

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ESTUDIO SOBRE LA CORRELACIÓN POR ANÁLISIS ESTADÍSTICO
ENTRE LOS ANÁLISIS DE SUELOS Y LAS MEDIDAS GEOFÍSICAS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

YARNO KARLOS CASTILLO EYZAGUIRRE

LIMA-PERÚ

2010

RESUMEN

En este informe de suficiencia se presenta un estudio que está basado sobre las posibles correlaciones por análisis estadístico que pueden existir entre los análisis de suelos y las medidas geofísicas realizadas sobre el suelo de Limeil – Brévannes.

La geofísica es un método de reconocimiento de sitios que proporciona, a partir de la superficie del suelo, imágenes de formaciones geológicas subterráneas gracias a las propiedades físicas que las caracterizan. Sin embargo, uno de los problemas a los cuales las medidas geofísicas son confrontadas es que estas son influenciadas por la geología, el agua subterránea, la presencia de desechos y la contaminación.

Para poder predecir las correlaciones, se han utilizado los resultados de estudios medioambientales realizados por IDUNA Environnement (empresa consultora francesa en geología, hidrogeología, geofísica). Se ha desarrollado particularmente el diagnóstico de contaminación de un viejo desmonte de Limeil – Brévannes (comuna francesa situada en el sud este del departamento de Val de Marne y la región Ile de France), el estudio parte de una base de datos importante.

INDICE

RESUMEN	1
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
I INTRODUCCIÓN.....	6
II GLOSARIO DE TÉRMINOS	7
III LAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS	10
III.1 Aplicaciones	10
III.2 Elección de métodos geofísicos.....	12
III.2.1 Principales métodos empleados.....	12
III.2.2 Naturaleza de los contaminantes directamente detectables por las técnicas geofísicas	13
III.2.3 Ejemplos.....	15
III.2.4 Limitaciones	17
III.3 Nociones generales	17
III.3.1 Resistividad / conductividad eléctrica.....	17
III.3.2 Métodos eléctricos.....	19
III.3.3 Métodos electromagnéticos.....	21
III.4 Problema propuesto	22
III.5 Sitios estudiados	23
IV EL SITIO DE LIMEIL – BREVANNES	24
IV.1 Historia del sitio.....	24

IV.2	Estudio bibliográfico	25
IV.3	Tratamiento estadístico	25
IV.4	Datos utilizados	26
IV.4.1	Medidas geofísicas realizadas	26
IV.4.2	Análisis de suelos	28
IV.5	Tratamiento de datos	30
IV.6	Resultados estadísticos sobre el sitio de Limeil	39
V	RESULTADOS ESTADÍSTICOS GEOFÍSICOS / CONTAMINACIÓN...	48
VI	CONCLUSIONES.....	49
VII	BIBLIOGRAFÍA.....	50
	ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Resistividad eléctrica de suelos.....	18
Figura 2: Esquema general de una medida de resistividad de suelo utilizando un dispositivo de 4 electrodos	20
Figura 3: Líneas de corriente (en negrita) y curvas equipotenciales (normal) inducidas	20
Figura 4 : Configuración del EM31	22
Figura 5: Pseudo – secciones de perfiles de resistividad	26
Figura 6: Localización de los perfiles de resistividad	27
Figura 7: Cobertura electromagnética	28
Figura 8: Localización de sondeos	29
Figura 9: Perfiles eléctricos y puntos de muestra	31
Figura 10: Distribución en el espacio de las conductividades y puntos de muestra (electromagnéticas).....	33
Figura 11: Círculo de correlaciones.....	40
Figura 12: Gráfico de observaciones.....	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 : Principales métodos de investigación por geofísica.....	12
Tabla 2: Conductividad eléctrica de los contaminantes medidos.....	30
Tabla 3: Resumen de resultados de perfiles	3
Tabla 4: Resumen de resultados del EM31	34
Tabla 5 : Fuentes de contaminación de metales pesados.....	42
Tabla 6: Distribución en función de la profundidad 1 (depth1)	43
Tabla 7: Distribución en función de la profundidad 2 (depth2)	44
Tabla 8: Test de correlación	46

I INTRODUCCIÓN

IDUNA Environnement hace diagnósticos de suelos contaminados utilizando medios tales como las medidas geofísicas y los análisis fisicoquímicos de suelos. La finalidad de este informe es de mostrar si se puede encontrar correlaciones simples entre los resultados geofísicos y los análisis de suelos.

El problema al cual estamos confrontados es que las medidas geofísicas están influenciadas por la geología, el agua subterránea, la presencia de desechos y la contaminación en el sentido estricto de la palabra.

En este estudio, dos bases de datos (medidas geofísicas, IDUNA) fueron utilizadas: aquella del sitio de Limeil – Brévannes y aquella de Bonneuil en Francia. En los dos casos se trata de medidas sobre desmonte contaminado.

A través de un diagnóstico detallado sobre el sitio de LIMEIL BREVANNES a partir de un reconocimiento indirecto por métodos geofísicos: eléctrico y electromagnético y de un reconocimiento directo por exploración de sondas, muestreo y análisis en laboratorio, se intenta predecir qué relación existe entre las medidas geofísicas y los análisis de suelos a través de un análisis estadístico.

II GLOSARIO DE TÉRMINOS

VLF (Very Low Frequency): Medidas electromagnéticas que permiten delimitar las fracturas o fallas de un acuífero. Particularmente útil en caso de estudio de acuíferos fracturados como los sistemas kársticos.

EMB (Método electromagnético inductivo): El método electromagnético es usual en la exploración minera, aunque también tiene aplicación en la localización de cables y tuberías subterráneas, así como en la detección de minas explosivas y en la realización de mapas de áreas contaminadas. El método se basa en la propagación de campos electromagnéticos (continuos o transitorios) en el subsuelo. La generación se realiza por acoplamiento inductivo o introduciendo el generador en el subsuelo, mientras que la detección siempre se realiza por acoplamiento inductivo.

SEDT o TDEM en ingles (Sondeos Electromagnéticos en el dominio temporal): El método tienen ventajas sobre métodos electromagnéticos entre otras por su capacidad de mayor poder de penetración que permite obtener información hasta profundidad más altas y a través de recubrimientos conductores.

LNAPL: Hidrocarburo líquido en fase no acuosa.

Pz: Piezómetro.

ST: Sondeos de diagnósticos iniciales.

PM: Excavaciones de diagnósticos iniciales.

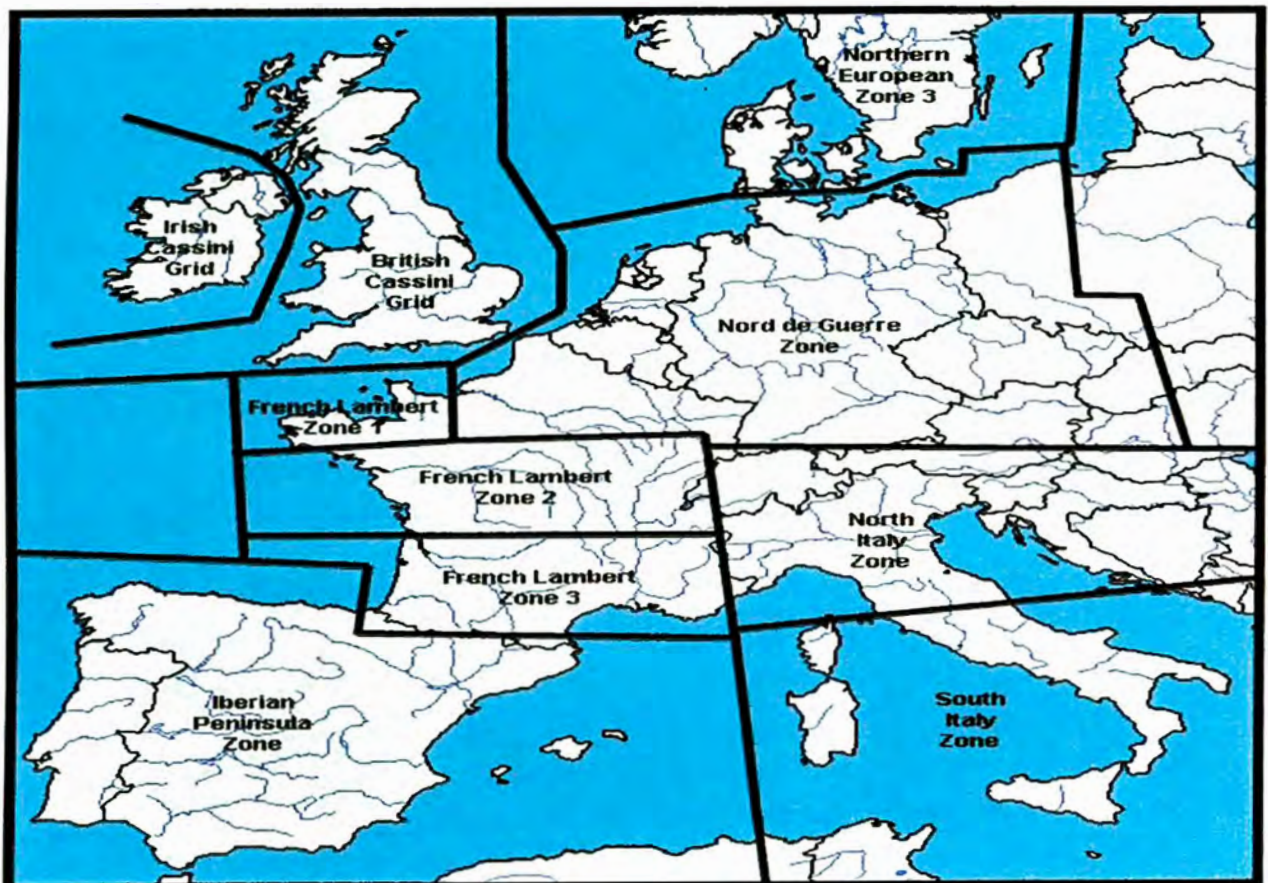
TR: Sondeos de diagnóstico profundos.

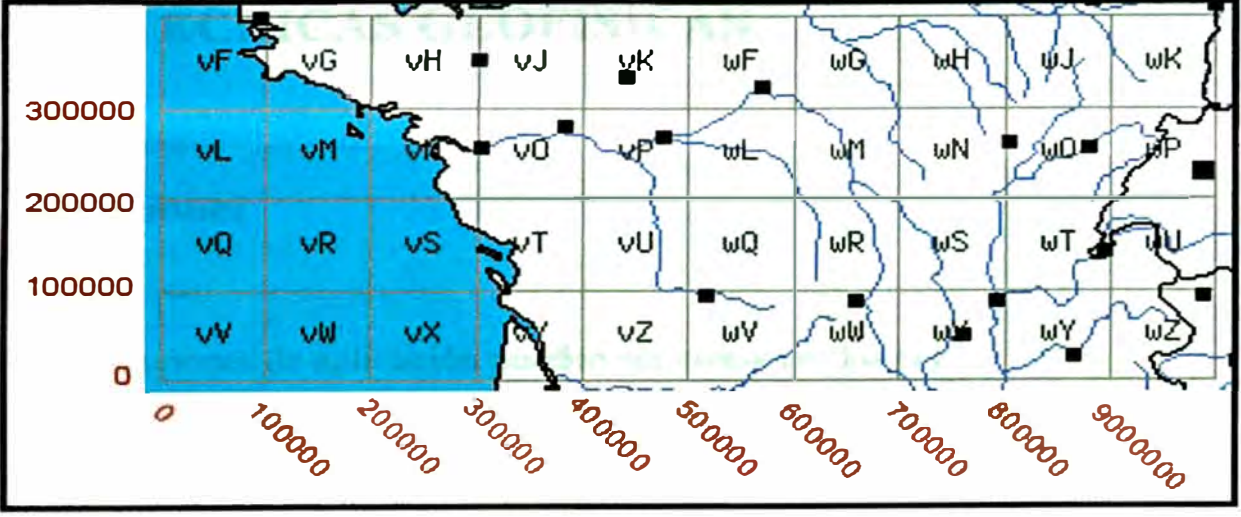
mg/kg-ms: Miligramo por kilogramo de materia seca.

EM31: Instrumento usado para trazar un mapa de variaciones medias de la conductividad eléctrica en profundidades entre 0 a 3 o 6 metros.



X Lambert II / Y Lambert II: Proyección utilizada para Francia , el número II se refiere a la parte central de Francia, en nuestro caso Francia Metropolitana, se trata de una proyección cónica.





III LAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS

III.1 Aplicaciones

Dos situaciones de aplicación pueden ser consideradas (1):

- a) La utilización de métodos geofísicos para la detección y localización de estructuras metálicas conteniendo hidrocarburos o solventes clorados (tambores, tanques, diversas cavidades), la estructura siendo el elemento detectado, teniendo en cuenta las propiedades de las paredes o de sus propiedades globales contrastando con el terreno natural. Este tipo de situación no es específica a los contaminantes considerados.

- b) Los métodos geofísicos son utilizados para la detección de zonas de terreno más o menos impregnadas por los contaminantes utilizando los contrastes de conductividad eléctrica entre los fluidos contaminados fuertemente ionizados y las aguas subterráneas saludables.

La elección de los métodos dependerá esencialmente de contrastes físicos o químicos entre los diferentes componentes, de su talla, de la profundidad del relleno sanitario, de la ocupación del suelo.

El uso de las técnicas geofísicas no puede ser suficiente y debe ser completada por otras formas de investigación directa (sondeos, extracción de muestras), análisis fisicoquímicos a respuestas más específicas permitiendo una calibración de resultados geofísicos.

Fuera de la detección y delimitación de zonas contaminadas, el aporte geofísico puede caracterizar las estructuras geológicas y sus propiedades (por ejemplo la litología) que determina directamente la elección de posibilidades de rehabilitación (1).

Los métodos geofísicos aplicados al estudio de sitios contaminados proporcionan información sobre la extensión de la contaminación y sobre la constitución del subsuelo poco profundo (yendo de 0 a 20 m de profundidad) que integran la naturaleza de los materiales, su porosidad, su hidrológica (2).

En el dominio del medio ambiente, y más particularmente aquel del diagnóstico de eventuales contaminaciones, las técnicas geofísicas encuentran tres principales campos de aplicación (3):

- a) La búsqueda de fuentes de contaminación (ejemplos: presencia de canalizaciones o de objetos o de volúmenes de desechos enterrados).
- b) La búsqueda de fugas en un sistema sellado (control de la homogeneidad, de discontinuidades o de fisuras en una cobertura o un fondo de descarga).
- c) La detección de contaminaciones de suelos o de aguas subterráneas (contaminación salina, por hidrocarburos con fuerte resistividad o por metales pesados disueltos con fuertes conductividades) con la finalidad de delimitar la localización.

III.2 Elección de métodos geofísicos

III.2.1 Principales métodos empleados

Los principales métodos utilizados en geofísica aplicada son reagrupados según el parámetro físico estudiado y el origen del campo medido.

Tabla 1 : Principales métodos de investigación por geofísica (4)

Grupo de métodos	Parámetro físico estudiado	Campo medido	Origen natural (N) o Provocado (P)
Eléctrico en corriente continua.	Resistividad.	Diferencia de potencial.	P
Electromagnetismo.	Resistividad y/o constante dieléctrica.	Campo magnético. Campo eléctrico.	N o P
Sísmico.	Velocidad y/o impedancia acústica de las ondas mecánicas (velocidad*densidad).	Tiempos de trayecto y amplitud de señales de transmisión.	P

Debe hacerse un análisis del problema propuesto, de las condiciones geológicas y de las condiciones medioambientales locales antes de la elección de un método geofísico y del programa técnico. Este análisis debe conducir a retener el o los parámetros físicos susceptibles de presentar un contraste suficiente para responder al objetivo fijado (4).

III.2.2 Naturaleza de los contaminantes directamente

detectables por las técnicas geofísicas (1)

Técnicas utilizables	Posibilidades de localización y delimitación
<p>Método eléctrico por resistividad (corriente continua) por sondeos eléctricos o arrastres eléctricos.</p>	<p>Hidrocarburos en impregnación masiva (efecto de su fuerte resistividad eléctrica) en medios aluviales o porosos. Profundidad de investigación pudiendo ir a algunas centenas de metros.</p> <p>Búsqueda de solventes clorados degradados (conductividad eléctrica de cloruros).</p>
<p>Método eléctrico por resistividad (corriente alterna) llamada por</p>	<p>Trazas de contaminantes orgánicos (hidrocarburos) en subsuelo arcilloso (efecto de la inhibición de propiedades de intercambio</p>

polarización provocada.	catiónico de arcillas).
Métodos radio – magneto telúricos (VLF).	Hidrocarburos o solventes degradados (cloruros) en impregnación de medios aluviales. Zonificación.
Método electromagnético inductivo (EMB).	Hidrocarburos en impregnación de medios aluviales (efecto de la fuerte resistividad). Zonificación.
Georradar.	Hidrocarburos en impregnación de medios poco húmedos y poco arcillosos.
Refracción sísmica.	Detección de productos pesados no miscibles al agua (efecto de refracción de ondas mecánicas por las interfaces de medios de densidades diferentes).
Scintillometry.	Detección indirecta de hidrocarburos por la medida de la tasa de radón (desplazado por los vapores de hidrocarburos en el suelo).

III.2.3 Ejemplos

La utilización de métodos geofísicos para la detección de contaminación de suelos y de aguas ha sido el objeto de numerosos estudios (2):

- La utilización de paneles eléctricos 2D y de medidas electromagnéticas slingram en zonas industriales abandonadas, para posicionar lodo industrial contaminado y objetos metálicos enterrados (*Bernstone y Dahlin, 1997*).
- Se puede mostrar con la tomografía eléctrica 3D sobre un sitio con desechos que los materiales contaminados y la arenisca que la rodea tienen la misma resistencia, pero pueden ser distinguidos por su geometría 3D (*Ogilvy y al., 1999*).
- Utilización de la tomografía eléctrica 3D para obtener la geometría de fosas llenas por los desechos, y la naturaleza de estos desechos (*Chambers y al., 1999*).
- Combinación de varios métodos electromagnéticos (electromagnetismo transitorio: TDEM, y radiomagnetotelúrico) para la prospección de una gran gama de profundidades y para determinar la contaminación del medio profundo (*Hörd y al., 2000*).

- Por radar y medidas eléctricas verticales la detección de restos de LNAPL (*Sauck, 2000*).
- Métodos TDEM y eléctricos (corriente continua, polarización espontánea e inducida) sobre un sitio minero para detectar las infiltraciones (*Buselli y Lu, 2001*).
- Cartografía de la medida de la contaminación de una capa sobre un sitio de almacenamiento de desechos utilizando el electromagnetismo VLF y corriente continua que corroboren los datos hidrogeológicos presentando anomalías de concentración química (*Karlýk y Ali Kaya, 2001*).
- El estudio de un antiguo sitio industrial por tomografía eléctrica 2D para posicionar los desagües de transferencia de contaminantes hacia una fuente (*Vickery y Hobbs, 2003*).
- Los métodos eléctricos son apropiados a la detección de contaminación por hidrocarburos: un sitio contaminado por LNAPL presenta anomalías conductoras debido a la biodegradación mientras que los hidrocarburos "jóvenes" se caracterizan por anomalías resistentes (*Werkema y al. 2003*).
- La utilización de perfiles radar para localizar el límite de una mancha de contaminación y los estudios eléctricos para determinar la sucesión vertical por encima y fuera de la zona contaminada (*Porsani y al., 2004*).

- El aporte de prospecciones eléctricas 3D para el estudio de sitios de remediación (*Bentley y Gharibi, 2004*).

III.2.4 Limitaciones

Existen limitaciones en el empleo de estos métodos geofísicos, se puede mostrar que (3):

- La resistividad naturalmente elevada del terreno natural puede esconder una resistividad anormal debido a una contaminación de hidrocarburos.
- La presencia de arcillas en el substrato del sitio estudiado, o de un nivel de agua próximo del suelo reduce considerablemente la profundidad de la penetración de ciertas técnicas (por ejemplo: radar geológico).
- Una actividad humana generando fuentes eléctricas o magnéticas (corrientes vagabundas a proximidad de vías férreas o de líneas de alta tensión).

III.3 Nociones generales

III.3.1 Resistividad / conductividad eléctrica

La resistividad eléctrica de un material representa su capacidad a la circulación de corriente eléctrica. Esta corresponde a la resistencia

de una sección de material de 1 m de longitud y de 1 m² de sección; este valor está expresado en Ω.m. Es la magnitud inversa de la conductividad eléctrica (5).

Los terrenos presentan una resistencia al paso de la corriente. Esta resistencia eléctrica depende de la naturaleza de los terrenos (arcillosos, arena, piedra caliza), de su grado de humedad y de la naturaleza de las aguas que los bañan (6).

Las resistividades eléctricas más o menos ionizadas (Ω.m) y conductividades (μS/cm) de suelos están presentes en la figura siguiente:

$$\rho \text{ (en } \Omega.m) = 1/\sigma \quad \text{con } \sigma : \text{conductividad en S/m}$$

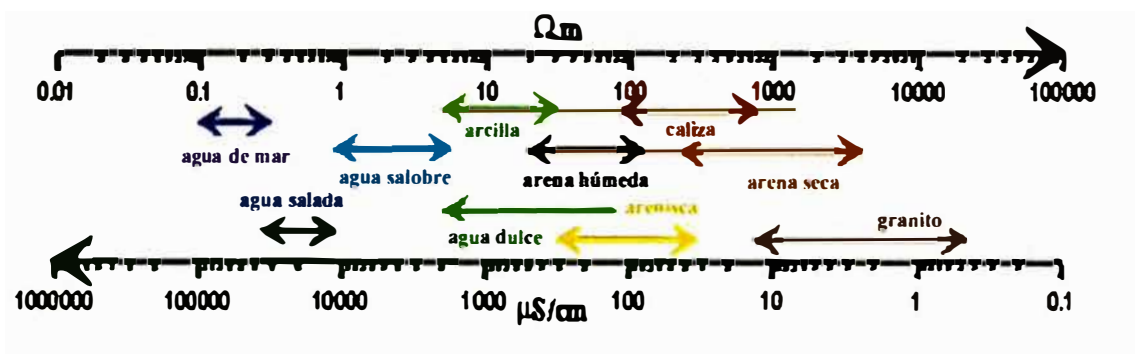


Figura 1 : Resistividad eléctrica de suelos

La resistividad eléctrica es la propiedad física la más adaptada para los estudios de suelos contaminados.

Las aplicaciones del método de resistividad eléctrica sobre los sitios contaminados son:

- a) Basándose sobre el contraste de conductividad entre el agua salina y el agua dulce.
- b) La detección de hidrocarburos en los acuíferos puede igualmente ser observada.
- c) Las plumas de contaminación orgánica son generalmente caracterizados por valores de conductividad de fluido elevadas debido al número importante de iones presentes en la solución polar. Así, estas plumas pueden ser caracterizadas por los pequeños valores de resistividad.
- d) Los suelos contaminados por los hidrocarburos ven sus propiedades eléctricas y especialmente sus resistividades evolucionar con el tiempo. Estas son resistentes inicialmente y se convierten a medida que pasa el tiempo más y más conductoras debido a la degradación bioquímica del contaminante.

III.3.2 Métodos eléctricos

Los métodos geofísicos miden la resistividad eléctrica aparente (o su inversa la conductividad) correspondiente a la resistencia de un cierto volumen de suelo, al paso de una corriente continua. En la práctica, una medida de resistividad de suelo necesita 4 electrodos (Figura 2). Conectados a un generador, dos de estos electrodos, llamados de corriente (C1, C2), hacen circular en el suelo una corriente continua de intensidad fija y controlada por un amperímetro. La diferencia de potencial inducida en el suelo por la circulación de esta corriente es medida por un voltímetro conectado a dos electrodos llamados de potencial (P1, P2). El conjunto

(amperímetro + voltímetro, eventualmente generador de corriente) es llamado resistivímetro.

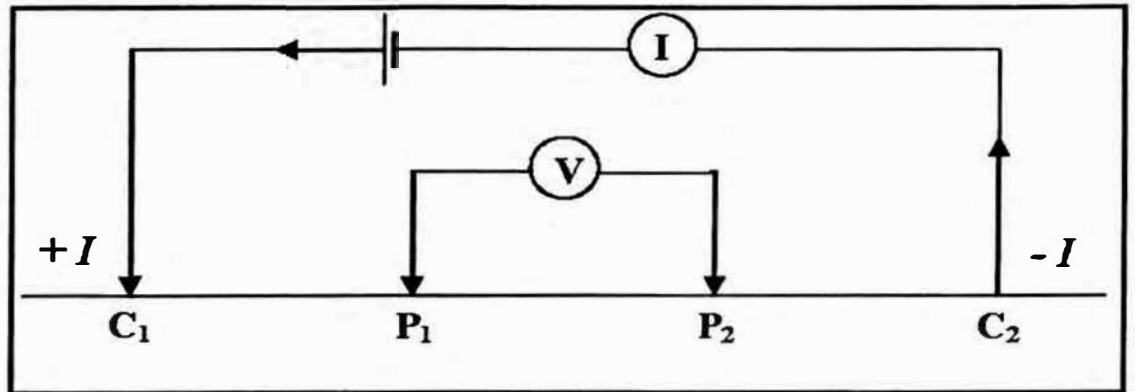


Figura 2: Esquema general de una medida de resistividad de suelo utilizando un dispositivo de 4 electrodos (7)

La circulación de una corriente continua en un demi-espacio homogéneo infinito entre 4 electrodos es representado en la Figura 3. La corriente entra en el suelo en el punto C1 (+I) y sale por el punto C2 (-I). El potencial en un punto M cualquiera es la suma de las contribuciones de las fuentes C1 y C2 (7).

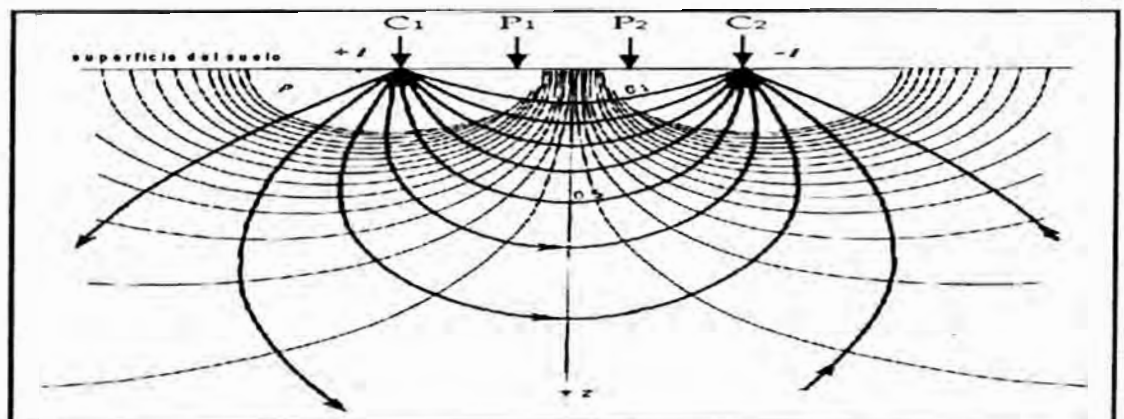


Figura 3: Líneas de corriente (en negrita) y curvas equipotenciales (normal) inducidas por dos electrodos de corriente C1 (+1) y C2 (-1). Las flechas verticales en la superficie representan los electrodos

III.3.3 Métodos electromagnéticos

Para el EM31, el aparato utilizado tiene una distancia inter – bobinas fija de 3.66 m y funciona a una frecuencia de 9.8 kHz. Los datos adquiridos son representativos de un volumen de suelo yendo de la superficie a la profundidad de investigación. La aplicación permite obtener una cartografía rápida (mapeo) de la conductividad aparente de terrenos superficiales. El principio es el siguiente: una primera bobina emite un campo denominado secundario por la presencia de un medio conductor. Este campo secundario medido en una segunda bobina separada 3.66 m de la primera es proporcional a la conductividad del suelo gracias a la aproximación de la inducción de base (8).

El EM31 proporciona la carta de variaciones geológicas, de los contaminantes de agua subterránea o no importa qué función (dispositivo) superficial asociado a los cambios de la conductividad de la tierra utilizando una técnica inductiva electromagnética patentada que hace las medidas sin el contacto de la tierra o electrodos. Con este método inductivo, las investigaciones pueden ser efectuadas en las condiciones más geológicas incluyendo los de alta resistividad superficial como la arena, grava y asfalto.

Este instrumento es calibrado para leer la verdadera conductividad cuando la tierra es uniforme. La decisión en cuanto al espaciamiento correcto será basada sobre un conocimiento de las dimensiones laterales de la anomalía de resistividad prevenida. El EM31 es poco sensible a los conductores subterráneos como grandes tuberías, etc. (9).

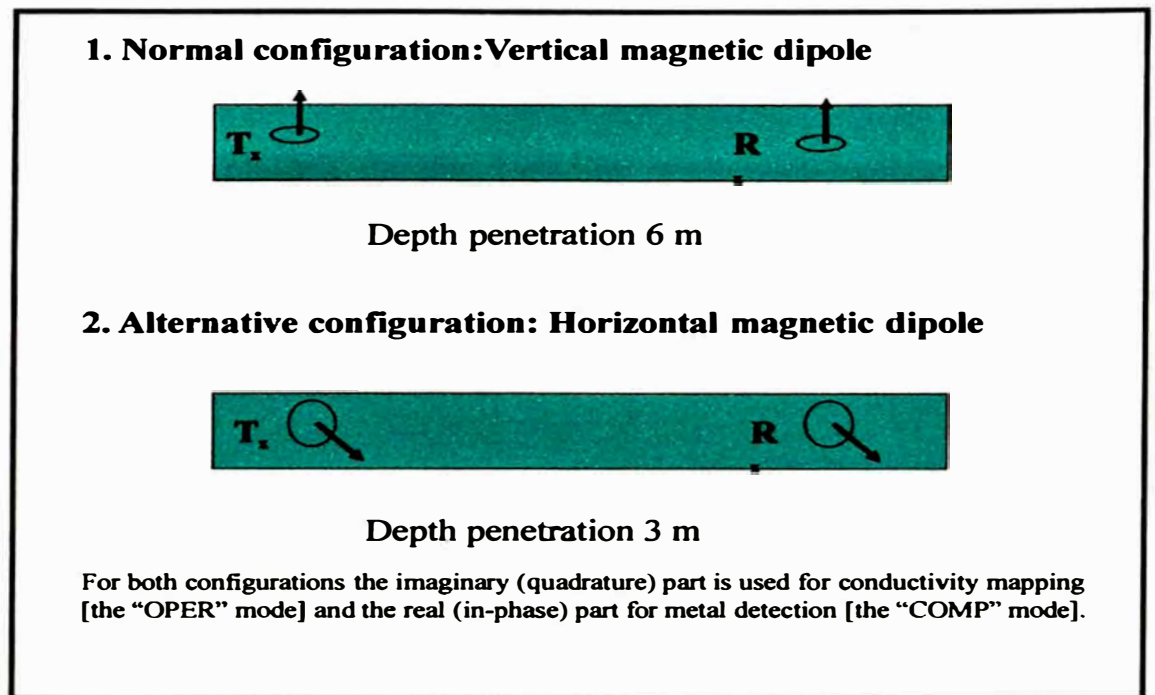


Figura 4 : Configuración del EM31 (9)

III.4 Problema propuesto

Las medidas geofísicas están relacionadas de una parte a la naturaleza de los terrenos, a la presencia de aguas subterráneas y a la presencia de objetos (canalización, tanques enterrados, barriles) y contaminaciones o desechos contaminados.

La interpretación de medidas en el marco de un diagnóstico de contaminación necesita seleccionar las medidas obtenidas para separar la contaminación buscada del ruido de fondo relacionado al terreno natural.

III.5 Sitios estudiados

Se estudiaron los resultados de dos estudios siguientes realizados sobre sitios de desmontes contaminados:

- Limeil:
 - Informe N°E11A: Estudio documentado medioambiental e histórico.
 - Informe N°E11B: Estudio simplificado de riesgos.
 - Informe N°E11C: Diagnostico profundo o completo del sitio de Limeil.

- Bonneuil:
 - Informe N°F02: Reconocimiento del desmonte por prospección geofísica y electromagnética.

IV EL SITIO DE LIMEIL – BREVANNES

IV.1 Historia del sitio

El sitio de Limeil está situado sobre los aluviones de la Seine, ha sido explotado en grava por la explotación de aluviones hasta 12 m de profundidad sobre 10 hectáreas más o menos.

Al final de la explotación el cuerpo de agua estaba relleno por desechos inertes: escombros de construcción, desechos de edificios, tierra.

Una vez relleno, el terreno ha sido dejado al abandono (baldío industrial) y ha servido de depósito clandestino.

La SEM A.L.B. condujo un proyecto de desarrollo local sobre el sitio, esta ha hecho realizar en 2003 investigaciones por sondeos que han mostrado que los suelos y las aguas subterráneas de este baldío están contaminados por hidrocarburos, solventes y metales pesados.

En septiembre del 2005 la SEM A.L.B. confió a IDUNA un estudio que ha permitido precisar lo más exactamente posible las características de la contaminación del baldío, y de definir en qué medidas, y sobre cuales limitaciones, el proyecto de desarrollo podría ser llevado a su término.

El estudio de IDUNA ha sido centrado sobre el contexto hidrogeológico de todo el sitio, teniendo en cuenta los usos potenciales o demostrados de las aguas subterráneas, con la finalidad de identificar el sentido de desplazamiento de la capa de agua subterránea y sus principales características (velocidad, profundidad,...), y las principales vías de

comunicación susceptibles de ser tomadas por las aguas subterráneas en el caso de una migración de la contaminación (10).

IDUNA ha completado los reconocimientos anteriores por:

- Investigaciones geofísicas.
- Sondeos de 0 a 12 m de profundidad para toma de muestras de desmontes analizados en laboratorio.

IV.2 Estudio bibliográfico

Se utilizaron los datos bibliográficos siguientes:

- Resultados de investigaciones geofísicas por el método electromagnético: cobertura del sitio de 10 hectáreas por 21687 medidas del EM31: conductividades aparentes sobre la porción 0 – 6 m de profundidad.
- Resultados de investigaciones geofísicas por el método eléctrico: el perfil de resistividades de 315 m de largo lo que nos da 7137 resistividades aparentes sobre la porción 0 – 15 m de profundidad.

IV.3 Tratamiento estadístico

Los datos geofísicos (EM31, perfiles eléctricos) van a ser ordenados en orden creciente en función de la posición en el espacio (X Lambert II e Y Lambert II).

En lo que respecta a los datos sobre las concentraciones de los 10 contaminantes, se les va a ordenar en orden creciente en función de la profundidad de investigación y de su posición en el espacio.

El primer paso permite identificar rápidamente a grandes grupos de resistividad y conductividad. El segundo paso refina el resultado fijando la extensión de la contaminación.

IV.4 Datos utilizados

IV.4.1 Medidas geofísicas realizadas

Los paneles de resistividad han puesto en evidencia la presencia de zonas muy conductoras entre 5 a 10 m de profundidad.

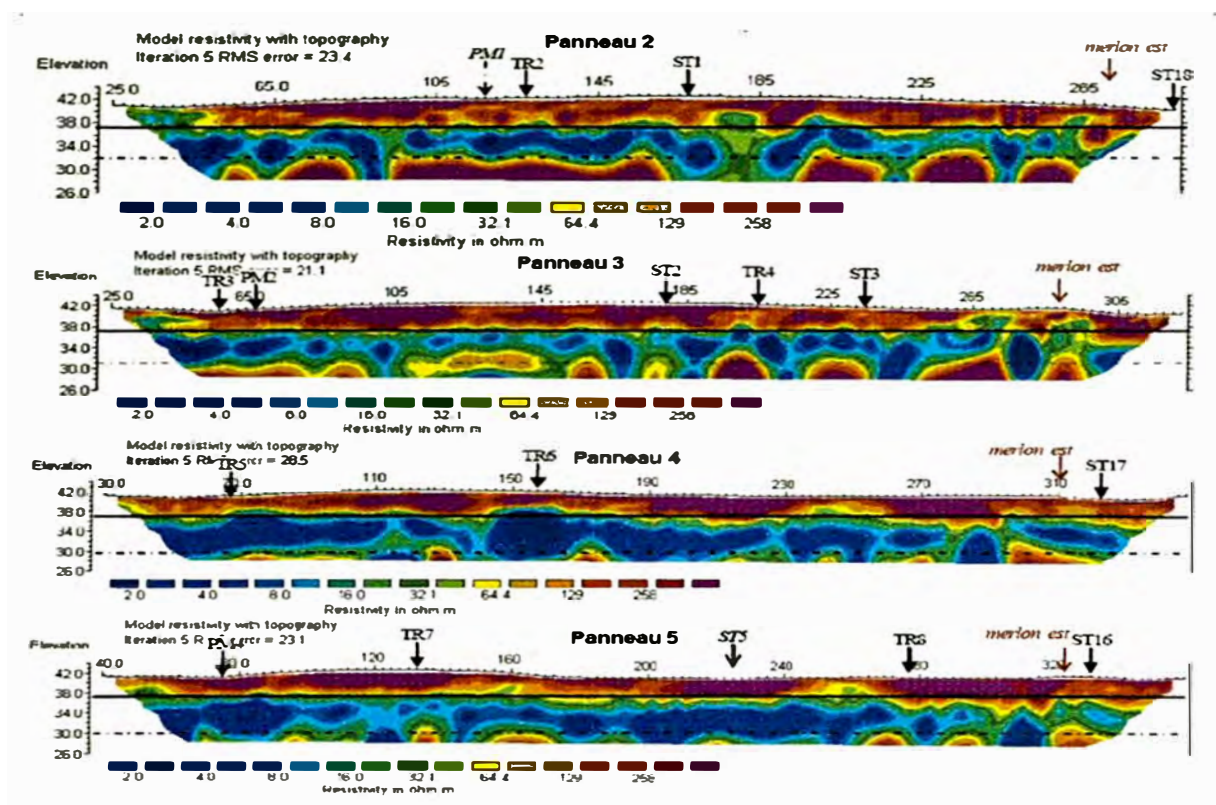


Figura 5: Pseudo – secciones de perfiles de resistividad (11)

Inicialmente se localizaron los diferentes paneles eléctricos sobre el sitio de Limeil gracias a la investigación geofísica por el método eléctrico a partir de las coordenadas (X e Y) de los paneles de resistividad.

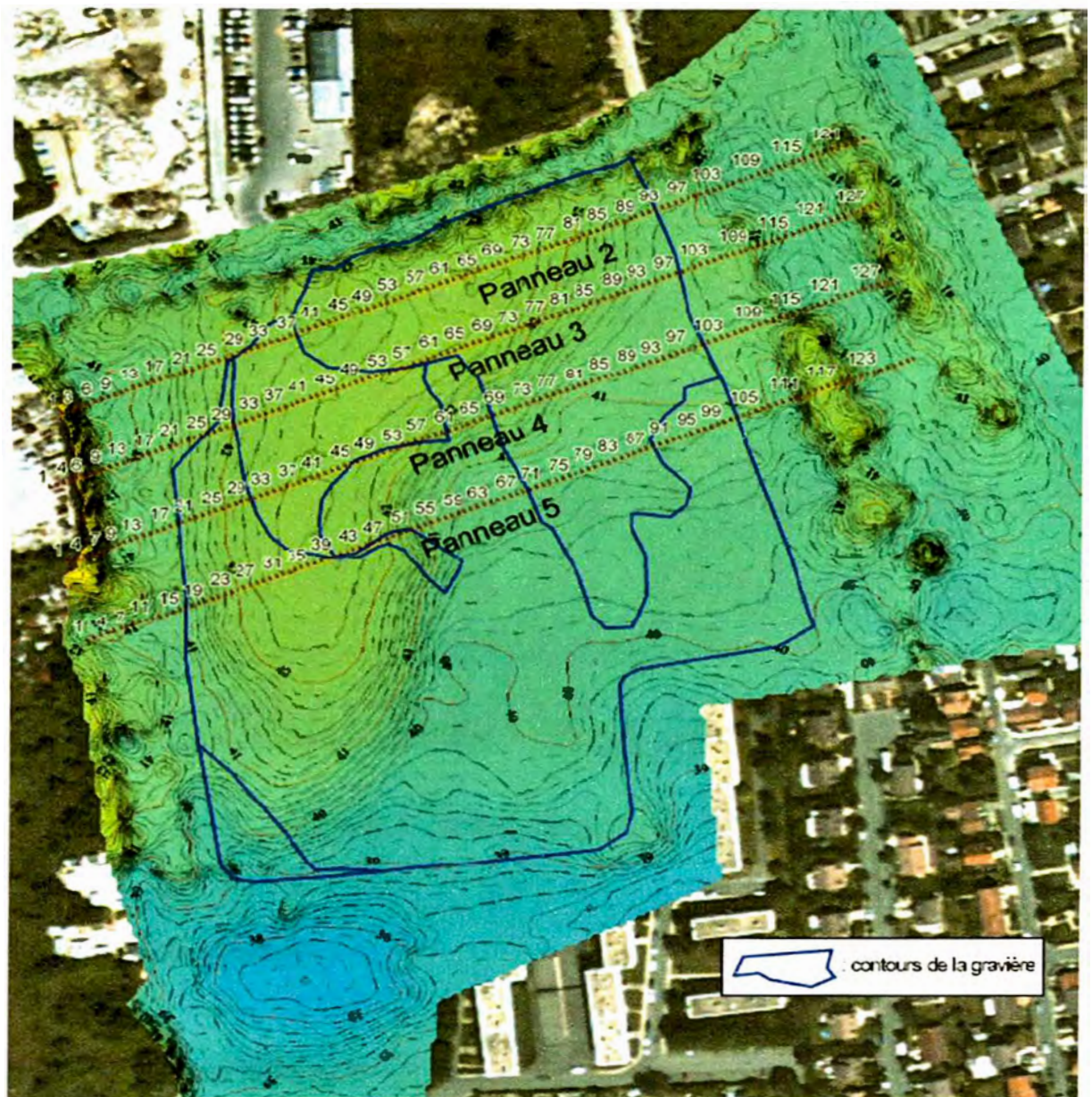


Figura 6: Localización de los perfiles de resistividad (11)

Los resultados del EM31 dibujan una carta (cobertura electromagnética) sobre la repartición de las conductividades aparentes (mmohs/m), que han puesto en evidencia la homogeneidad electromagnética.

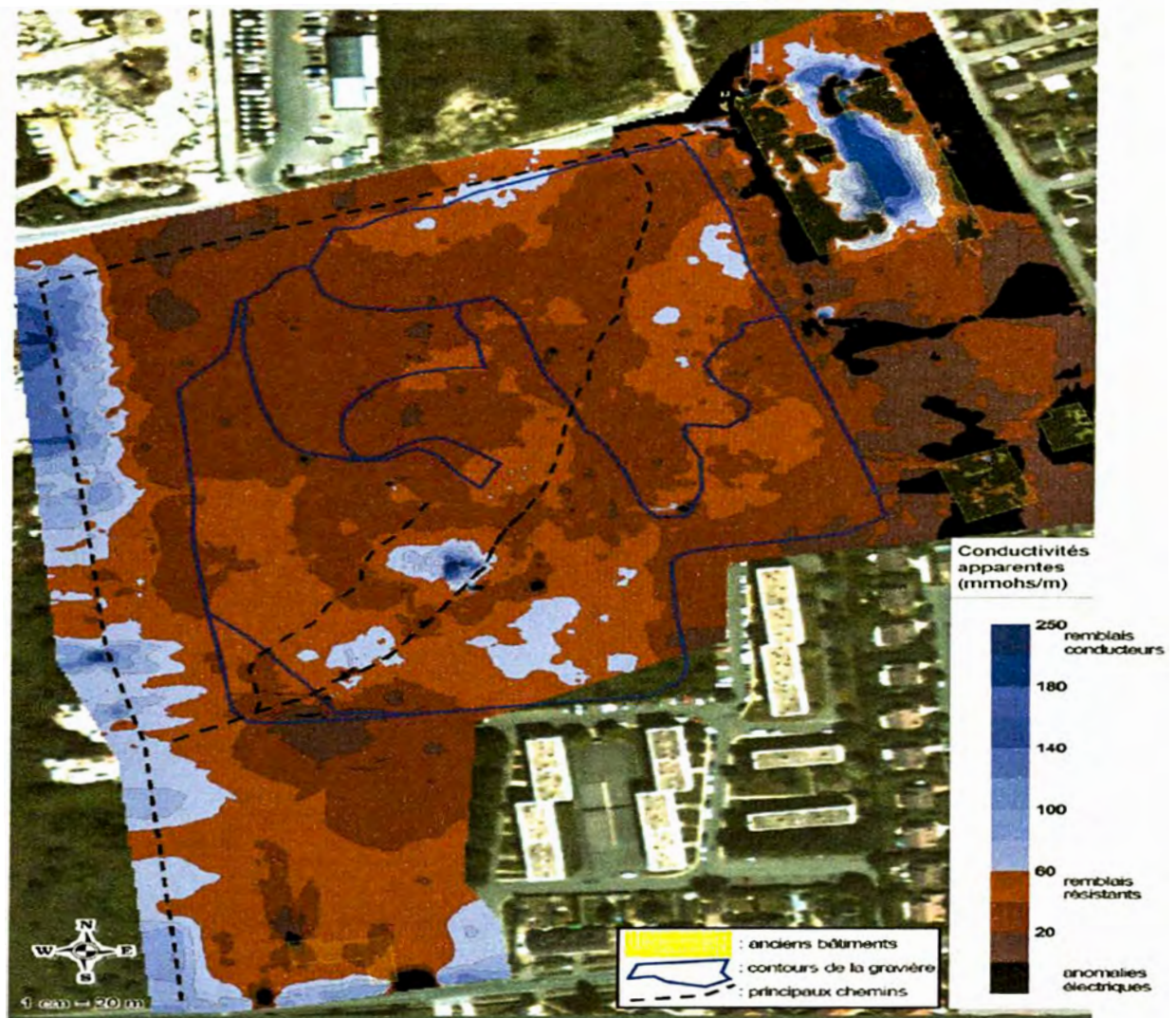


Figura 7: Cobertura electromagnética (11)

IV.4.2 Análisis de suelos

Los análisis han sido ya realizados (diagnóstico inicial) sobre 24 puntos de toma de muestra (ST1 a ST18 y PM1 a PM6). Los análisis que fueron confiados por IDUNA a un laboratorio se han centrado sobre ocho muestras de suelos tomados entre 5 a 10 m de profundidad en los nuevos sondeos (TR1 a TR8); en los casos anteriores los análisis se centran sobre la concentración en mg/kg-ms de 10 contaminantes: As, Cd, Cr, Cu, HCT, Hg, Ni, Pb, Tricloroetileno y Zn.

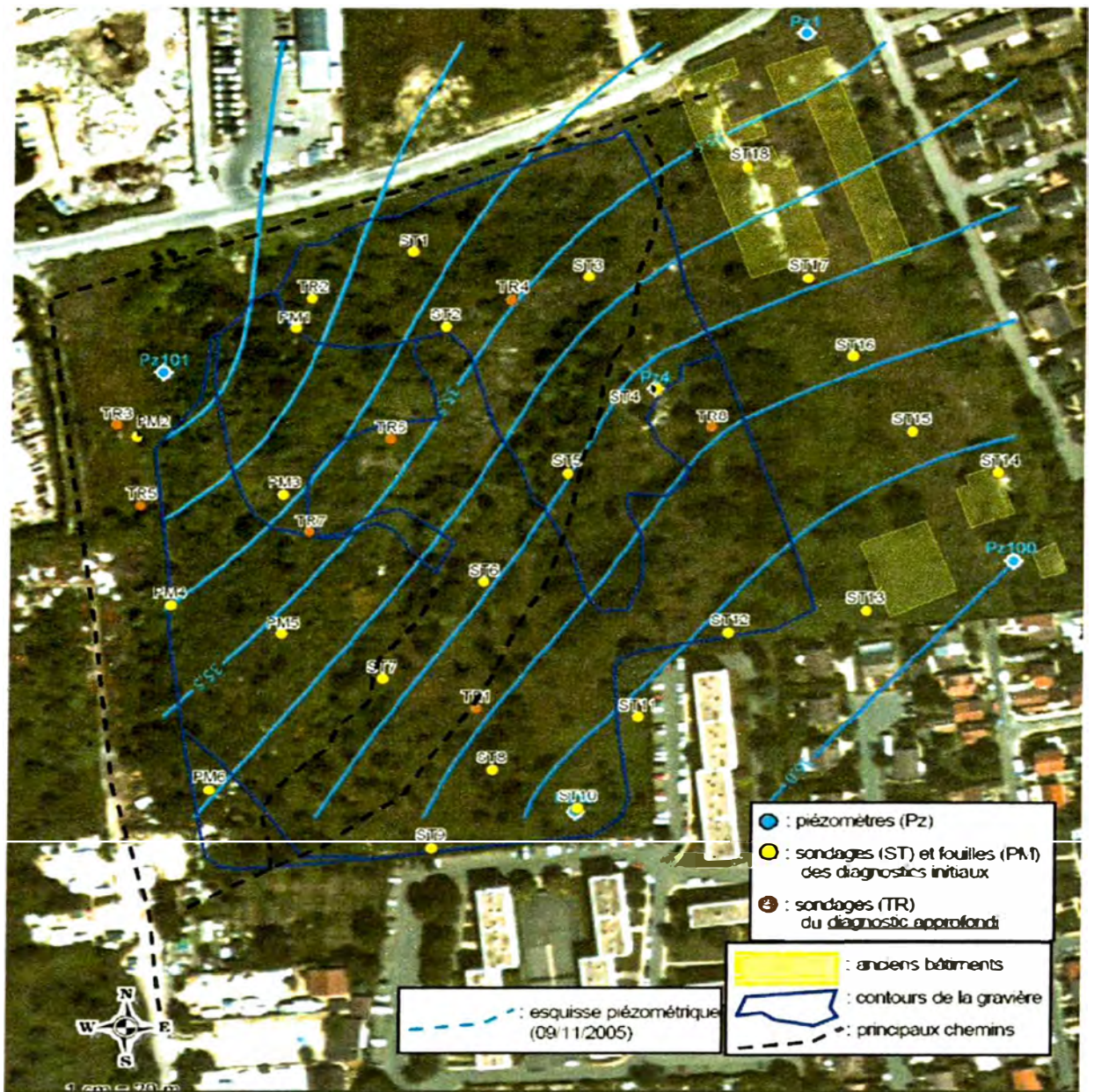


Figura 8: Localización de sondes (11)

Con la base de datos sobre los contaminantes (ver anexo), se ha ordenado cada contaminante medido según su conductividad eléctrica (en orden decreciente):

Contaminante	Conductividad eléctrica (S/m)
Cu	59,6 .10 ⁶
Zn	16,6 .10 ⁶
Ni	14,3 .10 ⁶
Cd	13,8 .10 ⁶
Cr	7,74 .10 ⁶
Pb	4,85 .10 ⁶
As	3,45 .10 ⁶
Hg	1,04 .10 ⁶

Tabla 2: Conductividad eléctrica de los contaminantes medidos (12)

Se procedió a un análisis estadístico sobre 8 de entre ellos (metales pesados) puesto que estos presentan conductividades importantes y tienen características fisicoquímicas comunes.

IV.5 Tratamiento de datos

Se conoce las coordenadas (X, Y) y los valores de resistividad en la cual han sido efectuadas las medidas geofísicas (perfil eléctrico 2, 3, 4 y 5), se conoce también las coordenadas de los puntos de análisis para la toma de muestras (sobre los diferentes contaminantes), a partir de estos grupos de valores se hace la distribución del conjunto de datos en el espacio:

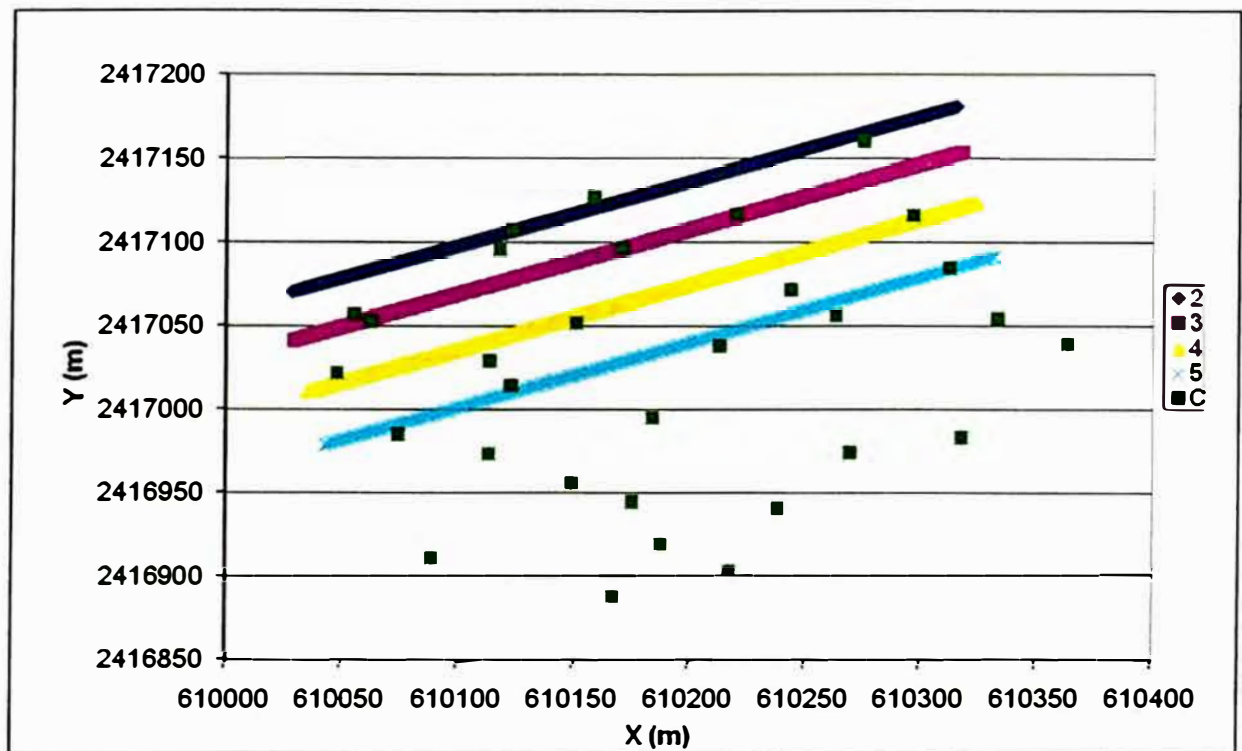


Figura 9: Perfiles eléctricos y puntos de muestra (sondeos profundos → muestras → análisis)

Después de un análisis, nos damos cuenta que algunos puntos de muestra (13 puntos) están fuera de la zona en la cual se han hecho las medidas de resistividad, que ciertos puntos tienen la misma coordenada donde se han hecho las medidas de resistividad y que para los otros que están cercanos a los puntos de resistividad se debe de delimitar un radio de acción de +/- 3m y hacer una media para reencontrar los valores de resistividad caracterizando estos puntos.

Finalmente nos encontramos con 18 puntos en el espacio X / Y y valores de resistividad:

Tabla 3: Resumen de resultados de perfiles (11)

XLam2	YLam2	Resistividad ($\Omega.m$)
610048.00	2417016.12	52.44
610055.50	2417051.62	43.31
610062.48	2417054.33	64.66
610074.51	2416991.36	76.63
610113.01	2417041.42	98.03
610117.76	2417104.75	105.99
610123.29	2417010.32	186.53
610123.30	2417106.89	120.48
610150.22	2417055.91	67.67
610158.31	2417120.41	48.23
610170.38	2417096.27	138.40
610211.86	2417044.74	131.35
610219.47	2417115.35	58.78
610242.35	2417056.59	34.04
610263.12	2417064.66	119.21
610275.32	2417165.59	57.47
610295.01	2417112.26	52.63
610312.07	2417083.69	102.45

Gracias a los resultados sobre la cobertura electromagnética, nos interesamos a hacer una distribución en el espacio con los datos sobre los puntos de toma de muestra para ver cuál es el límite entre la zona donde se ha hecho los sondeos y la zona de medida de la conductividad.

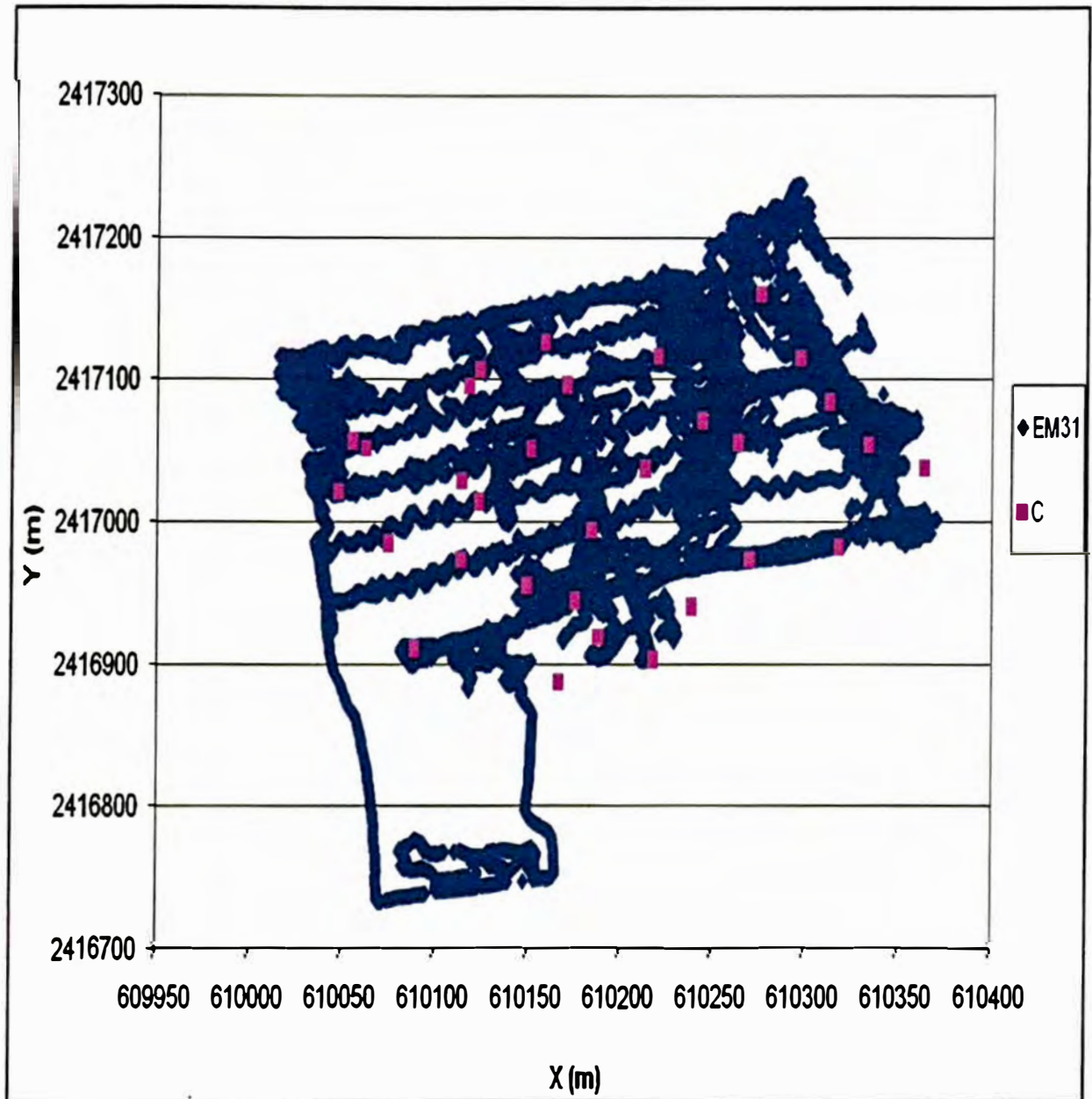


Figura 10: Distribución en el espacio de las conductividades y puntos de muestra (electromagnéticas)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se procede a limitar los datos del EM31 (conductividades aparentes y desviaciones):

Tabla 4: Resumen de resultados del EM31 (11)

XLam2	YLam2	Q	I
610046.98	2417030.69	58.12	-1.31
610055.52	2417027.87	33.72	-3.21
610062.35	2417007.77	35.82	-2.61
610074.34	2417032.05	30.85	-1.07
610114.20	2416993.83	38.21	-2.77
610117.68	2416982.53	38.65	-3.67
610122.89	2416986.09	39.17	-2.84
610123.10	2416987.46	39.35	-2.87
610150.54	2416998.86	43.20	-3.79
610158.45	2417045.10	79.51	1.24
610170.01	2417034.37	46.75	-2.44
610212.74	2417027.81	40.71	-2.29
610219.88	2417058.12	37.58	-3.93
610243.56	2417078.24	41.57	4.97
610262.86	2417117.91	40.49	5.97
610275.32	2417128.83	59.36	4.15
610296.45	2417141.31	62.17	7.83
610312.72	2417095.08	22.84	3.82

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo es reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (13). Se emplea sobre todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos (14).

Una de las ventajas del ACP para reducir la dimensionalidad de un grupo de datos, es que retiene aquellas características del conjunto de datos que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel de los componentes principales e ignorando los de alto nivel. El objetivo es que esos componentes de bajo orden a veces contienen el "más importante" aspecto de esa información (14).

El ACP es un método muy eficaz para el análisis de datos cuantitativos (continuos o discretos) presentándose sobre la forma de tablas a M observaciones / N variables. Este permite:

- Visualizar y analizar rápidamente las correlaciones entre las N variables.
- Visualizar y analizar las M observaciones inicialmente descritas por N variables sobre un gráfico a dos o tres dimensiones, construido de manera que la dispersión entre los datos sea también bien preservada en lo posible.
- Construir un conjunto de P factores no correlacionados ($P < N$) que pueden después ser reutilizados por otros métodos (la regresión por ejemplo).

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es usualmente utilizado antes de una regresión puesto que permite evitar el uso de variables redundantes, o antes de una clasificación puesto que ésta permite identificar la estructura de la población y eventualmente determinar el número de grupos a construir.

Para hacer este análisis estadístico se utilizó un programa que se llama XLSTAT 2007 compatible con Excel que no solo nos permitirá hacer el ACP sino también hacer un estudio sobre la correlación entre las diferentes variables.

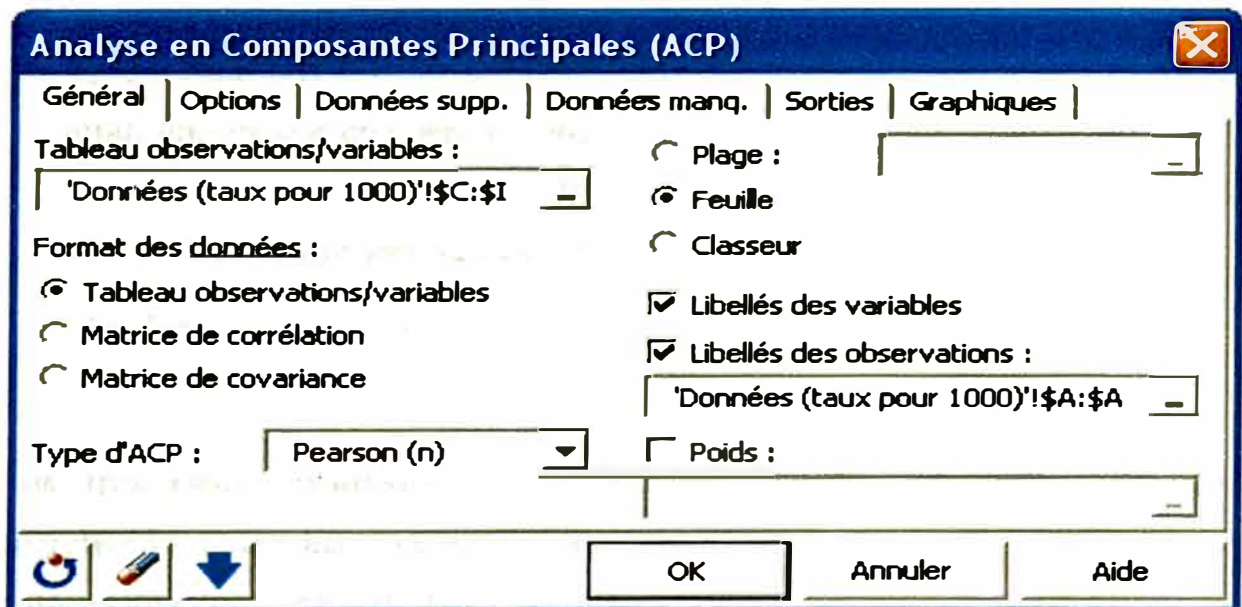
Analizamos la distribución de los contaminantes en función de la profundidad, de la posición en el espacio, así como la distribución de la resistividad, de la conductividad aparente y desviaciones para poder correlacionar los valores entre las medidas geofísicas y los análisis de suelos.

Para ejecutar el programa se debe hacer click en el menú XLSTAT / Analyse des données / Analyse en Composantes Principales (ACP), o sobre el botón correspondiente a la barra "Análisis de datos".



La opción de Análisis en Componentes Principales hace su aparición. Se selecciona los datos en la hoja de Excel, para esto se elige el modo de selección por columnas; la opción "Libellés des variables" se activa, puesto que la primera línea de datos contiene el nombre de las variables. El

"Format des données" seleccionado aquí es "Observations/Variables" ya que es el formato de datos iniciales. El "Type d'ACP" escogido es Pearson, lo que significa que los cálculos serán basados sobre una matriz compuesta de coeficientes de correlación de Pearson clásicamente el más utilizado.



Luego una nueva ventana nos permite escoger los ejes por los cuales los gráficos deben ser mostrados. En nuestro caso, el % de variabilidad representado sobre los dos primeros ejes no es particularmente elevado en los tres casos analizados:

1. Primer caso (ACP1): Se toma en consideración solamente las concentraciones de los 10 contaminantes, 67.72 % de la variabilidad es representada.

Se ve que el primer valor propio vale 4.830 y representa 48.3 % de la variabilidad. Esto significa que si se representa los datos sobre un solo eje, tendremos siempre 48.3 % de la variabilidad total que será preservada.

2. Segundo caso (ACP2): En este caso se añade dos variables a nuestro estudio, la profundidad: depth 1 et depth 2, se cuenta con 12 variables y 12 factores a ser correlacionados, 58.66 % de la variabilidad es representada.

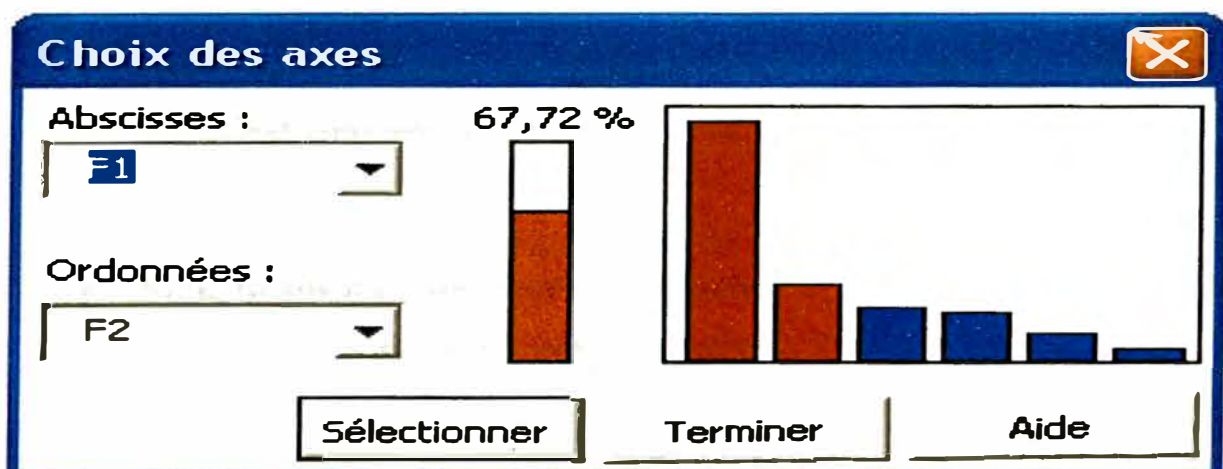
El primer valor propio vale 4.84 que representa 40.3 % de la variabilidad.

3. Tercer caso (ACP3): Se utilizan todas las variables que tenemos, 16 en total; teniéndose en cuenta 4 nuevas variables, las coordenadas (el este y el norte) de cada punto de análisis, la elevación y la profundidad total, 48.78 % de la variabilidad es representada.

El valor propio vale 4.95 que representa 30.9 % de la variabilidad.

Los tres casos evaluados en el ACP concuerdan en que existe una correlación entre las concentraciones de Cd, Ni, Pb y Zn gracias a los valores de r (próximos de 1).

De los tres casos vistos anteriormente se elige el primero ya que tiene un mayor % de variabilidad y para evitar una mala interpretación de los gráficos, la presentación sobre los ejes F1 y F2 es la que se ha escogido.



IV.6 Resultados estadísticos sobre el sitio de Limeil

A partir del análisis de componentes principales (ACP) se encuentra que existe una correlación entre las concentraciones de Cd, Ni, Pb y Zn gracias a los valores de r (próximos de 1, ver el anexo II) y también gracias a los valores de coseno cuadrado de variables (también próximos de 1, ver el anexo II) sobre el eje F1, se puede considerar que el factor F1 resume el lazo entre estas cuatro variables.

El círculo de correlaciones (ver a continuación el círculo sobre los ejes F1 y F2) corresponde a una proyección de las variables iniciales sobre un plano a dos dimensiones constituido por los dos primeros factores.

Cuando dos variables están lejos del centro del gráfico, entonces si ellas son:

- Próximas las unas comparadas a las otras, entonces estas presentan una alta correlación positiva (r próximo de 1).
- Ortogonales las unas comparadas a las otras, entonces estas están significativamente no correlacionadas (r próximo de 0).
- Simétricamente opuestas comparadas al centro, entonces estas presentan una alta correlación negativa (r próximo de -1).

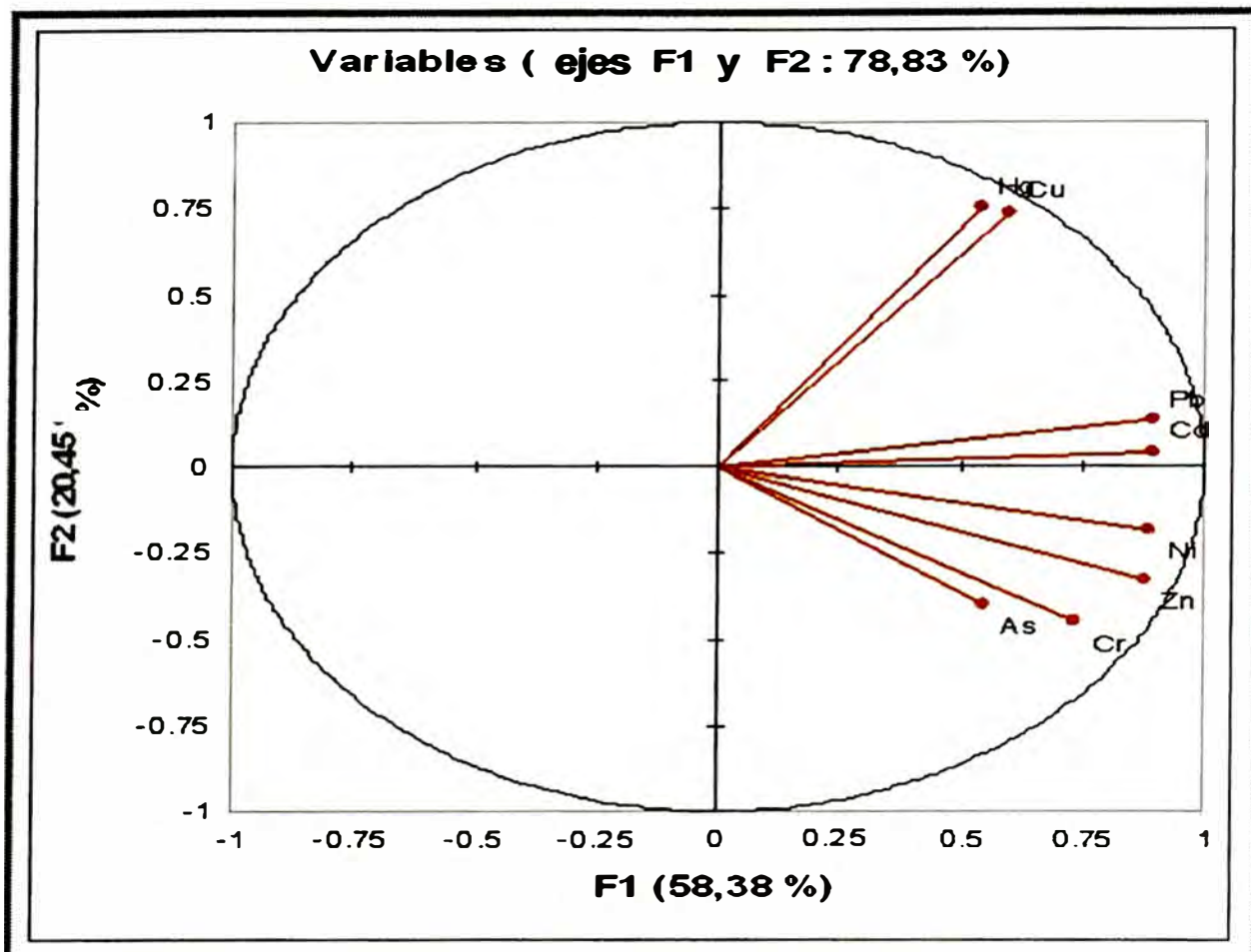


Figura 11: Círculo de correlaciones

El círculo de correlaciones es también útil para interpretar la significación de los ejes. Las tendencias son particularmente interesantes a extraer para la interpretación del gráfico de individuos (ver aquí debajo). Para confirmar el hecho de que una variable es fuertemente relacionada a un factor, basta con consultar la tabla de cosenos: mientras el coseno es elevado (en valor absoluto), más la variable es ligada al eje. Mientras el coseno es próximo de cero, menos la variables está ligada al eje (15).

A partir del gráfico de observaciones que permite representar los puntos de medida sobre una carta a dos dimensiones, y también de identificar las tendencias entres estos puntos, se ve en nuestro caso de estudio que sobre la

base de variables de concentración de contaminantes que disponemos, las observaciones PM2', PM3, PM4', PM5 et ST4-Pz4 son bastante particulares, estos puntos tienen todas características en común: valores superiores a la media en concentraciones para el Cd, Ni, Pb et Zn. También que para PM4' se tiene el valor máximo en Ni y Zn, para PM5 el valor máximo en Cd y para ST4-Pz4 el valor máximo en Pb.

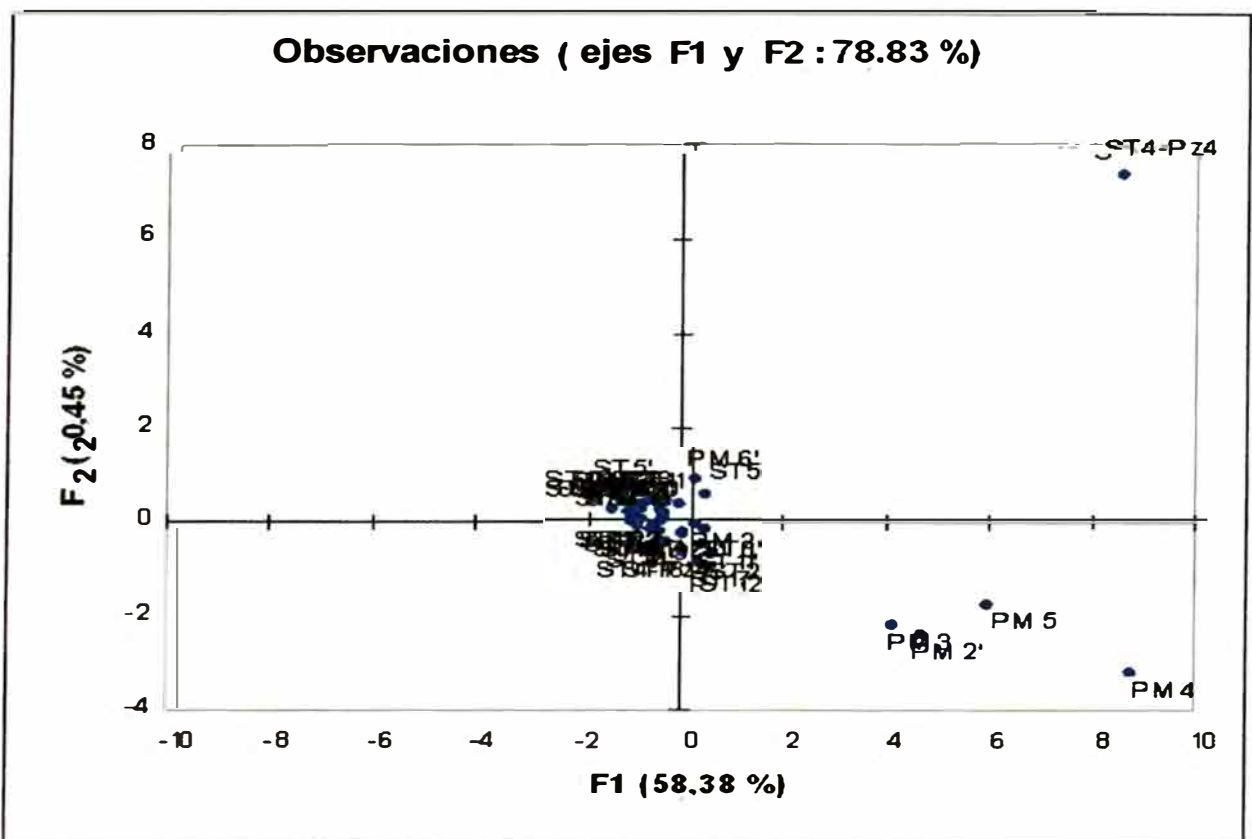


Figura 12: Gráfico de observaciones

El análisis estadístico nos revela que existe la misma distribución de concentración para el Cr y Ni, y para el Pb y Zn sea en función de la profundidad (ver el anexo III) o en función de la posición en el espacio (ver el anexo IV y V). A partir de esta observación se puede sospechar que el Cr y Ni, Pb y Zn tienen una misma fuente de contaminación. A partir del estudio histórico se sabe que el sitio es una grava antigua rellena por materiales inertes. La puesta en evidencia de la contaminación indica que ha

habido un entierro de desechos contaminados, donde se puede intentar encontrar el origen. En efecto, gracias a este estudio y según la tabla 5 (a continuación) se puede inducir que la fuente de contaminación para el Cr y el Ni puede ser: la fabricación de aleaciones especiales o la industria de tratamiento de superficie, que para el Pb y Zn puede ser: la industria de pintura o el tratamiento de superficie.

Tabla 5 : Fuentes de contaminación de metales pesados (16)

Cd	Fertilizantes fosfatados, industria de tratamiento de superficie de metales, industria de estabilización de materiales plásticos, fabricación de acumuladores y de radiadores de automóviles, fabricación de caucho, colorantes, aguas contaminadas de vías de circulación.
Cu	Canalizaciones de agua, cables eléctricos, radiadores de automóviles, aparatos de calentamiento, tratamiento de superficie.
Zn	Productos farmacéuticos o domésticos, conductos de agua, pinturas, pilas; galvanización, tratamiento de superficie.
Ni	Fabricación de aceros y aleaciones especiales, recubrimiento de superficie por electrólisis, hidrogenación de aceites y sustancias orgánicas, fabricación de pinturas, de laca y de productos cosméticos.
Hg	Productos farmacéuticos o domésticos, producción y utilización de antifúngicos, aparatos eléctricos, productos electrolíticos de cloro y de la soda, pinturas, pulpa de papel, fabricación de cloruro de vinilo y de uretano.
Cr	Industria del cuero, fabricación de aleaciones especiales, industria de tratamiento de superficie.
Pb	Canalizaciones de agua, recipientes de baterías, pinturas, aditivos para la gasolina, aguas contaminadas de vías de circulación,

	industrias farmacéuticas y siderúrgicas, talleres fotográficos, televisión.
--	---

Se procede a analizar la distribución en función de la profundidad (depth 1) a la cual se ha tomado las muestras (ver el anexo III). Gracias a estas distribuciones se puede sacar como conclusiones que:

- Para el Pb, Hg et Cu se encuentran concentraciones máximas a una misma profundidad (1.4 m) y sobre el mismo límite de análisis (ST4-Pz4).
- Se puede observar la misma situación para el Cr y Cd, profundidad de 2.4m y límite PM5.
- Finalmente para el Zn y el Ni, profundidad de 3.7 m y límite PM4’.

Estas observaciones están resumidas en la tabla siguiente:

Tabla 6: Distribución en función de la profundidad 1 (depth1)

Contaminante	Depth1 (m)	Concentración máx. (mg/kg-ms)	Límite
Pb	1.4	3000	ST4-Pz4
Zn	3.7	3800	PM4’
Cr	2.4	110	PM5

Ni	3.7	140	PM4'
Tricloro	6.0	1.3	TR8
Hg	1.4	6.8	ST4-Pz4
As	2.9	62	ST12'
Cd	2.4	19	PM5
Cu	1.4	25000	ST4-Pz4
HCT	1.4	3800	ST3

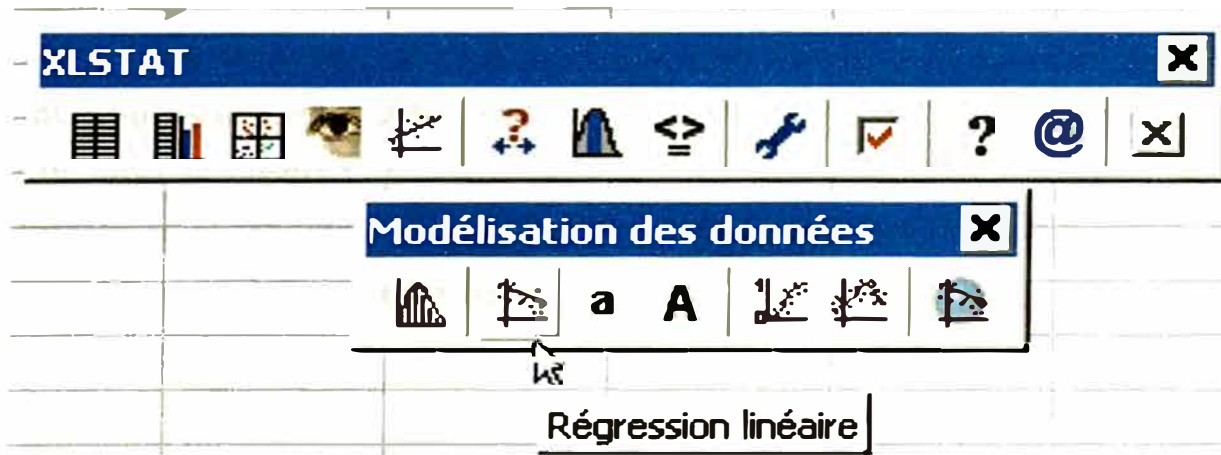
El análisis de la distribución de concentraciones en función de la profundidad 2 (ver el anexo III) nos muestra que:

Tabla 7: Distribución en función de la profundidad 2 (depth2)

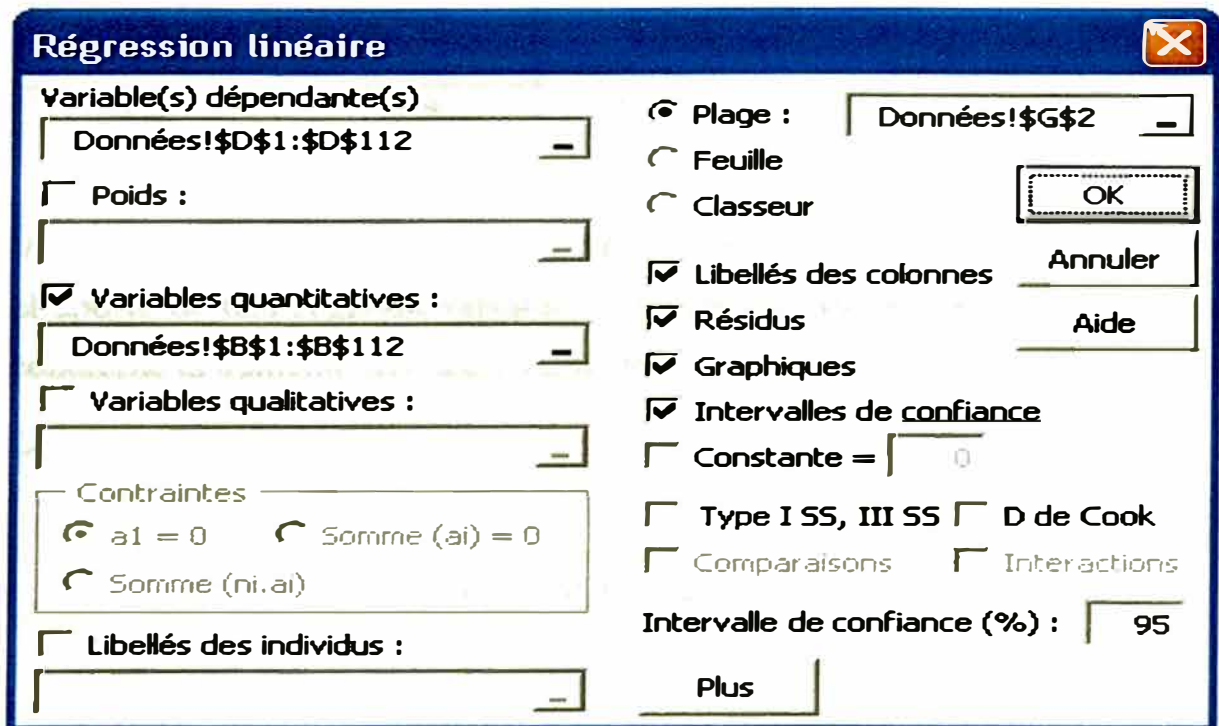
Contaminante	Depth2 (m)	Concentración máx. (mg/kg-ms)	Límite
Pb	1.6	3000	ST4-Pz4
Zn	3.9	3800	PM4'
Cr	2.6	110	PM5
Ni	3.9	140	PM4'
Tricloro	11	1.3	TR8
Hg	1.6	6.8	ST4-Pz4
As	3.1	62	ST12'
Cd	2.6	19	PM5
Cu	1.6	25000	ST4-Pz4
HCT	1.6	3800	ST3

- Existe una concentración máxima a una profundidad de 1.6 m y sobre el mismo punto de muestreo (ST4-Pz4) para el Cu, Pb y Hg.
- Situación similar para el Cr y Cd a una profundidad de 2.6 m y límite PM5.
- Finalmente el Zn y Ni presentan la concentración máxima en el límite PM4' y profundidad de 3.9 m.

Para hacer una modelización de datos en el XLSTAT, se debe de seleccionar el comando XLSTAT/Modélisation/Régression o hacer click en el botón "Régression" de la barra de comandos "Modélisation".



Se debe seleccionar los datos de la hoja de Excel, la "Variable dépendante" corresponde a la variable a modelizar. Las variables explicativas pueden ser cuantitativas o cualitativas. La opción "Libellés des colonnes" se deja activa, puesto que la primera línea de columnas comprende el nombre de las variables. Se deja la opción "Résidus" seleccionada ya que se analizara las predicciones y los residuos para validar la hipótesis de normalidad de la regresión y para identificar los valores extremos.



Gracias al método ACP se puede proceder a hacer una modelización de datos entre el Cd, Ni, Pb y Zn puesto que como hemos visto estas son correlacionadas entre ellas. Para ello se hará una regresión lineal simple o múltiple entre estos diferentes contaminantes, luego se debe verificar en que caso se observa un coeficiente de determinación (R^2) más cerca de 1 (mejor es el modelo), lo que nos da una idea del % de variabilidad de la variable a modelizar, demostrado por la variable explicativa.

Haciendo un test de correlación entre estas 4 variables:

Tabla 8: Test de correlación

Variables	Cd	Ni	Pb	Zn
Cd	1	0.423	0.705	0.566
Ni	0.423	1	0.528	0.757

Pb	0.705	0.528	1	0.564
Zn	0.566	0.757	0.564	1

Vemos que el Cd y el Pb están correlacionados al 70.5 %, se verifica que el aporte de una segunda variable o tercera variable es mínimo en lo que concierne al aumento del coeficiente de regresión.

La ecuación del modelo es:

$$\text{Cd} = -0.15 + 4.37\text{E-}03*\text{Pb}$$

Para el Ni y el Zn se observa que son correlacionados a 75.7%. La regresión lineal simple aporta el coeficiente de determinación lo más cercano a 1.

$$\text{Ni} = 6.97 + 3.08\text{E-}02*\text{Zn}$$

En el caso del Pb, con una regresión lineal múltiple se puede observar un aumento del coeficiente de regresión en 5.1% hasta el valor de 76.1% con el Cd y Ni.

$$\text{Pb} = 3.78 + 122.36*\text{Cd} + 9.03*\text{Ni}$$

Finalmente en el caso del Zn, este está correlacionado con el Ni y Cd a 81.7 % (aumento de 6 % con respecto a el aporte del Ni solamente).

$$\text{Zn} = -30.06 + 60.85*\text{Cd} + 18.67*\text{Ni}$$

V RESULTADOS ESTADÍSTICOS GEOFÍSICOS / CONTAMINACIÓN

En este caso preciso no se puede encontrar una correlación simple entre los resultados geofísicos (resistividad, conductividad, desviaciones) y los análisis de suelos (concentraciones de ciertos contaminantes) puesto que lo que se ha logrado con el ACP es una correlación entre los contaminantes.

Estas conclusiones no son definitivas, estas se aplican al sitio de Limeil – Brévannes y meritan de ser verificadas sobre otros sitios contaminados. En el futuro, para los próximos sitios estudiados, nuestra metodología será mejorada.

En cambio con el análisis estadístico se puede precisar primeramente la evolución de la distribución de concentración en función de la profundidad, segundo que existe la misma distribución de ciertos contaminantes (Cr y Ni, Pb y Zn) en el sitio (ver el anexo IV y V). Gracias a este resultado se tratara de localizar las contaminaciones comunes y de descubrir nuevas.

VI CONCLUSIONES

1. Globalmente los suelos derivan de la alteración y de la degradación de rocas subyacentes, y en consecuencia heredan de sus principales caracteres geoquímicos.
2. Los métodos geofísicos permiten explorar el subsuelo sin intervención de trabajos pesados (movimiento de tierras, pruebas, etc.). Estos son particularmente bien adaptados a las prospecciones en zonas urbanas, en zonas culturales protegidas, etc.; estos métodos son usualmente utilizados sobre los sitios contaminados para detectar y evaluar la extensión de una pluma de contaminación o su migración.
3. Sabemos mal delimitar las contaminaciones, se puede utilizar modestamente las técnicas geofísicas para discriminar las zonas homogéneas y orientar así las operaciones de muestreo. A menudo la utilización de estas técnicas puede enfrentarse a problemas de ocupación física de suelos, a artefactos tales que las corrientes vagabundas resulten de la puesta a tierra de instalaciones eléctricas o de tamaño de objetos a reconocer gracias al poder de resolución de las técnicas utilizadas.
4. La conexión entre los métodos "cartográficos" con los métodos eléctricos (resistividad eléctrica) permite verificar ciertas anomalías. Además el método electromagnético y la resistividad eléctrica permiten construir un corte de resistividad y de carga eléctrica. Así se puede conocer la profundidad y por lo tanto la geometría de cada anomalía.

VII BIBLIOGRAFÍA

- (1) Academia de Ciencias, Contaminación localizada de suelos y de subsuelos por los hidrocarburos y por los solventes clorados, Informe N° 44, Marzo 2000, Pág. 11.
- (2) Guérin R., Síntesis de trabajos de investigación presentados para la obtención de la habilitación a dirigir investigaciones, Noviembre 2004, Pág. 16.
- (3) BRGM, Gestión des sitios (potencialmente) contaminados, los métodos geofísicos aplicados al medio ambiente, Anexo 12, Marzo 2000, Pág. 35.
- (4) BRGM, Geofísica aplicada: Código de buena práctica, Marzo 2002, Pág. 2.
- (5) <http://fr.wikipedia.org/wiki/Résistivité>
- (6) Naudet V., Los métodos de resistividad eléctrica y de potencial espontáneo aplicados a sitios contaminados, Noviembre 2004, Pág. 22.
- (7) Rey E., Caracterización de suelos heterogéneos por métodos geofísicos, Junio 2005, Pág. 43.
- (8) Gourry J.C., Jeannot R., Proust E., Acoplamiento de las medidas geofísicas y análisis de gases para la detección de contaminantes en dos viejas coquerías, Programa Nacional CRITERRE, BRGM / RP – 51726 – FR, Junio 2002, Pág. 14.

- (9) [http://www.geofys.uu.se/field_methods_other_formats/Measurements with the EM31 system2.doc](http://www.geofys.uu.se/field_methods_other_formats/Measurements_with_the_EM31_system2.doc)
- (10) IDUNA Environnement, SEM A.L.B., Estudio documentario medioambiental e histórico, Informe N°E11B, Noviembre 2005, Pág. 4.
- (11) IDUNA Environnement, SEM A.L.B, Asistencia técnica sobre un sitio contaminado – Diagnostico profundo, Informe N°E11C, Enero 2006, Pág. 9.
- (12) [http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivdad electrica](http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivdad_electrica)
- (13) http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf
- (14) http://es.wikipedia.org/wiki/Análisis_de_componentes_principales
- (15) <http://www.xlstat.com/fr/support/tutorials/pca.htm>
- (16) Béhaegel M., Gourry J.C., Investigaciones de contaminaciones orgánicas por métodos geofísicos, BRGM / RP – 52642 – FR, Noviembre 2003, Pág. 54.
- (17) ADEME, Las técnicas de reconocimiento preliminar aplicadas a sitios potencialmente contaminados, Diciembre 2004, Pág. 15.
- (18) http://www.cig.ensmp.fr/~thiry/pol_Mortagne_solid/Mort_present_00.htm
- (19) <http://basias.brgm.fr>

(20) <http://www.echodelta.net/mbs/eng-overview.php>

(21) http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/foundations/method-summ_files/em31-notes.htm

ANEXOS

Anexo I: Análisis de suelos, repartición sobre el sitio (horizontal) y en profundidad (vertical).

Anexo II: Matriz de correlación y de cosenos cuadrados de variables.

Anexo III: Distribución de concentración en función de la profundidad.

Anexo IV: Distribución de concentración en la dirección X.

Anexo V: Distribución de concentración en la dirección Y.

Anexo I: Análisis de suelos, repartición sobre el sitio (horizontal) y en profundidad (vertical)

Limite	Easting	Northing	Elev	Total Depth	Depth 1	Depth 2	As	Cd	Cr	Cu	HCT
PM4	610074.49	2416985.26	41	5	2	2.2	0	0.86	19	440	150
PM4'	610074.49	2416985.26	41	5	3.7	3.9	58	9.3	74	1400	1800
TR7	610123	2417014.6	42.35	11	6	11	7.2	0.34	16	34	160
TR5	610047.85	2417021.94	41.25	11	6	11	9.6	1.9	23	54	82
PM3	610113.79	2417029.25	42.45	5.2	1.6	2	14	7.2	93	1200	2200
PM3'	610113.79	2417029.25	42.45	5.2	5	5.2	13	0.85	25	100	480
ST5	610212.77	2417037.96	40.55	5	1.4	1.6	10	1	27	96	410
ST5'	610212.77	2417037.96	40.55	5	4.4	4.6	0	0	17	40	0
TR6	610150.79	2417051.79	42.1	11	6	11	6.2	0.28	15	47	63
PM2	610062.23	2417052.62	41.2	3.4	0.9	1.1	0	1.5	22	130	140
PM2'	610062.23	2417052.62	41.2	3.4	3.2	3.4	47	6.5	61	940	200
TR8	610263.4	2417056.4	40.7	11	6	11	7.7	0.413	18	230	99
TR3	610055.14	2417057.18	41	11	6	11	7.6	1.1	25	50	230
ST4-Pz4	610243.71	2417071.64	40.95	9	1.4	1.6	12	14	31	25000	1200
ST4-Pz4'	610243.71	2417071.64	40.95	9	4.7	4.9	11	0.96	41	210	150
ST16	610312.45	2417084.7	41.5	5	1.4	1.6	0	0.67	12	27	0
ST16'	610312.45	2417084.7	41.5	5	4.9	5.1	0	0.51	36	56	160
PM1	610117.68	2417096.16	42.25	5	0.9	1.1	0	0.49	18	96	92
PM1'	610117.68	2417096.16	42.25	5	3.4	3.6	0	0	15	90	310
ST2	610170.04	2417096.62	42.45	5	0.4	0.6	0	1.7	12	66	890
ST2'	610170.04	2417096.62	42.45	5	1.4	1.6	24	1	30	130	360
ST2''	610170.04	2417096.62	42.45	5	4.4	4.6	0	0.56	20	110	1600
TR2	610123.2	2417107.8	42.2	9.3	4.5	9	6.8	1.1	20	83	250
ST17	610296.64	2417116.09	40.4	5	1.4	1.6	0	0	20	10	0
ST17'	610296.64	2417116.09	40.4	5	4	4.2	32	0	36	66	190
ST3	610219.65	2417116.78	41.5	5	1.4	1.6	0	0.62	22	28	3800
ST1	610158.24	2417126.63	42.45	5	0.4	0.6	0	0	0	0	0
ST1'	610158.24	2417126.63	42.45	5	1.4	1.6	0	0	20	57	1400
ST18	610275.1	2417160.32	40.3	5	1.4	1.6	0	0	22	47	0
ST18'	610275.1	2417160.32	40.3	5	4.9	5.1	16	0.41	29	49	0

Limite	Easting	Northing	Elev	Total Depth	Depth 1	Depth 2	Hg	Ni	Pb	Tricloro	Zn
PM4	610074.49	2416985.26	41	5	2	2.2	0.26	15	490	0	350
PM4'	610074.49	2416985.26	41	5	3.7	3.9	1.1	140	2900	0.015	3800
TR7	610123	2417014.6	42.35	11	6	11	0.43	12	110	0.21	270
TR5	610047.85	2417021.94	41.25	11	6	11	0.37	17	160	0.28	1100
PM3	610113.79	2417029.25	42.45	5.2	1.6	2	0.49	61	480	0	2300
PM3'	610113.79	2417029.25	42.45	5.2	5	5.2	0.32	17	450	0.025	400
ST5	610212.77	2417037.96	40.55	5	1.4	1.6	1.7	18	550	0.018	430
ST5'	610212.77	2417037.96	40.55	5	4.4	4.6	0.91	12	210	0.018	140
TR6	610150.79	2417051.79	42.1	11	6	11	0.44	11	80	0.03	83
PM2	610062.23	2417052.62	41.2	3.4	0.9	1.1	0.21	16	850	0.016	850
PM2'	610062.23	2417052.62	41.2	3.4	3.2	3.4	0.19	92	1300	0.2	1700
TR8	610263.4	2417056.4	40.7	11	6	11	0.72	12	94	1.3	130
TR3	610055.14	2417057.18	41	11	6	11	3.8	13	60	0.4	120
ST4-Pz4	610243.71	2417071.64	40.95	9	1.4	1.6	6.8	83	3000	0.026	1400
ST4-Pz4'	610243.71	2417071.64	40.95	9	4.7	4.9	0.2	23	96	0	230
ST16	610312.45	2417084.7	41.5	5	1.4	1.6	0.27	8.6	250	0.71	370
ST16'	610312.45	2417084.7	41.5	5	4.9	5.1	0.18	11	210	0.38	380
PM1	610117.68	2417096.16	42.25	5	0.9	1.1	0.37	13	150	0.014	190
PM1'	610117.68	2417096.16	42.25	5	3.4	3.6	0.4	13	110	0	95
ST2	610170.04	2417096.62	42.45	5	0.4	0.6	0.46	10	200	0.0095	280
ST2'	610170.04	2417096.62	42.45	5	1.4	1.6	0.41	28	300	0.011	570
ST2"	610170.04	2417096.62	42.45	5	4.4	4.6	0.59	15	240	0	480
TR2	610123.2	2417107.8	42.2	9.3	4.5	9	0.33	16	140	0.31	340
ST17	610296.64	2417116.09	40.4	5	1.4	1.6	0	19	13	0	50
ST17'	610296.64	2417116.09	40.4	5	4	4.2	0.46	34	38	0	76
ST3	610219.65	2417116.78	41.5	5	1.4	1.6	0.17	17	130	0.043	440
ST1	610158.24	2417126.63	42.45	5	0.4	0.6	0	0	0	0	15
ST1'	610158.24	2417126.63	42.45	5	1.4	1.6	0.27	11	99	0.007	150
ST18	610275.1	2417160.32	40.3	5	1.4	1.6	0.1	13	52	0.0079	70
ST18'	610275.1	2417160.32	40.3	5	4.9	5.1	0.12	26	110	0	440

Anexo II: Matriz de correlación y cosenos cuadrados de las variables

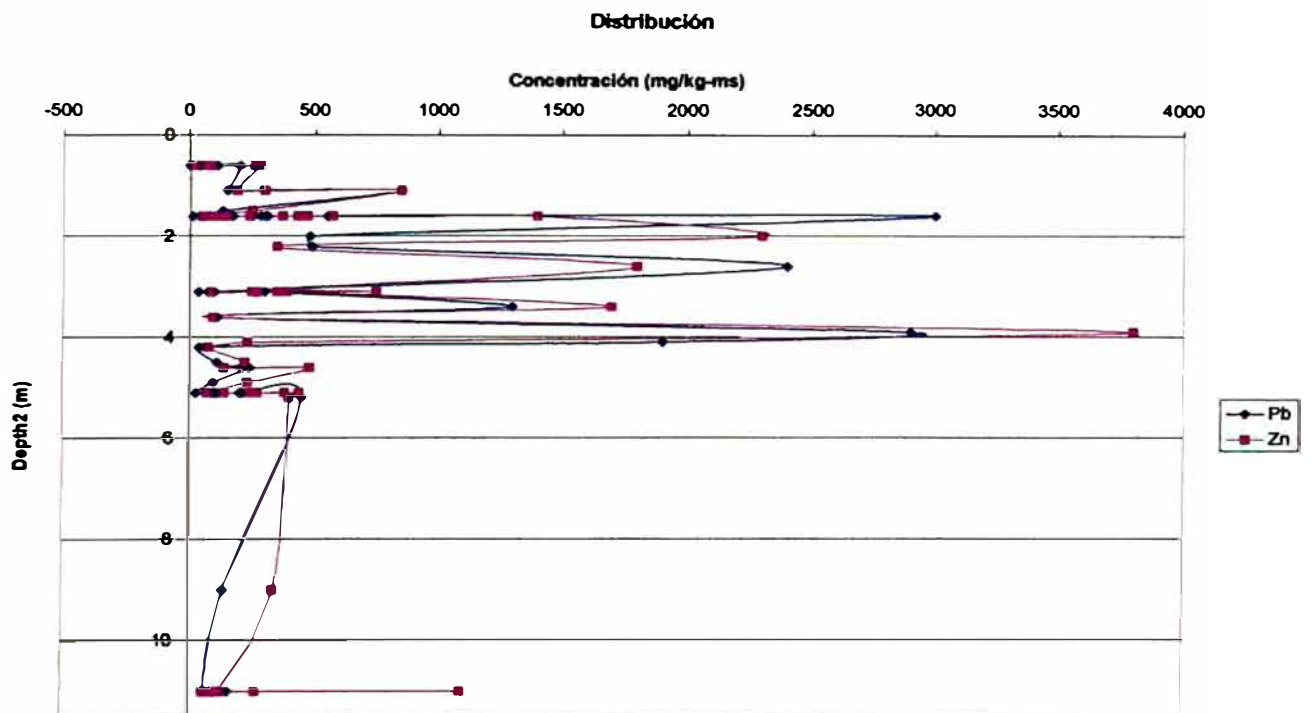
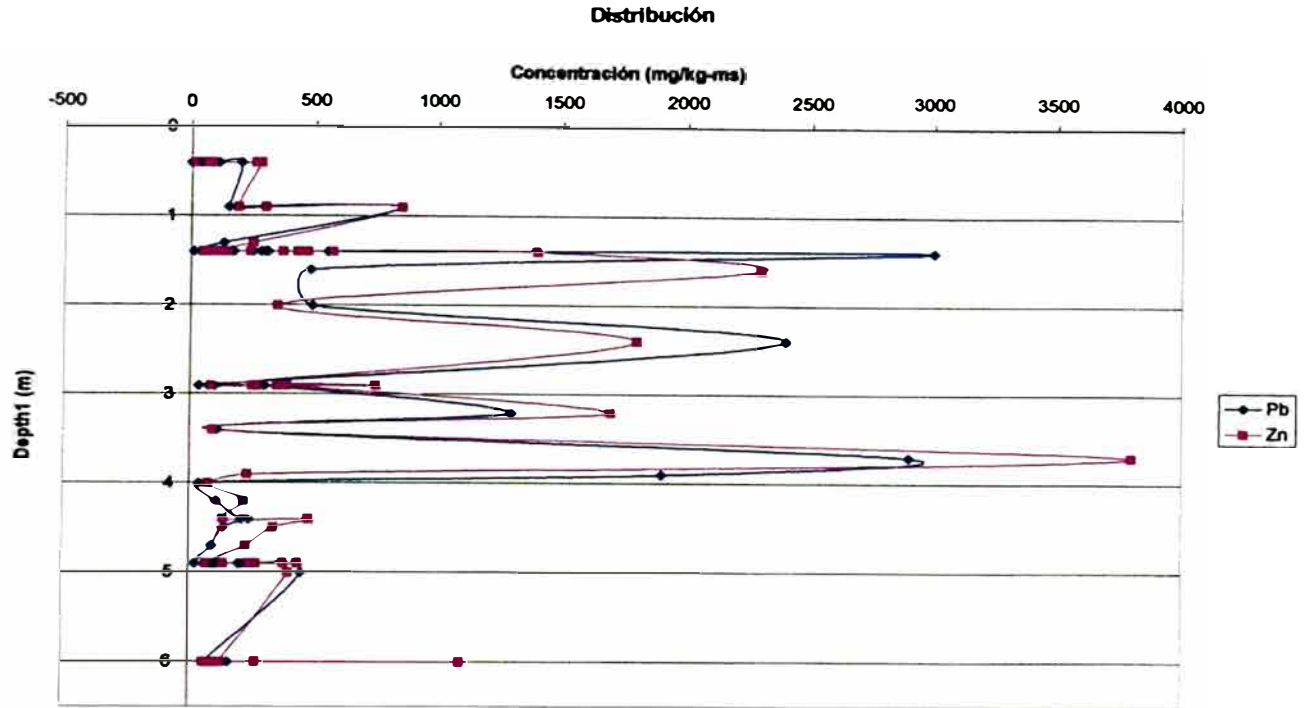
Matriz de correlación (Pearson (n)):

Variabes	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1	0.307	0.412	0.070	0.124	0.619	0.374	0.507
Cd	0.307	1	0.757	0.541	0.458	0.651	0.840	0.752
Cr	0.412	0.757	1	0.111	0.073	0.644	0.533	0.743
Cu	0.070	0.541	0.111	1	0.818	0.436	0.580	0.269
Hg	0.124	0.458	0.073	0.818	1	0.347	0.521	0.212
Ni	0.619	0.651	0.644	0.436	0.347	1	0.727	0.870
Pb	0.374	0.840	0.533	0.580	0.521	0.727	1	0.751
Zn	0.507	0.752	0.743	0.269	0.212	0.870	0.751	1

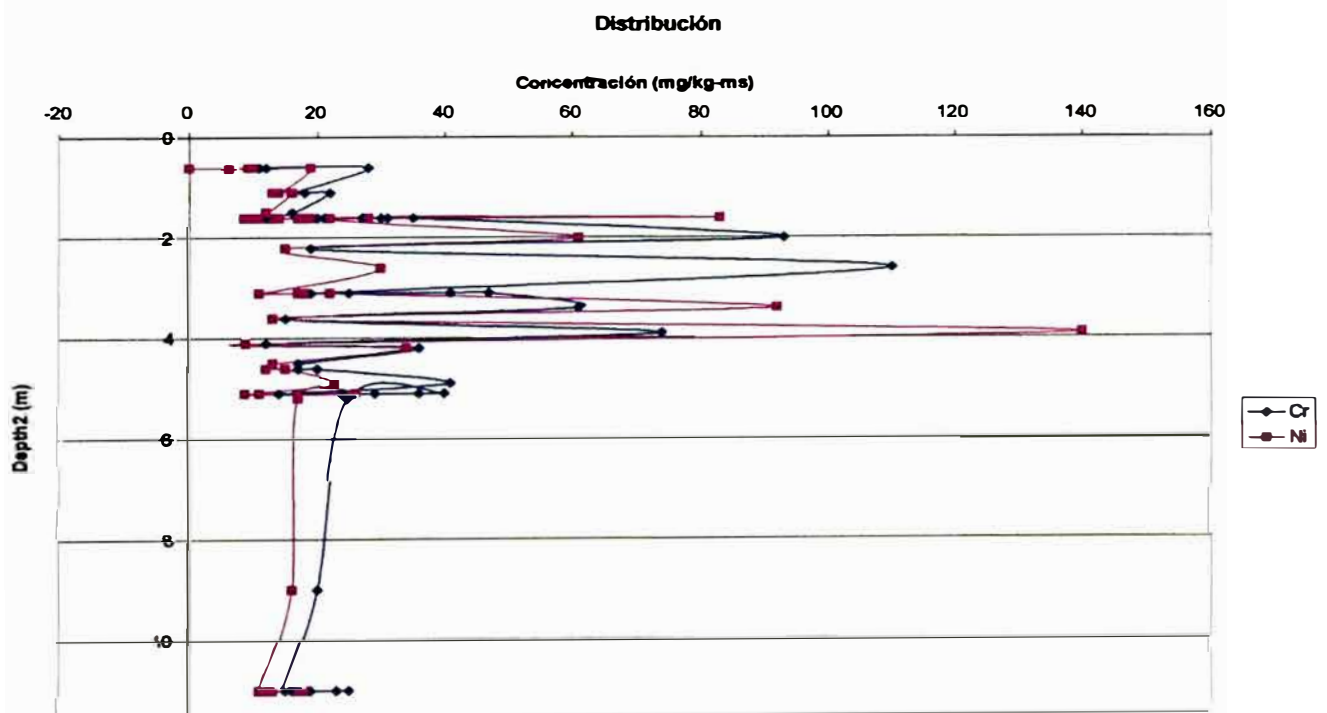
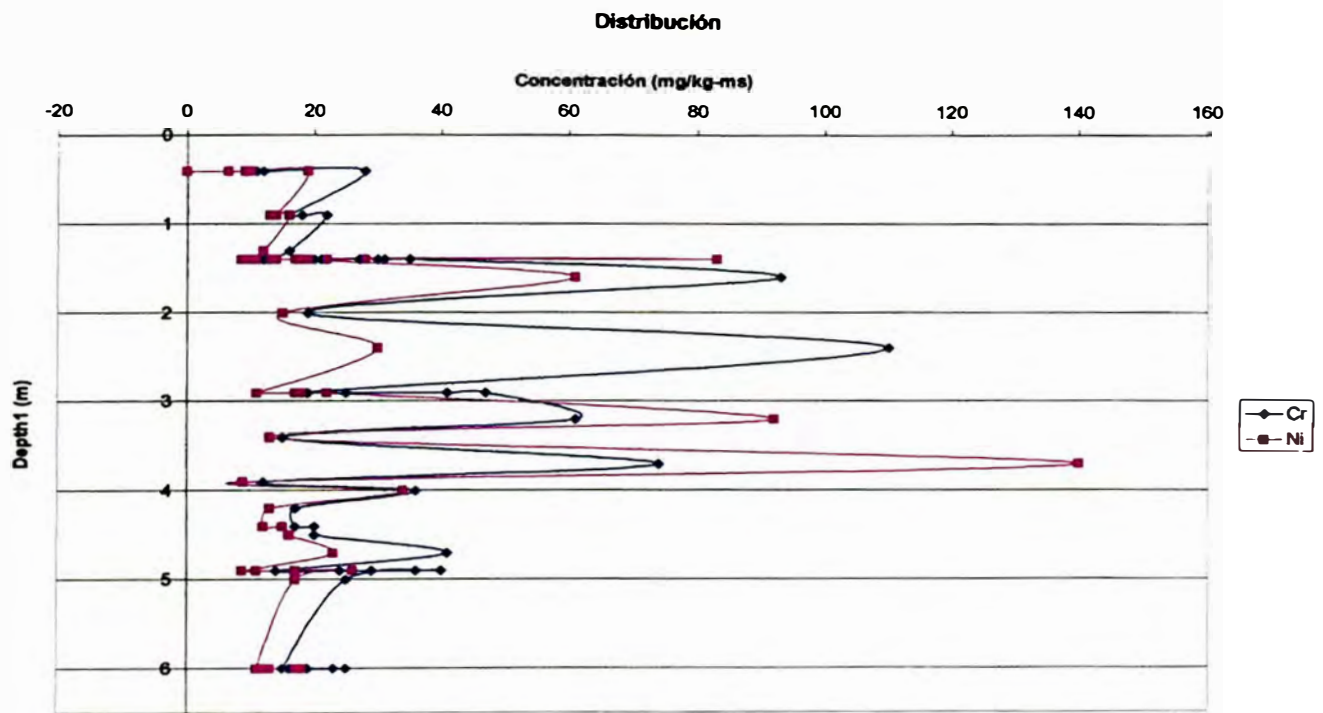
Cosenos cuadrados de las variables:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
As	0.303	0.163	0.471	0.039	0.019	0.004	0.001	0.000
Cd	0.805	0.002	0.112	0.024	0.025	0.005	0.013	0.015
Cr	0.547	0.203	0.101	0.108	0.026	0.000	0.010	0.004
Cu	0.357	0.546	0.003	0.000	0.018	0.070	0.001	0.004
Hg	0.292	0.565	0.030	0.031	0.003	0.079	0.000	0.000
Ni	0.791	0.034	0.041	0.052	0.060	0.000	0.012	0.011
Pb	0.803	0.018	0.009	0.038	0.109	0.000	0.020	0.002
Zn	0.773	0.107	0.006	0.056	0.006	0.016	0.032	0.006

Anexo III: Distribución de concentración en función de la profundidad

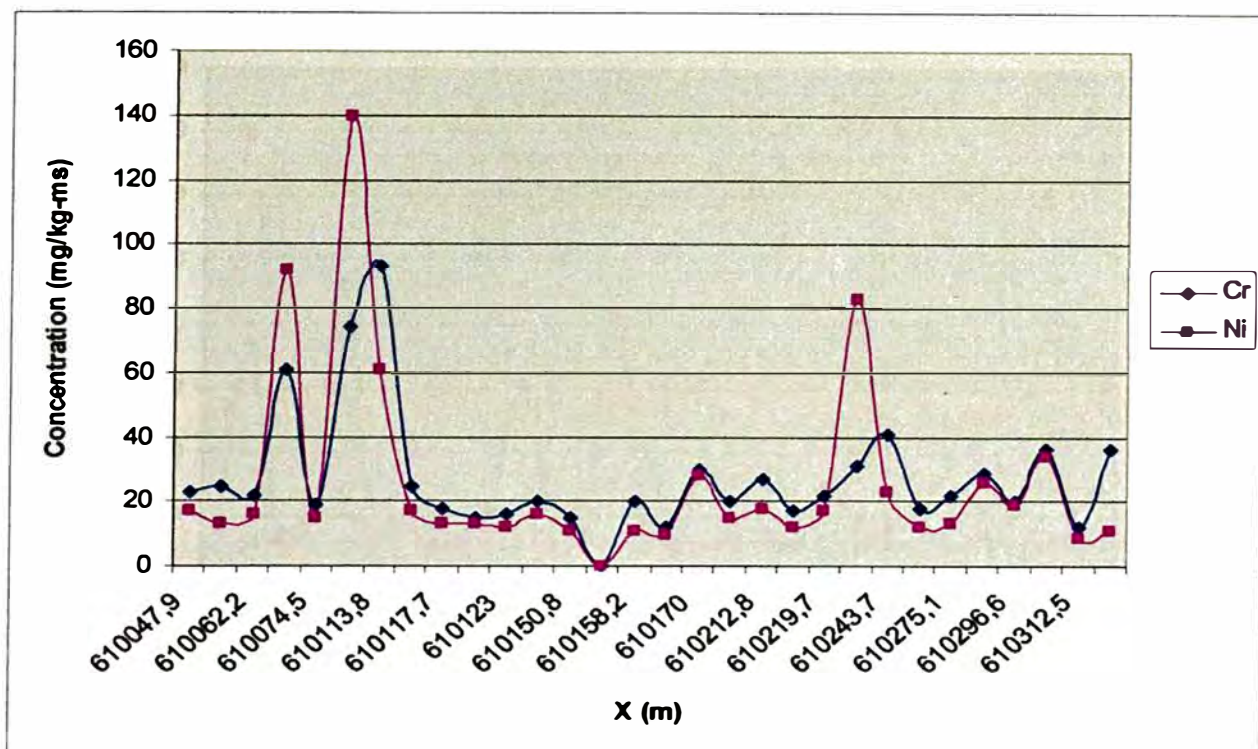
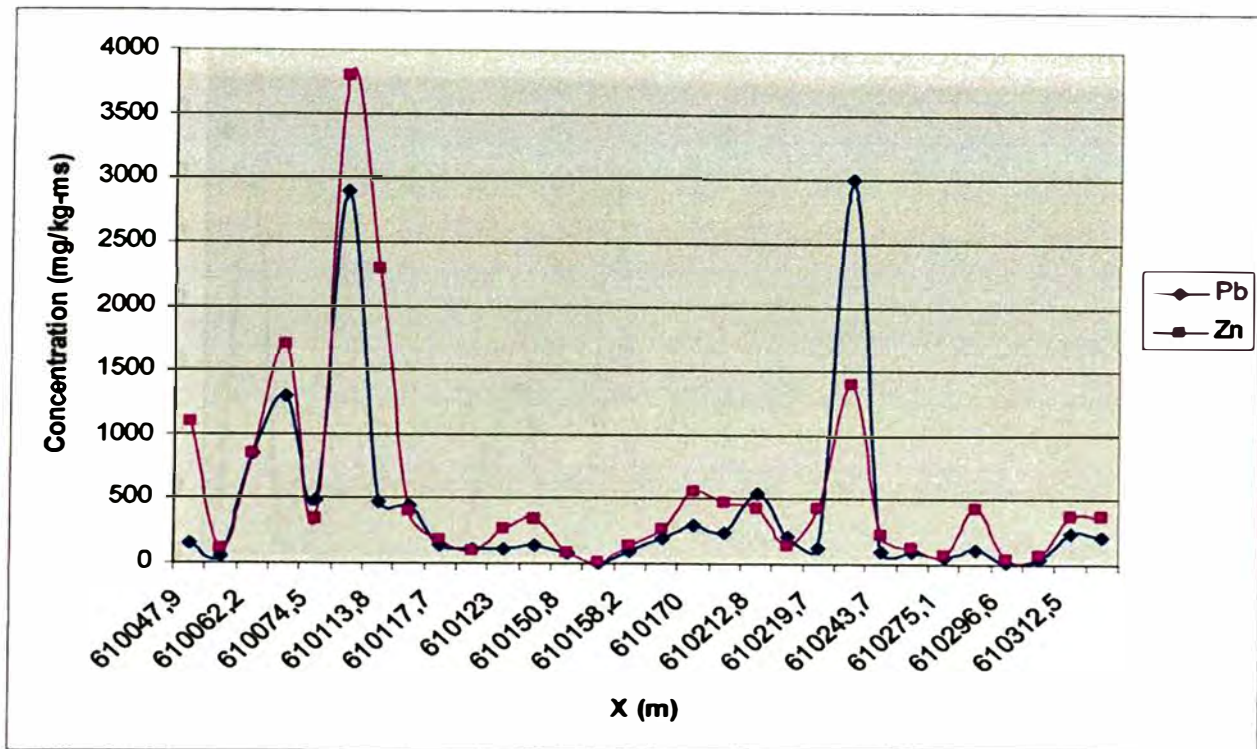


En estos dos gráficos se observa la misma distribución de la concentración del Pb y Zn en función de la profundidad 1 (depth1) y profundidad 2 (depth2).



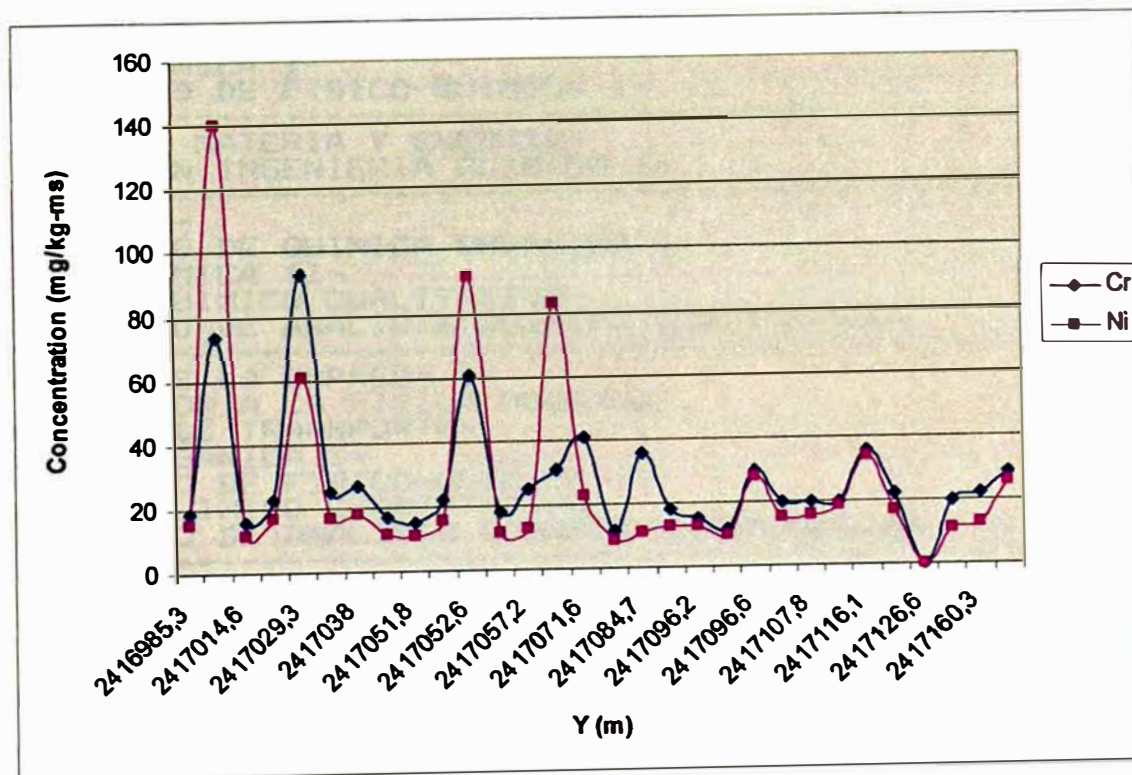
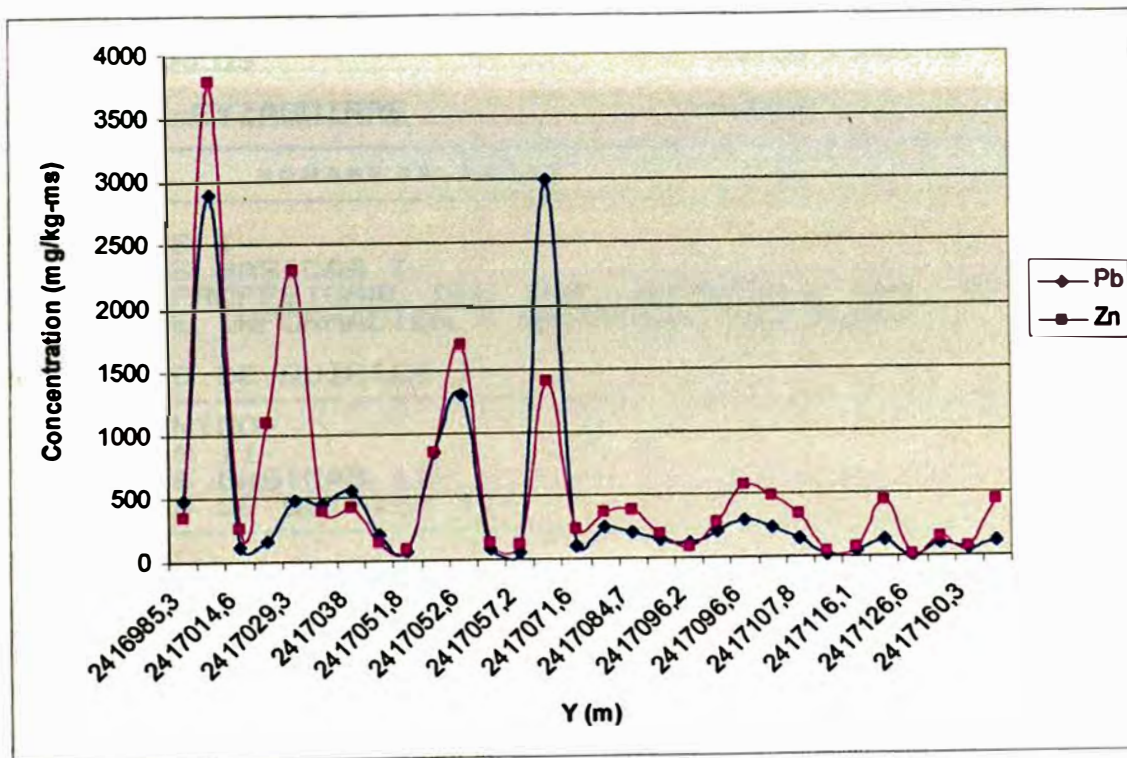
Misma distribución de la concentración del Cr y Ni según la profundidad 1 (depth1) y profundidad 2 (depth2).

Anexo IV: Distribución de concentración en la dirección X.



De estos gráficos se puede concluir que la distribución de la concentración del Pb y Zn así como del Cr y Ni es la misma en la dirección X.

Anexo V: Distribución de concentración en la dirección Y.



De estos gráficos se puede inducir que existe la misma distribución de la concentración del Pb y Zn así como del Cr y Ni en la dirección Y.