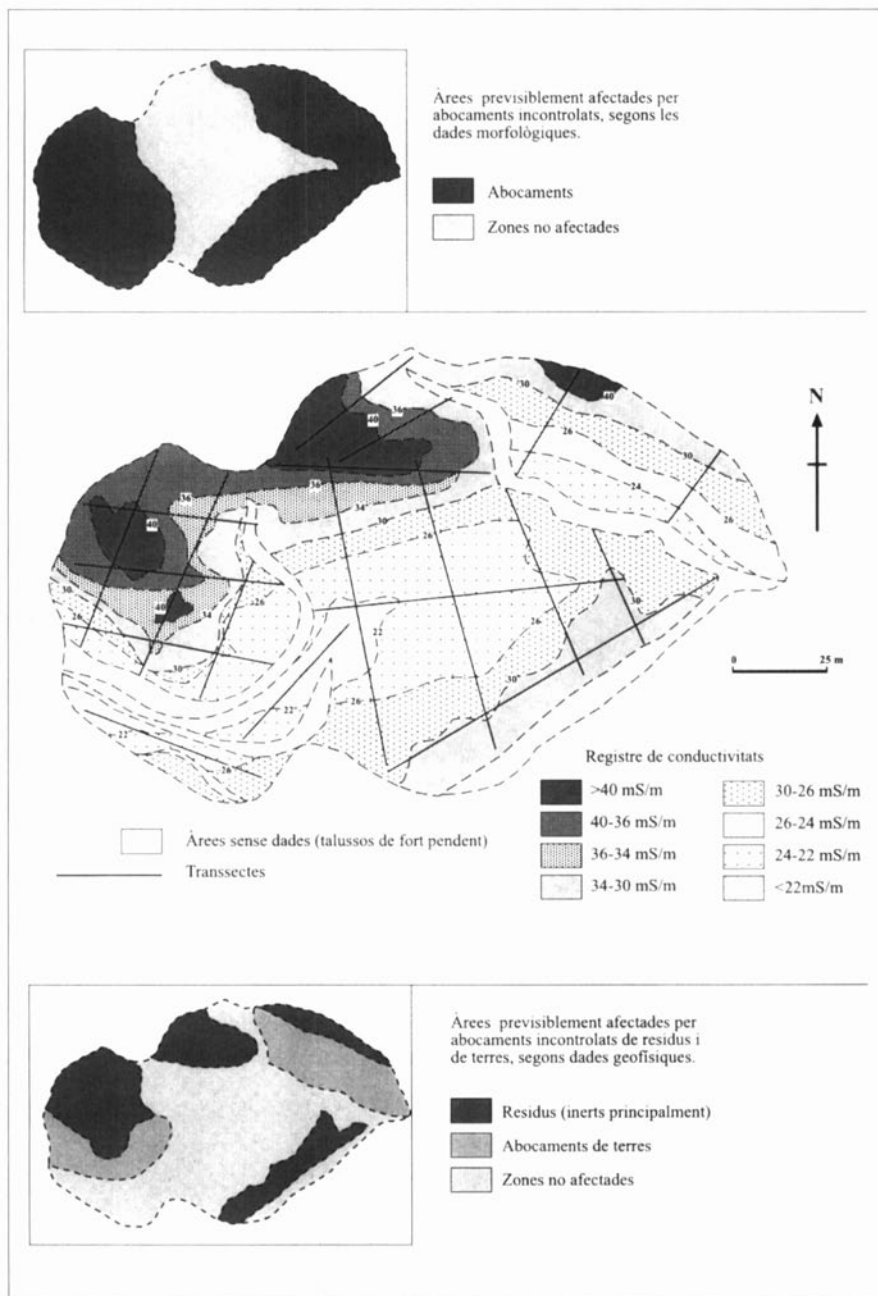
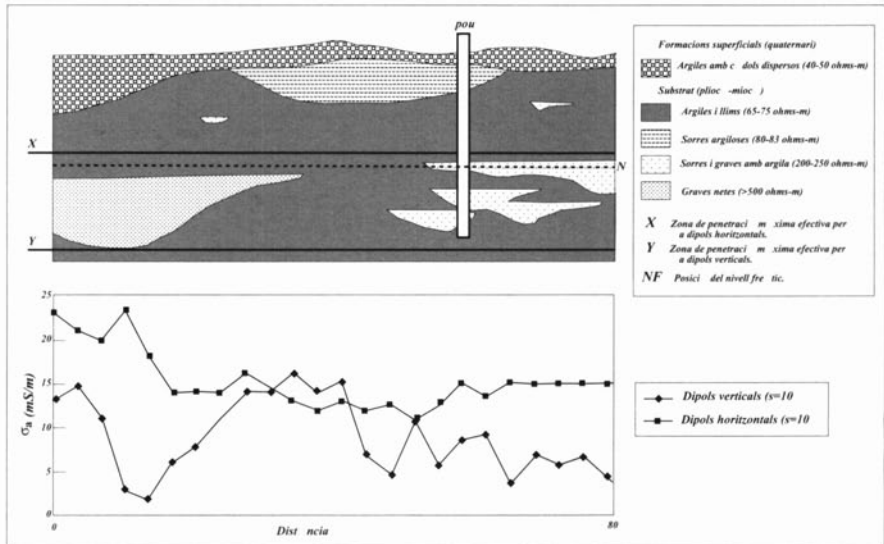


Figura 3. Cartografia de conductivitats aparents realitzada amb l'equip EM-31. Exemple 1.



**Figura 4.** Secció electromagnètica (EM-34) i interpretació de les mesures geofísiques. Exemple 2.

La tipologia de materials que conforma el subsòl d'aquesta zona és força similar a la descrita anteriorment (exemple 1). En aquest cas, la informació geològica utilitzada s'ha obtingut a través d'estudis de camp.

Per acotar els valors de conductivitat aparent que presenten aquests materials, s'ha seleccionat una àrea en la qual les diferents litologies que constitueixen el seu subsòl eren visibles en diversos talls. A la figura 4 es presenten els resultats obtinguts. Com s'observa, els mesurats efectuats amb l'equip EM-34 indiquen que per a profunditats efectives d'exploració compreses entre els 7,5 m (dipòls horitzontals) i els 15 m (dipòls verticals), els materials presenten conductivitats aparents inferiors als 25 mS/m.

En l'àrea previsiblement afectada pels abocaments incontrolats, s'han realitzat dos perfils paral·lels i separats entre si uns 30 m. A la figura 5 es mostren els valors detectats amb el conductímetre EM-31. En tots dos perfils destaca l'existència d'uns màxims amb valors de l'ordre de 160-180 mS/m. A part d'aquestes anomalies, el comportament elèctric dels materials investigats es caracteritza pel fet de presentar uns valors de conductivitat considerablement elevats en gran part de la secció A-A', compresos entre 80 mS/m i 120 mS/m, i, en canvi, força més baixos i constants en el cas de la secció B-B', de l'ordre d'uns 25-30 mS/m.

La comparació d'aquests valors amb el conjunt de dades disponibles ens mena a opinar que els residus previsiblement abocats en aquest sector es localitzen en gran part del subsòl investigat en la secció A-A'. Independentment de si són residus o sòls contaminats, queda palès que es tracta de substàncies altament conductores.



Pel que fa als materials reconeguts en la secció B-B', aquests presenten un comportament més resistiu i similar al que caracteritza els materials de la zona. En conseqüència, s'opina que aquest sector no va ser afectat pels abocaments.

Finalment, cal destacar que les localitzades anomalies que s'observen a dues seccions realitzades (pics de conductivitat de l'ordre de 160-180 mS/m) coincideixen amb el traçat de canonades soterrades d'aigua.

### CONSIDERACIONS FINALS

Entenem que els exemples presentats són prou il·lustratius de les potencialitats del mètode electromagnètic (equips EM-31 i EM-34) aplicats a localitzar zones afectades per abocaments incontrolats de residus.

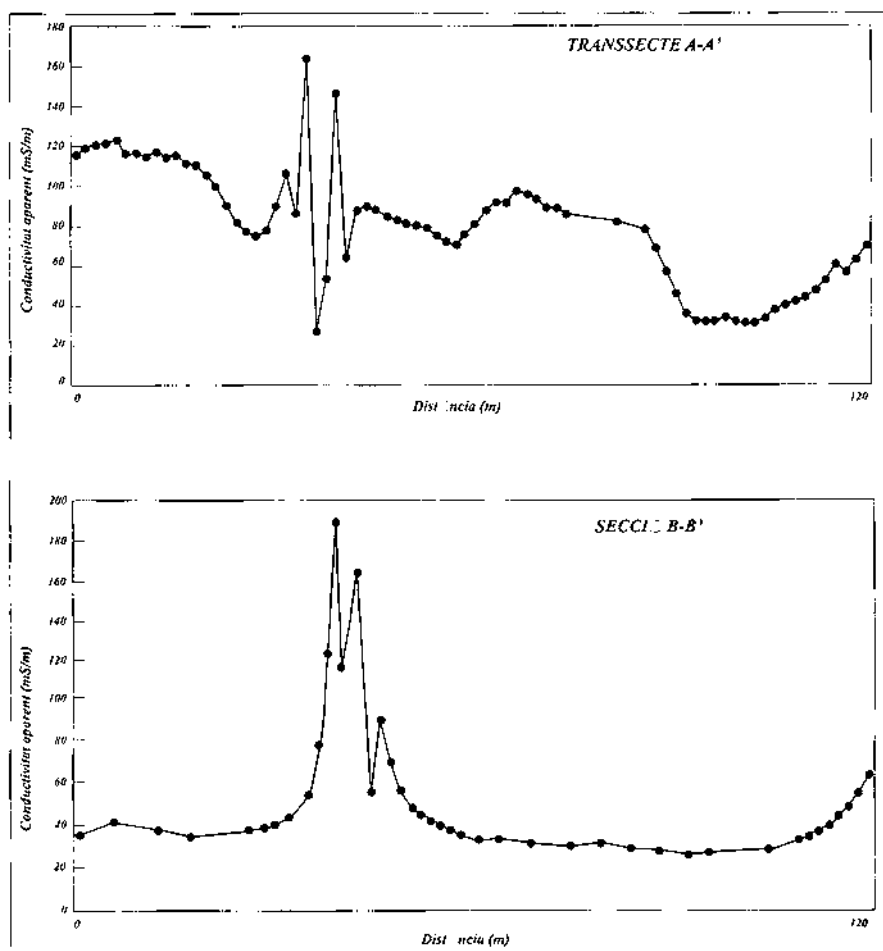


Figura 5. Registres de conductivitat aparent realitzats amb l'equip EM-31. Exemple 2.

La informació qualitativa que proporcionen aquests conductímetres de superfície, complementada, en punts concrets, amb les dades que proporcionen altres tècniques geofísiques (elèctrica -SEV- o sísmica per refracció, per exemple) i/o els sondejos mecànics de reconeixement, permet acotar amb un alt grau de definició l'abast areal de la problemàtica ambiental plantejada en aquest treball. Al mateix temps, la utilització d'aquestes tècniques geofísiques redueix notòriament els costos econòmics ocasionats amb altres mètodes tradicionals d'investigació del subsòl.

### Bibliografia

- FONT, X.; CARMONA, J.M.; PINTO, V.; CASAS, A.; RIVERA, L.; NAVARRO, A.; CORTES, A.; TAPIES, J.C. i FOLCH, M. (1996): Contaminación de suelos y aguas subterráneas por actividades industriales en la cuenca del río Besós (Barcelona). VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de GAOT. Granada, volum II, pàg. 241-256.
- FONT, X.; NAVARRO, A.; RIVERO, L.; CASAS, A.; NOGUERA, J. i MARTINEZ, F. (1998): Assesment of non controlled land-fillings by geochemical and geophysical methods. Llobregat delta (Barcelona, Spain). Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section). Barcelona, pàg. 135-138.
- GRANDA, A., i CAMBERO, J.C. (1998): The use of geophysical techniques for the detection and characterization of landfill in areas of urban development. Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section). Barcelona, pàg. 111-114.
- JORDAN, T.E., i COSTANTINI, D. (1995): The use of non-invasive electromagnetic (EM) techniques for focusing environmental investigations. *The Professional Geologist*, June 1995, pàg. 4-9.
- McNEILL, J.D. (1979): Operating Manual for EM-31 Non-contacting Terrain Conductivity Meter. Geonics Limited, Canadà. 42 pàg.
- McNEILL, J.D. (1980/a): Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Technical note TN-5. Geonics Limited, Canadà. 21 pàg.
- McNEILL, J.D. (1980/b): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Technical note TN-6. Geonics Limited, Canadà. 15 pàg.
- NAVARRO, A. (1989): Estudio de los acuíferos aluviales de la cuenca media del río Besós. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 534 pàg. Treball inèdit.
- PEHME, P.E., GREENHOUSE, J.P. i McNEILL, J.D. (1992): Mapping and Monitoring organic contaminants with terrain conductivity measurements. Conference of the Canadian National Chapter, International Association of Hydrogeologist, May 11-13, Hamilton, Ontario.
- STEWART, M.T. (1982): Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt water interfaces in coastal aquifers. *Groundwater*, vol. 20, núm. 5, pàg. 538-545.
- ZALASIEWICZ, J.A., MATHERS, S.L. i CORNWELL, J.D. (1985): The application of ground conductivity measurements to geological mapping. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 18, 139-148.