



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**

**DIRECCIÓN DE RECURSOS NATURALES**

---

---

---

**DETECCIÓN DE LIXIVIADOS EN UN  
VERTEDERO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS, EN UNA ZONA DEL ACUÍFERO  
DEL VALLE DEL YAQUI, SONORA, MÉXICO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**EN ADMINISTRACIÓN DE  
RECURSOS HIDRÁULICOS**

**PRESENTA**

***JESÚS ARVIZU NÚÑEZ***

**CD. OBREGÓN, SONORA**

**OCTUBRE DE 2005**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por que nada soy sin EL, nada puedo sin EL, por que me alientas y me fortaleces y me ayudas en mis sueños-metas.

Al apoyo incondicional de mis padres: Jesús Arvizu Valenzuela y Fátima Núñez Quezada.

A mis amigos el Ingeniero Jesús Alfonso Saucedo y la Ingeniera Selene Beltrán por su apoyo durante 2 años en la Maestría y en la obtención de los datos de campo.

A los Maestros Rodrigo González Enríquez, Jaime Garatuza Payán por los apoyos recibidos durante mi posgrado y por ser un ejemplo a seguir.

## RESUMEN

En este estudio, se determina la existencia de lixiviados en una zona que originalmente fue utilizada como banco de material para la construcción de los bordos de los canales Principales Alto y Bajo en el año de 1950, la cuál posteriormente fue destinada como vertedero de residuos sólidos urbanos, su profundidad y extensión son desconocidas, fue clausurado en 1995 por su saturación de basura. Para determinar si existe pluma de contaminación por lixiviado en el acuífero, se utilizó el método geofísico electromagnético (EM) modelo EM31-MK2.

Los resultados de este estudio indican que existe una pluma contaminante desde el nivel superficial del terreno hasta la profundidad máxima de exploración de 7 m, por lo que se puede concluir que posiblemente el acuífero este contaminado, ya que se tienen registros de que los niveles freáticos se encuentran a 6 m de profundidad en esta zona.

Se recomienda identificar la velocidad y trayecto de dichas plumas contaminantes, obtener muestras para su análisis químico; y construir pozos de observación para una mejor comprensión del comportamiento del acuífero y de la pluma contaminante y planear las estrategias de remediación que procedan.

**Palabras Clave: Vertedero de residuos sólidos, Hidrogeofísica, EM31, Lixiviado.**

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RECONOCIMIENTOS .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
RESUMEN .....	iii
ÍNDICE GENERAL .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 La Hidrogeofísica .....	7
2.2 El Método Electromagnético (EM) .....	9
2.3 Marco legal para la disposición de desechos sólidos municipales....	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1 Localización de la Zona de Estudio .....	17
3.2 Materiales.....	19
3.3 Metodología .....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1 Resultados de la calibración de materiales y basura de la región .....	23
4.2 Resultados de la conductividad del terreno en planta .....	24
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	32
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
ANEXO LECTURAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	38

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.- Principales constituyentes de lixiviados de rellenos sanitarios de varios países.....	4
Tabla 2.- Características de los instrumentos geofísicos electromagnéticos (EM) .....	9
Tabla 3.- Rangos bibliográficos de valores de conductividades de varios materiales .....	10
Tabla 4.- Resultados de Conductividad para materiales del Río Yaqui y Basura de un Relleno Sanitario .....	23

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.- Principio de Operación del EM31-MK2. ....	14
Figura 2.- Localización del Valle del Yaqui y Zona de estudio .....	18
Figura 3.- Perfil Geológico del Valle del Yaqui .....	20
Figura 4.- “Grid”, Localización de estaciones de muestreo y Perfiles geoeléctricos.....	21
Figura 5.- Conductividad Geoeléctrica a 7 m de profundidad al terreno .....	25
Figura 6.- Conductividad Geoeléctrica a 6 m de profundidad al terreno .....	26
Figura 7.- Conductividad Geoeléctrica a 3.5 m de profundidad al terreno .....	27
Figura 8.- Conductividad Geoeléctrica a 3 m de profundidad al terreno .....	28
Figura 9.- Perfil geoeléctrico A-A´ .....	29
Figura 10.- Perfil geoeléctrico B-B´ .....	30
Figura 11.- Perfil geoeléctrico C-C .....	31



## **1. INTRODUCCIÓN.**

La sociedad ha llevado consigo cambios en los patrones de consumo, el desarrollo tecnológico y la explosión demográfica, generando residuos sólidos en demasía. En las ciudades, la basura sigue siendo un problema casi desde el origen de éstas, debido a la alta densidad de población y al hecho de arrojar la basura a las calles. Esto ha producido la proliferación de insectos, roedores y microorganismos patógenos. Un mal sistema de gestión de las basuras, producirá un deterioro y depreciación del entorno debido a la contaminación del aire, del agua, del suelo y la pérdida de tierras agrícolas. Si se tiene una descarga no controlada de basura en la superficie, puede considerarse la posible contaminación del agua subterránea (CEPIS, 1987).

El estudio que se ha generado por los desechos sólidos municipales, es mundial, se han abordado temas respecto a estos desechos principalmente en el área del agua subterránea, ya que constituyen una fuente de contaminación puntual, cuando no se implementa un relleno sanitario para el tratado de los lixiviados y gases generados por el proceso de descomposición de la materia.

Según la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente y Pesca (1994), en la NOM-084-ECOL-1994, la Environmental Protection Agency (1997), en su Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, y el Department Environmental Protection (2001) en sus Regulaciones Ambientales, definen que los vertederos o rellenos sanitarios son obras de ingeniería, sitios o unidades diseñadas específicamente para el desecho de residuos peligrosos o sólidos municipales y señalan que un relleno sanitario o vertedero mal ubicado o construido puede generar impactos negativos al medio ambiente.

La planificación y construcción de estas obras civiles no deben alterar el medio ambiente natural en forma negativa o causar impactos adversos, según Repeto (1999), en el funcionamiento y desarrollo de un relleno sanitario no se deben afectar los recursos de agua subterránea, por lo que para su creación deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- Profundidad del agua subterránea, límites de acuíferos confinados y no confinados.
- Dirección y radio del flujo del agua, incluyendo las variaciones espaciales y temporales.
- Características de los acuíferos como espesores saturados e insaturados y su conductividad hidráulica.
- Usos regionales y calidad del agua subterránea.

El no realizar estudios de estas variables ocasiona que los acuíferos estén destinados a permanecer contaminados o a contaminarse, ya que se considera

que la disposición de residuos sólidos es una fuente importante de carga contaminante al subsuelo (Miller & Scalf, 1974).

El lixiviado es un líquido orgánico complejo formado primordialmente por la filtración de la precipitación los rellenos sanitarios a cielo abierto o en su parte superior, su composición química exacta es variable y depende de la edad de la basura y de la precipitación (Britz, 1995). Por lo que la composición del lixiviado estará determinada por los años de servicio del terreno; e influenciada por las condiciones climáticas, radio de ubicación y constituyentes de la basura, así como su densidad y absorción.

Según Bitton (2002), los lixiviados “jóvenes”, se caracterizan por su bajo pH, alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y concentraciones medias de amonio; Para lixiviados “viejos” valores altos de pH asociados con baja DBO. Un reporte de la composición cuantitativa se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. – Principales constituyentes de lixiviados de rellenos sanitarios de varios países.

Materiales	Canadá (Montreal)	Hong Kong		Grecia		Taiwán	Turquía	Reino Unido		Alemania	Finlandia
		10-11 año / sitio "clausurado"	< 3 años / sitio "activo"	NE / acetogenico	NE / estabilizado			<2 años	>20 años		
Año del Lixiviado / Madurez del sitio	NE	10-11 año / sitio "clausurado"	< 3 años / sitio "activo"	NE / acetogenico	NE / estabilizado	2 años	3.5 años	<2 años	>20 años	NE	NE
pH	6.8	7.0 – 8.3	5.6 – 7.3	5.97	7.5	6.3	7.3 – 7.8	6.21	7.45	NE	NE
DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno, mgl-1	450	7,300	1,600	36,500	72	15,710	10,875	11,900	260	NE	NE
DQO Demanda Química de Oxígeno, mgl-1	860	17,000	6,610	69,400	1,140	22,750	18,100	23,800	1,160	NE	NE
VFAs Ácidos grasos volátiles, mgl-1	NE	NE	NE	NE	NE	13,740	8,600	5,688	<5	NE	NE
NH4-N Nitrógeno amoniacal, mgl-1	20	3,000	1,500	1,260	261	171	1,810	790	370	NE	NE
PO42- Fosfatos, mgl-1	NE	10	10	15	0.1	NE	64	0.7	1.4	NE	NE
SO42- Sulfatos, mgl-1	Ne	1,000	39	NE	NE	NE	350	NE	NE	NE	NE
Cl- Cloruros, mgl-1	1,900	12,000	3,400	3,800	3450	NE	NE	1,315	2,080	NE	NE
Al (mg l -1)	NE	NE	NE	5.5 – 18.3		NE	NE	NE		2.4	< 0.14
As(mg l -1)	NE	NE	NE	< 0.4		NE	NE	NE		0.014	NE
Cd(mg l -1)	NE	<0.01	<0.01	< 0.07		NE	NE	< 0.005		0.014	< 0.08
Cu(mg l -1)	1.7	0.5	0.02	0.03 – 4.8		NE	NE	0.08		0.054	< 0.02
Pb(mg l -1)	1	1	0.04	< 0.5		NE	NE	0.11		0.063	< 0.2
Hg(mg l -1)	NE	NE	NE	< 0.5		NE	NE	NE		0.0006	NE
Ni(mg l -1)	NE	0.5	0.1	0.23 – 0.82		NE	NE	0.18		0.17	0.056
Zn(mg l -1)	2.5	1	1	0.5 – 8.56		NE	NE	17.6		0.68	0.57

Fuente: Bitton, 2002.

NE: No especificado

En México, desde la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996 (SEMARNAP, 1996) se establecen las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales; Desde entonces se han instalado en algunos estados de la Republica Mexicana, rellenos sanitarios que cumplen con esta norma; pero existe una cantidad no conocida de vertederos a cielo abierto (basureros), algunos oficiales y otros clandestinos; ya que es la forma más “barata” de operarlos; sin considerar con algún tipo de regulación de los desechos sólidos municipales que se generan en las ciudades. Uno de los problemas principales lo genera la infiltración de lixiviados provenientes de basureros, derrames químicos o desperdicios líquidos. Esto produce la degradación local de la calidad del agua subterránea (Díaz y Arizabalo, 1991).

Durante décadas, esta actividad no representó un problema serio para las autoridades encargadas del servicio de limpia y disposición de los residuos sólidos, ya que bastaba con llevarlos fuera de los núcleos urbanos para evitar el impacto visual y las molestias que podrían ocasionar a la población. La cantidad generada y sus características de composición, permitían que se reintegraran rápidamente al ciclo natural, sin ocasionar daños al ambiente, ya que el subsuelo sí puede usarse para depósitos de desecho (Díaz y Arizabalo, 1991).

Ante estos cambios y frente a la perspectiva de prácticas tradicionales en la disposición de los residuos sólidos, aparecieron grandes tiraderos a cielo abierto y tiraderos clandestinos, los cuales constituyen un foco de contaminación grave para los cuerpos de agua, aire y suelo, así como un medio propicio para el desarrollo de fauna nociva, lo que pone en riesgo la salud de la población, genera la degradación de los recursos naturales; y afecta la economía, incluyendo el deterioro de la imagen urbana del lugar.

Las condiciones antes señaladas, aparentemente se manifiestan con el manejo de los desechos sólidos en el municipio de Cajeme, dado que en la zona norte del acuífero del Valle del Yaqui, se localiza el antiguo relleno sanitario de Ciudad

Obregón, se tiene reportado que no cuenta con el diseño constructivo apropiado para una obra de este tipo, y no satisface las más elementales condiciones marcadas por la Norma Oficial Mexicana (Beltrán y Torres, 1998), dado que fue generado por una excavación para la extracción de materiales requeridos durante la construcción de los canales del Distrito de Riego, esto representa un posible impacto sobre el acuífero, ya que en esta zona el nivel freático es del orden de los 6 m de profundidad (González, *et al*,1995) lo cuál no ha sido evaluado, por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Existirá contaminación por lixiviación en el acuífero donde se localiza el vertedero de desechos sólidos municipales del municipio de Cajeme?

Por lo que el objetivo del trabajo fue determinar la presencia de lixiviados contaminantes en el acuífero, por el vertedero de desechos sólidos de Ciudad Obregón, utilizando un método geofísico electromagnético.

## **2. MARCO TEÓRICO.**

### **2.1 La Hidrogeofísica.**

Según Hubbard (2002), la hidrogeofísica se esfuerza en combinar la información hidrogeológica obtenida y los métodos geofísicos para mejorar nuestra comprensión de parámetros subsuperficiales o de proceso.

Para identificar mejor los recursos de agua subterránea, se necesita determinar con suficiente exactitud las características del agua almacenada, su composición

química, calidad biológica y sus características posibles del flujo. Las diversas técnicas geofísicas no son invasoras, son económicas y se pueden realizar con un amplio muestreo espacial; Así, las técnicas geofísicas tienen un potencial enorme para suplir los datos obtenidos por métodos invasores. Las medidas geofísicas se pueden expresar en términos de información hidrogeológica, sin embargo se requiere que la relación hidráulica entre las características físicas de los suelos y las rocas sean parámetros conocidos. De acuerdo con Guérin (2005), en algunos casos, la prospección geofísica permite la interpolación de los resultados obtenidos de perforaciones o de piezómetros (exploración subsuperficial) y de la caracterización de las propiedades de tierra (exploración detallada).

Según Guérin (2005), la geofísica podría ser más explícita si se solucionan algunas incertidumbres hidrológicas, por ejemplo:

- La geometría del acuífero en depósitos aluviales y/o sedimentarios y en capas volcánicas estratificadas, así como la localización de su basamento, fronteras laterales e interconexiones.
- Las características de las rocas fracturadas (localización de sus fracturas y/o de grietas).
- El estudio de las características hidráulicas del acuífero (porosidad, contenido de la arcilla, trasmisividad, permeabilidad del medio poroso, etc).
- La calidad del agua (dulce, salado, mineralizado pesadamente, contaminado).
- La supervisión del flujo del agua.
- La interpretación de los efectos futuros de la explotación.

La zona somera o subsuperficial de la tierra es una zona extremadamente importante que suministra recursos de agua; apoya a la agricultura; a los servicios como el depósito para la mayoría de los contaminantes municipales e industriales de basuras, y soporta a las cimentaciones en la construcción (Hubbard, 2002).

## 2.2 El Método Electromagnético (EM).

Los métodos electromagnéticos miden conductividades eléctricas subsuperficiales por inducción electromagnética de baja frecuencia (Benson, 1984), producen campos magnéticos en variación-tiempo que son producidos por un transmisor para inducir corrientes eléctricas en la subsuperficie, el flujo de estas corrientes es controlado por la conductividad eléctrica de la subsuperficie (David, 2002), este método proporcionan instrumentos de medición para la conductividad eléctrica del suelo subsuperficial, de la roca y del agua subterránea; La cuál esta en función del tipo de suelo, de roca, de su porosidad, de su permeabilidad y de los líquidos que llenan el espacio de poro (Benson, 1984).

La profundidad eficaz para los métodos EM es determinada por la geometría y el espaciamiento de las bobinas de transmisión y de recepción (Tabla 2).

Tabla 2. Características de los instrumentos geofísicos electromagnéticos (EM).

Instrumento	Separación de Bobinas	Frecuencia	Orientación	Profundidad de Exploración
EM38	1.0 metros	14.6 Khz.	VD	1.5 m
			HD	0.75 m
EM31	3.66 metros	9.8 KHz	VD	6 m
			HD	3 m
EM34	10 metros	6.4 Khz.	VD	15 m
			HD	7.5 m
EM34	20 metros	1.6 Khz.	VD	30 m
			HD	15 m
EM34	40 metros	0.4 KHz	VD	60 m
			HD	30 m

Fuente: Geonics Ltd, 1995. **HD - Dipolo Horizontal; VD - Dipolo Vertical**

La mayoría de los sistemas EM utilizan un transmisor activo de modo que la geometría de la fuente y la frecuencia de la onda puedan ser controladas durante la operación de campo (David, 2002).

Los métodos EM son los más eficaces en identificar las estructuras enterradas en medios con baja conductividad eléctrica, a diferencia de los métodos eléctricos tradicionales de resistencia ya que estos requieren instrumentos para realizar la penetración de la corriente (David, 2002), por consiguiente, el método EM es aplicable a condiciones naturales del suelo, a la geohidrología y para trazos de muchos tipos de plumas contaminantes. Además, para encontrar los límites de una excavación, las basuras y tambos enterrados entre otras aplicaciones.

De acuerdo con Benson (1984), las variaciones de conductividad pueden ser causadas por los cambios en el contenido de agua del suelo, la conductancia específica del agua subterránea, la profundidad de la roca, y el grueso de las capas del suelo y de la roca. Los cambios en tipos básicos del suelo o de la roca, y las características estructurales tales como fracturas o vacíos, los depósitos naturales orgánicos de la arcilla, de la arena, y de la grava, también afectarán la conductividad. Estas variaciones permiten al investigador encontrar rápidamente condiciones anómalas; las zonas altamente conductoras en la superficie inferior conducen fácilmente la corriente eléctrica, mientras que las zonas menos conductoras impiden el flujo actual. El método EM no requiere el contacto físico de tierra, las medidas pueden realizarse rápidamente. En la Tabla 3 se muestran algunos valores de conductividad.

Tabla 3. – Rangos bibliográficos de valores de conductividades de varios materiales.

MATERIAL	Conductividad (mS/m)	REFERENCIA
Aire	0	ASCE, 1998
Agua destilada	0.01	ASCE, 1998
Agua	0.5	ASCE, 1998
Suelo Arcilloso	2 - 10	Culley <i>et al</i> , 1975
Arena de río y grava	7 - 10	Culley <i>et al</i> , 1975
Arcillas	10 - 1000	Telford <i>et al</i> , 1976
Lixiviado típico de relleno sanitario	100 - 2000	Davies and Campanella, 1995
Agua de mar	3000	ASCE, 1998

Muchos contaminantes producirán un aumento en la concentración libre del ion cuando se encuentran en el suelo o agua subterránea, este aumento excesivo de la conductividad en el sistema permite la detección, mapeo del suelo, del agua subterránea contaminada y de alto riesgo, como los rellenos sanitarios ó vertederos de desechos sólidos. Las grandes cantidades de líquidos orgánicos pueden desplazar la humedad normal del suelo, causando una disminución de la conductividad. El mapeo de una pluma contaminante definirá generalmente el sentido local del contaminante (Benson, 1984).

El valor de la conductividad que resulta de un instrumento EM es un compuesto, y representa los efectos combinados del grosor de las capas del suelo o de la roca, de sus profundidades, y de las conductividades específicas de los materiales. Los valores que resultan son influenciados más fuertemente por los materiales someros que por capas más profundas, y esto se debe considerar al interpretar los datos. Los instrumentos EM están calibrados para leer conductividad subsuperficial en mS/m o su equivalente ( $1 \text{ mho/m} = 1 \text{ Siemen/m}$ ).

La mayoría de los minerales del suelo y de la roca, cuando son secos, tienen conductividades muy bajas, según Culley *et al* (1975) la conductividad es influenciada por el contenido en agua y los parámetros siguientes de suelo y roca:

- La porosidad y la permeabilidad del material;
- El grado de saturación del espacio del poro;
- La concentración de electrolitos y de coloides disueltos en los líquidos del poro;
- El estado de la temperatura y de la fase (es decir, líquido o hielo) del agua de poro.

Un valor único de la conductividad no se le puede asignar a un material particular, porque las correlaciones de la composición del suelo, de la estructura y de los líquidos del poro son altamente variables en la naturaleza.

El instrumento geofísico EM31-MK2 que es fabricado por Geonics Ltd, tiene un Datalogger (Memoria de datos) incorporado, puede trazar variaciones geológicas, contaminación del agua subterránea, o cualquier característica subsuperficial asociada a los cambios de conductividad de la tierra usando una técnica inductiva electromagnética que no necesita contacto físico con la tierra. Este medidor de conductividad de terreno, es un sistema que puede ser manejado por un solo individuo y es portátil, proporciona estimaciones de la conductividad eléctrica superficial de los materiales someros e identifica sus anomalías, estas podrían ser de origen natural o antropogénicas (como redes del abastecimiento de agua, o alambres eléctricos enterrados).

El funcionamiento estándar del EM31-MK2 realiza una exploración sobre el subsuelo estimada de 6 m en posición vertical y colocando el instrumento a 1 m de altura del suelo aproximadamente, si se hace rotar el instrumento a 90° sobre su eje longitudinal, se reduce la profundidad de la exploración a 3 m (Ver Tabla 2).

El equipo está compuesto por una antena receptora y por una antena emisora. A través de la antena emisora circula una corriente alterna la cuál crea un campo magnético primario, que se va desplazando por el subsuelo hasta llegar a un cuerpo conductor, creando este un campo magnético secundario. La antena receptora adquiere la combinación del campo magnético primario y secundario (Figura 1), este método determina la conductividad del subsuelo (McNeill, 1980).

El componente de Cuadratura (Quad-phase, Q) y el componente En-Fase (In-phase, I) que pertenecen al campo magnético secundario son capturados por el receptor en forma de un voltaje de salida que se relaciona linealmente con la conductividad de la subsuperficie (Hutchinson, 2000). Las lecturas Quad-phase son transformadas a unidades de conductividad del terreno, se miden en miliSiemens/metro (mS/m); Las lecturas In-phase son unidades de partes por mil (ppt) del campo magnético, y son utilizadas para identificar y detectar objetos metálicos.

La conductividad de la tierra y las componentes de fase (In-Phase, I y Quad-phase, Q) se leen directamente en la pantalla del Datalogger, las cuales son registradas y almacenadas para el posterior análisis computarizado y mapeo.

Debido a su espaciamiento fijo de la bobina del transmisor-receptor, una sola frecuencia, y energía baja, el sistema es capaz de trazar características a la profundidad típica de 6 m, la cuál es la profundidad eficaz de la exploración, haciéndola ideal para muchas investigaciones someras sobre agua subterránea contaminada; con este método inductivo, las investigaciones se pueden realizar bajo una mayoría de condiciones geológicas, incluyendo las de alta resistencia superficial, tales como arena, grava y asfalto.

Este sistema proporciona medidas directas de conductividad del subsuelo expresadas en mS/m que son representativas del rango de profundidad investigado, por tanto su interpretación es inmediata (McNeill, 1980); obteniendo el campo magnético primario ( $H_p$ ) y el campo magnético secundario ( $H_s$ ), la conductividad aparente registrada indicada por el instrumento es calculada según la siguiente ecuación:

$$\sigma_a = 4 \frac{\left[ \frac{H_s}{H_p} \right]}{\mu_0 \omega S^2}$$

Donde

$H_s$  = Campo secundario magnético de la bobina receptora.

$H_p$  = Campo primario magnético de la bobina receptora.

$\omega = 2 \pi f$

$f$  = Frecuencia en Hz.

$\mu_0$  = Permeabilidad del poro.

$\sigma$  = Conductividad del Terreno in S/m (mho/m).

$s$  = espaciamiento entre bobinas.

Las ventajas importantes de este método son la velocidad con la cuál las exploraciones se pueden realizar, la precisión con la cuál los cambios pequeños en conductividad se pueden medir y la colección continua de la lectura y de datos mientras se atraviesa el área de exploración.

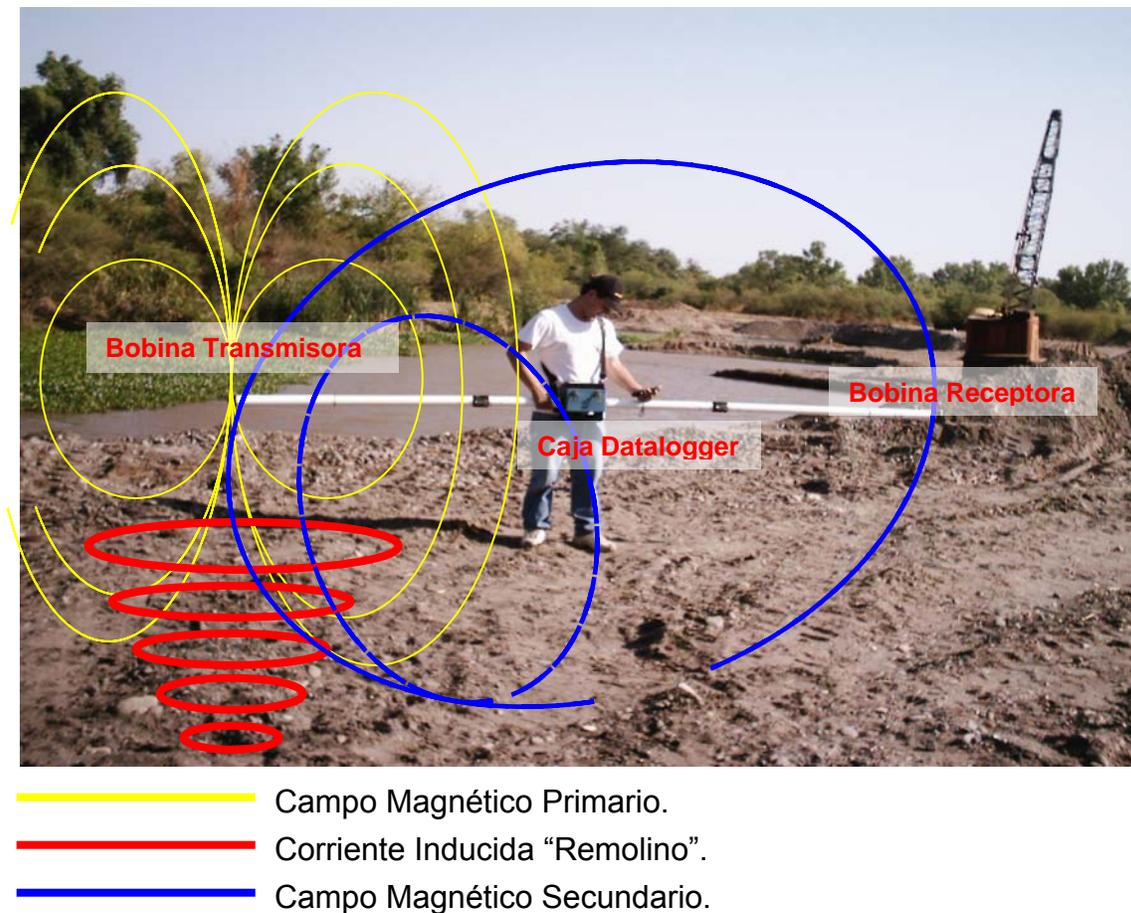


Fig. 1. Principio de Operación del EM31-MK2; La bobina trasmisora genera un campo magnético primario el cuál al contacto con un cuerpo conductor produce un campo magnético secundario el cuál es captado por la bobina receptora.

### 2.3 Marco legal para la disposición de desechos sólidos municipales.

Menciona Kirov (1973) que para un eficiente manejo de los desechos se necesita un marco legislativo consistente para que pueda funcionar adecuadamente, esto

es por que se ha observado que los países han establecido normas ambientales que llevan consigo una serie de obligaciones y observaciones, las cuales se deben efectuar para llevar una gestión ambiental bien controlada, que debe cumplirse tanto a nivel de gobierno como privado.

Esto ha llevado consigo a que se destinen lugares especiales que capten esta generación de desechos sólidos, ya que en su mayoría son a cielo abierto, sin ningún tipo de control o gestión de dicho vertedero.

Según la norma oficial mexicana (NOM-083-ECOL-1996) en México, menciona que los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales generan lixiviados que contienen diversos contaminantes que pueden afectar los recursos naturales en especial a los acuíferos y los cuerpos superficiales de agua. Esta es una ley que establece las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y es de observancia obligatoria para aquellos que tienen la responsabilidad de la disposición final de los desechos sólidos municipales, preservar el ambiente y el equilibrio ecológico y minimizar los efectos contaminantes.

Por otra parte la NOM-83-ECOL-1996 (SEMARNAP, 1996), indica que para ubicar un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales, deben realizarse estudios regionales y locales como a continuación se especifica:

- Geología: Regional.- describir la estratigrafía, geometría y distribución, identificación de fallas y fracturas.
- Geología Local: Determinar las unidades litológicas en el sitio, su geometría, distribución y presencia de fallas y fracturas, incluir estudios geofísicos para complementar la información sobre las unidades litológicas.

- Hidrogeología: se consideran cinco etapas: (i) Evidencias y uso del agua subterránea, (ii) Identificación del tipo de acuífero, (iii) Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas; características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo, (iv) Análisis del sistema de flujo, (v) Evaluación del potencial de contaminación.

Adicionalmente se requiere: Definir la ubicación y distribución de manantiales, pozos y norias, a escala regional y local, determinando el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio, e identificar la extensión, geometría y tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado); determinando la profundidad al nivel piezométrico en el sistema acuífero, dirección y velocidad del agua subterránea a partir de los parámetros de conductividad hidráulica, carga hidráulica y porosidad efectiva.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

#### **3.1 Localización de la Zona de Estudio.**

La zona de estudio se encuentra localizada al Norte del Valle del Yaqui, la cuál es adyacente al Canal Principal Bajo y la carretera “Prolongación California” (Figura 2), corresponde a un sitio de desechos sólidos municipal desde 1950 y fue clausurado en 1995 porque alcanzó la saturación de basuras.

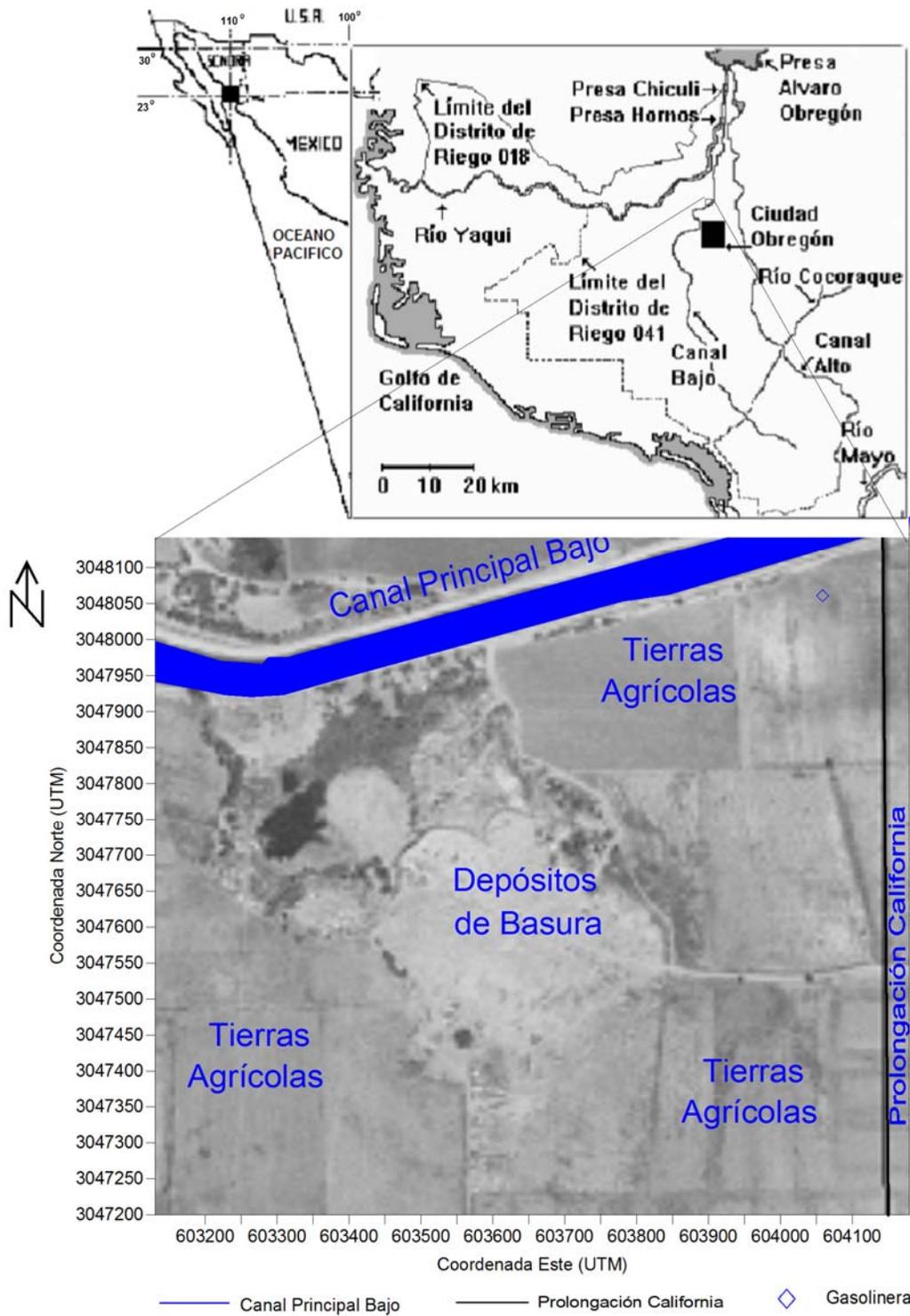


Fig. 2. Localización del Valle del Yaqui y Zona de estudio, se observa en la parte central de la ortofoto, alteraciones del terreno que corresponden a depósitos de

basura, las tierras adyacentes son de uso agrícola, la parte al Norte del Canal Principal Bajo se encuentra fuera del área de estudio.

### **3.2 Materiales.**

El material utilizado en campo fue: un equipo geofísico electromagnético EM31-MK2 Marca Geonics Ltd, un sistema Geoposicionador Global (GPS) marca Magellan Meridian Platinum y calibrado con el Datum NAD 83, una perforadora marca Honda GX340 modelo Hydraulic Beaver de 11.0 HP, Medidor de Conductividad Marca Orion.

Se utilizó el Software DAT31W proporcionado por Geonics Ltd, el cuál realiza la conversión de los datos obtenidos del Datalogger (Memoria de Datos), los cuales fueron mapeados en el software Surfer Ver. 8.

### **3.3 Metodología.**

Para conocer los valores de conductividad del suelo y de la basura donde se realizó el estudio, se calibró el equipo tomando lecturas de conductividad en basura sin compactar y en materiales de arcilla, gravas y arenas, dado que éstos se pueden encontrar en la zona de estudio como se indica en la Figura 3 (González et al, 1997).

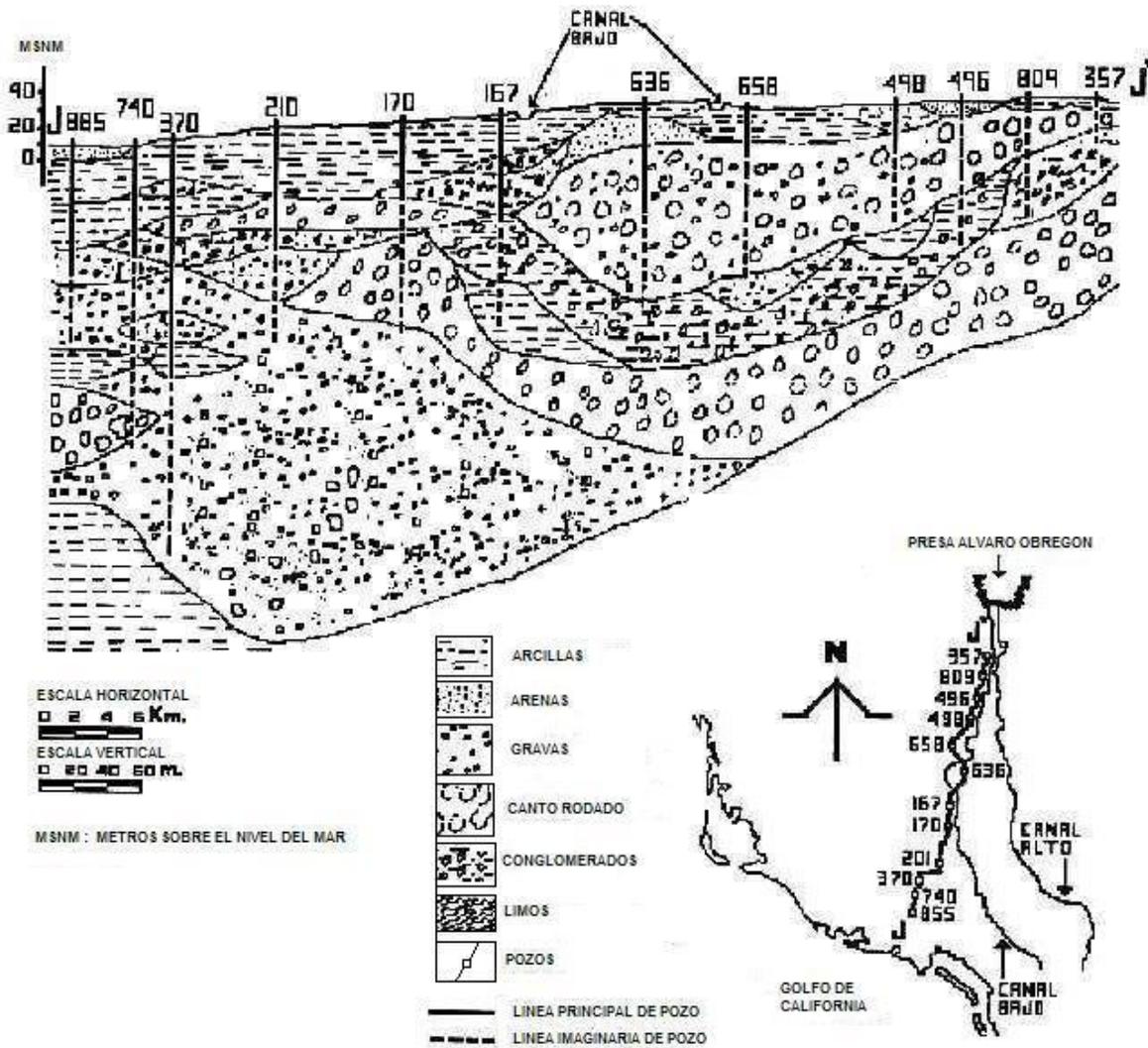


Fig. 3. Perfil Geológico del Valle del Yaqui J – J'. Se observa la estratigrafía que identifica los materiales estratificados pertenecientes al área de estudio localizado entre los pozos 658 y 636.

El equipo EM31-MK2 se calibró en terrenos de litoestratigrafía conocida y limpio de todo material u objetos que puedan alterar las lecturas del aparato de medición, se tomaron las coordenadas con GPS, para una ubicación exacta de las lecturas de referencias. Los terrenos de calibración consideraron zonas con contenido exclusivo de arcilla, gravas y arenas y una zona con basura no compactada de un vertedero en operación.

Se realizó un “grid” o mallado de la zona a estudiar con dimensiones de 1 x 1 km, tomando lecturas de conductividad y coordenadas de cada 50 m de distancia entre

sí, iniciando en el camino paralelo-contiguo a la carretera Prolongación California y el bordo Sur del Canal Principal Bajo, las secciones recorridas con el EM31-MK2, se realizaron desde la coordenada 604100 hasta 603100 Este, y 3047200 hasta 3047900 Norte (Figura 4).

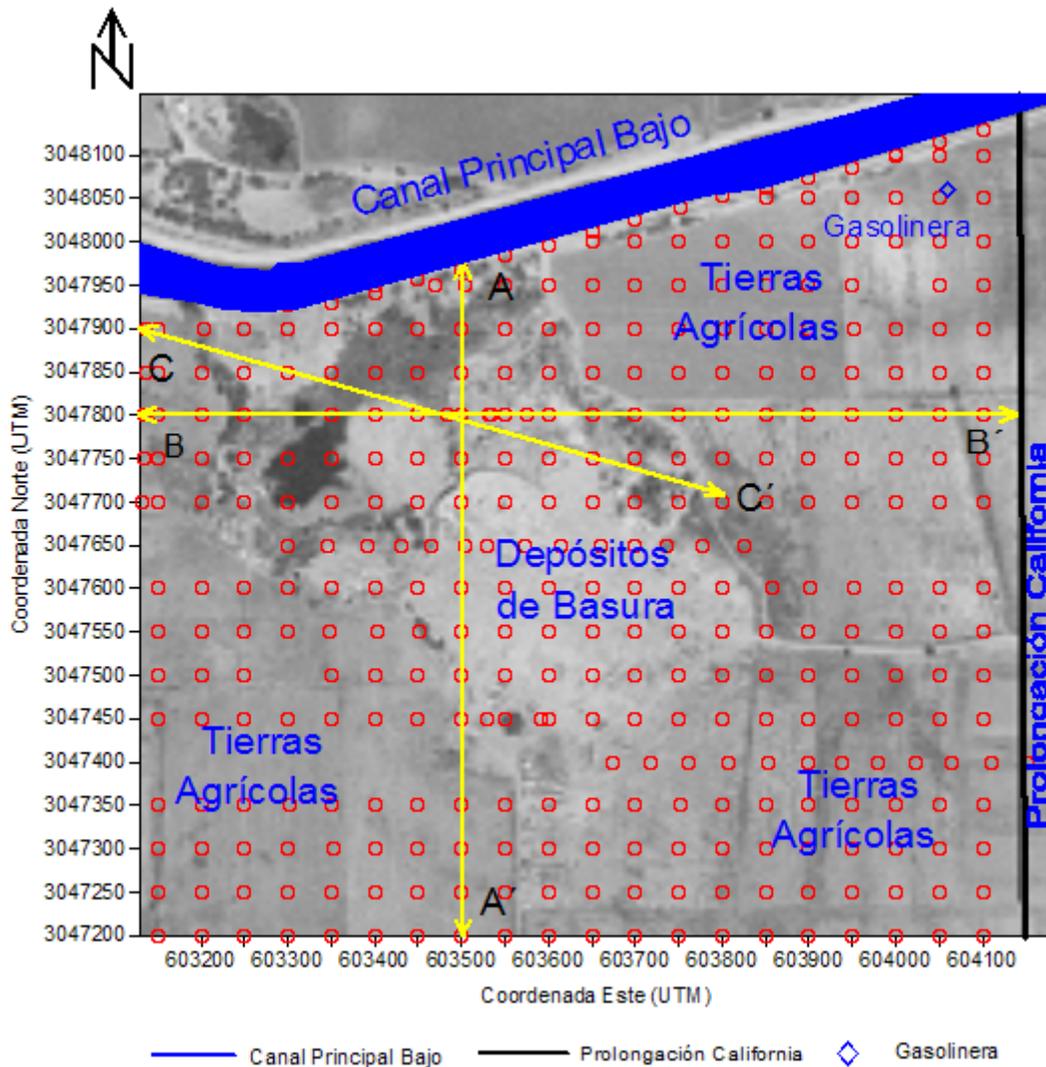


Fig. 4. “Grid”, Localización de estaciones de muestreo y Perfiles geoelectricos (Figuras 9, 10 y 11), los círculos corresponden a las estaciones de medición y las líneas a los perfiles geoelectricos de las figuras 9, 10 y 11.

En la zona de estudio se tomaron 4 lecturas en cada estación, una en modo vertical y otra en modo horizontal para la exploración a 6 y 3 m de profundidad respectivamente, a 1 metro de altura del nivel del suelo; al nivel de terreno se

tomó en modo vertical una lectura para explorar a 7 m de profundidad y otra en modo horizontal para lecturas de exploración de 3.5 m de profundidad, por lo que las lecturas In-phase y Quad-phase se obtuvieron durante la exploración en ambos modos.

El datalogger almacenó los datos obtenidos en campo, una vez realizado esto, los datos fueron descargados en el DAT31W (lector de datos) para ser convertidos y ser leídos en una Hoja de Cálculo de Excel, fueron ordenados por coordenada, para el proceso y su análisis, realizando una distribución espacial y mapeo de los datos en la zona de estudio, utilizando el software Surfer Ver. 8. finalmente se imprimieron planos en planta y en perfil, para su geointerpretación.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **4.1 Resultados de la calibración de materiales y basura de la región.**

En la Tabla 4 se muestran conductividades de los diversos materiales de la región como del lixiviado, requeridos para identificar, comparar y calibrar los valores obtenidos en la zona de estudio en campo, adicionalmente se tomaron como referencia los reportes de diversos autores (Ver Tabla 3), especialmente los valores de lixiviados de Davies y Campanella (1995).

Tabla 4. - Resultados de Conductividad para materiales del Río Yaqui, Basura de un Relleno Sanitario y lixiviado del área de estudio.

<b>MATERIAL</b>	<b>Conductividad (mS/m)</b>
<b>Grava</b>	<b>5 - 10</b>
<b>Arena</b>	<b>7 - 10</b>
<b>Arcilla</b>	<b>20 - 30</b>
<b>Basura Sin Compactar</b>	<b>0 - 4</b>
<b>Lixiviado</b>	<b>1000</b>

Adicionalmente se toma muestra de lixiviado y se realizaron varias excavaciones con la perforadora hidráulica manual, en la área de estudio con el fin de realizar una estratigrafía de esta zona desde el nivel superficial hasta los 7 m de profundidad para obtener muestras y comparar las conductividades que se obtuvieron en la investigación, éstas alcanzaron 0.5 m de profundidad ya que se observaron materiales que imposibilitaban la perforación a mayor profundidad.

Se contemplo la perforación con retroexcavadora, pero debido a la inestabilidad del terreno y que el relleno sanitario no cumple con ninguna tipo de norma, no se realizó.

## **4.2 Resultados de la Conductividad del Terreno en Planta.**

En las figuras de la 5 a la 8 se presentan resultados obtenidos de la exploración en planta a 7.0, 6.0, 3.5 y 3.0 m de profundidad al nivel de terreno. En todos los casos se incluye el contenido de la tabla 4 para facilitar la comprensión de los mapas y en el anexo se reporta toda la información obtenida en campo.

Para la profundidad de exploración de 7 m (Figura 5), se muestran conductividades de materiales distribuidos desde 5 hasta 30 mS/m, compuestos posiblemente por arcilla, arena y grava, también se observan conductividades entre los 30 y 100 mS/m, siendo estos materiales probablemente saturados y de transición entre el agua del acuífero y lixiviado, las conductividades entre 100 y 500 mS/m, corresponden a la presencia franca de lixiviados. Es evidente que el Canal Principal Bajo genera una recarga que eleva los niveles freáticos en su vecindad y se mezcla con las basuras y sus lixiviados generando un transporte de solutos en dirección de Norte a Sur.

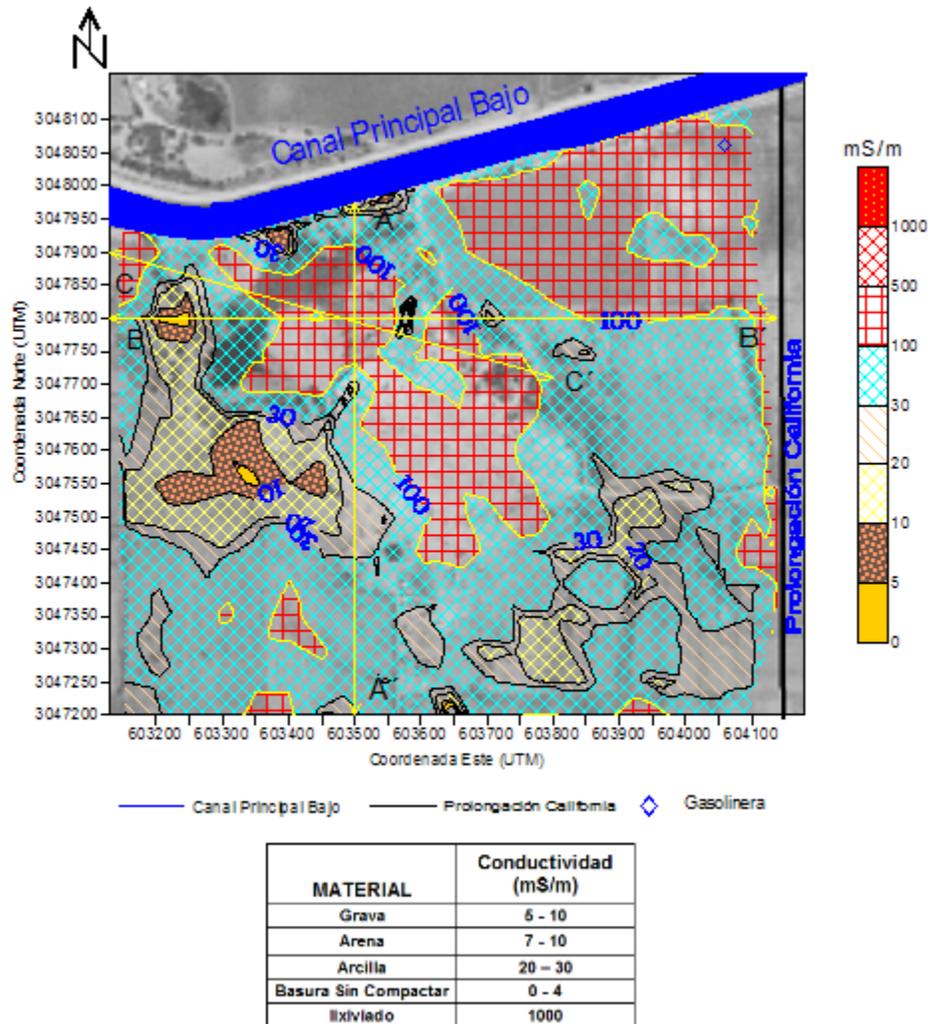


Fig.5. Conductividad Geoeléctrica a 7 m de profundidad al terreno.

Para la profundidad de exploración de 6 m (Figura 6), se observa la dispersión de conductividades desde 100 hasta 500 mS/m, que pertenecen a lixiviado. Las conductividades entre 100 y 30 mS/m pertenecen a materiales arenosos y arcillosos, los cuales operan como transición entre el lixiviado y agua del acuífero; presentándose también valores de 30 hasta 5 mS/m, conductividades correspondientes a arena y grava.

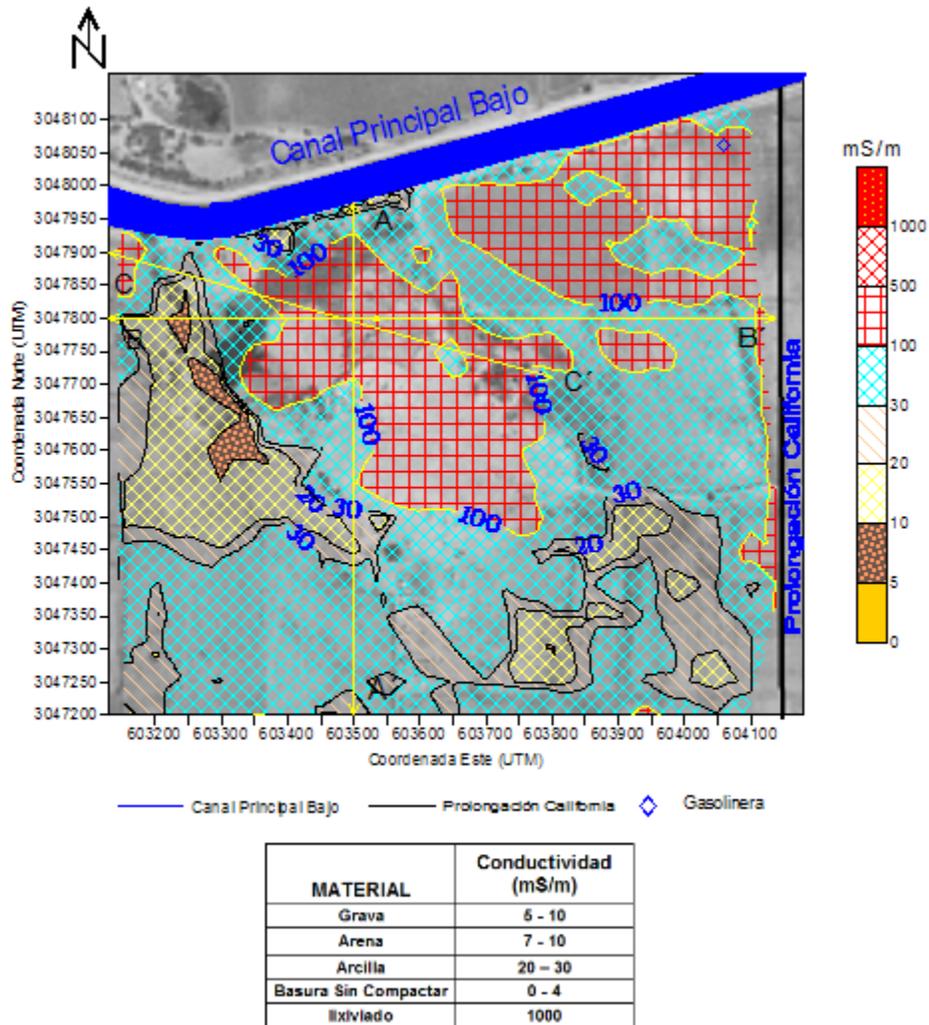


Fig.6. Conductividad Geoeléctrica a 6 m de profundidad al terreno.

Para la profundidad de exploración de 3.5 m (Figura 7), se observa lixiviado, en mayor concentración con conductividades entre 100 y 1000 mS/m, Se indican conductividades desde los 30 mS/m hasta 100 mS/m que tal vez comprenda a arcilla con posible saturación de agua; también se muestran conductividades desde los 30 mS/m hasta 5 mS/m correspondientes a material de grava, arena y arcilla.

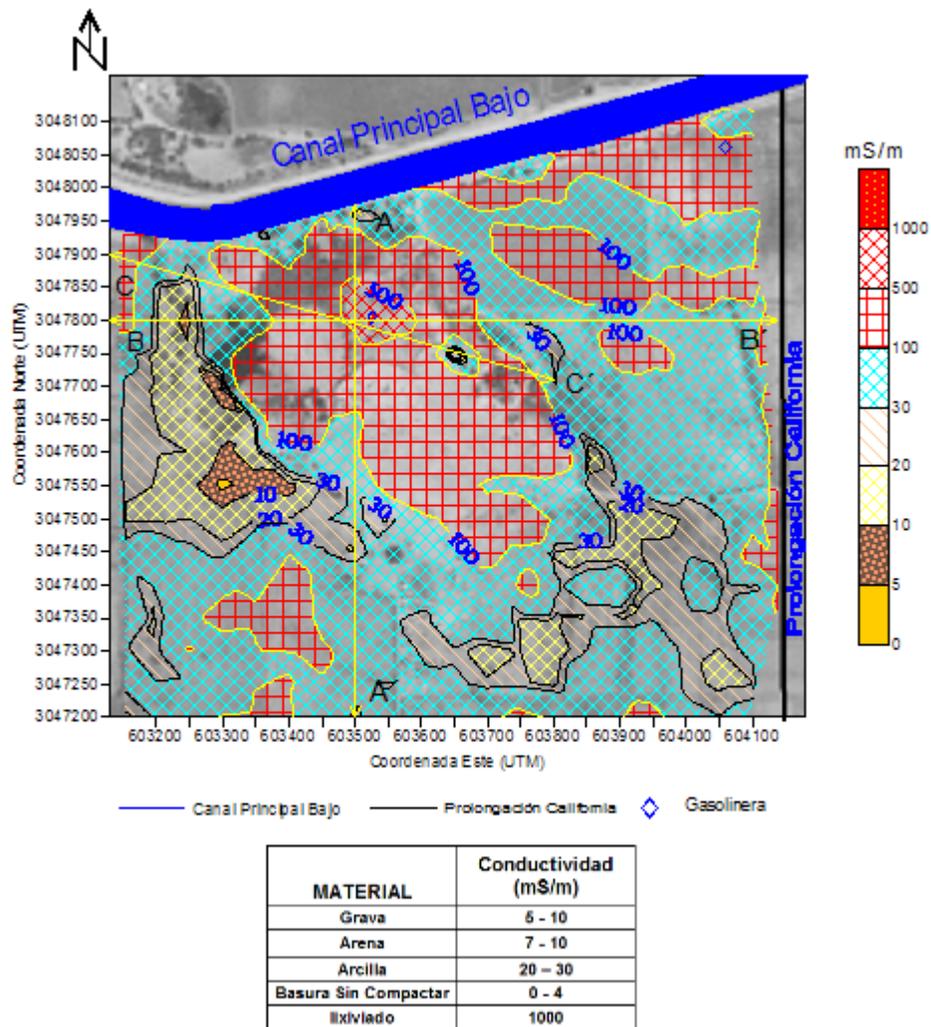


Fig.7 Conductividad Geoeléctrica a 3.5 m de profundidad al terreno.

Para la profundidad de exploración de 3.0 m (Figura 8), se observa en el área de estudio conductividades desde los 100 hasta 500 mS/m pertenecientes a lixiviados; se distingue en gran extensión la presencia de conductividades desde 30 hasta 100 mS/m, que corresponden a materiales arcillosos probablemente en zona de transición entre el acuífero y lixiviado; se ubican conductividades que posiblemente comprenden a materiales arcillosos, gravas y arenas con conductividades desde 5 mS/m hasta 30 mS/m; Se especifican conductividades entre 0 y 5 mS/m, los cuales podrían pertenecer a basura en un estado sólido y

sin descomposición. No fue posible verificar el tipo y contenido de estos materiales por falta de una maquina perforadora de mayor potencia.

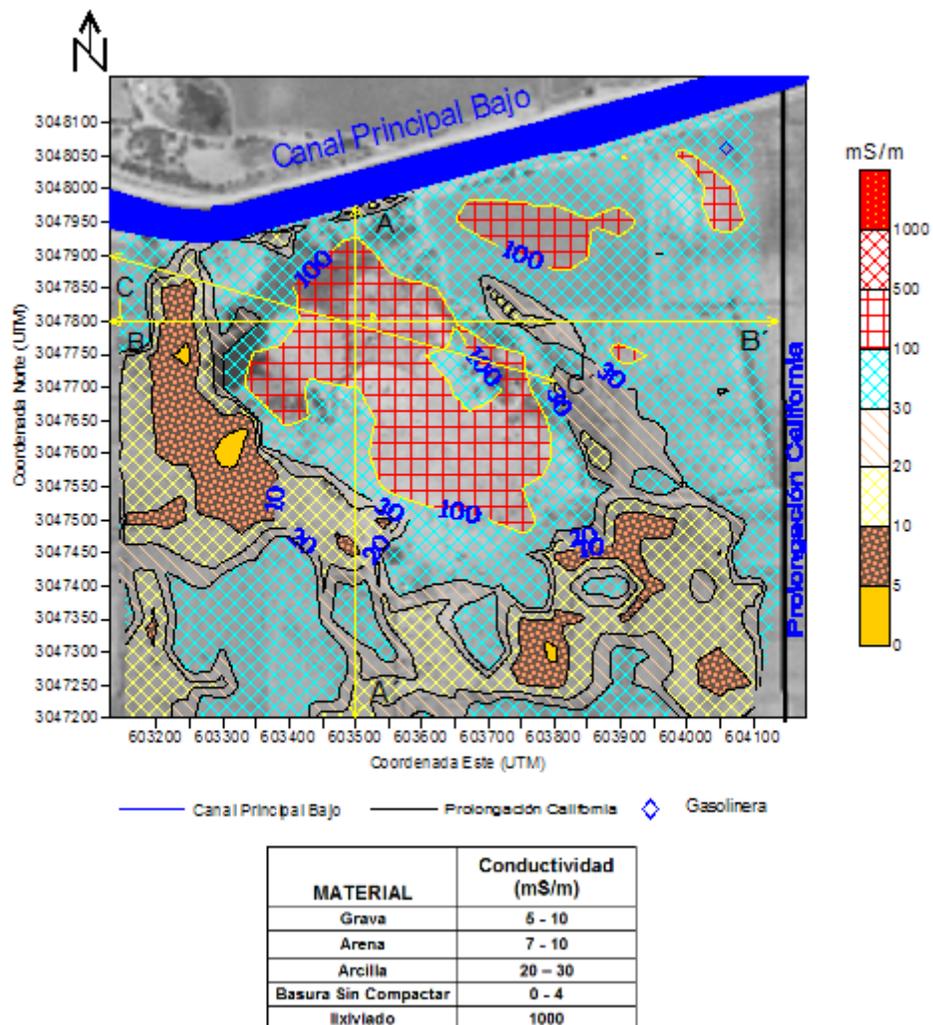


Fig.8 Conductividad Geoeléctrica a 3 m de profundidad al terreno.

Es necesario establecer la trayectoria de los lixiviados en la zona de estudio, por lo que se muestran los perfiles señalados en la Figura 5, que definen los posibles trayectos de los contaminantes en estado liquido y la posible presencia de desecho en estado sólido (Figura 9,10,11).

El perfil geoelectrico A-A' (Figura 4 y 9) con dirección Norte-Sur, presenta conductividades mayores de 500 que corresponden a una pluma contaminante de lixiviados concentrados identificados desde los 3.5 m hasta los 5 m, mismos que se diluyen hasta 100 mS/m que pudieran ser sólidos en proceso de mineralización y que invaden la zona de los 3 m hasta los 7 m de profundidad los cuales presentan un diámetro de 250 m. Dado que el acuífero se ubica a los 6 m de profundidad se puede inferir que tiene contacto con el lixiviado.

Se observan conductividades menores a 100 mS/m hasta los 30 mS/m correspondientes a arcillas que sirven como material barrera impermeable entre el lixiviado y el acuífero; se presentan conductividades entre los 30 y 10 mS/m correspondientes a arcillas y arenas mezcladas.

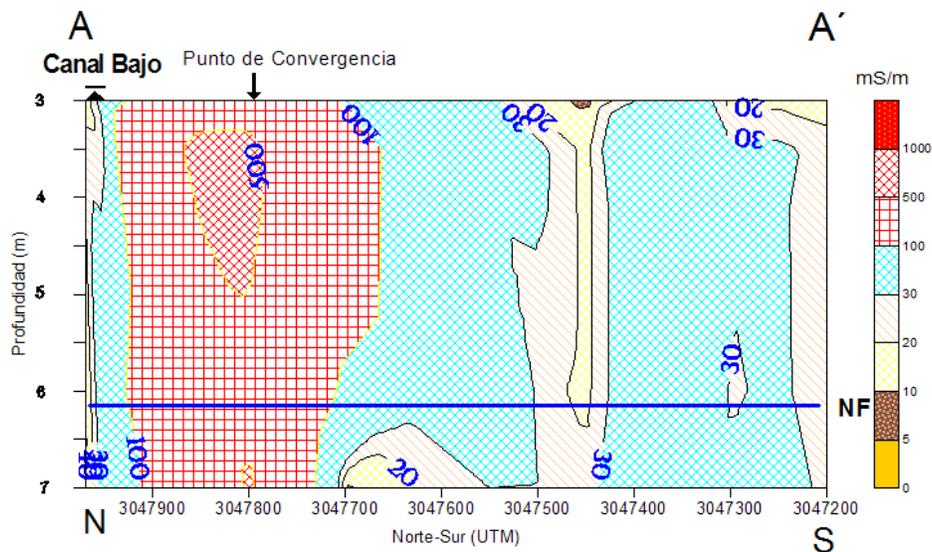


Fig. 9. Perfil geoelectrico A – A'; La escala gráfica y las isolíneas corresponden a conductividades en mS/m, están distribuidas de Norte a Sur, desde 3 hasta los 7 m de profundidad. Los lixiviados presentan conductividades mayores de 500 mS/m, la basura en proceso de descomposición muestra conductividades entre los 500 y 100 mS/m, las arcillas entre 100 y 30 mS/m y menores de 30 mS/m corresponden a arcillas con arenas. El nivel freático (NF) está a los 6 m de profundidad; se muestra el punto de convergencia ( ↓ ) de los perfiles de la Figura 4.

En el perfil geoelectrico B-B' se observa con dirección Este-Oeste (Figura 4 y 10) una conductividad de 1000 mS/m a la profundidad de 3.5 m cercano a la línea de convergencia de los perfiles, registrando la mas alta concentración de lixiviado de la zona de estudio, diluyéndose posteriormente a conductividades entre 500 mS/m desde los 3 m hasta los 7 m aproximadamente, y finalmente disolviéndose a conductividades de 100 mS/m las cuales se muestran desde los 3 m hasta los 7 m de profundidad abarcando 250 m de diámetro , otra pluma contaminante de igual conductividad se distingue desde los 3 m hasta los 5 m de profundidad en el extremo Oeste del perfil, al Este de la figura también se presentan conductividades de 100 mS/m a la profundidad de 7 m. Se contemplan conductividades menores de 100 hasta 30 mS/m correspondientes a material arcilloso que actúa como barrera impermeable entre el lixiviado y el acuífero, al Oeste de la figura se distinguen conductividades entre los 30 y 20 mS/m correspondientes arcillas que pueden funcionar como barrera entre ambos lixivios, las conductividades entre 20 y 5 mS/m corresponden a arenas y gravas.

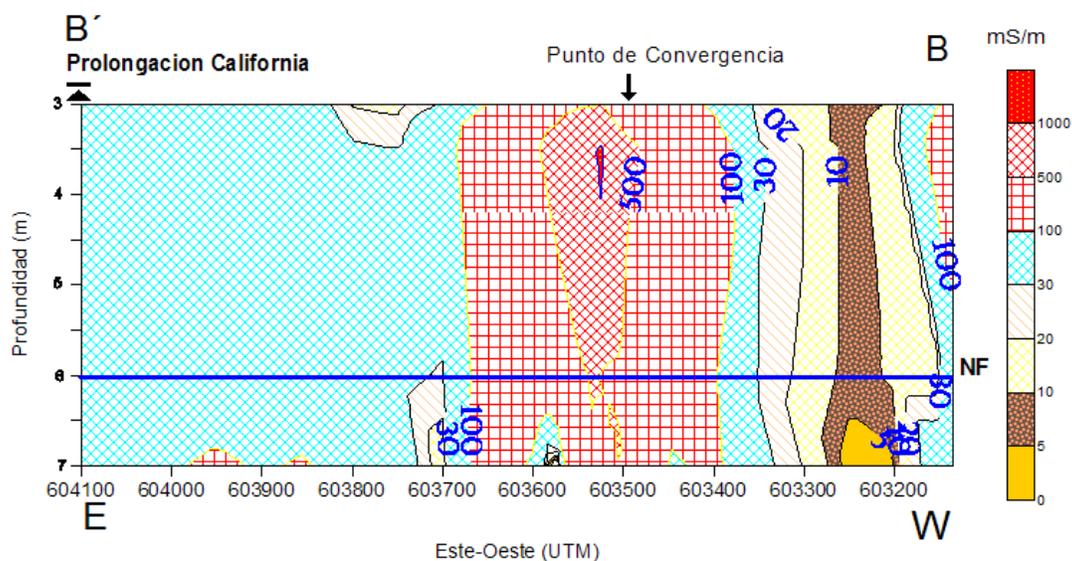
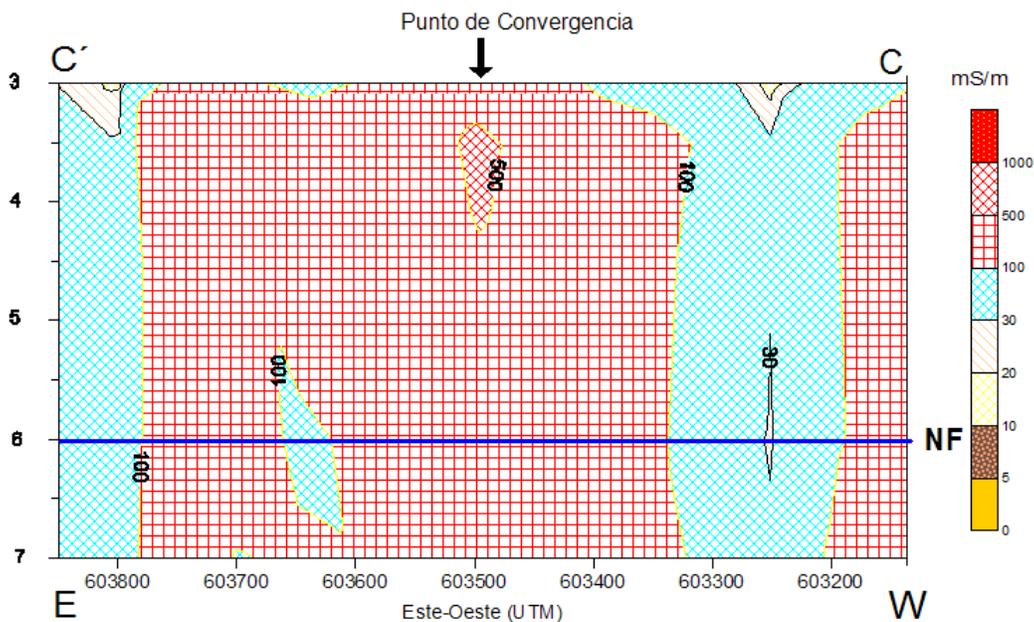


Fig. 10. Perfil geoelectrico B – B', La escala gráfica y las isóneas corresponden a conductividades en mS/m, están distribuidas de Este a Oeste, desde 3 hasta 7 m de profundidad. Los lixivios presentan conductividades entre 1000 y 500 mS/m, la basura en proceso de descomposición muestra conductividades entre los 500 y 100 mS/m, las arcillas entre 100 y 30 mS/m y menores de 30 mS/m corresponden

a arcillas con arenas. El nivel freático (NF) está a los 6 m de profundidad; se muestra el punto de convergencia ( ↓ ) de los perfiles de la Figura 4.

En el perfil geoelectrico C-C' con dirección Este-Oeste (Figura 4 y 11) se ubican conductividades de 500 mS/m que pertenecen a lixiviado muy concentrado desde los 3.5 m hasta los 4 m de profundidad dispersándose en la zona de estudio alcanzado conductividades de 100 mS/m y extendiéndose en un diámetro de 450 m aproximadamente; al Oeste de la figura se observa lixiviado con conductividades de 100 mS/m desde los 3.5 m hasta los 7 m de profundidad, se indican conductividades menores a 100 mS/m y 30 mS/m correspondiente a material arcilloso que actúa como transición entre ambos lixiviados y el acuífero.



## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1 Conclusiones.**

Los materiales utilizados para la calibración que comprenden a la zona de estudio corresponden a grava, arena y arcilla las cuales presentaron conductividades de 5 a 10 mS/m, de 7 a 10 mS/m, de 20 a 30 mS/m respectivamente, la basura sin compactar presentó conductividades desde 0 a 4 mS/m y el lixiviado muestreado presentó una conductividad de 1000 mS/m. Se tiene conocimiento de que en el área de estudio existieron lagunas de desechos de pequeños criaderos porcinos.

Se observa el desplazamiento del lixiviado en el área de estudio, el cuál se encuentra entre las capas de exploración desde los 3 hasta los 7 m de profundidad, por lo que se puede inferir que este saturando algunas capas de material, no necesariamente en extensión, pero si puntualmente, por lo que posiblemente es distribuido por el flujo del agua subterránea hacia otras zonas.

Este estudio indica que existen plumas contaminantes desde los 3 m de profundidad hasta la profundidad máxima de exploración de 7 m, por lo que se concluye que el acuífero presenta contaminación por lixiviados, ya que se sabe que el nivel freático se encuentra a 6 m de profundidad en esta zona y seguramente mas elevado en las proximidades con el Canal Principal Bajo.

### **5.2 Recomendaciones.**

Se recomienda identificar la velocidad y el trayecto de dichas plumas contaminantes, obtener muestras para su análisis químico y construir pozos de observación para una mejor comprensión del comportamiento de acuífero y de la pluma contaminante y planear las estrategias de remediación que procedan.

Se recomienda no construir pozos aguas abajo próximos a esta zona, ya que el cono de abatimiento generado, puede provocar una difusión más extensa y rápida de la contaminación que esta presente en el acuífero y contaminar otros pozos.

Se recomienda no construir ningún tipo de área habitacional, industrial o recreativa, ya que probablemente se encuentren gases y líquidos de lixiviación confinados entre la basura depositada, material de relleno y el material de la zona de estudio.

Se podrá construir solo en caso de que se tenga un estudio que evalúe y/o controle los riesgos antes mencionados; realizado lo anterior el área de estudio puede ser incorporada al ambiente natural, reforestándola. Esta zona podría quedar como una reserva ecológica para conservación de flora y fauna regional siempre y cuando se establezcan previamente las medidas de remediación.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ASCE.1998, Geophysical Exploration for Engineering Environmental Investigations. Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the U.S. Army Corps Engineers, No. 23. American Society Official Engineers. ASCE Press. Reston, Va, US.

Beltrán Ramírez J.D y Torres Martínez C.L, 1998, Análisis de Rellenos Sanitarios en Semana de Ecología y Protección al Ambiente, Cd. Obregón, Sonora, Marzo 1998, Pág. 69.

Benson Richard 1984, Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes Migration, National Ground Water Association.

Bitton Gabriel, 2002, Encyclopedia of Environmental Microbiology, Edit. John Wiley & Sons, Inc. University of Florida, Gainesville, Florida.

Britz, J. Trevor, 1995, Landfill Leachate Treatment en Microbiology of Landfill Sites, Segunda Edición, Editor Eric Senior Ph.D. Waste-tech Professor of Waste Technology.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1987, Las Aguas Subterráneas: Un valioso recurso que requiere protección, Lima, Perú, Págs. 10

Culley, R.W., Jagodits, F.L., Middleton, R.S., 1975, In-phase system for detection of buried granular deposits, Symposium on Modern Innovations in Subsurface Explorations, 54th Annual Meeting of Transportation Research Board.

David A. Farrell, 2002, Barbados Pilot Site Characterization Part 1: Field Report, Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, TX, USA.

- Davies, M.P. and R.G. Campanella (1995). Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of Soil, Proc. SAGEEP 95, Orlando, Florida, April.
- Díaz G.G, y Arizabalo R.D, 1991, La Contaminación del Agua Subterránea y su Transporte en Medios Porosos, Cuadernos del Instituto de Geofísica, Cuaderno No. 6.
- Department of Environmental Protection Western Australia (DEP), Part 1 of the Environmental Protection Regulations 1987, as amended 2001, Australia.
- Environmental Protection Agency (EPA), Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, 1997, Washington, DC; se puede encontrar también en <http://www.epa.gov/osw>.
- Geonics Ltd, 2004. DAT31W Versión 1.30
- Geonics Ltd. 1995, Technical Notes, <http://www.geonics.com/index.html>.
- Golden Software Inc. 2002, Surfer Version 8.00 Surface Mapping System, Colorado.
- Gonzalez,R., L.E. Marín, G. Cordova. 1997, Hydrogeology and Groundwater pollution of Yaqui Valley, Sonora, Mexico. Geofísica Internacional. 36 (1):49-54.
- Guérin Roger, 2005, Borehole and surface-based hydrogeophysics, Págs. 13:251-254, Universit\_ Pierre et Marie Curie (Paris 6), Case 105, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.

- Hubbard Susan, 2002, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., USA;  
and Yoram Rubin, Department of Civil and Environmental Engineering, University  
of California, Hydrogeophysics Overview, Berkeley, USA, Eos, Vol. 83, No. 51.
- Hutchinson Peter J., 2000, Geophysical Applications to Solid Waste Analysis, the  
Hutchinson group, Ltd. Murrysville, Pennsylvania.
- Hurst J. Christon, 2002, Manual of Environmental Microbiology, 2<sup>nd</sup>. edition, American  
Society for Microbiology, Washington, DC.
- Kirov Y. N., 1973 Towards Effective Solid Waste Management in the U.K. –Legislative  
Developments en Waste Management, Control Recovery and Reuse. Edit.  
N.Y.Kirov, ann arbor science Publishers Inc., Sydney, Australia, Pág. 39.
- Miller, D.W. & Scaf, M.R. 1974. New priorities for groundwater quality protection.  
Groundwater, 12:335-347.
- McNeill, J. D. 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction  
numbers. Technical note TN-6. Mississauga, Ontario: Geonics Limited.
- Repeto, P.C. 1999. Landfills in: The Handbook of Groundwater Engineering, Cap. 23  
Pág. 23-1 a 23-24, Edit. CRC Press, Boca Ratón, FL, USA.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), Norma  
Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos para el  
diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias,  
Págs.16, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), Norma  
Oficial Mexicana, NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben

reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, Págs.,17, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A., (1976), Applied Geophysics, Ch. 5, Cambridge University Press, N.Y.

# ANEXO

## Lecturas Electromagnéticas

**E: Estación de muestreo**

**Q: Fase de Cuadratura (mS/m)**

**I: En Fase (ppt)**

**PE: Profundidad de exploración**