



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESTUDIO GEOFÍSICO DE  
RESISTIVIDAD PARA EVALUAR EL  
IMPACTO AMBIENTAL DEL  
SUBSUELO EN EL RELLENO  
SANITARIO DE NOGALES, SONORA.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO GEOFÍSICO**

PRESENTA

IBÁÑEZ MARTINEZ JAVIER ALEXANDER

**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. EDUARDO HILARIO AMADOR TERRAZAS**



MÉXICO, D. F., 2009

## DEDICATORIAS

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.

A Dios por darme la oportunidad de vivir y regalarme una familia tan maravillosa.

Principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá, por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí. Aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que se encuentren a mi lado.

Los quiero de todo corazón, y el esfuerzo empleado en este trabajo se los dedico a ustedes, tratando de devolverles lo que ustedes me dieron desde un principio.

A mis hermanos Güero (Juan Manuel) y Nancy, por estar conmigo apoyándome siempre y aguantándome el carácter, los quiero mucho.

A Gaby, quien siempre me apoyo desde que la conocí, convirtiéndose en una de las personas más importantes de mi vida, alentándome en mis fracasos, después convertidos en éxitos, apoyándome en mis caprichos, estando conmigo en mis enojos, tristezas, alegrías, logros, en todo momento. Te amo mucho mi chinita hermosa.

A mi mejor amigo Anselmo, porque gracias a ti vi la vida de otra manera, las vivencias inolvidables que tuvimos, además de que por ti conocí mi pasión a la Geofísica y a las matemáticas, sabes que siempre contarás con mi apoyo para todo y cumpliré el acuerdo planteado desde el inicio de la carrera, si es que entro a PEMEX, jeje.

A Araceli, al ser una de las piezas fundamentales de mi carrera, ayudándome siempre y en todo momento, sin importar nuestros problemas o la complejidad de las cosas. Gracias por esta última ayuda, al revisar mi trabajo y darme tu punto de vista, el cual fue fundamental para que mi trabajo terminará así como lo tengo, te lo agradezco de corazón.

A mis súper cuates de la facultad Regner, Javier (Fingolfín), Luis (Willis), Candido, Gregorio, Cristian (Torrado), Iván (Chabelo) por apoyarme en las materias y creer siempre en mí...

A mis amigos de la carrera Gloria, Maricela, Alma, Francisco, Andrés (el niño), por brindarme su apoyo desde el momento de mi cambio de carrera, siendo pieza clave en la culminación de la misma.

Al Ingeniero Aristóteles Jaramillo, por enseñarme en qué consiste el trabajo de la Geofísica, por permitirme realizar este estudio, por su confianza, sus regaños, su enseñanza, gracias por cruzarse en mi camino y aceptarme como su trabajador.

A mis profesores, Ing. Javier Urbieto, por sus comentarios respecto a este trabajo y consejos brindados, Ing. Eduardo Amador por ayudarme en mis trámites de titulación, Ing. José Antonio Hernández, Ing. Héctor Luis Macías y el Fis. Salvador Villalobos, por su tiempo para la revisión y comentarios acerca del trabajo, así como apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería por permitirme ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva para el país.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-895

**SR. JAVIER ALEXANDER IBÁÑEZ MARTÍNEZ**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Eduardo Amador Terrazas y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD PARA EVALUAR IMPACTO AMBIENTAL DEL  
SUBSUELO EN EL RELLENO SANITARIO DE NOGALES, SONORA**

**RESUMEN**

- I INTRODUCCIÓN**
  - II MARCO GEOLÓGICO**
  - III HIDROGEOLOGÍA**
  - IV MÉTODOS ELÉCTRICOS**
  - V APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS**
  - VI ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**
  - VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

CD. Universitaria, D. F., a 10 de Agosto de 2009  
EL DIRECTOR

**MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA**

**JGGZ\*RJPYS\*srs**

## CONTENIDO

### DEDICATORIAS

RESUMEN	1
---------	---

### CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Localización del Área de Estudio	3
1.2. Clima	5
1.3. Relleno Sanitario	6

### CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Fisiografía	16
2.2. Geología Regional	21
2.3. Estratigrafía	24
2.4. Geomorfología	30
2.5. Geología Estructural	30
2.6. Geología Local	32
2.7. Orografía	33

### CAPITULO 3. HIDROLOGÍA

3.1. Hidrología Superficial	35
3.2. Hidrología Subterránea	41
3.3. Contaminación del Agua Subterránea en el Sitio.	50

<b>CAPITULO 4. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA</b>	<b>52</b>
4.1. Método Geoeléctrico	52
4.2. Principios Básicos	53
4.3. Concepto de Resistividad Aparente	56
4.4. Fundamentos de la Teoría Básica de Resistividad	60
4.5. Dispositivos Geoeléctricos	63
4.6. Diferencia Entre Arreglos	65
4.7. Sondeos Eléctricos Verticales	67
<b>CAPITULO 5. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS</b>	<b>75</b>
5.1. Descripción de la Adquisición de Datos	75
5.2. Instrumentación	76
5.3. Procesamiento	77
5.4. Método de Interpretación	78
5.5. Construcción de Mapas de Isoresistividad	79
5.6. Mapas de Isoresistividad Aparente	80
5.7. Análisis e Interpretación de los Mapas de Isoresistividad Aparente	85
5.8. Interpretación de las Curvas de Resistividad Aparente Obtenida en los Sondeos Eléctricos Verticales	87
5.9. Secciones Geoeléctricas	103
5.10. Análisis e Interpretación de las Secciones Geoeléctricas	106
<b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>114</b>

## **ANEXOS**

Anexo A: Anexo Fotográfico	116
Anexo B: Legislación y Reglamentación Existente	120
Anexo C: Plano TJ	132

## **REFERENCIAS**

133

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio en el País y en Fotografía Satelital	4
Figura 2. Partes de un Relleno Sanitario	6
Figura 3. Fisiografía del Estado de Sonora	21
Figura 4. Geología del Estado de Sonora	24
Figura 5. Zona de Estudio en la Carta Geológico – Minera y Materiales que la Componen	29
Figura 6. Orografía del Municipio de Nogales	34
Figura 7. Mapa Hidrológico del Estado de Sonora	37
Figura 8. Mapa Hidrográfico del Estado de Sonora	40
Figura 9. Mapa de la Profundidad del Nivel Estático de Agua y Dirección del Flujo Subterráneo	47
Figura 10. Carga Eléctrica	54
Figura 11. Campo Eléctrico Tridimensional	55
Figura 12. Dispositivo Tetraelectródico	62
Figura 13. Esquema de Configuración Electródica del Dispositivo Schlumberger	64
Figura 14. Esquema de Configuración Electródica del Dispositivo Wenner	65
Figura 15. Esquema de la Contribución de Señal para el Arreglo Wenner	66
Figura 16. Esquema de la Contribución de Señal para el Arreglo Schlumberger	66
Figura 17. Gráfico Logarítmico	67
Figura 18. Representación del Sondeo Wenner	69
Figura 19. Representación del Sondeo Schlumberger	69
Figura 20. Curvas del Corte Geoeléctrico de Dos Capas	71



Figura 21. Modelos para Corte Geoeléctrico de Tres Capas	71
Figura 22. Modelos para Corte Geoeléctrico de Cinco Capas	72
Figura 23. Principio de Equivalencia	74
Figura 24. Principio de Supresión	74
Figura 25. Ubicación de los Ocho Sondeos Eléctricos Verticales Levantados en el Área de Estudio	75
Figura 26. Equipo Utilizado Durante el Levantamiento	77
Figura 27. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 3(a)$ y $4(b)$ Metros	80
Figura 28. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 5(a)$ , $7(b)$ y $10(c)$ Metros	81
Figura 29. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 15(a)$ , $20(b)$ y $30(c)$ Metros	82
Figura 30. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 40(a)$ , $50(b)$ y $70(c)$ Metros	83
Figura 31. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 100(a)$ , $150(b)$ y $200(c)$ Metros	84
Figura 32. Mapas de Isoresistividad para $AB/2= 300$ Metros	85
Figura 33. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 1	87
Figura 34. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 1	88
Figura 35. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 2	89
Figura 36. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 2	90
Figura 37. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 3	91
Figura 38. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 3	92
Figura 39. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 4	93
Figura 40. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 4	94
Figura 41. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 5	95
Figura 42. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 5	96
Figura 43. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 6	97
Figura 44. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 6	98

Figura 45. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 7	99
Figura 46. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 7	100
Figura 47. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 8	101
Figura 48. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 8	102
Figura 49. Secciones Geoeléctricas Realizadas	103
Figura 50. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 1	104
Figura 51. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 2	104
Figura 52. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 3	105
Figura 53. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 4	105
Figura 54. Modelo de Capas Propuesto Para la Sección Geoeléctrica 1	107
Figura 55. Modelo de Capas Propuesto Para la Sección Geoeléctrica 2	109
Figura 56. Modelo de Capas Propuesto Para la Sección Geoeléctrica 3	111
Figura 57. Modelo de Capas Propuesto Para la Sección Geoeléctrica 4	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas GPS, UTM en WGS84 del Área de Estudio	3
Tabla 2. Ventajas y Desventajas del Relleno Sanitario	7
Tabla 3. Valores Relativos de Permeabilidad.	9
Tabla 4. Estudios y Análisis Previos Requeridos para la Construcción de Sitios de Disposición Final.	14
Tabla 5. Relación de Resistividades Eléctricas en Ohm-m	57
Tabla 6. Comparación Entre las Configuraciones de Electrodo	66
Tabla 7. Localización de los 8 Sondeos Eléctricos Verticales en el Área de Estudio	76

## **RESUMEN**

Actualmente muy cerca de la comunidad el Bellotoso, en Nogales Sonora, se encuentra ubicado un relleno de disposición final de residuos sólidos, el cual ha demandado diversos estudios multidisciplinarios para la caracterización integral del terreno. Por tal motivo se empleo en el presente estudio una técnica geofísica de exploración indirecta denominada método geoelectrico de resistividad, con la finalidad de caracterizar el subsuelo de la zona, obtener las condiciones geológicas e hidrogeológicas del terreno, y así poder evaluar parte del impacto ambiental debido a este relleno sanitario.

En términos generales el estudio realizado, así como su interpretación consistirá en obtener y asociar valores de resistividad a estratos del subsuelo de acuerdo con el marco geológico del sitio, tratando de identificar las características físicas particulares asociadas con materiales de relleno y a cada estrato en particular, al igual que el tipo de estructuras que conforman el subsuelo del área de estudio.

A partir del estudio realizado, se encontró que el área de estudio se encuentra sobre rocas permeables con un espesor superior a los 300 m, por lo que debido a su alta permeabilidad, el estrato permite la infiltración vertical de los lixiviados, teniendo presente la posibilidad de que el lixiviado alcance una profundidad en la que se encuentra el nivel estático del agua, provocando la contaminación del acuífero, siendo este sitio un potencial foco de contaminación a nivel atmosférico.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

El control en la disposición final de los residuos sólidos y peligrosos, ha sido de gran importancia en los últimos años debido a la preocupación y la cada vez mayor concientización por los asuntos ecológicos en los diversos sectores de la población.

La generación de residuos sólidos presenta un continuo incremento en el país, tanto por el incremento de la población como por las modificaciones en los hábitos de consumo de la misma, así, se estima que en México se generan más de 80,000 toneladas por día de residuos sólidos municipales y más de 300,000 toneladas de residuos industriales; estos residuos en parte son reciclados, pero una gran parte tienen que ser transportados a los sitios de disposición final llamados "Rellenos Sanitarios". (A. Dávila Villarreal, 1991)

El Relleno Sanitario es un área donde se distribuye la basura en capas, se le compacta y se le cubre con tierra con una cierta periodicidad. Esta técnica busca minimizar los daños al medioambiente que podría producir la basura al descomponerse. ("BioEngineer", Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 2008)

Todas las técnicas geofísicas intentan distinguir o reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante algún parámetro físico, por ejemplo en sísmica por la velocidad de transmisión de las ondas o como en este caso la prospección eléctrica por la resistividad.

Existen diversas técnicas geofísicas eléctricas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso, la conductividad. Algunas de estas técnicas son más modernas y mucho más precisas, pero los Sondeos Eléctricos Verticales siguen siendo utilizados debido a su sencillez y a su relativa economía del equipo necesario.

Para la realización e interpretación correcta de dichos Sondeos Eléctricos Verticales (así como para cualquier método geofísico), debe de considerarse el marco geológico del sitio, no obstante, la simplicidad del método en su interpretación de los datos puede cambiar radicalmente si no se tiene bien establecido el marco geológico de referencia ya que de acuerdo con la experiencia, repercute directamente en la selección de las zonas.

El método geoelectrico empleado ha sido usado ampliamente para la exploración en zonas de rellenos sanitarios, teniendo como principal objetivo la profundidad que estos presentan. Algunos ejemplos de este tipo de estudios son los realizados en diversos rellenos sanitarios

del país, alguno de ellos son los ejecutados en QUERÉTARO, QRO., en el año 2001, y el de LEÓN, GTO., en el año 2003, estudios realizados por el Ing. Carlos A. González. ([www.cartografiamexico.com/geofisica.htm](http://www.cartografiamexico.com/geofisica.htm))

Este tipo de estudio no solo se aplica en nuestro país, también recurren a él en diversas partes del mundo, por mencionar alguno ejemplo es el realizado al sur de Perú para el relleno sanitario de la ciudad de Tacna, realizado por Ing. Conrado Bedoya Jean, en el año 1997. ([www.cepis.org.pe/bvsacd/residuos/bedoya.pdf](http://www.cepis.org.pe/bvsacd/residuos/bedoya.pdf))

El presente estudio geofísico permitirá determinar la estratigrafía presente en el subsuelo así como las propiedades físicas que presentan los materiales localizados en la zona, dadas estas características y considerando que el sitio es empleado para la disposición final de residuos sólidos, este sitio podría ser un posible foco contaminante.

### 1.1. Localización del Área de Estudio

En la Tabla 1 aparecen las coordenadas del área de estudio localizada al SW de la Ciudad de Nogales, en el Estado de Sonora.

En la Figura 1 se muestra de manera esquemática la ubicación y el acceso al relleno sanitario, partiendo de la ciudad de Nogales por la avenida Álvaro Obregón, para incorporarse a la carretera federal No. 19. Aproximadamente a 8 kilómetros de distancia de la ciudad de Nogales, encontramos el poblado llamado Agua Zarca, donde a partir de allí, tomamos la desviación al municipio de Sáric, encontrando aproximadamente a 6 kilómetros adelante la entrada al tiradero de residuos sólidos de Nogales Sonora.

	X	Y	Z
<b>Relleno Sanitario</b>	<b>496828 m.</b>	<b>3447602 m.</b>	<b>1337.5 m.</b>

**Tabla 1. Coordenadas GPS, UTM en WGS84 del Área de Estudio.**

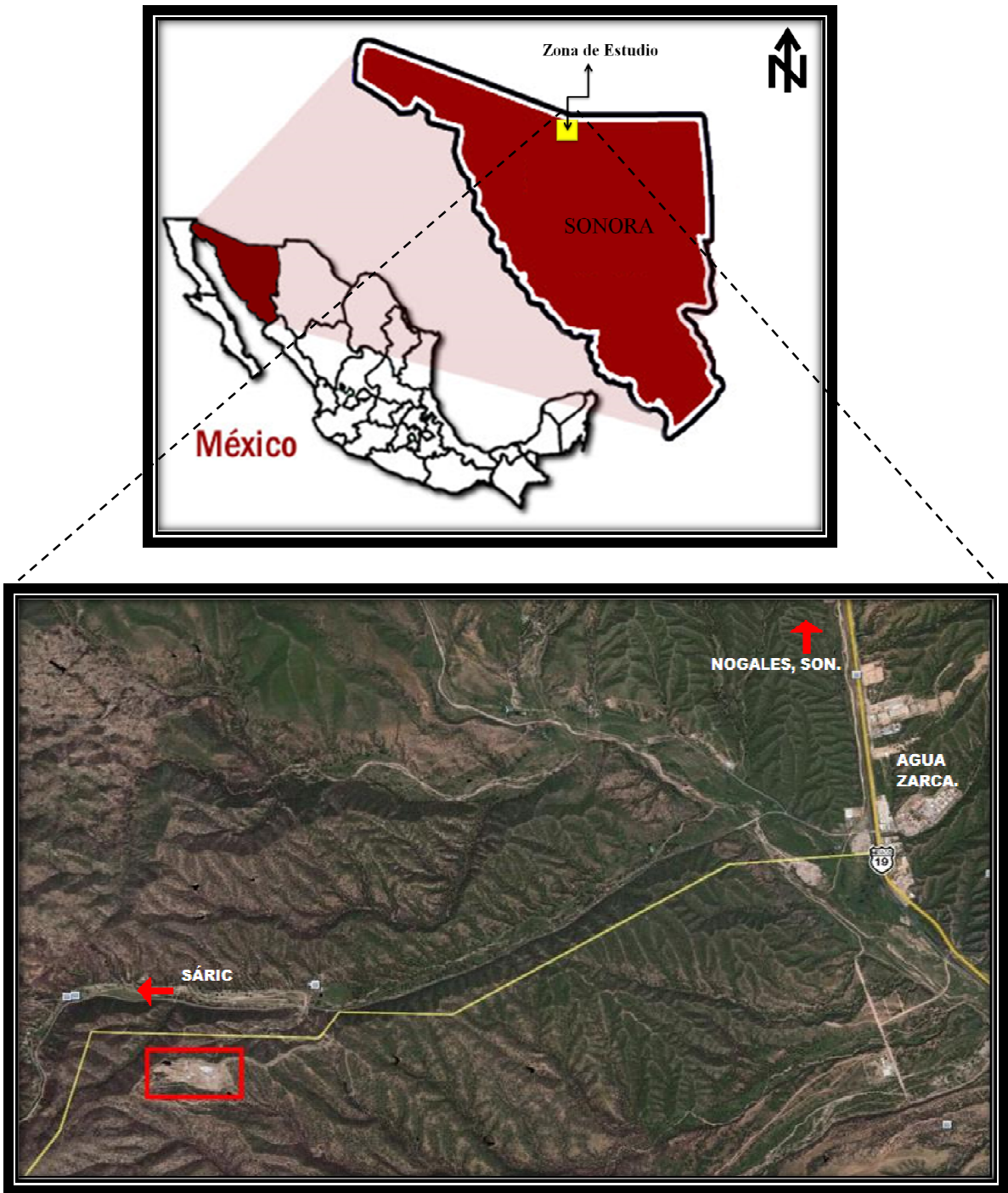


Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio en el País y en Fotografía Satelital.  
(Modificado Google Earth, 2009)

## 1.2. Clima

El Clima de Nogales es semiseco, presentándose en la región dos temporadas de lluvias en el año: las de verano y las de invierno, ocasionadas ambas por diferentes procesos.

Las lluvias de verano son generalmente intensas, aunque de muy poca extensión geográfica, mientras que las invernales abarcan grandes extensiones territoriales (a veces todo el noroeste del país), pero de intensidad moderada.

La precipitación promedio es, según el INEGI, de 488.3 mm (1986 a 1995); mientras que según la NOAA de los Estados Unidos, en Nogales, Arizona, la precipitación promedio es de 473.2 mm (1892 al presente).

La región de Nogales sufre de una gran variabilidad en su régimen de lluvias, ya que se han presentado años con grandes inundaciones, seguidos inmediatamente por periodos de sequía que llegan a extenderse por varios años.

En relación con otros factores climáticos, los vientos en el municipio son generalmente moderados, con brisas ligeras prevalecientes del sur durante el verano y del norte durante el invierno. En cuanto a su intensidad máxima registrada, se han alcanzado ráfagas hasta de 110 km/h durante algunas tormentas veraniegas. (Alberto Suarez Barnett, Bosquejo Histórico de Nogales, Sonora)

Durante el invierno ocurren en promedio unas 3 nevadas. Históricamente, las máximas registradas han ocurrido el 12 de marzo de 1922 y el 4 de diciembre de 1971, ambas con una profundidad de 15 cm.

La temperatura media anual, según INEGI, es de 17.8°C y puede variar a lo largo del año entre medias máxima y mínima: en enero de 18 y 3°C y en julio de 34 y 18°C, aunque se han llegado a registrar temperaturas extremas máxima de 44.5°C el 26 de junio de 1990 y mínima de -20°C el 8 de diciembre de 1978. A la derecha muestro las temperaturas extremas registradas en Nogales a lo largo del año.

### 1.3. Relleno Sanitario

Es una técnica de eliminación final de residuos sólidos en el suelo que no causa molestias a la comunidad ni riesgos para la salud, tanto en su operación, como después de terminado, buscando minimizar los perjuicios al medioambiente controlando los efectos potenciales de contaminación mediante el tratamiento de los efluentes líquidos y gaseosos que producirá la basura al descomponerse (CONSORCIO AMBIENTAL Y DE SERVICIOS; "Manifestación de Impacto Ambiental". 1999).

En la Figura 2, muestra la estructura que debe constituir un relleno sanitario. La parte principal del relleno es el módulo, recinto donde se depositarán y compactarán los residuos, este módulo debe de estar limitado por una pared de arcilla. La descomposición de la basura produce un líquido que lixivia distintos componentes contaminantes, conocido como lixiviado, este liquido debe recolectarse por medio de un sistema de drenajes haciendo que el lixiviado desemboque en piletas construidas en la parte más baja del terreno. De igual manera, en la descomposición de la basura, se generan diversos gases, principalmente el metano, se requieren tuberías para que este gas sea evacuado mediante el venteo, es decir al exponerse al relleno sanitario la acción del viento provoca que el gas se salga. Debe de tener dos pozos donde continuamente se estén extrayendo muestras, aguas arriba y aguas abajo, de la capa de agua subterránea ubicada a determinada altura en el perfil del subsuelo, con la finalidad de estar monitoreando la calidad del agua. En la parte inferior del relleno debe estar perfectamente aislado para evitar que la filtración de líquidos contamine la capa de agua más cercana a superficie, para eso la base del relleno se cubre con una capa de polietileno de alta densidad. ("BioEngineer", Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 2008)

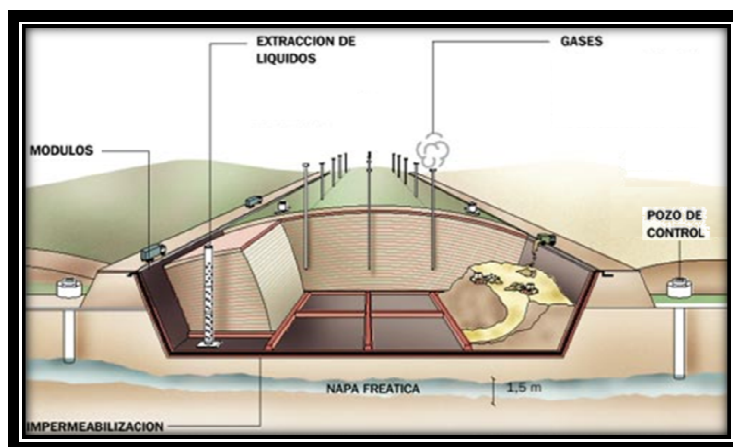


Figura 2. Partes de un Relleno Sanitario. (Modificado de BioEngineer, 2008)



### 1.3.1 Principios Básicos de Operación del Relleno Sanitario.

- Supervisión permanente del Relleno Sanitario, mientras se está rociando o recubriendo la basura.
- La basura debe compactarse en capas de 15 a 30 cm.
- La profundidad del Relleno no debe ser excesiva, probablemente no más de 2.50 m.
- Toda la basura recibida diariamente debe quedar cubierta con una capa temporal de tierra o material similar de por lo menos 0.60 m de espesor.
- Adoptar medidas para evitar el esparcimiento de papeles u otro tipo de desperdicios fuera del recinto del Relleno Sanitario.

### 1.3.2. Ventajas y Desventajas del Relleno Sanitario:

En la Publicación DESECHOS SÓLIDOS, PRINCIPIOS DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN de George Tchobanoglous, Hilary Theissen y Rolf Eliassen, se citan una serie de ventajas y desventajas de la técnica de Rellenos Sanitarios para la disposición final de los residuos sólidos, sintetizadas en el siguiente cuadro:

Ventajas	Desventajas
Es con frecuencia el sistema de eliminación de desechos sólidos más económico.	En áreas muy pobladas, el terreno apropiado puede no estar dentro de distancias costeables para el transporte.
La inversión inicial es baja comparada con la de otros métodos de eliminación.	Se deben observar las normas apropiadas de rellenos sanitarios a diario. Si no se opera adecuadamente se puede convertir en un tiradero a cielo abierto.
En el relleno sanitario se puede eliminar toda clase de basuras.	La ubicación del relleno en áreas residenciales puede tener fuerte oposición pública.
Se puede poner en operación en corto tiempo.	Las construcciones permisibles sobre el relleno son especiales y muy limitadas.

Recibe de todo tipo de desechos sólidos	Un relleno sanitario terminado se asentará y exigirá mantenimiento periódico.
Es flexible ya que puede disponer cantidades mayores o menores de basura con poco personal o equipo adicional.	El metano, un gas explosivo, y otros gases de la descomposición de los desechos pueden convertirse en un peligro o molestia e interferir con el uso del relleno sanitario terminado.

**Tabla 2. Ventajas y Desventajas del Relleno Sanitario. (Tchobanoglous, 1982)**

### **1.3.3. Importancia de la Evaluación de Impacto Ambiental**

Estas evaluaciones deben realizarse en la fase de planificación y diseño, con el objetivo de asegurar que el proyecto sea ambientalmente adecuado y sustentable, facilitando su mejora desde el punto de vista ambiental, al mismo tiempo que se minimizan, atenúan o compensan los impactos negativos. Deben considerarse al menos tres etapas: la preparación de la infraestructura, la operación y el poscierre y control del área.

### **1.3.4. Lixiviación**

Cuando los residuos sólidos se entierran, la materia orgánica se descompone en condiciones aeróbicas durante las primeras semanas (en áreas húmedas) o en primer año (en áreas secas) y después se degrada anaeróbicamente cuando ya no hay oxígeno presente. Mientras los residuos se descomponen, el líquido que sale de ellos, la filtración de aguas subterráneas y el agua de la precipitación pluvial y el desagüe de las superficies se cuelan a través de los desechos y producen otro líquido contaminado que se conoce como lixiviado. (Álvarez M.C., et al. 1990)

La contaminación de las aguas subterráneas por un lixiviado rico en sustancias orgánicas, sólidos disueltos y otros componentes puede ser un problema grave cuando los pozos cercanos se utilizan como fuente de abastecimiento de agua.

El peligro proviene sobre todo de las sales disueltas, puesto que el suelo elimina los materiales orgánicos biodegradables y los organismos patógenos antes que el lixiviado recorra una distancia muy grande.

Los contaminantes más importantes en el lixiviado son DBO (Demanda Química de Oxígeno), DQO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), cloruros y nitratos, así como los metales pesados, compuestos organoclorados e hidrocarburos disueltos.

Los gases, principalmente metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que genera la descomposición anaeróbica de las sustancias orgánicas del relleno son también motivo de preocupación. El metano es un gas sin olor y combustible, más ligero que el aire y explosivo cuando su concentración en aire está entre el 5 y el 15 %. El dióxido de carbono en combinación con el agua crea un ambiente ácido en el cual los minerales como el calcio, magnesio, hierro, cadmio, plomo y zinc, presentes en los desechos (o en el suelo), tienden a disolverse y avanzar hacia el nivel freático. El calcio y el magnesio sólo aportan dureza a las aguas subterráneas, pero los metales pesados tóxicos constituyen un problema más serio porque pueden hacer que el agua no sea adecuada para el consumo humano. (Álvarez M.C., et al. 1990)

Un suelo de baja permeabilidad se considera deseable porque restringe el flujo de lixiviado. En áreas húmedas un suelo totalmente impermeable podría ser problemático al permitir que el lixiviado se acumule en el relleno sanitario y se derrame tarde o temprano. La permeabilidad, por tanto, es un factor que debe considerarse. El grado de permeabilidad de un suelo, se mide por su coeficiente de permeabilidad, el cual se basa en la Ley propuesta por Darcy:

$$V = K * I$$

Donde V es la velocidad de escurrimiento de un fluido a través del suelo; K es el coeficiente de permeabilidad propio y característico; I es el gradiente hidráulico, el cual representa la relación entre la diferencia de niveles y la distancia que el agua recorre. La Tabla 3 muestra los valores relativos a la permeabilidad:

Permeabilidad Relativa	Valores de K (cm / seg)	Suelo Típico
Muy Permeable	$> 1 \times 10^{-1}$	Grava Gruesa
Moderadamente Permeable	$1 \times 10^{-1}$ a $1 \times 10^{-3}$	Arena, Arena Fina
Poco Permeable	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-5}$	Arena Limosa, Arena Sucia
Muy Poco Permeable	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7}$	Limo y Arenisca Fina
Impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Arcilla

**Tabla 3. Valores Relativos de Permeabilidad. (Terzaghi K. y Peck R.,1980.)**

#### **1.3.4.1. Control del lixiviado**

Una vez que el suelo alcanza su máxima capacidad para absorber el líquido de los desechos, el lixiviado emigra a través del suelo subyacente hacia el nivel freático. La máxima rapidez de filtración a través del suelo se produce cuando se alcanza su capacidad de campo y en ese punto el suelo ya no absorbe más agua. En estas condiciones, la rapidez de movimiento del líquido a través de un suelo uniforme es proporcional al gradiente hidráulico que causa el flujo.

#### **1.3.5. Protección del Agua**

El percolado de un relleno sanitario puede ser muy contaminante. Cuando hay riesgo de contaminar fuentes de agua, deben tomarse las medidas necesarias para impedir que el percolado llegue al agua subterránea o ingrese en algún curso de agua.

Para asegurar el correcto funcionamiento del Relleno Sanitario y evitar que se convierta en un basural a cielo abierto, debe realizarse una serie de controles cuya metodología y frecuencia debe determinarse previamente.

Para monitorear las aguas subterráneas realizamos una evaluación preliminar mediante un proceso sistemático de análisis de la información, mapas, documentos existentes proporcionados por individuos pertenecientes al sitio y tomados de archivos para determinar la probable naturaleza y localización de la contaminación. Esta fase no involucra muestreo ni análisis. Consta de dos partes, el estudio del material de documentación y el reconocimiento del sitio.

Los resultados arrojados por el primer análisis deberían coincidir con los resultados que se obtienen de las muestras de agua tomadas luego de circular debajo del relleno; en este caso se garantiza la impermeabilización del mismo. Caso contrario se estaría en una situación de contaminación de las capas causada por la ineficacia del sistema de impermeabilización.

Es imprescindible realizar un adecuado control de los efluentes líquidos y garantizar la correcta captación y venteo de los efluentes gaseosos. (Álvarez M.C., et al. 1990)

### **1.3.6. Legislación en México**

#### **1.3.6.1. Residuos Sólidos y Peligrosos**

En México la legislación se divide en aquella que se refiere a los residuos sólidos municipales y por otra parte a la referente a los residuos peligrosos.

Hasta la fecha la Federación se ha encargado de llevar a cabo lo referente a la legislación, reglamentación y normalización de los residuos peligrosos, la primera con base en lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y específicamente en lo relativo a residuos peligrosos con el Reglamento de la Ley Federal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Sólidos Peligrosos y las Normas Técnicas Ecológicas que ha publicado, una de ellas específicamente está relacionada con las características que deben cumplir los sitios para el confinamiento de residuos peligrosos.

Por su parte en lo relativo al control de los residuos sólidos municipales, básicamente en lo relacionado con la prestación del servicio de aseo urbano, hasta la fecha ha sido reglamentado por los municipios y por el Distrito Federal, en estos reglamentos no se contempla en ningún momento las características que debe tener un sitio para la disposición final de los residuos municipales.

La información presentada en el Anexo B, es la que considero más importante en lo relativo a los factores que se deben tener en consideración para la selección de sitios destinados a la disposición final de residuos sólidos y peligrosos. Estos factores que se presentan se dividen en los necesarios para los sitios que reciben residuos sólidos municipales y para los que reciben y que está normado, residuos peligrosos.

#### **1.3.6.2. Rellenos Sanitarios**

La situación legal respecto a los rellenos sanitarios está dividida en tres organismos: Leyes, Reglamentos y Normas.

*Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.*

A nivel Federal las reformas realizadas a los artículos 27 y 73 de la Constitución Mexicana, con que se elevo a rango constitucional la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico, son la base principal del sustento de la Ley General del Equilibrio Ecológico, sus reglamentos y normas.(Davila, 1991)

### *Ley General de Equilibrio Ecológico para la Protección del Ambiente*

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales es la encargada de la elaboración y expedición de Normas Oficiales a través del Instituto Nacional de Ecología (INE). La Ley General de Equilibrio Ecológico para la Protección del Ambiente (LGEEPA), está encargada a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, donde sobresalen los siguientes artículos:

- Art. 9, fracción VII: "promover, en coordinación con el Gobierno Federal y las autoridades correspondientes, la creación de infraestructura para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos, de manejo especial y residuos peligrosos, en las entidades federativas y municipios, con la participación de los inversionistas y representantes de los sectores sociales interesados. "

Este artículo me parece de gran importancia porque para tener un manejo integral de los residuos debe haber infraestructura suficiente. Cuando se carece de ésta los problemas de contaminación aumentan ya que generalmente los residuos terminan en barrancas, tiraderos a cielo abierto, canales, etc.

- Art. 10: los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consiste en la recolección, traslado, tratamiento y su disposición final.

La LGEEPA también cuenta con artículos donde se especifica el cuidado de los suelos (art. 15, clausula IV):

- Identificar las fuentes generadoras de los residuos cuya disposición final pueda provocar salinización e incrementos excesivos de carga orgánica en suelos y cuerpos de agua.

Cuando los municipios cuentan con recursos suficientes para construir un relleno sanitario deben apegarse a la norma vigente.

### *Norma Oficial Mexicana - 83 - SEMARNAT - 2003*

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT -2003 establece las especificaciones de protección ambiental, para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Uno de sus principales objetivos es el de señalar las condiciones Geológicas e Hidrogeológicas que deben existir en el sitio para proteger la calidad de los mantos acuíferos.

De la Norma resalta que:

- En localidades mayores a 2 500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m contados a partir del límite de la traza urbana existente.
- El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.
- La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas debe ser de 500 m como mínimo.
- La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua, tanto en operación como abandonados, será de 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 m.
- No debe ubicarse en zonas de cavernas, fracturas o fallas geológicas.
- Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien garantizarlas con un sistema de impermeabilización equivalente.
- Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás, lixiviado y acuíferos, para asegurar la adecuada operación de los sitios de disposición final.

La Tabla 4 muestra los estudios necesarios previos que se deben hacer para la construcción de un relleno sanitario, las columnas A, B Y C, es la clasificación del tipo de relleno sanitario según la carga de residuos que acepta por día. A equivale a más de 100 ton/día, B equivale al rango entre 50 y 100 ton/día y por último C es el intervalo entre 50 y 10 ton/día.

<b>Estudios</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Geológico y Geohidrológico Regionales	X		
Evaluación Geológica y Geodrológica	X	X	
Hidrológico	X	X	
Topográfico	X	X	X
Geotécnico	X	X	X
Generación y Composición de los Residuos Sólidos Urbanos	X	X	X
Generación de Biogás			
Generación de Lixiviado			

**Tabla 4. Estudios y Análisis Previos Requeridos para la Construcción de Sitios de Disposición Final. (NOM-83-SEMARNAT)**

Teóricamente la norma parece un poco estricta por todas las restricciones que presenta, pero prácticamente es muy difícil, casi imposible, poder cumplirla al pie de la letra. Cuando se aprobó la norma faltó considerar el punto económico; un relleno sanitario es un gasto necesario para municipios con más de 2500 habitantes, los cuales muchas veces no consideran en su presupuesto el gasto de disponer de un relleno sanitario, este es el primer punto a criticar de la Norma.

Una de las restricciones que crean más problemas son las que se refieren a la distancia mínima que debe haber entre un sitio de disposición y la traza de la población. La finalidad de esta cláusula es poder resguardar la seguridad de las personas en caso de



una contingencia, además de evitarles algunas molestias generadas por el ruido, el olor, el continuo tránsito de vehículos, etc. Pero en realidad esta restricción es poco aplicable en las grandes ciudades, ya que, lo que hace falta en éstas, es espacio, un ejemplo muy claro es la Ciudad de México y si agregamos que cuando se dispone de un vertedero llegan cientos de pepenadores a residir a los alrededores, esta restricción es imposible.

El otro factor poco viable es el que se refiere a la distancia que debe haber del sitio a un pozo, esta condición es casi imposible, con el aumento de la demografía ha sido necesario abastecer de agua a toda la población. Si consideramos que tan solo en la Ciudad de México y la Zona Metropolitana existen aproximadamente 2 000 (Sistema de Aguas) pozos, prácticamente ya no queda lugar para ubicar un sitio de confinamiento.

Actualmente la SEMARNAT está organizando un grupo de trabajo en el cual se revisará la estructura de la norma para saber qué es lo que falla en cuanto a su aplicación. Porque es evidente que la norma existe pero es muy poco aplicable. De los 2500 municipios que existen en la República Mexicana tan solo existen 12 rellenos sanitarios aproximadamente que cumplen con los requisitos mínimos de la NOM- 83-SEMARNA 1. Hay casos como el estado de Nayarit o Sinaloa donde no existe ni un solo relleno sanitario, el 100% de sus residuos se disponen en tiraderos a cielo abierto.

Una de las mejores opciones que pueden aminorar el impacto es reducir el volumen de residuos sólidos urbanos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos especifica que los residuos deben evaluarse y aprovechar antes de ser dispuestos en un confinamiento.

En la ley también se contempla la reducción de embalajes; es muy usual que aunque compremos un producto pequeño su empaque es hasta 5 veces más grande, obviamente la finalidad es el impacto de mercado.

El conseguir lugares que cumplan con la norma cada día es más difícil, lo realmente importante es reducir los volúmenes de residuos desde su origen, al mismo tiempo se cuidará el ambiente y se pondrá en práctica la responsabilidad compartida.

Por lo que la LGEEPA promueve:

"La investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen, reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y la transferencia, de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes de la gestión integral de los residuos."

## **CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO**

### **2.1. Fisiografía**

El estado de Sonora comprende áreas que corresponden a cuatro provincias o regiones fisiográficas del país: Desierto Sonorense, en el noroeste y oeste; Sierra Madre Occidental, en la parte oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal; y Llanura Costera del Pacífico, en el sur. En la Figura 3, queda representada esquemáticamente la Fisiografía del estado de Sonora:

#### **2.1.1. Provincia Desierto Sonorense**

Dentro de Sonora adopta la forma de una cuña orientada hacia el sur; colinda en el extremo noroeste con la Península de Baja California, hacia el oriente con la Sierra Madre Occidental y en su extremo sur con la Llanura Costera del Pacífico.

La provincia está dividida en dos subprovincias y una discontinuidad, las cuales son: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar y Sierra del Pinacate.

##### **2.1.1.1. Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses**

Comprende un área de 81,661.40 km<sup>2</sup>, abarca completamente los municipios de Caborca, Altar, Sáric, Tubutama, Atil, Oquitoa, Pitiquito, Trincheras, Benjamín Hill, Hermosillo, Carbó, San Miguel de Horcasitas, Empalme y Mazatán; asimismo incluye parte de los de San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco, General Plutarco Elías Calles, Nogales, Magdalena, Santa Ana, Opodepe, Quiriego, Ures, Villa Pesqueira, La Colorada, Guaymas, Suaqui Grande y Cajeme.

Está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Tales sierras son más elevadas (700 a 1 400 m.s.n.m.) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (menos de 700 m.s.n.m.) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan rocas ígneas intrusivas ácidas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas lávicas, metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Terciario. La isla Tiburón forma parte de este sistema de sierras, cuyas cimas son bajas y muy uniformes. Las pendientes son bastante abruptas, siendo frecuentes las mayores de 45°, especialmente en las rocas intrusivas, lávicas y metamórficas; en tanto que las menores a 20° son anormales. En general, las cimas son almenadas, es decir, dentadas. Los arroyos que drenan esta región efectúan una fuerte erosión produciendo espolones laterales que se proyectan en las llanuras.

Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia. Están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes. La llanura aluvial de Hermosillo (200 m.s.n.m.) baja hacia la costa ensanchándose en sentido noreste-suroeste, tiene 125 km de largo y 60 km de ancho en la costa. (INEGI, 2009)

El río más grande de esta porción es el Sonora, que nace en Cananea, en la provincia Sierra Madre Occidental, donde fluye hacia el sur. A la altura de Hermosillo se une con el San Miguel de Horcasitas, también procedente de esa provincia, y con El Zanjón, que se origina en esta subprovincia.

#### **2.1.1.2. Subprovincia Desierto de Altar**

La subprovincia abarca un área de 11,556.29 km<sup>2</sup> en Sonora, ocupa parte de tres municipios: San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles.

En su mayoría es un desierto arenoso con altitudes abajo de 200 m, en la parte occidental se localiza el mayor delta del país: el del río Colorado, que cruza la subprovincia en sentido norte-sur, tiene un ancho de cerca de 90 km en la frontera y una longitud aproximada de 140 km hasta su desembocadura.

La región está constituida predominantemente de campos de dunas semilunares (tipo barján), con la ladera abrupta y los cuernos del lado opuesto (sotavento) al que recibe los vientos dominantes. Estos campos son interrumpidos al riente del delta y al norte de la bahía de San Jorge por lomeríos de rocas metamórficas del Precámbrico.

#### **2.1.1.3. Discontinuidad Sierra del Pinacate**

Se encuentra dentro de los municipios de Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles e interrumpe en su parte oriental a la subprovincia Desierto de Altar. Ocupa una extensión de 1,556.61 km<sup>2</sup>; es un complejo volcánico con longitudes aproximadas de 50 km norte-sur y unos 37 km este-oeste, con sistemas de topofomas muy diferentes. Hay una dominancia absoluta de rocas volcánicas básicas, con abundancia de lavas basálticas. El aparato central es escarpado con cima superior a 1,100 m.s.n.m. Hacia la base las laderas se tornan cóncavas y finalmente casi planas sobre las mesetas de basalto circundantes.

## **2.1.2. Provincia Sierra Madre Occidental**

Cuatro subprovincias de la Sierra Madre Occidental quedan comprendidas dentro de los límites estatales: Sierras y Valles del Norte, Sierras y Cañadas del Norte, Pie de la Sierra y Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses.

### **2.1.2.1. Subprovincia Sierras y Valles del Norte**

El área de la subprovincia en territorio sonoreense es de 32,688.84 km<sup>2</sup>, abarca los municipios de: Cucurpe, Arizpe, Cumpas, Huásabas, Bacoachi, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Baviácora, Moctezuma, Granados y San Javier; además incluye parte de los municipios de: Nogales, Imuris, Cananea, Fronteras, Nacoziari de García, Villa Hidalgo, Opodepe, Rayón, Divisaderos, Tepache, San Pedro de la Cueva, Villa Pesqueira, Soyopa, La Colorada, Cajeme y Rosario.

Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, de tal forma que en la sierra Los Ajos, al este de Cananea, se localiza la mayor altitud, con 2 620 m; al norte de Mazocahui gran parte de las elevaciones exceden los 1000 m.s.n.m., mientras que al sur de esta población la mayoría de las cimas quedan por abajo de esa altitud.

En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas, sin embargo, un cuerpo ígneo intrusivo aflora desde la sierra Los Locos hasta Mazatán y Nácori Grande, pasando por Mazocahui. En los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario); en los ubicados al occidente fluyen los ríos San Miguel de Horcasitas y Sonora; y el Moctezuma y el Bavispe, ambos afluentes del Yaqui, corren por los valles orientales.

Una enorme falla normal baja hacia el sur, desde Ignacio Zaragoza, al suroeste de Agua Prieta, bordeando los costados occidentales de las sierras Los Ajos, Buenos Aires y La Madera, hasta el extremo sur de esta última, donde termina. Otra de menor longitud se localiza en el Valle de Moctezuma. (INEGI, 2009)

### **2.1.2.2. Subprovincia Sierras y Cañadas del Norte**

Comprende una superficie de 23,349.16 km<sup>2</sup>; engloba la totalidad de los municipios de Bacerac, Nácori Chico, Sahuaripa, Arivechi y Bacanora; también abarca parte de los de

Agua Prieta, Bavispe, Nacozari de García, Ures, Huachinera, Bacadéhuachi, Divisaderos, Tepache, San Pedro de la Cueva, Soyopa, Onavas, Rosario y Yécora.

En su parte occidental todas las cimas se levantan por arriba de 1000 m.s.n.m., y de 2,000 m.s.n.m. en el oriente. La cumbre más elevada, con 2,520 m.s.n.m., está ubicada en el extremo norte, en la sierra San Luis. Estas sierras de laderas escarpadas, entre las cuales se localizan valles intermontanos, están constituidas principalmente de rocas volcánicas ácidas, pero existen también grandes franjas basálticas burdamente orientadas norte-sur.

Los ríos que nacen en el norte de esta región drenan hacia el sur, y hacia el norte los que se originan en el sur. Esto se debe al fallamiento en bloques con diversas inclinaciones.

### **2.1.2.3. Subprovincia Pie de la Sierra**

Esta subprovincia ocupa en la entidad una extensión de 8,561.36 km<sup>2</sup>. Tiene la forma de una franja angosta ubicada al poniente del macizo principal de la Sierra Madre Occidental; limita al oeste con la Llanura Costera del Pacífico. Abarca parte de los municipios de: Cajeme, Quiriego, Rosario, Alamos, Navojoa y Huatabampo.

La caracterizan sierras y lomeríos similares en litología a la Sierra Madre, pero además presentan granitos y algunas rocas metamórficas.

Las sierras son poco elevadas, pues sólo ciertas cumbres se levantan a más de 700 m sobre los terrenos bajos que las rodean; están constituidas de uno o varios núcleos altos, acompañados de lomeríos y cerros más bajos, con altura de 200 a 300 m sobre los 50 m.s.n.m. de las llanuras más cercanas. Presentan disección intensa, esto es, incisiones o hendiduras originadas por cursos de agua erosionantes, además de algunas mesetas. Entre los lomeríos se encuentran llanuras aluviales.

### **2.1.2.4. Subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses**

En Sonora ocupa un área de 4,669.83 km<sup>2</sup> que corresponde a parte de los municipios: Yécora, Rosario, Quiriego y Alamos.

Ostenta la morfología de sierras, constituidas de rocas volcánicas (dominando las ignimbritas) con algunos afloramientos basálticos. Está disectada por el río Mayo, que tiene su origen en el sureste de la subprovincia y se dirige hacia Navojoa. La altitud de esta porción es de alrededor de 1000 m. (INEGI, 2009)

### **2.1.3. Provincia Sierras y Llanuras Del Norte**

Representada en la entidad por la Subprovincia Llanuras y Médanos del Norte.

#### **2.1.3.1. Subprovincia Llanuras y Médanos del Norte**

En Sonora abarca una superficie de 7,316.07 km<sup>2</sup>, que corresponden a partes de los municipios de: Nogales, Santa Cruz, Imuris, Cananea, Naco, Fronteras, Agua Prieta y Bavispe. Esta zona, a diferencia del resto de la subprovincia, está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras; asimismo, en el límite con Chihuahua se localiza un sistema de topoformas denominado bajada. Predominan las rocas sedimentarias (principalmente conglomerados), aunque también se encuentran pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas ácidas, como en la sierra El Chivato. Surcan este territorio los ríos Punta de Agua y Cajón Bonito, afluentes del Agua Prieta.

### **2.1.4. Provincia Llanura Costera Del Pacifico**

Representada en la entidad por la Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa.

#### **2.1.4.1. Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa**

Esta subprovincia engloba en forma completa al municipio de Etchojoa, además incluye parte de los de: Huatabampo, Navojoa, Quiriego, Cajeme, Bácum y Guaymas, que en conjunto suman 9,245.44 km<sup>2</sup> de territorio sonorenses. La integran en su mayor parte tres grandes deltas, los de los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte, en los cuales están ubicados extensos distritos de riego. La mayoría del territorio está cubierto de material aluvial.

En la entidad la mayor parte de los suelos son jóvenes (67.58% del total), entre ellos se encuentran las unidades de Litosol y Regosol, que son poco desarrolladas. Existen además otras que se consideran intermedias entre los suelos jóvenes y los propiamente maduros, como son Yermosol, Xerosol y Cambisol, que representan 26.85% de la superficie estatal. Estos suelos han tenido un incipiente desarrollo debido a las condiciones climáticas, ya que la escasa precipitación y la alta evapotranspiración en las zonas ocupadas por ellos limita los procesos formadores. En algunas bajadas y en las áreas húmedas de la Sierra Madre Occidental se ubican los suelos más evolucionados, como son Luvisol, Feozem y Gleysol, los cuales ocupando sólo 5.27% del área. (INEGI, 2009)

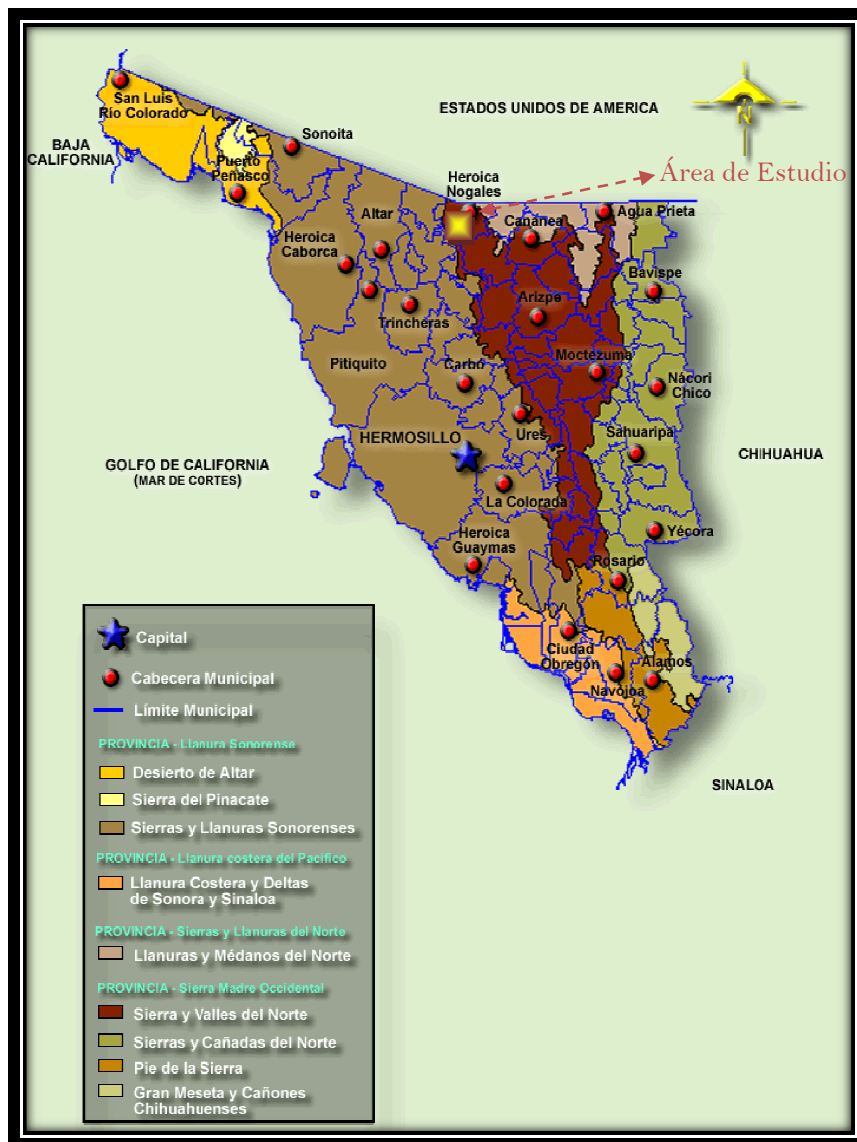


Figura 3. Fisiografía del Estado de Sonora. (INEGI, 2009)

## 2.2. Geología Regional

El territorio sonorense tiene una historia geológica compleja. En él acontecieron varios eventos geológicos que dieron lugar a una diversidad de unidades litológicas, las cuales, por medio de los fenómenos endógenos (tectonismo y vulcanismo) y exógenos (erosión y depósito) sucedidos a través del tiempo, han transformado su estructura original y modelado el paisaje (Véase Figura 4).

De acuerdo con las características fisiográficas que presenta el estado, éste queda comprendido dentro de las provincias: Desierto Sonorense, Sierra Madre Occidental, Sierras y Llanuras del Norte y Llanura Costera del Pacífico.

La porción occidental corresponde al Desierto Sonorense, que se caracteriza por la alternancia de sierras, bajadas y llanuras. En esta zona las sierras se formaron por procesos tectónicos, tienen una orientación noroeste-sureste, están próximas unas de otras en el oriente y más separadas en el poniente.

Su composición litológica es variada, dominan las rocas anteriores al Terciario, las cuales en el este están cubiertas por efusiones volcánicas del Cenozoico. En esta provincia, desde el sur de Caborca hasta el noroeste del estado, afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias del Precámbrico.

El Paleozoico por lo general está representado por calizas, ortocuarcitas y dolomías metamorizadas. El Mesozoico por calizas y rocas detríticas de ambientes marino y continental; además de volcánicas (con predominio de composición andesítica) e ígneas intrusivas (granitos y granodioritas) que son las de mayor distribución en el Desierto Sonorense. (INEGI, 2009)

Del Cenozoico se encuentran rocas volcánicas, entre las que predominan las de composición ácida. Los afloramientos de conglomerados del Terciario tienen también una amplia distribución; sin embargo, la mayor parte de esta provincia se encuentra cubierta por depósitos sin consolidar del Cuaternario, localizados en las llanuras y bajadas.

La Sierra Madre Occidental abarca la parte oriental de la entidad, está constituida por una gran estructura ígnea orientada noroeste-sureste, presenta gran número de fallas de tipo normal que forman fosas y pilares tectónicos. Las características estructurales y el depósito pseudohorizontal de su cubierta ignimbrítica le dan la forma de una extensa meseta. Su flanco occidental, del que se encuentra una parte en Sonora, es más abrupto que el oriental debido al fallamiento que presenta, lo cual originó escarpes.

En esta provincia afloran también rocas antiguas, mediante procesos de erosión o bien porque no fueron cubiertas por las efusiones volcánicas del Cenozoico. El Precámbrico está representado por rocas metamórficas, que son el basamento de la sierra; el Paleozoico y el Mesozoico por calizas y rocas detríticas, algunas de ellas con diversos grados de metamorfismo.



Además, en esta zona hay depósitos continentales de conglomerados del Terciario; así como suelos del Cuaternario, los cuales se distribuyen en las partes más bajas y en los valles.

La parte noreste de Sonora pertenece a la provincia Sierras y Llanuras del Norte, en ella afloran rocas calizas del Paleozoico; detríticas, calcáreas y cuerpos intrusivos de composición ácida del Mesozoico; volcánicas ácidas y básicas del Cenozoico; y conglomerados del Terciario que forman lomeríos de pendiente suave. Los suelos del Cuaternario son parcialmente escasos y se localizan en las zonas más bajas.

La Llanura Costera del Pacífico abarca la porción sur, está formada por una planicie angosta paralela a la costa, que se desarrolló debido al avance lento de los deltas de los ríos hacia el oeste. Se encuentra cubierta casi en su totalidad por depósitos no consolidados del Cuaternario, pero como resultado de la erosión han quedado al descubierto rocas metamórficas del Precámbrico y volcánicas del Terciario formando prominencias topográficas de poca elevación. Hacia el oriente, en el límite con la Sierra Madre Occidental, se localizan cuerpos intrusivos y una secuencia de calizas y lutitas del Cretácico. Otras rocas distribuidas en esta región son areniscas y conglomerados del Terciario Inferior. (INEGI, 2009)

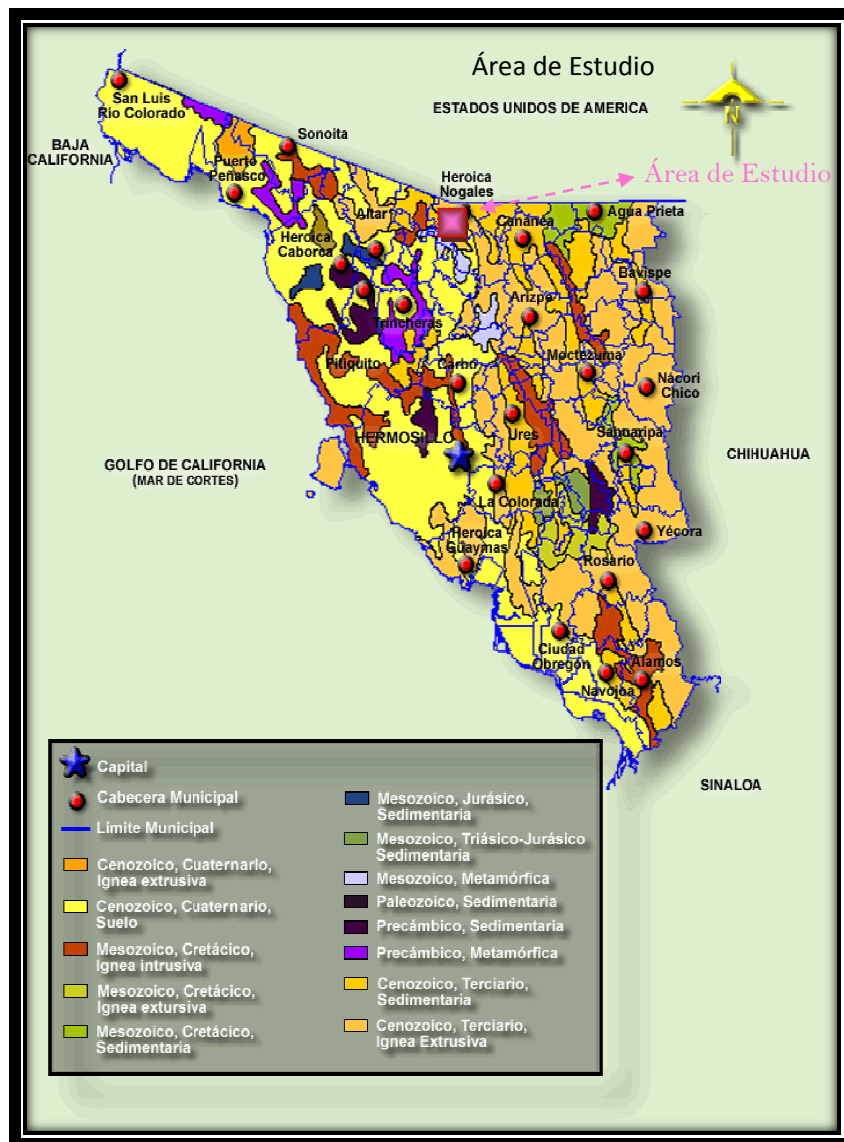


Figura 4. Geología del Estado de Sonora. (INEGI, 2009)

### 2.3. Estratigrafía

En el estado de Sonora afloran rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, cuyas edades de formación comprenden desde el Precámbrico al Cuaternario, aunque algunos períodos sólo están representados en forma parcial, la información que a continuación se muestra fue obtenido del SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO de la Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2, Esc. 1:250000, 1997.

### **2.3.1. Precámbrico**

Las rocas más antiguas, de probable edad Proterozoico, están representadas por cuerpos graníticos y dioríticos, expuesto en ambos flancos de la sierra San José, en el flanco noreste del cerro El Caloso y en un afloramiento no cartografiable al oriente del cerro El Tejano. Se encuentra en contacto por falla normal y discordante con una secuencia paleozoica; se correlaciona con el Granito Cananea de  $1440 \pm 15$  m.a., U-Pb. El intrusivo diorítico aflora en la porción noroeste de la sierra San Antonio y forma parte de una serie de afloramientos discontinuos de edad Proterozoico; esta unidad se encuentra intrusionada por cuerpos graníticos y granodioríticos del Jurásico medio y Paleoceno. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

### **2.3.2. Paleozoico**

#### ***Cámbrico Medio - Superior.***

El Cámbrico medio-superior que aflora en esta región consiste de caliza, caliza oolítica, arenisca y limolita, con restos de trilobites de edad Dresbachiano; es correlacionable con la Cuarcita Bolsa y la Caliza Abrigo del sureste de Arizona.

#### ***Devónico - Pérmico.***

El Devónico-Pérmico consiste de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado y lodolita; en la parte oriental el contacto es discordante y por falla normal con las rocas Cámbricas subyacentes, observándose una relación similar con las unidades del Jurásico inferior-medio y Cretácico superior sobreyacentes; se correlaciona con las formaciones Caliza Martín, Caliza Escabrosa, Horquilla y Earp. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

### **2.3.3. Mesozoico**

#### ***Jurásico Inferior - Medio***

Las rocas del Jurásico inferior-medio afloran en las porciones central y occidental, se relacionan con la actividad de un arco magmático que estuvo activo durante el Jurásico. Consisten de derrames de composición riolítica, arenisca y toba riolítica, se presentan silicificadas y muy basculadas, con plegamiento relacionado a un intenso fallamiento.

El contacto inferior no se observa, pero hacia la cima el contacto es discordante con las rocas clásticas del Jurásico Superior-Cretácico inferior que las cubren. Se conoce como Formación Las Avispas, y puede correlacionarse con las formaciones Cobre Ridge, Mount Wrightson, Canelo Hills, y El Pinito de edad de 174 m.a. En los alrededores del poblado Saric afloran esquistos, metariolita metatoba, metaconglomerado, metarenisca y gneiss con metamorfismo en facies de esquistos verdes. El evento metamórfico está fechado en  $169 \pm 8$  m.a. (K-Ar) y existe controversia con relación al origen del evento. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

Provisionalmente a esta unidad se correlaciona con el grupo de edad del Jurásico medio. Intrusionando a las unidades anteriores se presentan afloramientos de cuerpos plutónicos graníticos del Jurásico medio que se localizan al norte de la sierra El Humo, en la sierra Guacomea, y en la región de Nogales están cubiertos discordantemente por las unidades más recientes.

#### ***Jurásico Superior - Cretácico Inferior.***

El Jurásico superior-Cretácico inferior está representado por rocas sedimentarias expuestas en la sierra La Esmeralda, constituidas por arenisca, conglomerado y limolita. Se reconoce a esta unidad como Formación La Jareta y se correlaciona con el Conglomerado Glance. En la sierra San José aflora una secuencia clástica-carbonatada de edad Aptiano-Albiano correlacionable con el Grupo Bisbee, constituida de caliza, arenisca, limolita y lutita, con estratos plegados con ejes orientados noroeste-sureste, plegamiento atribuido a una fase compresiva mesocretácica. Cubre discordantemente a un intrusivo granítico proterozoico, y a su vez se encuentra cubierta mediante un contacto discordante por las rocas volcanosedimentarias del Cretácico superior y conglomerados cuaternarios.

#### ***Cretácico Superior***

El Cretácico superior volcanosedimentario y volcánico aflora en las porciones central y oriental de la carta; el paquete volcanosedimentario está constituido de arenisca, lutita, toba riolítica, limolita, conglomerado y ocasionalmente andesita, correlacionable con el Grupo Cabullona del Cretácico superior, el cual se considera parte de las asociaciones estratigráfico-tectónicas no marinas que se depositaron en cuencas laramídicas, con volcanismo asociado con este evento. El contacto con las unidades subyacentes es discordante, observándose la misma relación con las unidades más jóvenes que la sobreyacen. Las rocas volcánicas de composición intermedia (andesita, toba andesítica,

aglomerado y arenisca tobácea), se encuentran depositadas discordantemente sobre las unidades más antiguas e intrusionadas por los plutones laramídicos, y cubiertas por las unidades más recientes. Presentan propilitización y silicificación, se correlacionan con la Formación Mesa, de  $69 \pm 0.2$  m.a., Ar-Ar. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

#### **2.3.4. Cenozoico**

Las intrusiones batolíticas laramídicas de composición granítica-granodiorítica del Paleoceno (TpaGr-Gd), se consideran asociadas con la transgresión de un arco magmático relacionado a convergencia de placas. Afloran en la región de Cuitaca, sierra San Antonio, Sierra El Pinito y en el noroeste del poblado de Saric, afectando a las rocas pre-terciarias. Estos intrusivos han sido fechados por varios investigadores, obteniéndose edades como 64 m.a., por U-Pb,Rb-Sr y Sm-Nd,  $64 \pm 3$  y  $69 \pm 1$  m.a., U-Pb en afloramientos de la región de Cuitaca-Cananea; y 74 m.a., U-Pb al noroeste del poblado de Saric. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

En la periferia de la sierra Mariquita afloran cuerpos porfídicos monzoníticos-cuarzomonzoníticos que se consideran estrechamente asociados a la mineralización tipo pórfido cuprífero en el Distrito Minero de Cananea. Esta unidad que se encuentra afectando a las rocas pre-paleoceno, incluye apófisis de cuerpos subvolcánicos riolíticos como el que aflora en el cerro El Tordillo, fechado en  $54.2 \pm 2$  m.a., K-Ar en sericita cerca de Cananea; además en este distrito minero se tienen edades de los pórfidos cuarzomonzoníticos de  $59.9 \pm 2$  m.a., K-Ar en flogopita; la mineralización del depósito María tienen una edad de  $57.4 \pm 1.6$  m.a., Re-Os en molibdenita.

En la porción occidental de la carta H12-2, están expuestos intrusivos graníticos de dos micas que presentan fábrica milonítica, del Oligoceno ( $39.96 \pm 0.7$  m.a.). La deformación es el resultado de perturbación termal con posterior colapso gravitacional durante el Mioceno. La extensión en Sonora (25-18 m.a.) es contemporánea con el desarrollo de los Core Complex de Arizona, Nevada y Utah. Por otra parte, en la porción sur de las montañas Baboquivari, la edad de diques riolíticos y microdioríticos que cortan la fábrica milonítica del granito es de  $24 \pm 2$  m.a., U-Pb en zircones y  $22.4 \pm 0.6$  m.a., K-Ar en roca total. Se presentan intrusionando a rocas metamórficas jurásicas y a intrusiones laramídicas. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

El Oligoceno volcánico consiste en afloramientos aislados de rocas de composición traquítica-andesítica con una edad de 33 m.a., K-Ar; expuestas en la parte sur de la sierra El Humo y al suroeste de Saric, donde se encuentran cubiertas por unidades sedimentarias y volcánicas más jóvenes; toba riolítica, riolita, toba lítica, toba y brecha de composición dacítica, que afloran al norte de la sierra El Chivato, donde cubren discordantemente a rocas más antiguas.

El Mioceno está representado por unidades sedimentarias que en ocasiones presentan intercalaciones de basalto (TmAr-Lu, TmCgp, TmAr-B) y (TmCgp-B TmCgp-Ar.), que rellenaron cuencas continentales tipo graben, originadas por la tectónica distensiva que provoca la apertura del Protogolfo de California; son correlacionables con las Formaciones Tubutama y Baucarit, las separa una discordancia y afloran principalmente en la porción central. Cubriendo a las unidades anteriores y aflorando en toda el área se tienen rocas constituidas por toba riolítica, riolita y toba lítica de edad Mioceno.

El Mioceno-Plioceno está constituido por depósitos de conglomerados poco consolidados que afloran en Cuitaca y Milpillas; y con intercalaciones de basalto subhorizontales, de 7 m.a., K-Ar, que en algunas localidades cubren a estos depósitos continentales, son correlacionables con los basaltos de la Formación Comedores, originados por erupciones fisurales debido a la continuidad de la tectónica distensiva. Cubriendo a rocas más antiguas se tienen conglomerados no consolidados del Pleistoceno, ampliamente distribuidos, rellenando valles orientados noroeste-sureste y norte-sur, mientras que el aluvión de planicie constituido por arena y limo se encuentra muy extendido. (Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

### **2.3.5. Cuaternario**

Los aluviones del Cuaternario están cubriendo los cauces de los ríos y arroyos principales, es decir este material se distribuyen en las partes más bajas y en los valles.

En la Figura 5 puede observarse la distribución litológica que componen los alrededores le sitio estudiado:

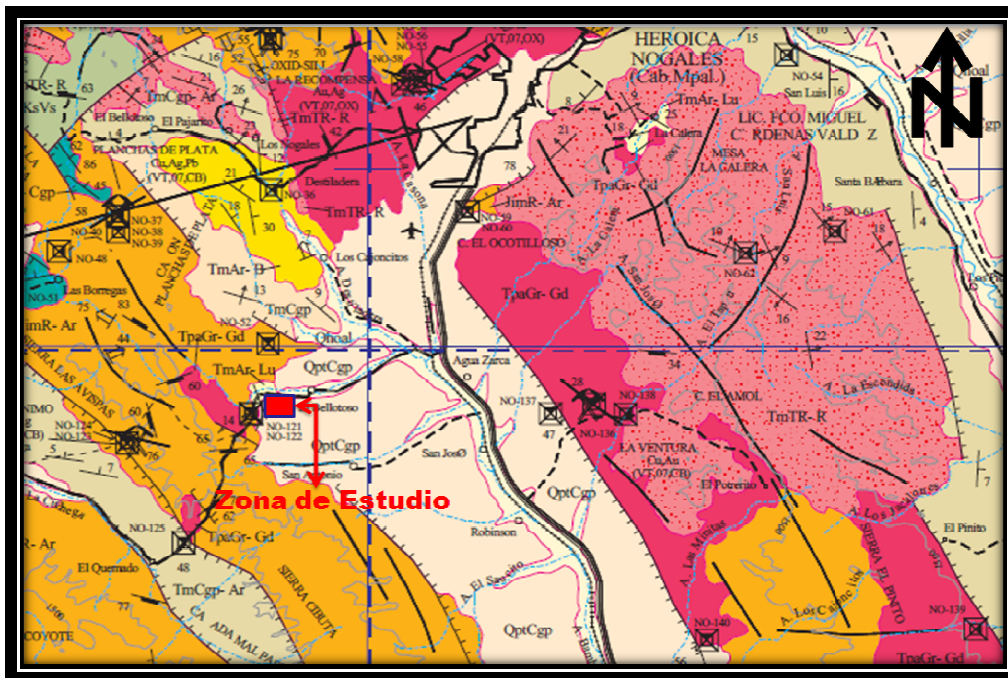


Figura 5. Zona de Estudio en la Carta Geológica – Minera y Materiales que la Componen. (Modificado de la Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2)

## **2.4. Geomorfología**

La región se encuentra formada por estructuras complejas, constituidas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, sujetas a erosión fluvial.

Esta región es considerada como sierras sepultadas de Sonora, comprendida en el relieve de planicies, caracterizado por su clima árido con planicies que ascienden gradualmente de la costa hacia el oriente del estado, al mismo tiempo que son desmembradas por lomeríos y elevaciones menores, constituidos por rocas volcánicas terciarias, hasta cristalinas paleozoicas y precámbricas.

En la porción oriental las elevaciones aumentan gradualmente de altitud destacando la alineación noroeste-sureste de los valles originados por “grabens” post-orogénicos, que dieron lugar al depósito con gran cantidad de materiales clásticos derivados de partes altas de las montañas.

En la actualidad estos depósitos terciarios se encuentran en una etapa de rejuvenecimiento, manifestada por una intensa erosión a la que son sujetas.

En la porción occidental del área destacan grandes valles aluviales que separan a las sierras principalmente graníticas, que aparecen como testigos de la erosión, a pie de las cuales se puede observar una gran cantidad de abanicos aluviales.

## **2.5. Geología Estructural**

Las características estructurales que presenta el territorio de Sonora son el resultado de los diferentes eventos geológicos que han afectado la corteza, modificando las estructuras originales.

A finales del Pérmico y principios del Triásico los eventos orogénicos de la fase Apalachiana provocaron un levantamiento, así como un fallamiento en bloques de las secuencias litológicas preexistentes. Los sedimentos marinos del Triásico indican la presencia de una paleobahía en el área de El Antimonio. Hacia el sureste de Hermosillo se forma una cuenca palustre donde se depositan sedimentos del Triásico y Jurásico. Al inicio de este último período se desarrolla una zona de convergencia en la margen del Pacífico en México, en la que, la placa Paleopacífica se hundía bajo la corteza continental, dando como resultado la formación de un arco vulcano-plutónico con



dirección noroeste-sureste, que se extendió desde Sonoita, en el noroeste, hasta El Novillo, en el centro.

También durante el Jurásico se produjo una zona de corrimiento lateral izquierdo, denominada Megashear Mojave-Sonora, que cruza diagonalmente el norte de la entidad, con dirección noroeste-sureste, y separa dos terrenos precámbricos de diferente edad.

A principios del Cretácico se efectúa el emplazamiento de los cuerpos plutónicos de la porción occidental del estado. Así mismo, las zonas noreste y este son invadidas por los mares provenientes del oriente, con el consecuente depósito de rocas marinas. Iniciado el Cretácico Superior se produjo el levantamiento de esta porción de la República Mexicana. De esa edad son los cuerpos plutónicos más importantes de la región; así como las rocas volcánicas que constituyen la base de la Sierra Madre Occidental.

Durante la Orogenia Laramide, a fines del Cretácico y principios del Terciario, los esfuerzos compresivos plegaron la secuencia sedimentaria preexistente, dándole una orientación noroeste-sureste a los ejes principales, provocando fallas de cabalgadura en el noreste, entre Naco y Agua Prieta. En el Oligoceno se originó la principal actividad ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental. La actividad convergente de las placas, iniciada en el Jurásico, cesa en el Mioceno. A partir de este último período ocurre una fase distensiva que inicia la separación de la Península de Baja California, la cual estaba unida a la porción occidental de Sonora y provoca la formación de horsts y grabens. Esta actividad tectónica actúa hasta el Cuaternario. (INEGI, 2009)

Dentro de la zona estudiada se presenta un patrón estructural de lineamientos regionales bien marcados con una orientación preferencial noroeste-sureste que corresponden a fallas normales con buzamientos al noreste y suroeste, produciendo sierras paralelas a la orientación de las fallas regionales, dando como resultado un sistema de bloques levantados y hundidos tipo horst y graben, relacionado a la tectónica extensional del Terciario superior; encontrándose bien definido en la porción central del área cartografiada. En esta región se conoce como lineamiento Imuris cuya traza pasa por las sierras Cibuta-Guacomea, la región de El Correo y al oriente de El Sásabe, es el límite que separa afloramientos con deformación dúctil, de los que no presentan este tipo de deformación en el noroeste.

A este patrón de lineamientos noroeste-sureste y norte-sur se relacionan las emisiones basálticas fisurales presentes en la parte occidental del área. En menor proporción se tienen lineamientos orientados noreste-suroeste y burdamente este-oeste.

## 2.6. Geología Local

La síntesis geológica local, asociada al objetivo geohidrológico del presente trabajo comprende un ambiente de unidades geohidrológicas granulares clásticas, con posibilidades acuíferas de altas a medias, emplazadas en valles intermontanos y alargados orientados NW-SE y NE-SW, flanqueando a unidades hidrogeológicas rocosas poco permeables a impermeables, con potencialidades acuíferas de bajas a nulas, dispuestas en la misma orientación que la de los valles alargados.

Nogales está comprendida dentro del Terreno Tectonoestratigráfico Chihuahua (Campa y Caney, 1981).

El material cuaternario se extiende preferentemente sobre el valle, ocupando una extensión de 3.5 km de ancho y 10 km de largo, aproximadamente. Su espesor varía de unos cuantos decímetros hasta varias decenas de metros, aumentando de los bordes del valle hacia su porción central. Está compuesto por clastos de grano medio a grueso, intercalado con materiales limo-arcillosos y su permeabilidad y transmisividad dependen de la distribución granulométrica y espesor.

Los conglomerados afloran en los lomeríos y terrazas adyacentes al valle, sitio donde se encuentra ubicado el Relleno Sanitario, su expresión superficial es mayor que la de los materiales cuaternarios, alcanzando valores de 250 a 350 m de espesor. La permeabilidad de esta formación depende de su distribución granulométrica y grado de compactación y/o cementación, su capacidad transmisora es inferior a la del material cuaternario, pero debido a su potente espesor almacena la mayor parte de la reserva de agua subterránea.

La tobas riolíticas se encuentran representadas por los macizos montañosos y se extienden por debajo del valle. Las características hidrogeológicas de esta unidad dependen del grado de fracturamiento y en menor proporción de su composición mineralógica. Se puede considerar que esta formación constituye la parte inferior de los acuíferos regionales, mientras que la parte sin fracturamiento limita a los acuíferos y carece de interés para la captación de agua.

La unidad anterior (tobas riolíticas) está limitada tanto horizontal como verticalmente por rocas graníticas prácticamente impermeables, las cuales constituyen el núcleo de las sierras adyacentes, presentando una configuración escalonada debido principalmente a los movimientos tectónicos.

La alimentación del sistema acuífero, se debe a los volúmenes de escurrimiento de las aguas pluviales y su infiltración en las cuencas, tanto en el territorio de Arizona como en el de Sonora, así como por la alimentación profunda de los cuerpos de agua regional en tránsito hacia su descarga.

La recarga principal proviene de la infiltración de lluvia a través de las fracturas del granito, de las rocas volcánicas y del propio material clástico que conforma al acuífero. También contribuyen a la recarga el escurrimiento del Arroyo Los Nogales y de sus afluentes, razón por la cual se considera que el acuífero es vulnerable a la contaminación antropogénica.

## **2.7. Orografía**

En la Figura 6, se aprecia la orografía del municipio de Nogales, inmediatamente salta a la vista la orientación noroeste–sureste de ésta, ya que aquí podemos apreciar los principales ejes serranos (serranías alineadas paralelamente).

Visualizando de oeste a este, estos ejes son:

- a) La secuencia de sierras La Esmeralda – Las Avispas – Sierra Cíbuta y Guacomea, que tiene en su falda oeste pequeños valles y cañadas, las más importantes de las cuales es la de Planchas de Plata, que además la atraviesa y tiene una anchura promedio de 50 metros.
- b) Le siguen al este las sierras de Nogales y el Pinito, que quedan separadas de la secuencia anterior por dos valles: en su extremo norte por el de Los Nogales (anchura promedio de 100 m.) y al sur por el de los Alisis (ancho promedio de 300m.).
- c) Finalmente, en el extremo noreste del municipio se encuentra la falda de la sierra de San Antonio, que a su vez está rodeada por el valle del río Santa Cruz, con una anchura promedio de 300m.

Como principales alturas sobre el nivel del mar, tenemos la cima de la Sierra Guacomea, situada en el centro del límite sur del mismo, en 31°02'33" de latitud y 110°58'41" de longitud y de 2,080 m.s.n.m., mientras que el más bajo se encuentra en el Arroyo Planchas de Plata, cerca de El Potrerito, con 900 m.s.n.m. de altura.

Dentro de la Ciudad de Nogales el punto más bajo se encuentra en la Garita, con 1,177 m.s.n.m.; de allí el terreno va subiendo hacia el sur a lo largo del Arroyo Los Nogales, hasta llegar a 1,200 m.s.n.m. un poco más al norte de la calle Basurto, por la Obregón; los 1,250 m.s.n.m. se alcanza en el Parque Industrial; mientras que en el puente de Lomas, donde la carretera cruza la vía férrea, toca los 1,320 m.s.n.m.

La pendiente promedio del Arroyo Los Nogales es del 1%. Además, un afluente del Arroyo Los Nogales, el de la Colonia Granja, tiene una pendiente cercana al 1.6%, mientras que a lo largo de su cauce, el punto en que confluye con el Arroyo Los Nogales se encuentra en los 1,205 m.s.n.m., la Unidad Deportiva en los 1,230 m.s.n.m. y el represo en los 1,280 m.s.n.m.

Por este rumbo, los Cerros Altos, situados cerca del represo, alcanzan una altura de 1,640 m.s.n.m. y constituyen el punto más alto en inmediaciones de Nogales.

Actualmente, algunas zonas habitadas de la mancha urbana alcanzan los 1,350 m.s.n.m. Estas se encuentran en Las Torres, Nuevo Nogales, San Carlos y por Pueblo Nuevo. (A. Suárez Barnett, 2008)

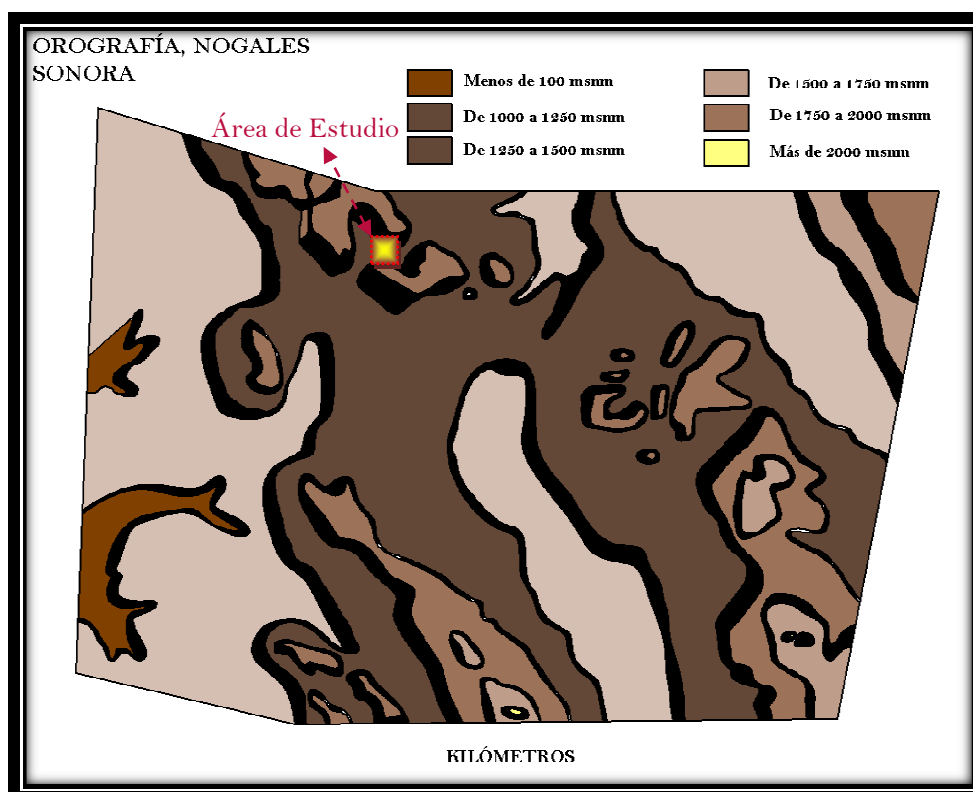


Figura 6. Orografía del Municipio de Nogales.  
(Tomado de A. Suárez Barnett, 2008).

## **CAPITULO 3. HIDROLOGÍA.**

### ***3.1. Hidrología Superficial***

Las principales corrientes superficiales están distribuidas en el nornoroeste, este y sur del estado de Sonora. Los escurrimientos son aprovechados mediante presas que se emplean para el control de avenidas, generación de energía, riego y abrevadero. En la porción noroeste el clima seco y no permite la formación de corrientes perennes, aunque existen varias intermitentes, por esto el agua subterránea es de suma importancia para el desarrollo de las actividades agrícolas. La sobreexplotación y la falta de recarga en los acuíferos de la zona costera están provocando el abatimiento de los mismos; debido a lo anterior en algunos de ellos hay intrusión de agua salada.

Como se observa en la Figura 7, el municipio de Nogales, se encuentra comprendido entre dos regiones hidrológicas: la del Río Colorado y la Sonora Norte, divididas ambas por un parteaguas que va de dirección noroeste-sureste, cruzando al municipio.

#### ***3.1.1. Región Hidrológica Río Colorado***

Abarca los terrenos situados sobre la margen izquierda (Sonora) y derecha (Baja California) del río Colorado, en la parte final de su recorrido. Tiene como límite superior la línea divisoria internacional con los Estados Unidos de América y termina en el Golfo de California. La corriente principal, el río Colorado, inicia en Wyoming, E.U.A., con dirección inicial hacia el sur; su cauce, cerca de Los Algodones, B.C., a San Luis Río Colorado, sirve como límite internacional entre México y el vecino país del norte. A partir de esta zona el río drena hacia el sureste, hasta su desembocadura en el Golfo de California. La extensión de esta región dentro de la entidad, corresponde en su totalidad a la cuenca, Bacanora-Mejorada.

##### ***3.1.1.1. Cuenca Bacanora-Mejorada***

Esta cuenca comprende tres porciones separadas dentro del estado: una en el noreste, cerca de la sierra San Luis; otra en el norte, por Nogales y Naco; y la última en el noroeste, en el límite con Baja California. Representa en la entidad 2.81% del territorio de Sonora. Se ha determinado para la cuenca una precipitación media anual de 301 mm con un coeficiente de escurrimiento de 7.2%.

### **3.1.2. Región Hidrológica Sonora Norte**

Se encuentra toda en la entidad, ocupando casi el noroeste, en una área que comprende del sureste de San Luis Río Colorado a las proximidades de Cananea, y de Punta Chueca (frente a la isla Tiburón) al Golfo de Santa Clara, que representa 30.7 % de la superficie de Sonora; las cuencas que la conforman son:

#### **3.1.2.1. Cuenca Río San Ignacio y Otros**

Su corriente más importante, el río San Ignacio, se origina en el cerro El Tordillo, a una altitud de 1,120 m, con curso inicial hacia el noroeste, que cambia al sur y luego al oeste para desembocar en el Golfo de California. El aprovechamiento de los escurrimientos se lleva a cabo mediante la construcción de pequeños bordos de almacenamiento, los que se utilizan para actividades pecuarias. Ocupa 4.59% de la superficie estatal; la precipitación media anual es de 142 mm con un coeficiente de escurrimiento de 3.6%.

#### **3.1.2.2. Cuenca Río Concepción-Arroyo Cocóspera**

De las cuencas de la región, es la que mayor área drena, 14.25% de superficie estatal. Se tiene una precipitación media anual de 305 mm con un coeficiente de escurrimiento de 1.71%.

Las presas de mayor importancia son: Cuauhtémoc en el río Altar, Comaquito sobre el arroyo Cocóspera; el Plomo en el arroyo del mismo nombre e Ignacio R. Pesqueira, en el arroyo El Yeso. El uso más extendido es agrícola y en menor proporción doméstico, pecuario e industrial.

#### **3.1.2.3. Cuenca Desierto de Altar-Río Bamori**

Esta cuenca comprende la región más árida del país. En la cuenca, además de la parte del Distrito de Riego Río Altar-Pitiquito-Caborca, se localiza casi la mitad del de "Río Colorado". Ocupa una superficie de 11.86% del estado. Se presenta una precipitación media anual de 109 mm con un coeficiente de escurrimiento de 2.3%. El principal uso del agua es: agrícola, doméstico y pecuario.

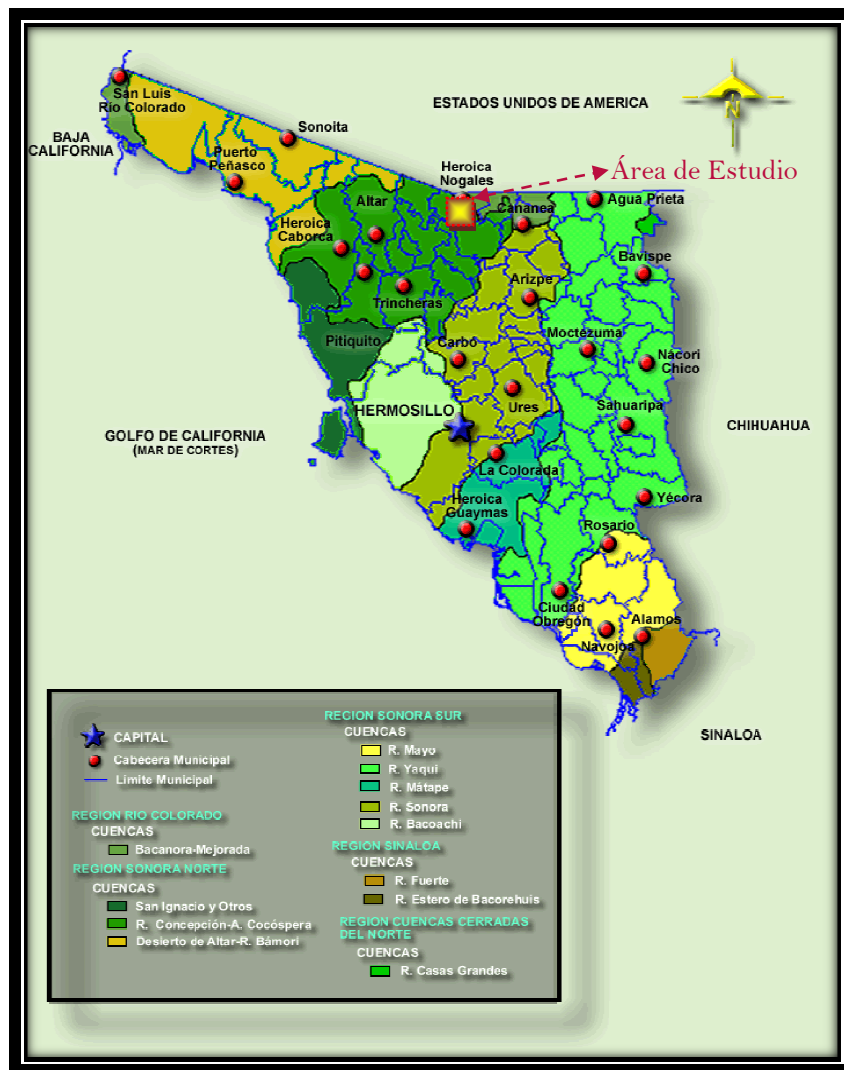


Figura 7. Mapa Hidrológico del Estado de Sonora (INEGI, 2009).

### 3.1.3. Hidrografía.

El marcado declive del suelo del estado no permite a los ríos el almacenamiento de sus aguas ya que todas sus corrientes son torrenciales. Hay cinco cuencas principales formadas por los ríos Magdalena, Sonora, Colorado, Mátape, Yaqui y Mayo. La del Río Magdalena con 23,000 km<sup>2</sup>; la de Sonora con 26,000 km<sup>2</sup>; la de Colorado con 5,923.16 km<sup>2</sup>; la del Mátape con 6,000 km<sup>2</sup>; la de Yaqui con 76,000 km<sup>2</sup> y la de Mayo con 11,000 km<sup>2</sup>.

Como principales ríos del Estado de Sonora, tenemos los siguientes (Figura 8):

- El Río Colorado forma el límite natural entre Sonora y Baja California. Los ríos Yaqui, Mayo y Magdalena, están declarados en jurisdicción federal.
- Río de Sonora. Nace en el Ojo de Agua de Aravayo, situado en las inmediaciones de la Sierra de Cananea, su curso abarca un recorrido de 420 km. De norte a sur pasa por los pueblos de Bacoachi, Chinepo, Arizpe donde recibe la afluencia del riachuelo Bacanuchi-Sinoquipe, Banamiche, Huépac, Aconchi, Baviacora y Suaaui. Continúa por municipio de Ures, pasa el municipio de Hermosillo regando San Luis, Topahue, El Molino. La Galera, El Chino. En las inmediaciones de la capital recibe la afluencia del Río San Miguel.
- Río Magdalena. Recibe también los nombres de Mar, Asunción y Concepción. Tiene un curso de 384 Km nace en las sierras del norte del municipio de Imuris y corre al sur atravesando la Cañada de Imuris, en donde recibe la afluencia del Río Cocóspera que nace en la Sierra de la Mariquillo: continua su curso al suroeste recorriendo los pueblos de Terrenate, San Ignacio, Magdalena, Santa Ana y los ejidos de Son Lorenzo, Santa Marta, Coyotillo y El Claro. Se interna luego en el municipio de Trincheras; al suroeste de la Villa de Altar se le une el Río Altar, que a su vez obtiene la afluencia del Río Seco y riega los pueblos de Sáric, Tubutama, Oquitos y Altar. Sigue por Pitiquito y Caborca toma rumbo al oeste y se pierde en el Golfo de California.
- Río Mátape. Nace cerca de la villa Pesqueira en el municipio de este nombre. Paso por Nácori Grande y Mazatán, después por San José de Pimas, San Miguel y finalmente se pierde en el Golfo de California.
- Río Yaqui. Es el más caudaloso de Sonora y su curso es de 680 Km nace en una cañada al S de Cd. Guerrero en el edo. de Chihuahua, donde se forma de un manantial y varios ojos de agua. Allí se le conoce con el nombre de Papigóchic; después se le incorporan varios arroyos que nacen en la Sierra Madre y al penetrar al estado de Sonora recibe la afluencia del Río Gavilana y del Arroyo Yepachic. Penetra en Sonora con el nombre de Aros y sigue después con la



denominación de Yaquí. Recibe en su curso las aguas de los ríos Mulato, Satachis y Nácóri. El primero nace en el municipio de Mulatos y los otros dos en el municipio de Nácóri Chico. Adelante se le incorpora el río Bavispe que pasa por los pueblos de Huachinera, Báserac, Bavispe, San Miguelito Oputo, Huasaba y Granados; en San Mateo se le une el Río Sahuaripa que toca los pueblos de Güisamopa, Tacupeto, Bámori, Arivechi, Santo Tomás y Sahuaripa. Sigue rumbo al suroeste y muy cerca de Suaquí afluyen a su curso las aguas del Río Moctezuma. Continúa por Soyopa, San Antonio de la Huerta, Tonichi y Onavas, donde su lecho es de tan suave pendiente que presenta una línea de navegación fluvial para lanchas de poco calado en una distancia de 60 Km cerca de La Dura, municipio de Rosario, toma como afluente el Río Chico que cruza los pueblos de Nuri, Movas y Chico. Paso después al municipio de Guaymas, toca Cumiiirpa, donde recibe las corrientes del Río Tecórita y sigue por Buenavista. Finalmente desemboca en el Golfo de California en un punto llamado Estero Los Algodones. La cuenca del Río Yaqui ocupa el quinto lugar entre las mayores del país.

- Río Mayo. Nace en las Sierras de Ocampo en el estado de Chihuahua. Su curso es de 530 Km corre de este a suroeste y toca los municipios de Alamos, Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, los pueblos de Mocojuachi, Conicárit, Camoa, Tesia, Navojoa, Cuirímpe, Etchojoa y Huatabampo y los ejidos de Santa Bárbara, Tres Hermanos y Santa Rosa. Recibe en Conicárit la afluencia del Río Cedros. Desemboca en el Golfo de California cerca del Estero de Santo Bárbara. Río Colorado. Nace en las Montañas Rocallosas. E.U.A. y solo en su curso inferior pertenece a México, formando el límite natural entre Sonora y Baja California. En esta parte su anchura es de 200 m. y de 800 en las grandes avenidas. Lagunas. En Sonora existen un gran número de lagunas entre las que destacan las de Juárez, Prizta, Cochuirimpa y Bayajari. (INEGI, 2009)

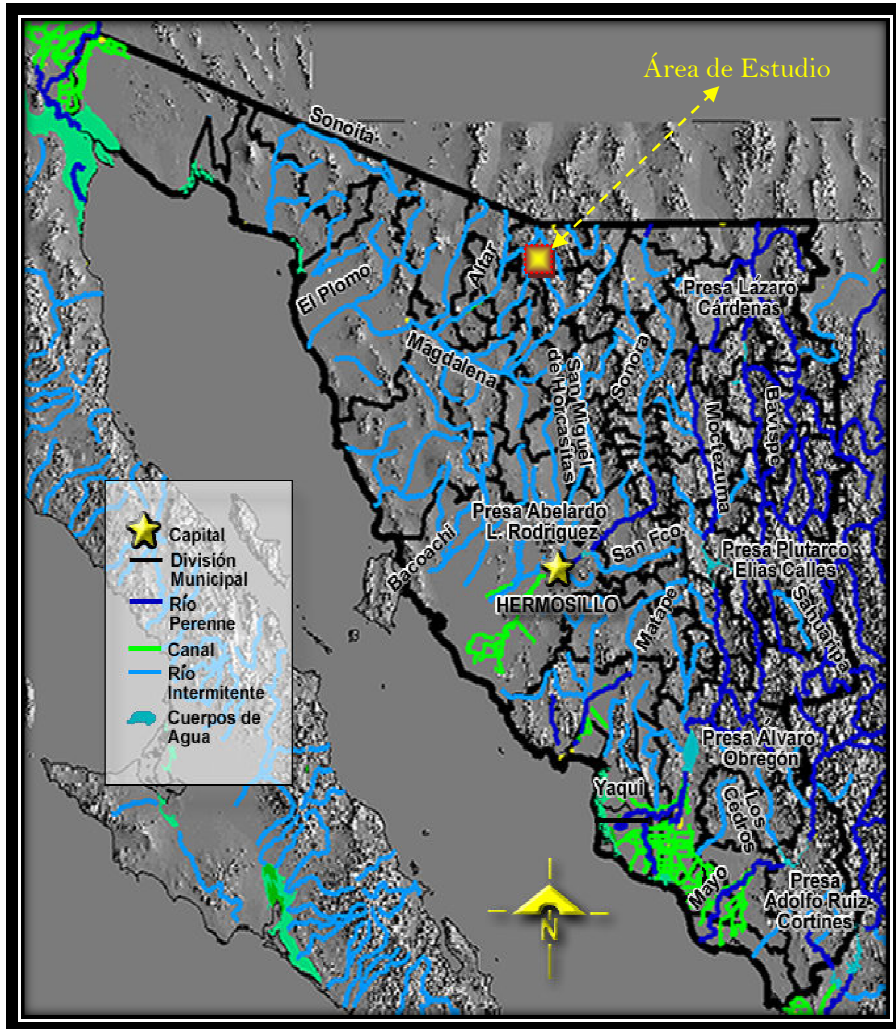


Figura 8. Mapa Hidrográfico del Estado de Sonora (INEGI, 2009)

### **3.2. Hidrología Subterránea**

La falta de agua en el estado, ha generado la instalación de obras hidráulicas, así como la extracción de este recurso de los mantos acuíferos. Del volumen extraído 93% se utiliza para agricultura, 4.8% en doméstico y comercial, 1.5% en la industria y 0.7% en pecuario, recreativo, etcétera.

#### **3.2.1. Zonas de Explotación**

De las 41 zonas de explotación registradas en Sonora por la Comisión del Agua (CNA), las más importantes son:

Zona Aguacaliente	Zona Río Moctezuma
Zona Agua Prieta	Zona Río Sonora
Zona Caborca	Zona Río Yaqui
Zona Costa de Hermosillo	Zona Sahuaral
Zona Fuerte-Mayo	Zona San Ignacio
Zona Guaymas	Zona Sonoita
Zona Las Guásimas	Zona Mesa Arenosa
Zona Río Mayo	

#### **3.2.2. Características Geohidrológicas de las Rocas.**

Estas unidades, constituidas por uno o varios tipos de material, han sido definidas por sus características físicas (porosidad, fracturamiento, disolución y estructura o grado de cementación) y geohidrológicas (permeabilidad, transmisibilidad, etc.) de las rocas y materiales granulares, con el fin de determinar el funcionamiento de las mismas, como acuíferos, clasificándolas en: Unidades de Material Consolidado con Posibilidades Altas, Medias y Bajas; y Unidades de Material No Consolidado con Posibilidades Altas, Medias y Bajas. (INEGI, 2009)

### **3.2.2.1. Regional**

#### *Unidad de Material Consolidado con Posibilidades Altas*

La integran todas aquellas rocas que, por su fracturamiento intenso y alta porosidad intercomunicada, permiten el flujo del agua. Representativos de esta unidad es el basalto que integra la sierra El Pinacate, ubicada al noroeste, y la asociación de arenisca-conglomerado que aflora al este de Navojoa, entre otros.

#### *Unidad de Material Consolidado con Posibilidades Medias*

Esta unidad la constituyen rocas que tienen fracturamiento y porosidad moderados; tal es el caso de: andesita, basalto y conglomerado del Terciario localizados al norte de Bacoachi, al este de Cumuripa y en forma más extensa, entre las sierras El Encinal y San Luis, al este de la presa Alvaro Obregón.

#### *Unidad de Material Consolidado con Posibilidades Bajas*

Se agrupan en ella las rocas metamórficas (esquisto y gneis), sedimentarias (caliza y conglomerado) y extrusivas ácidas (riolita y tobas) que por su origen, escaso fracturamiento y baja porosidad limitan en alto grado la circulación del agua. Dichas rocas se distribuyen en las llanuras, pero dominan sobre todo en los sistemas serranos, en particular en la Sierra Madre Occidental.

#### *Unidad de Material No Consolidado con Posibilidades Altas*

Pertencen a esta unidad los depósitos constituidos por grava y arena, con buena selección y porosidad intercomunicada. Esta unidad es muy extensa en el occidente del estado, comprende, por citar algunos lugares, la mesa arenosa de San Luis Río Colorado, el Desierto de Altar y las llanuras aluviales situadas al oeste de Hermosillo.

#### *Unidad de Material No Consolidado con Posibilidades Medias*

Dentro de esta unidad están clasificados aquellos depósitos heterogéneos constituidos por grava, arena, limo y arcilla, con mediana selección y porosidad. Se localizan en el norte y centro del territorio sonorense, en áreas intermontanas y de la llanura costera, en las que se ubican Bacoachi, Bavispe, Sahuaripa, Benjamín Hill, El Desemboque y varios poblados más.

#### *Unidad de Material No Consolidado con Posibilidades Bajas*

Está integrada por depósitos de material con granulometría variada y alto porcentaje de arcilla y limo que los hacen casi impermeables. La extensión que comprende es poca, se localiza en dos zonas cercanas entre sí: la primera al este y sur del cerro Chihuahuilla y la segunda al sur de la localidad Agua Buena. En esta última el conglomerado está formado por grava mal seleccionada empacada en una matriz arcillo-limosa.

### **3.2.2.2. Local**

#### ***Cámbrico Medio - Superior.***

Las rocas de edad Cambrica que aflora en la región consisten de caliza, caliza oolítica, arenisca y limolita.

CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS: Unidades de material consolidado con posibilidades altas a medias, siendo estas rocas permeables.

#### ***Devónico - Pérmico.***

Este periodo consiste de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado y lodolita.

CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS: Unidades de material consolidado y no consolidado con posibilidades altas a medias, siendo estas rocas permeables.

### **Jurásico Inferior - Medio**

Las rocas del Jurásico inferior-medio están relacionadas a la actividad de un arco magmático que estuvo activo durante el Jurásico. Consiste en derrames de composición riolítica, arenisca y toba riolítica, se presentan silicificadas y muy basculadas; pero hacia la cima el contacto es discordante con las rocas clásticas del Jurásico superior-Cretácico inferior que las cubren. En los alrededores del poblado Saric afloran esquistos, metariolita metatoba, metaconglomerado, metarenisca y gneiss con metamorfismo en facies de esquistos verdes.

CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS: Unidades de material consolidado con posibilidades bajas, siendo estas rocas impermeables.

### **Jurásico Superior - Cretácico Inferior.**

El Jurásico superior-Cretácico inferior está representado por rocas sedimentarias constituidas por arenisca, conglomerado y limolita. En la sierra San José aflora una secuencia clástica-carbonatada constituida de caliza, arenisca, limolita y lutita. Cubre discordantemente a un intrusivo granítico proterozoico.

CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS: Unidades de material consolidado y no consolidado con posibilidades medias a bajas, siendo estas rocas semipermeables.

### **Cretácico Superior**

El Cretácico superior vulcanosedimentario está constituido de arenisca, lutita, toba riolítica, limolita, conglomerado y ocasionalmente andesita. Las rocas volcánicas de composición intermedia (andesita, toba andesítica, aglomerado y arenisca tobácea), se encuentran depositadas discordantemente sobre las unidades más antiguas.

CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS: Unidades de material consolidado y no consolidado con posibilidades medias a bajas, siendo estas rocas semipermeables.

## **Terciario**

El Terciario Oligoceno volcánico consiste en afloramientos aislados de rocas de composición traquítica-andesítica, donde se encuentran cubiertas por unidades sedimentarias y volcánicas más jóvenes; toba riolítica, riolita, toba lítica, toba y brecha de composición dacítica. El Mioceno está representado por unidades sedimentarias que en ocasiones presentan intercalaciones de basalto. Cubriendo a las unidades anteriores y aflorando en toda el área se tienen rocas constituidas por toba riolítica, riolita y toba lítica de edad Mioceno. El Mioceno-Plioceno está constituido por depósitos de conglomerados poco consolidados y con intercalaciones de basalto. Cubriendo a rocas más antiguas se tienen conglomerados no consolidados del Pleistoceno, ampliamente distribuidos, rellenando valles, mientras que el aluvión de planicie constituido por arena y limo se encuentra muy extendido en el extremo occidental.

**CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS:** Unidades de material consolidado y no consolidado con posibilidades altas, siendo estas rocas permeables.

## **Cuaternario**

Los aluviones del Cuaternario están cubriendo los cauces de los ríos y arroyos principales.

**CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS:** Unidades de material no consolidado con posibilidades altas, siendo estas rocas permeables.

### **3.2.3. Tipo y Estructura del Acuífero.**

El acuífero del área de estudio se compone por tres unidades geológicas aluvión reciente, conglomerado y tobas riolíticas, hidráulicamente interconectadas, que funcionan como una sola unidad geohidrológica.

En el sitio estudiado, los conglomerados se encuentran a nivel superficial, aflorando en los lomeríos y terrazas adyacentes a los valles; su extensión superficial es mayor que la del aluvión y su espesor alcanza valores de 250 a 350m, en las porciones centrales de la cuenca. La permeabilidad de esta unidad varía en función de su distribución granulométrica y grado de compactación o cementación; en general su capacidad

transmisora es menor que la del aluvión, pero debido a sus enormes dimensiones, almacena la mayor parte de la reserva de agua subterránea.

Las tobas riolíticas se exponen en los macizos montañosos y se extienden bajo el conglomerado. Las características de esta unidad dependen de su composición y grado de fracturamiento.

A su vez, las tobas riolíticas están limitadas inferior y lateralmente por rocas graníticas, prácticamente impermeables, las cuales afloran en las sierras adyacentes, presentando una configuración escalonada a causa del tectónismo y constituyen el basamento de la cuenca.

Debido a la constitución que presenta el acuífero este funciona como *semiconfinado* donde el confinamiento superior está constituido por conglomerados del terciario y el confinamiento inferior está constituido por las tobas riolíticas sin fracturamiento.

#### **3.2.4. Profundidad del Nivel Estático y Flujo del Agua Subterránea**

De información obtenida de forma general, la profundidad de los niveles estáticos en el municipio de Nogales es variable: de 5 a 30 m en las inmediaciones de la franja fronteriza y en el centro permanece entre los 60 y 140 m, mientras que en el límite sur, sitio donde está ubicado el Relleno Sanitario fluctúa entre 100 a 150 m. (CNA; "Estudio de Simulación Hidrodinámica, 1999)

*Un estudio geohidrológico realizado en noviembre de 1995 por CNA,* registra que en nuestro sitio de interés, las curvas de igual elevación del nivel estático, que van desde 1190 hasta 1150 m.s.n.m., presentando en nuestra región de estudio un valor elevación de 1175 m.s.n.m., por tanto tenemos en el sitio estudiado una profundidad del nivel estático alrededor de los 145 m (Figura 9).

Los datos pizométricos no indican tendencias descendentes de los niveles de agua subterránea, que pudieran atribuirse al bombeo de pozos.

Sin embargo es probable que la operación de las captaciones del sistema municipal hayan provocado abatimientos dentro de sus áreas de influencia, las cuales no son claramente identificables en los datos disponibles, por que la operación continua de los pozos enmascara los niveles estáticos reales.



La configuración de los niveles estáticos del agua subterránea correspondiente al mes de noviembre de 1995, permite deducir las direcciones principales del flujo subterráneo.

En la zona estudiada, la dirección principal de flujo subterráneo es de Norte a Sur; la elevación de los niveles de agua varía entre 1190 y 1000 m.s.n.m. y el gradiente medio de flujo es de 3.5 por millar.

Es por lo que se supone que el agua circula de los flancos montañosos hacia los valles, donde el relleno reciente de mayor permeabilidad funciona como un dren subterráneo natural.

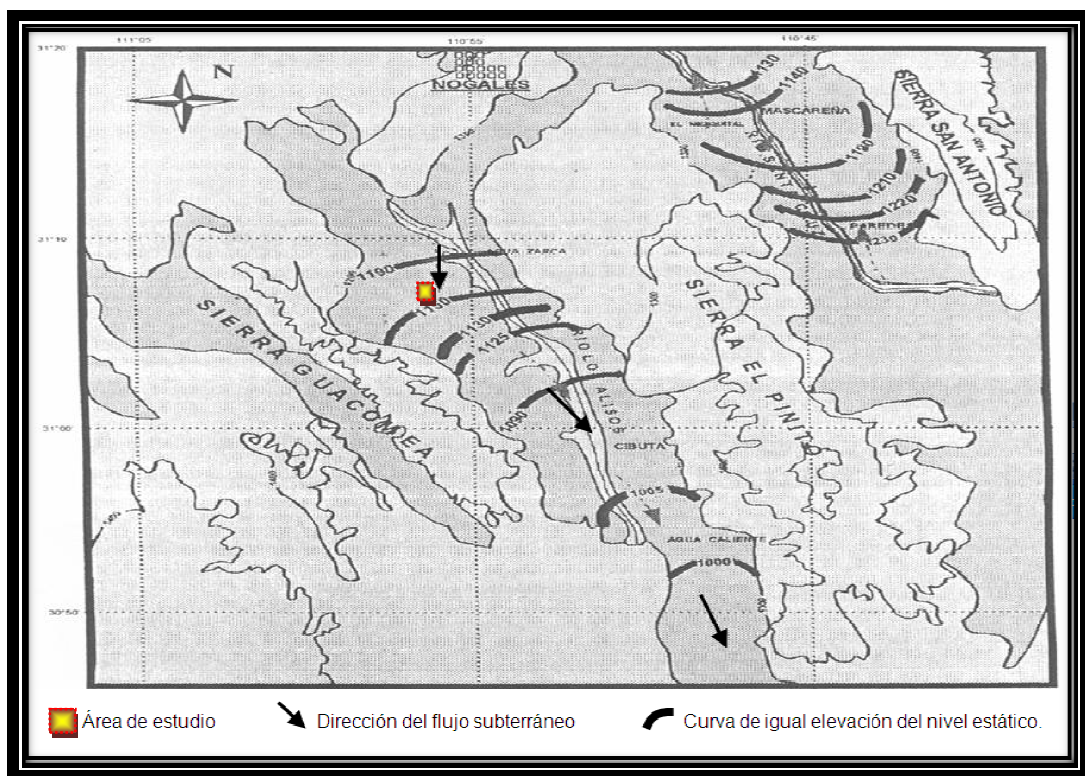


Figura 9. Mapa de la Profundidad Nivel Estático de Agua y Dirección del Flujo Subterráneo. (CNA, 1995)

### 3.2.5. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento

Para la interpretación de las pruebas efectuadas se utilizó la metodología propuesta por Papadópulos y Cooper (1967), aplicada en pozos de gran diámetro. Para este fin se empleó papel logarítmico tanto para graficar los datos de campo como para las curvas

tipo de Papadópulos. Una vez graficada la información se superponen las curvas y se obtienen los parámetros necesarios para calcular la transiividad y conocer los sistemas de flujo pozo-acuífero.

Otro aspecto a considerar en el tratamiento de las pruebas, es el inicio de la recuperación, ya que no solo tiene que fluir agua al pozo para permitir el ascenso de los niveles de acuerdo con el del acuífero, sino que también tiene que llenarse la parte del pozo vaciada por las pérdidas de carga. Ello produce una "anomalía de recuperación" desde el primer momento, la cual puede conducir a errores de interpretación, en esta etapa. Dada la anterior premisa, la interpretación solo se llevó a efecto en la etapa de abatimiento.

Los valores de transmisividad resultantes de la interpretación de 20 pruebas de bombeo, varían dentro de un rango de  $1.23E^{-3}$  a  $7.59E^{-3}$   $m^2 / s$ , lo cual refleja la heterogeneidad en el tamaño de los granos que conforman a los clásticos, así como los diferentes espesores que se presentan en el acuífero.

Por lo que respecta a los caudales específicos ( $Q_e$ ), estos oscilan dentro de un intervalo que va de 7.56 (lps/m) a 31.61 (lps/m), reflejando en realidad, un valor poco representativo del acuífero, ya que los caudales extraídos son altos, comparativamente con los descensos presentados que son pequeños.

Lo anterior trae como resultado caudales específicos considerables, que tienen su explicación en numerosos ensayos realizados por C.E. Jacob, para determinar el exponente ( $n$ ) de la expresión general utilizada en la cuantificación de los abatimientos totales ( $aT$ ) en un pozo, y de los cuales se desprende lo siguiente:

$$aT = BQ + CQ \dots\dots\dots 3.2.5.1$$

$n = 2$   $aT = BQ + CQ^2 \dots\dots\dots 3.2.5.2$

y basándonos en que:

$$Q_e = \frac{Q}{aT} \dots\dots\dots 3.2.5.3$$

se obtiene:

$$Q_e = \frac{1}{B} + CQ \dots\dots\dots 3.2.5.4$$

Donde:

B: Coeficiente que depende de las características del acuífero y del tiempo de bombeo.

C: Coeficiente de pérdida de pozo.

Q: Caudal de extracción.

De lo anterior se destaca que  $Q_e$  no es constante sino que varía inversamente con el gasto (Q) y con el tiempo de bombeo (B). Además, se infiere que un pozo tiene mayor capacidad específica cuando extrae un caudal pequeño, que cuando extrae uno mayor.

Por otra parte un sistema analizado por Theis y Jacob relaciona  $Q_e$  y T (transmisividad) de manera proporcional, en donde el valor del coeficiente de proporcionalidad es próximo a la unidad, por tanto para fines de estimación la relación se expresa de la siguiente manera:

$$Q_e = T$$

aunque se debe considerar como preliminar y con cierta reserva ya que el sistema analizado no contempla las pérdidas en el pozo.

Finalmente partiendo de la definición de permeabilidad, se tiene que:

$$K = \frac{T}{B} \quad (m/s)$$

Donde

T: transmisividad ( $m^2 / s$ )

B: espesor del acuífero (m)

Por tanto, la permeabilidad media del acuífero oscila en un intervalo que va de  $6.15 \cdot 10^{-5}$  a  $3.8 \cdot 10^{-4}$  m/s (5.3 a 32.8 m/día), correspondiente a materiales cuya clasificación geológica los ubica como depósitos de grano medio uniforme, con permeabilidad alta.

La utilidad práctica del método de Papadópulos y Cooper es buena para la determinación del valor de las transmisividades, pero su alcance para estimar el valor del coeficiente de

almacenamiento (S) es limitado, por lo que se debe tomar con reserva (Narasimhan,1968).

De acuerdo con la granulometría de los clásticos que constituyen al acuífero, en el que predominan materiales de grano medio a grueso, le corresponden valores de porosidad eficaz (n) que van de 0.15 a 0.20.

### **3.3. Contaminación del Agua en el Sitio.**

El hecho de que Nogales sea una cañada agrava cualquier contaminación por derrames líquidos que ocurra aquí, ya que estos quedarán confinados dentro de la misma, migrando arroyo abajo y contaminando el subsuelo del Arroyo Los Nogales en toda su extensión.

Un muestreo sobre calidad del agua del arroyo Los Nogales realizado en 1988 reveló que ya entonces que tanto las aguas superficiales como los sedimentos cercanos al parque industrial mostraban altos niveles de arsénico; en otra toma pública de varios barrios sin servicio de agua se encontraron niveles de tricloro etileno (TCE) 20 % por encima de los estándares de agua potable de los EEUU, además de 1-1-1 tricloroetano (TCEA) y 1-1 dicloroetano muy cercanos al máximo permisible. Todos estos, compuestos de uso común en las maquiladoras. (A. Suarez Barnett, 2008)

Otro estudio, realizado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas, que fue hecho público en julio de 1998, indica que en 4 de 7 pozos analizados en el arroyo Los Nogales del lado sonorense se encontró contaminación biológica.

Para el caso de nuestra zona de estudio los materiales que conforman el suelo y subsuelo del relleno sanitario y las características litológicas estructurales presuponen los siguientes flujos subterráneos de los lixiviados:

- 1) A través del plano de contacto entre el terreno natural y la basura en donde se da una posible dirección de flujo vertical.
- 2) A través de la superficie del terreno (conglomerados), siguiendo las escorrentías superficiales, hasta llegar a un punto de captación o infiltración.
- 3) A través del fracturamiento escaso que existe en todos los paquetes rocosos, también se desarrolla una porosidad secundaria.

Para el primer caso, se puede suponer que el área de influencia principal de los lixiviados se concentra debajo del vertedero en el subsuelo permeable del sitio.

Para el segundo caso los lixiviados deben seguir un flujo descendente, a través de la superficie permeable del terreno, siguiendo la topografía del lugar.

Con base en lo anteriormente expuesto se deduce que el flujo de los lixiviados en cualquiera de sus formas, no es adecuadamente captado y tratado en una planta de tratamiento, sino al contrario su infiltración al subsuelo se facilita a través propio subsuelo que presenta la característica de ser una zona permeable.

## **CAPITULO 4. FUNDAMENTOS DEL METODO DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA**

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos, donde la tierra es estimulada por una fuente controlada y son medidos los potenciales artificiales que resultan fue hecha por Schlumberger en 1912. En esa época él introdujo los métodos de líneas equipotenciales de corriente directa (Ward, 1980).

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aun lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger).

En los últimos 20 años han aparecido nuevos métodos geofísicos de alta resolución bien adaptados para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral de las capas del subsuelo. Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectrónicos clásicos, como el Sondeo Eléctrico Vertical.

### **4.1. Método Geoelectrónico**

La principal finalidad de los métodos geoelectrónicos es investigar potenciales eléctricos naturales, empleando un campo eléctrico artificial creado desde la superficie mediante el paso de la corriente a través del subsuelo a manera de obtener como respuesta determinadas propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales.

En el presente estudio emplearemos el método conductivo, cuya finalidad es determinar la distribución espacial de la resistividad en el subsuelo realizando mediciones sobre la superficie. Esto se logra al introducir una corriente eléctrica continua en el terreno por un par de electrodos y posteriormente medir la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. La relación de estas dos magnitudes es lo que se conoce como resistividad aparente.

Generalmente se emplean como métodos de reconocimiento y de detalle en una gran diversidad de investigaciones, sobre todo en prospección de aguas subterráneas. Esta técnica comprende una gran variedad de técnicas, algunas de ellas permiten definir los límites de un acuífero, el nivel del agua en los acuíferos, la presencia de agua salada y la cartografía de las unidades litológicas. Destaca el bajo precio de los equipos empleados y su fácil implementación.

#### **4.1.1. Empleo del Método Geoeléctrico**

Para la elaboración de esta investigación involucramos la inyección de corriente a partir de electrodos ubicados en la superficie del terreno, conocido generalmente como método de corriente directa (DC).

Este método geoeléctrico de corriente directa nos permitirá el reconocimiento del subsuelo a partir del estudio de la resistividad eléctrica de las formaciones que lo constituyen. Debemos de tener en cuenta algunos factores que influyen sobre el valor de la resistividad obtenido, siendo algunos de ellos la temperatura, la porosidad de la roca, la saturación de agua, entre otras.

#### **4.2. Principios Básicos.**

##### ***4.2.1. Carga Eléctrica. Campo Eléctrico***

Una carga eléctrica (positiva o negativa) genera a su alrededor un campo eléctrico que atrae a otras cargas de signo contrario y repele a las cargas de su mismo signo (Figura 10). La fuerza con que el campo repele o atrae una carga se llama Intensidad de campo.

Si existen varias cargas eléctricas, la fuerza con que una carga que es atraída o repelida se obtendrá sumando los vectores debidos a cada uno de los campos existentes.

La unidad de carga eléctrica es el Coulomb.

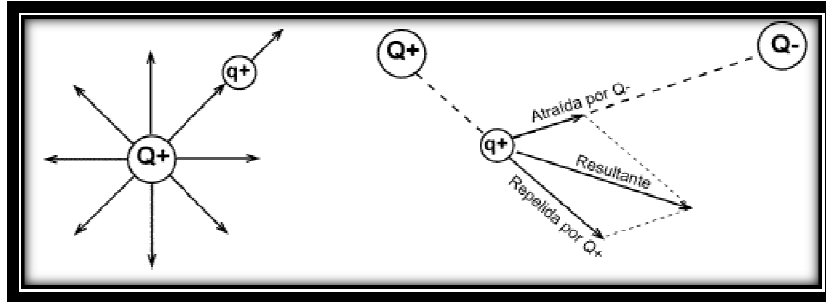


Figura 10. Carga Eléctrica.

#### **4.2.2. Potencial Eléctrico, Diferencia de Potencial**

Potencial de un campo eléctrico en un punto es el trabajo que realiza el campo para repeler una carga de 1 Coulomb hasta el infinito (o el que tendríamos que realizar para llevarla desde el infinito hasta ese punto contra las fuerzas del campo).

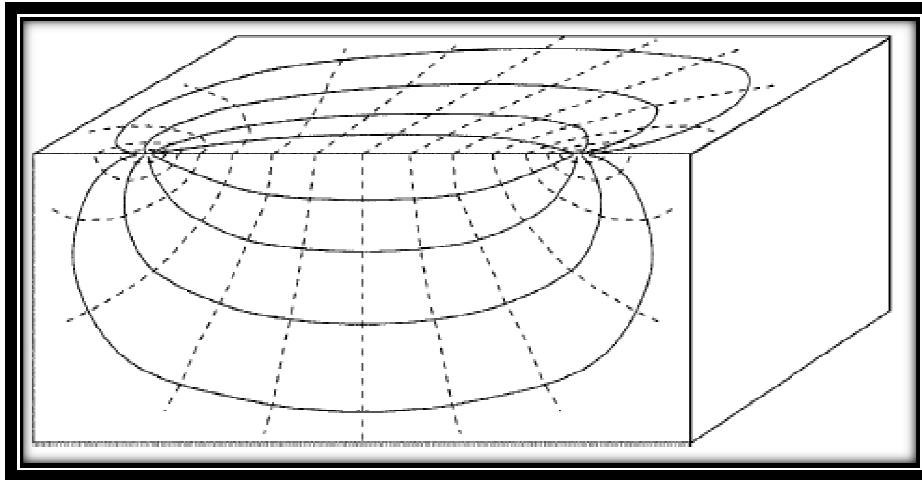
Diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico es el trabajo que hay que realizar para mover una carga de 1 Coulomb de un punto a otro contra las fuerzas del campo (o el trabajo que hace el campo para mover una carga de un punto a otro) (Sánchez San Román. 2009).

Unidad: Volt. Entre dos puntos de un campo eléctrico hay una diferencia de potencial de 1 Volt cuando hay que efectuar un trabajo de 1 Joule para mover 1 Coulomb de un punto a otro (o el trabajo que efectúa el campo para mover dicha carga).

#### **4.2.3. Superficies Equipotenciales**

Son el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial. Aunque se trata de superficies tridimensionales, cuando hacemos una representación en un papel (simplificamos la realidad tridimensional a las dos dimensiones del dibujo), la traza de la superficie equipotencial sobre el papel es lo que llamamos línea equipotencial.





**Figura 11. Campo Eléctrico Tridimensional.**

En la Figura 11 se aprecia que las líneas de fuerza (intensidad del campo) y las líneas equipotenciales son perpendiculares, como en cualquier red de flujo; este campo fue creado por dos cargas iguales y de signo contrario. Similar a éste será el campo generado al realizar un sondeo eléctrico

#### **4.2.4. Flujo Eléctrico: Intensidad**

Si existen cargas eléctricas libres en un campo eléctrico, se moverán empujadas por las fuerzas del campo. La medida de este flujo de cargas eléctricas es la intensidad.

Unidad: Amper. Se dice que por una sección está circulando una intensidad de un Amper cuando está pasando un Coulomb por segundo.

#### **4.2.5. Resistencia Eléctrica. Resistividad. Ley de Ohm**

Experimentalmente se demuestra que la intensidad de corriente que atraviesa un cuerpo por unidad de sección es linealmente proporcional al gradiente del potencial ( $\Delta V / \Delta l$ ). Por tanto, para una sección cualquiera, será:

$$I = C \cdot \Delta V / \Delta l \quad \text{---.....4.3.5.1}$$

Donde la constante de proporcionalidad, C, es la *Conductividad* del material.

Por otra parte, la *Resistencia* ( $R$ ) que opone un cuerpo al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la sección. La constante de proporcionalidad lineal  $\rho$  (ro) es la resistividad, un parámetro característico de cada material.

$$R = \rho * \frac{\text{longitud}}{\text{Sección}} \dots\dots\dots 4.3.5.2$$

Como la *Conductividad* ( $C$ ) es el inverso de la *resistividad* ( $\rho$ ):

$$R = \frac{1}{C} * \frac{\Delta l}{\text{Sección}} \dots\dots\dots 4.3.5.3$$

Sustituyendo la parte derecha de (4.3.5.3) en (4.3.5.1), obtenemos:

$$\text{Intensidad} = \frac{\Delta V}{R} \dots\dots\dots 4.3.5.4$$

Unidad de resistencia: ohm ( $\Omega$ ). A partir de (4.3.5.2) obtenemos las unidades de  $\rho$ , que son  $\Omega$ -m (ohm-metro).

### 4.3. Concepto de Resistividad Aparente

Un semiespacio homogéneo de resistividad  $\rho$  rara vez se da en la naturaleza, ya que el subsuelo no consta de capas homogéneas, y que la homogeneidad lateral es difícil de esperar, por lo tanto en la prospección geofísica se trabaja bajo el concepto de resistividad aparente  $\rho_a$ .

Definimos a la resistividad aparente en un semiespacio homogéneo con heterogeneidades donde las lecturas cambiaran de una posición a otra obteniendo una  $\rho$  diferente a la del semiespacio homogéneo. Esta variable no es el promedio de los valores de  $\rho$  obtenidos del subsuelo, sino el valor de medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo de electrodos, y es función del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la  $\rho$ . Es decir, la resistividad de un terreno imaginario, homogéneo e isótropo, equivalente al terreno real heterogéneo (Sánchez San Román. 2009).

#### **4.3.1. Resistividad de los Materiales Naturales**

La resistividad en los materiales naturales varía desde  $10^{-8}$  en los metales nativos hasta  $10^{15}$  en micas (perpendicularmente a la foliación).

Los valores de la resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad).

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores altos de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que poseen, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno. Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad. Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variabilidad.

En general, en el campo encontraremos valores de este orden:

<b>Material</b>	<b>Resistencia nominal (<math>\Omega</math> - m)</b>
<b>Suelo(40%arcilla)</b>	8
<b>Suelo (20%arcilla )</b>	33
<b>Suelo superior</b>	250-1700
<b>Arcilla de canto rodado</b>	15-35
<b>Arcilla (muy seca )</b>	50-150
<b>Carbón medido de arcilla</b>	50
<b>Carbón medio medido</b>	>100
<b>Tiza</b>	50-150
<b>Coque</b>	0.2-8
<b>Grava (seca)</b>	1400
<b>Grava (saturada)</b>	100

<b>Arenas cuaternarias recientes</b>	50 a 100
<b>Ceniza</b>	4
<b>Escombros de mina de carbón</b>	10_20
<b>Cenizas de combustible pulverizado</b>	50-100
<b>Laterita</b>	800-1500
<b>Suelo laterítico</b>	120-750
<b>Suelo arenoso</b>	80-1050
<b>Arcilla de arena /arena arcillosa</b>	30-215
<b>Arena y grava</b>	30-225
<b>Terraplén no saturada</b>	30-100
<b>Agua ácida turbia</b>	15-30
<b>Agua ácida de mina</b>	100
<b>Salida de la precipitación</b>	20
<b>Salida de terraplén</b>	20-100
<b>Glaciar (temperatura)</b>	$2 \cdot 10^6 - 1.2 \cdot 10^8$
<b>Glaciar (polar)</b>	$5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^{5*}$
<b>Roca salada</b>	$3 \cdot 10 - 10^{13}$
<b>Granito</b>	$3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^6$
<b>Granito (intemperizado)</b>	$3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2$
<b>Sienita</b>	$10^2 - 10^6$
<b>Diorita</b>	$10^4 - 10^5$
<b>Grabo</b>	$10^3 - 10^6$

<b>Basalto</b>	10-1.3*10 <sup>7</sup>
<b>Esquistos (calcáreo y micas )</b>	20-10 <sup>4</sup>
<b>Esquisto (grafito)</b>	10-10 <sup>2</sup>
<b>Pizarra</b>	6*10 <sup>2</sup> -4*10 <sup>7</sup>
<b>Mármol</b>	10 <sup>2</sup> -2.5*10 <sup>5</sup>
<b>Pizarras consolidadas</b>	20-2*10 <sup>3</sup>
<b>Conglomerados</b>	2*10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
<b>Limonitas</b>	5*10-10 <sup>9</sup>
<b>Dolomitas</b>	3.5*10 <sup>2</sup> -5*10 <sup>3</sup>
<b>Margas</b>	3-7*10
<b>Arcillas</b>	1-10 <sup>2</sup>
<b>Aluvión y arenas</b>	10-8*10 <sup>2</sup>
<b>Arenisca</b>	100-400

**Tabla 5. Relación de Resistividades Eléctricas en Ohm-m (KELLER, 1966 y TELFORD, 1996).**

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aún valores más bajos de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

Los metales, tal como hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de 1 Ohm-m con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos, típicamente tienen valores muy altos de resistividad

En rocas compactas (en general las que deben su permeabilidad a la posible fisuración) buscaremos las resistividades más bajas, que indican mayor fracturación y/o alteración.

En este caso también puede que las zonas o niveles de menor conductividad tampoco sean permeables si los planos de fracturación han sido tapados por arcillas de alteración.

En una región determinada, la experiencia nos indicará qué valores concretos de resistividad presenta cada una de las formaciones. En otras ocasiones, estos valores pueden obtenerse de digrafías o realizando Sondeos Eléctricos en el mismo punto donde exista una perforación de la que conozcamos la columna litológica ("SEV paramétricos").

#### 4.4. Fundamentos de la Teoría Básica De Resistividad.

Considerando un flujo continuo de corriente en un medio isotrópico y homogéneo (este análisis aplica también a corrientes alternas (AC) con frecuencias muy bajas), donde por lo general las propiedades magnéticas pueden ser ignoradas, entonces las ecuaciones de Maxwell se reducen a:

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{1}{\epsilon_0} * q \dots\dots\dots 4.4.1$$

$$\nabla \times \bar{E} = 0 \dots\dots\dots 4.4.2$$

Donde  $\bar{E}$  es el vector de campo eléctrico en V/m,  $\epsilon_0$  es la permitividad en el espacio libre ( $\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m) y q es la densidad de carga en C/m<sup>3</sup>.

Las técnicas geofísicas generalmente tienen que repartirse en distribuciones 3D de las propiedades físicas. Por lo tanto las siguientes derivaciones son dadas en las tres dimensiones espaciales x, y y z.

Aunque las ecuaciones sólo son aplicables para el flujo de corriente continua, ellas pueden ser usadas para representar los efectos de corrientes alternas (AC) de bajas frecuencias, tales que las corrientes de desplazamiento y los efectos de inducción puedan ser despreciados. El campo electrostático puede ser descrito por el gradiente del potencial eléctrico U:

$$\bar{E} = - \nabla U \dots\dots\dots 4.4.3$$

Combinando las ecuaciones 4.4.1 y 4.4.2, obtenemos la ecuación fundamental de Poisson para campos electrostáticos:

$$\nabla^2 U (x, y, z) = -\frac{1}{\epsilon_0} * q(x, y, z) \dots\dots\dots 4.4.4$$

La ecuación de continuidad para un punto en un espacio 3D definido por la función delta de Dirac es:

$$\nabla \cdot \bar{j}(x, y, z) = -\frac{\partial q(x, y, z, t)}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \dots \dots \dots 4.4.5$$

Donde  $\bar{j}$  es el vector densidad de corriente y  $t$  es el tiempo. Junto con la ecuación 4.4.3 y la ley de Ohm:

$$\bar{j} = \sigma \cdot \bar{E} = \frac{\bar{E}}{\rho} \dots \dots \dots 4.4.6$$

La ecuación 4.4.5 puede ser acomodada de la siguiente forma,

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla U(x, y, z)] = \frac{\delta q(x, y, z, t)}{\delta t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \dots \dots \dots 4.4.7$$

Donde,  $x_s$ ,  $y_s$  y  $z_s$ , define el punto de origen de la carga de prueba. El término origen en la ecuación 4.4.7 puede ser reescrita en una forma más práctica considerando el volumen elemental  $\Delta U$  sobre una carga introducida es:

$$\frac{\delta q(x, y, z, t)}{\delta t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) = \frac{I}{\Delta V} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \dots \dots \dots 4.4.8$$

Donde,  $I$  es la corriente dada por el punto de origen, la cual es una buena aproximación de situaciones de campo reales, donde usualmente se usa una barra de metal para inyectar la corriente. Sustituyendo la ecuación 4.4.8 en la 4.4.7 obtenemos una ecuación de diferencia parcial para el potencial eléctrico en un medio 3D isotrópico no uniforme generado por una carga puntual:

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla U(x, y, z)] = \frac{I}{\Delta V} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \dots \dots \dots 4.4.9$$

La solución numérica de esta ecuación puede ser utilizada para modelar la distribución de potencial dentro de un conductor arbitrario en la mitad del espacio.

Para un medio homogéneo e isotrópico, el campo eléctrico debido a una carga puntual puede ser derivado analíticamente. Integrando la ecuación de continuidad 4.4.5 sobre el volumen y aplicando el teorema de divergencia de Gauss, resulta una integral de superficie de la densidad de corriente  $\bar{j}$ . Sustituyendo  $\bar{j}$  de la ley de Ohm en 4.4.6 e integrando sobre la superficie de una esfera con radio  $r$  produce:

$$E(r) = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \dots \dots \dots 4.4.10$$

De la cual es fácil demostrar que:

$$\text{---..... 4.4.11}$$

La ecuación 4.4.11 describe el potencial debido a una carga puntual dentro de un espacio homogéneo a una distancia  $r$  del punto de inyección de corriente.

Las técnicas de resistividad usan generalmente electrodos desplegados sobre la superficie. Para estos casos, la ecuación 4.4.10 que ha sido integrada sobre una superficie esférica produce:

$$\text{---..... 4.4.12}$$

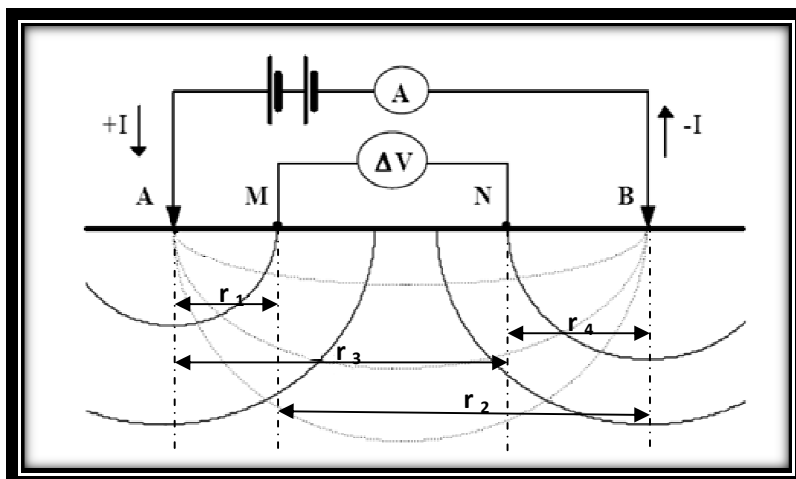
Debido a que sólo es la mitad del espacio.

Para permitir que la corriente fluya a través de un medio conductor, podría colocarse, de forma teórica, el otro electrodo de corriente en el infinito. Para la determinación de las superficies de resistividades se necesita conocer la distribución del potencial y la corriente suministrada (ver la ecuación 4.4.11).

Dados dos electrodos de corriente A y B y aplicando la ecuación 4.4.12, el potencial para un punto cualquiera M es:

$$\text{--- -- -- ..... 4.4.13}$$

Donde  $r_1$  es la distancia entre M y A y  $r_2$  es la distancia entre M y B.



**Figura 12. Dispositivo Tetraelectrónico  
(Modificado de trxconsulting).**



Para medir la diferencia de potencial se necesitan dos electrodos. Teóricamente los electrodos de inyección A y B pueden ser usados para medir la respuesta de la señal. Sin embargo, la resistencia de transición entre los electrodos y la superficie puede ser influenciada por las medidas en un comportamiento desconocido (Stummer, 2003).

Se necesitan un par de electrodos para medir la diferencia de potencial en un arreglo de cuatro electrodos, que son usados comúnmente en sondeos de corriente directa (CD). Sustrayendo el potencial del punto N del M, la diferencia de potencial  $\Delta U$  entre M y N:

$$\Delta U = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] = \frac{I\rho}{K} \dots\dots\dots 4.4.14$$

Donde  $r_3$  es la distancia entre N y A y  $r_4$  es la distancia entre N y B. Donde K sólo contiene las distancias entre los electrodos, que es llamado el “facto geométrico” y depende sólo de la distribución de los electrodos. Finalmente, acomodando la ecuación 4.4.14, obtenemos:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \dots\dots\dots 4.4.15$$

Para la tierra no homogénea, esta ecuación produce valores que varían de acuerdo con el arreglo geométrico usado en la superficie. Los valores obtenidos de la ecuación 4.4.15 para un subsuelo no homogéneo son llamados resistividades aparentes  $\rho_a$ .

Para obtener la resistividad del subsuelo, simplemente hay que dividir la lectura del voltímetro por la lectura del amperímetro y multiplicar por K, el valor obtenido sería la resistividad real del terreno si éste fuera homogéneo, pero es habitual que la  $\rho$  obtenida sea una mezcla de las resistividades de diversos materiales. Por tanto, lo denominamos resistividad aparente ( $\rho_a$ ). (W. Molina, 2006)

#### 4.5. Dispositivos Geoeléctricos

*Caso general.*- La ecuación anterior (4.4.15) está compuesta por la resistencia eléctrica y la geometría de la configuración de los electrodos que se utilice. El factor geométrico está dado por:

$$K = 2\pi \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \dots\dots\dots 4.5.1$$

Los datos de resistividad de un levantamiento se refieren a las resistividad aparentes del medio, estos valores son necesarios para que mediante inversión de datos obtengamos

resistividades “verdaderas”, es decir son las que nos darán las resistividades reales del medio las cuales nos ayudaran a realizar la interpretación del sitio.

Un “Dispositivo Geoeléctrico” es el conjunto de electrodos que inyecta corriente en el subsuelo y registra el potencial generado en el mismo. Generalmente, los dispositivos suelen disponer de cuatro electrodos, aunque también suelen emplearse los dispositivos de tres electrodos o de sólo dos. Una pareja de electrodos se denomina “de corriente” generalmente se les denomina A y B, y son los responsables de inyectar la electricidad en el subsuelo, y otros dos electrodos son “de potencial”, se les asigna M y N, empleándose para medir el voltaje generado en el subsuelo por la corriente inyectada.

El valor de la resistividad aparente depende de la geometría del arreglo electrodo que se utiliza, es decir, depende del factor geométrico K.

Existen diversos tipos de dispositivos, lineales y simétricos con respecto al centro de simetría del sondeo. En principio, los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno.

La mejor elección de configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, profundidad, la sensibilidad de aparato y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio (Urbieta, 2001).

#### 4.5.1. Dispositivo Schlumberger

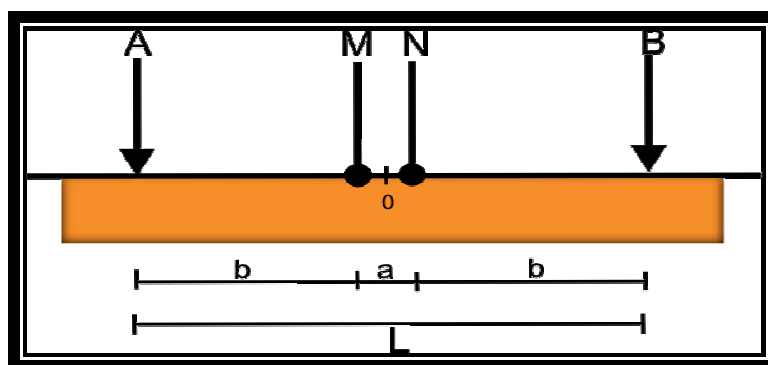


Figura 13. Esquema de Configuración Electrónica del Dispositivo Schlumberger

Es un dispositivo lineal que consta de cuatro electrodos. L cambia, al ser AB pero MN se mantiene fijo.

—.....4.5.2

#### 4.5.2. Dispositivo Wenner

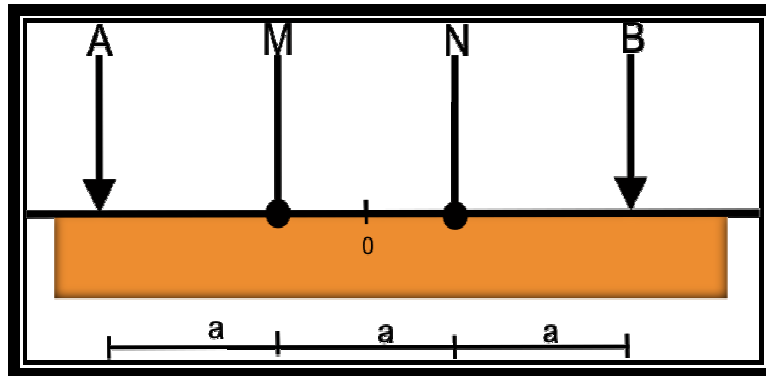


Figura 14. Esquema de Configuración Eléctrica del Dispositivo Wenner

Al igual que el Schlumberger es un dispositivo lineal de cuatro electrodos. En este dispositivo los electrodos AMNB son equidistantes entre si, a una distancia  $a$ . En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos.

—..... 4.5.3

#### 4.6. Diferencia Entre Arreglos

En los dos tipos de configuraciones principales de electrodos, Wenner y Schlumberger presentan ventajas, desventajas y sensibilidades variables. Los factores que influyen en la elección del tipo de arreglo son el espacio disponible y la intensidad de labor de cada método. Otras consideraciones importantes son la sensibilidad a inhomogeneidades laterales y a interfaces inclinadas.

Las diferentes respuestas de las configuraciones de electrodos se dan por las llamadas “secciones de contribución de señal”. Estas secciones son diagramas de contornos de la contribución hecha por cada unidad de volumen del subsuelo al voltaje medido en la superficie.

La Figura 15 muestra la contribución de señal para el arreglo Wenner. Para este arreglo la región cercana a la superficie las áreas positivas y negativas se cancelan unas con otras y la respuesta principal, originada desde lo profundo es mayormente plana.

Esto indica que para un medio estratificado horizontalmente, el arreglo de Wenner tiene una resolución vertical alta.

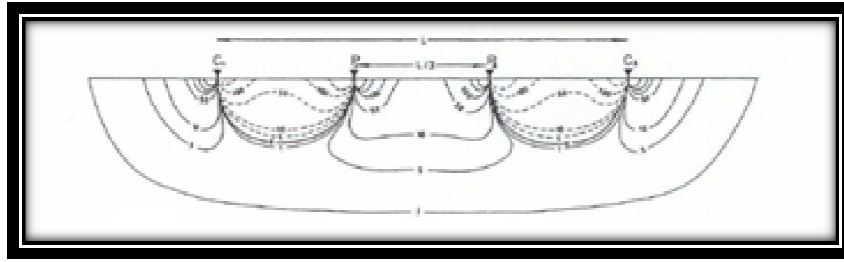


Figura 15. Esquema de la Contribución de Señal para el Arreglo Wenner.

La Figura 16 muestra que el arreglo Schlumberger tiene una resolución vertical parecida al Wenner pero la forma de la contribución de la señal a profundidad es cóncava hacia arriba.

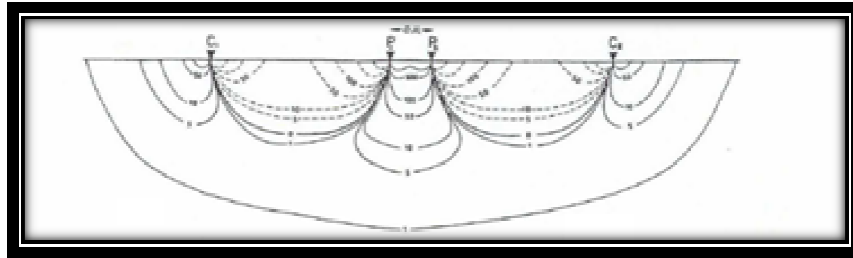


Figura 16. Esquema de la Contribución de Señal para el Arreglo Schlumberger.

En la Tabla 6 se muestra una comparación entre las capacidades que presentan cada una de las configuraciones de electrodos: dipolo-dipolo, Schlumberger y Wenner. Una consideración importante para la conveniencia de un arreglo dado es la escala a la cual será utilizado.

	Wenner	Schlumberger
Resolución Vertical	+++	++
Profundidad de Penetración	+	++
Conveniencia para SEV's	++	+++
Escala		(+++) <b>Bueno</b> (++) <b>Moderado</b> (+) <b>Pobre</b>

Tabla 6. Comparación Entre las Configuraciones de Electrodo

#### 4.7. Sondeo Eléctrico Vertical

Mediante los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), podemos inferir la distribución vertical en profundidad mediante la determinación de las resistividades aparentes de las distintas capas horizontales o sub-horizontales del subsuelo, a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos de corriente AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad AB/2 y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982).

Las distancias a las que se sitúan los electrodos dependen de los objetivos planteados y del modo de trabajo del investigador. Por ejemplo, si queremos investigar hasta una profundidad de 150 metros, el SEV podría empezar con AB/2= 2 metros y terminar en AB/2= 300 metros, realizando en ese intervalo de 15 a 25 medidas de resistividad aparente. Las distancias se van espaciando de modo que al representarse en escala logarítmica queden equidistantes.

Los resultados se representan en un gráfico logarítmico como el mostrado en la Figura 17, donde en el eje de las abscisas la distancia AB/2 de cada medida, y en ordenadas la resistividad aparente de cada punto. Esta curva es la que vamos a interpretar para conseguir los espesores y resistividades de las formaciones geológicas de la zona en que hemos realizado el SEV.

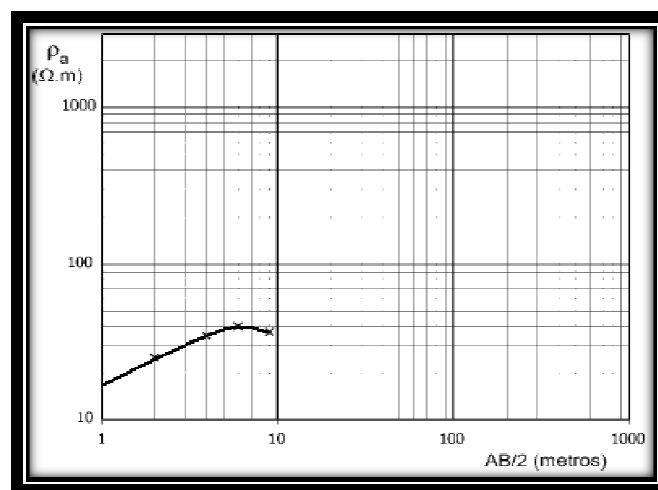


Figura 17. Gráfico Logarítmico

La mayor eficacia del método corresponde al caso en los que los sondeos se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitada por planos paralelos a la superficie del terreno, medio estratificado. Es tolerablemente válida para estratos inclinados hasta unos 30°.

La profundidad de investigación característica es la profundidad a la que una capa delgada de terreno (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno. La profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos de corriente y de potencial, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Es decir, si se intercambian entre sí las posiciones de los electrodos de potencial con los de corriente, la distribución de las líneas de corriente cambia (Urbieta, 2001).

Sin embargo, la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación no cambia. Definiendo  $L$  como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), los mismos autores determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos eléctricos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de  $0.35L$ , para Schlumberger de  $0.125L$  y para Wenner de  $0.11L$ .

Barker (1989) la define la *profundidad de investigación efectiva* como la mitad de la señal medida en la superficie debida a la porción de suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal debida a la porción de suelo inferior y muestra la mayor utilidad de ésta sobre la utilizada por Roy y Apparao (1971). Las profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y doble dipolo son respectivamente de  $0,17L$ ,  $0,19L$  y  $0,25L$  (para este último la profundidad de investigación característica es de  $0,195L$ ), es decir ligeramente mayores que utilizando la definición de profundidad de investigación característica (Roy y Apparao, 1971).

#### **4.7.1. Sondeo Wenner**

Dado el dispositivo Wenner AMNB con separación interelectrónica  $a$ , el sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de  $a$  manteniendo un punto central fijo  $P$ . Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida  $\rho_a$  en ohm-m, y en abscisas el valor de  $a$  en metros para cada paso.

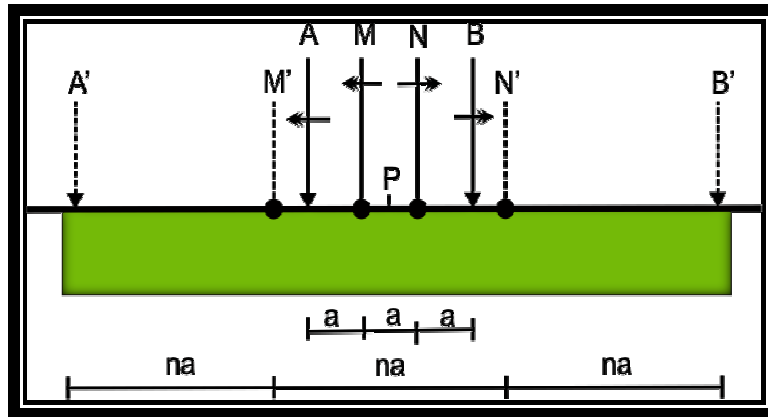


Figura 18. Representación del Sondeo Wenner.

La profundidad teórica de investigación del sondeo alcanza un tercio de la distancia AB, pero en realidad puede variar de  $AB/2$  hasta  $AB/10$  según las características de los materiales del subsuelo.

#### 4.7.2. Sondeo Schlumberger

Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con  $AB \gg 5MN$ , el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos de corriente A y B dejando los electrodos de potencial M y N fijos en torno a un punto central fijo P. La representación de este sondeo muestra en ordenadas  $\rho_a$  y en abscisas la distancia  $AB/2$  m.

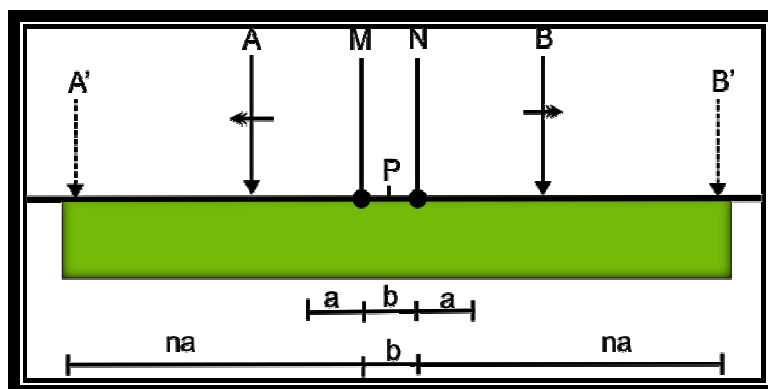


Figura 19. Representación del Sondeo Schlumberger.

### 4.7.3. Cortes Geoeléctricos

Un SEV puede realizarse sobre cualquier combinación de formaciones geológicas, pero para que la curva de resistividad aparente obtenida sea interpretable, el subsuelo debe estar formado por capas horizontales y homogéneas. En muchos casos la realidad se acerca lo suficiente a esta descripción teórica como para que los resultados sean aprovechables. En otros casos, el procedimiento no es aplicable.

Para realizar un corte geoeléctrico se debe considerar un medio estratificado general, compuesto por 2 semiespacios. El primero de ellos de conductividad nula, representa la atmósfera; el segundo, que representa el terreno, es un medio heterogéneo, compuesto de medios parciales homogéneos e isotrópos, de extensión lateral indefinida, y cuya superficie de separación son paralelas entre si y al plano aire-terreno.

Para caracterizar cada medio estratificado, bastará el espesor de  $E_i$  y la resistividad  $r_i$  de cada medio parcial isotrópico de índice  $i$ , numerando esto de arriba abajo, esto es, comenzando por el medio contiguo al semiespacio que representa la atmósfera. Cada uno de estos medios parciales será denominado capa geoeléctrica.

La especificación de espesores y resistividades de cada medio estratificado del tipo descrito, recibe el nombre de corte geoeléctrico.

Un corte geoeléctrico de  $n$  capas se compone de los siguientes datos:  $n$  valores de resistividad y  $n-1$  espesores (no se conoce el espesor de la última capa). Pueden clasificarse atendiendo al número de capas que lo componen. Los cortes del mismo número de capas pueden subdividirse según el orden que aparezcan, en los sucesivos contactos, resistividades mayores, o menores que la capa suprayacentes.



#### 4.7.3.1. Cortes de Dos Capas

Solamente pueden presentarse dos posibilidades:  $\rho_1 > \rho_2$  y  $\rho_1 < \rho_2$ . No reciben nomenclatura específica.

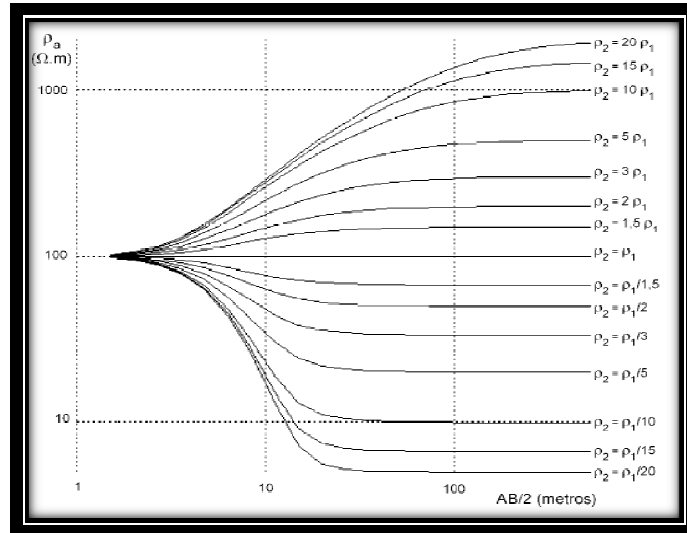


Figura 20. Curvas del Corte Geoelectrico de Dos Capas.  
(Modificado de Sánchez, F.J., 2004)

#### 4.7.3.2. Cortes de Tres Capas

Cuando el subsuelo se compone de tres capas, se admiten cuatro posibilidades:

Tipo H.- La segunda es la menos resistiva de las tres, es decir:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ .

Tipo K. - La segunda es la más resistiva de las tres, es decir:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ .

Tipo A- La resistividad va aumentando con la profundidad, es decir:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ .

Tipo Q.- La resistividad va disminuyendo con la profundidad, es decir:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ .

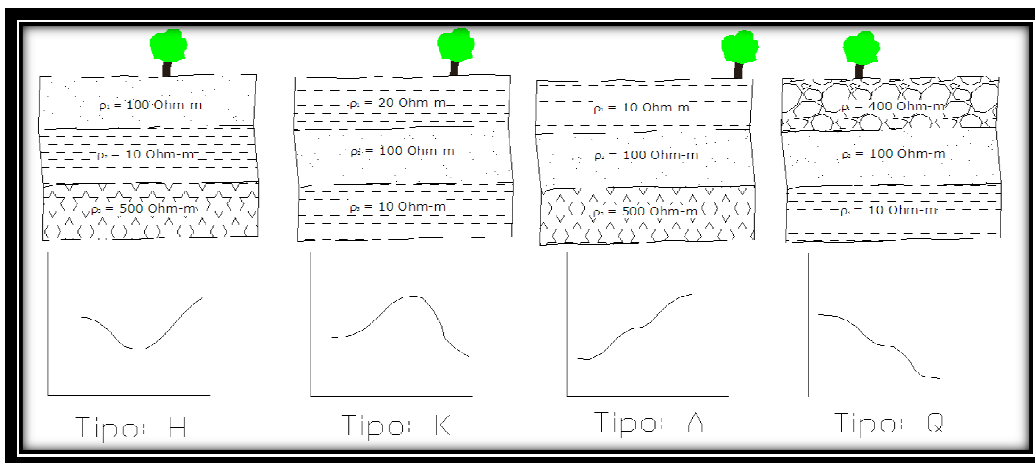
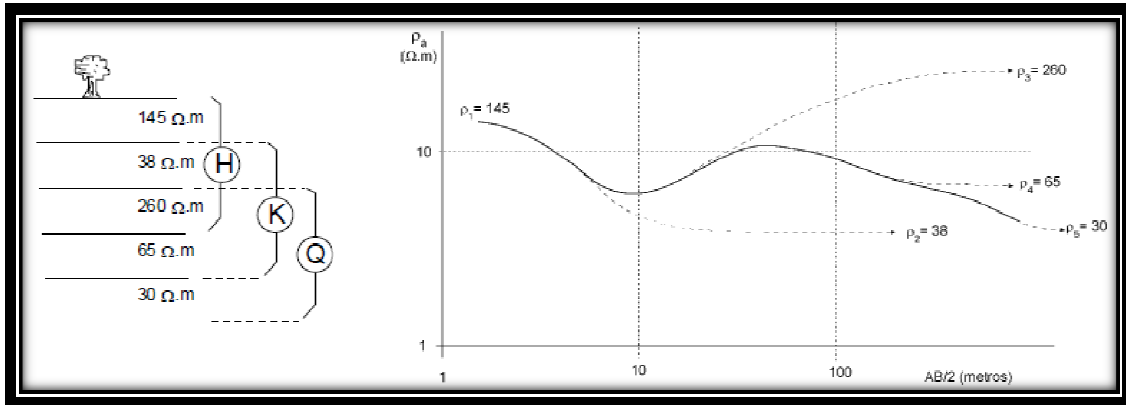


Figura 21. Modelos para Corte Geoelectrico de Tres Capas.  
(Modificado de Sánchez, F.J., 2004)

#### 4.7.3.3. Cortes de Cuatro a Más Capas

Un corte geoelectrico de cuatro o más capas se descompone en intervalos de 3 en 3, dándole la nomenclatura correspondiente a cada tramo de 3.



**Figura 22. Modelos para Corte Geoelectrico de Cinco Capas.**  
(Modificado de Sánchez, F.J., 2004)

#### 4.7.4. Interpretación de las Curvas de Resistividad Aparente

Antes de interpretar una curva cuantitativamente se debe razonar cualitativamente el número de capas y la nomenclatura del corte.

La primera fase de la interpretación consiste en conseguir el corte geoelectrico, formado por espesores y resistividades. Esto puede realizarse superponiendo la curva obtenida en el campo a gráficos patrón o mediante programas de ordenador.

La segunda fase de la interpretación es convertir el corte geoelectrico en un corte geológico. Esta etapa precisa de un conocimiento geológico de la región, pues ya hemos comentado que, aunque intentamos reconocer las formaciones por su resistividad eléctrica, un valor determinado, por ejemplo 100 Ohm-m puede corresponder a diversos tipos de roca. Esta incertidumbre puede solucionarse si se han realizado en la zona otros SEV en lugares en que se disponga también de datos geológicos. De este modo se habrá tomado nota de una equivalencia entre litologías y resistividades en esa zona.

#### 4.7.5. Efectos Laterales en el SEV y Ambigüedades en su Interpretación

Si el dispositivo eléctrico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corriente serán distorsionadas por lo que  $\Delta V_{MN}$  se verá afectado por el otro medio, tanto más cuanto mayor sea la separación de los electrodos AB. Por lo tanto, la medida de la resistividad aparente en un SEV está influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para distancias AB grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades (Orellana, 1982).

Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y su resistividad.

A partir de una curva de resistividad aparente, y en determinadas circunstancias podemos interpretar varios cortes geoelectricos diferentes. Básicamente esto se explica mediante el Principio de Equivalencia y el Principio de Supresión. Para ello debemos conocer estos conceptos:

Resistencia Transversal es producto del espesor de una capa por su resistividad:

$$T_i = \rho_i \cdot E_i \dots\dots\dots 4.7.5.1$$

Conductancia Longitudinal es el cociente de dividir el espesor de una capa por su resistividad:

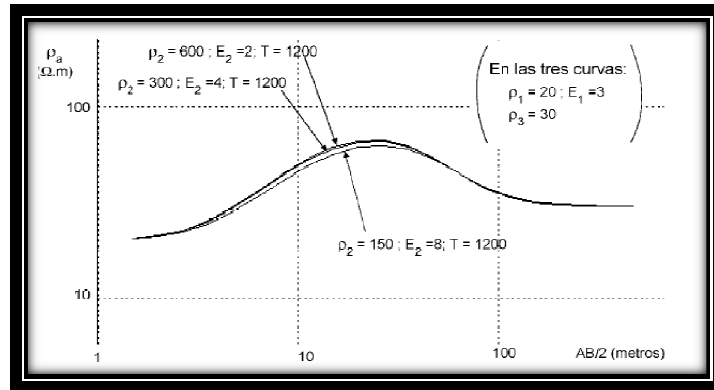
$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \dots\dots\dots 4.7.5.2$$

##### 4.7.5.1. Principio de Equivalencia

Pueden generarse curvas muy similares con diferentes valores de la 2ª capa, siempre que el producto  $\rho \cdot E$  sea constante.

Una capa mas resistiva que las adyacentes (tipo K y combinaciones), con T grande y S pequeño, puede producir el mismo efecto en el SEV que otra capa con valores diferentes de  $\rho$  y E pero con la misma T.

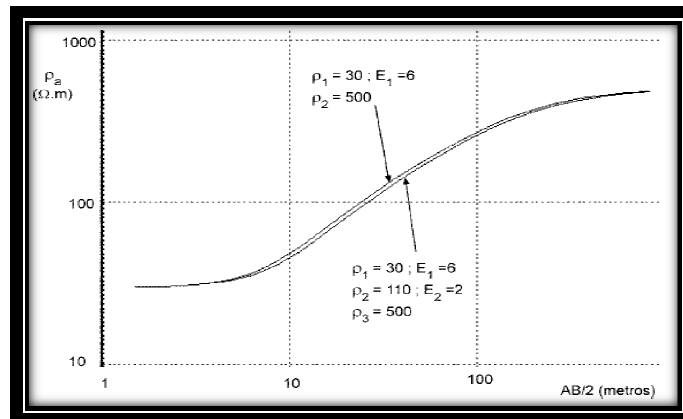
O bien: Una capa más conductora que las adyacentes, con un valor de T pequeño y S grande, puede producir el mismo efecto en el SEV que otra capa con diferentes E y  $\rho$  pero con el mismo S.



**Figura 23. Principio de Equivalencia.**  
(Modificado de Sánchez, F.J., 2004)

#### 4.7.5.2. Principio de Supresión

Una capa delgada, con una resistividad intermedia entre las adyacentes puede pasar desapercibida en la interpretación.



**Figura 24. Principio de Supresión.**  
(Modificado de Sánchez, F.J., 2004)

## CAPITULO 5. APLICACIÓN Y RESULTADOS DEL MÉTODO ELÉCTRICO

### 5.1. Descripción de la Adquisición de Datos

Al tratarse de un método Geofísico, la ventaja que proporciona los métodos eléctricos es el obtener información del subsuelo de forma indirecta y a costo bajo en comparación con el método directo como lo son las perforaciones del subsuelo.

El principal objetivo de este estudio es determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, el grado de permeabilidad de los materiales presentes, zonas con posible impregnación de lixiviados y posible impacto ambiental que puede causar el relleno sanitario.

Este estudio fue realizado en el mes de Octubre del año 2008 y se basó en la realización de 8 Sondeo Eléctricos Verticales (SEV) en modalidad Schlumberger con aberturas electrónicas AB/2 de 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200 y 300 m con orientación Este-Oeste y con el fin de alcanzar profundidades de investigación del orden de 100 m.

La ubicación de los SEV se programó de tal manera que se cubriera la estratigrafía local del sitio definiendo con 8 SEV un modelo tridimensional.



**Figura 25. Ubicación de los Ocho Sondeos Eléctricos Verticales Levantados en el Área de Estudio. (Modificado Google Earth, 2009)**

Las coordenadas de GPS, UTM en WGS84 de los 8 SEV realizados se muestran en la Tabla 7:

SEV	X	Y	Z
SEV – 1	496688.821	3447663.471	1337.200
SEV – 2	496810.204	3447659.452	1335.200
SEV – 3	496928.399	3447617.481	1332.200
SEV – 4	496913.421	3447541.672	1331.900
SEV – 5	496896.290	3447467.093	1331.600
SEV – 6	496758.031	3447494.722	1322.500
SEV – 7	496617.538	3447500.714	1312.900
SEV – 8	496828.405	3447601.978	1337.500

**Tabla 7. Localización de los 8 Sondeos Eléctricos Verticales en el Área de Estudio**

## 5.2. Instrumentación

Para el levantamiento de datos en campo se empleo el siguiente equipo:

- La toma de datos, de corriente y potencial se realizó con un equipo transmisor de corriente eléctrica de 3 Kw de potencia, capaz de inyectar al terreno pulsos rectangulares de 2 ó 4 segundos de duración.
- El receptor de potencial fue un multímetro marca Fluke de 10 megaohms de impedancia de entrada.

- Electrodo de acero para inyectar la corriente eléctrica, así como 2 carretes con cable cobre de 500 m de longitud para interconectarlos dichos electrodos.



**Figura 26. Equipo Utilizado Durante el Levantamiento.**

### **5.3. Procesamiento**

Los trabajos de oficina o gabinete de los datos geofísicos recolectados en campo se realizaron casi en su totalidad de forma automática, aplicándoles las siguientes correcciones y procesos:

Los resultados de campo se corrigieron por las variaciones laterales, propias de cada sitio de medición, y se interpretaron mediante técnicas gráficas, analíticas y programas de cómputo especializados a fin de obtener los modelos geoelectricos representativos de las condiciones geológicas prevalecientes en el subsuelo.

Cada SEV se graficó en papel bilogarítmico para realizar la corrección por empalme y luego se llevó a cabo una interpretación gráfica que permitió inferir el modelo geológico preliminar del sitio. Mediante este procedimiento fue posible estimar el número de estratos presentes en el subsuelo, así como el grosor y resistividad de cada uno de ellos.

Posteriormente, los datos de campo y parámetros de la interpretación preliminar se capturaron en el programa de cómputo RESIX PLUS, donde el procesamiento de los datos se realiza a través de un algoritmo basado en el método de aproximaciones sucesivas o iteraciones, hasta alcanzar la mejor respuesta matemática o solución a la curva de datos de resistividad aparente, utilizando las funciones de Kernel y de Bessel, se

tiene como respuesta el modelo matemático de la curva, el cual consiste de una serie de valores de resistividad verdadera o hallada, variable según los datos de profundidad. El segundo software empleado es el IPI2WIN, desarrollado por la Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics, el cual permite realizar interpretaciones automatizadas o semi-automatizadas a partir de datos obtenidos por los arreglos utilizados en prospección eléctrica. El proceso interactivo es resuelto usando filtrado lineal. La implementación del algoritmo de filtrado provee una solución rápida y precisa para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables. El problema inverso es resuelto usando una variante del algoritmo de Newton para el número mínimo de capas, de manera independiente para cada curva. Cabe señalar que las curvas proporcionadas por este último software solo las utilicé para corroborar el correcto análisis del procesamiento a través del software RESIX PLUS, ya que este programa me fue más fácil la manipulación de los resultados.

Para determinar con mayor precisión el número de estratos involucrados y sus características físicas; los resultados arrojados por el procesado de RESIXP, son manejados a través de un paquete de interpretación de datos geofísicos, denominado WinGLink desarrollado por GEOSYSTEM, este programa multidisciplinario es utilizado para procesar, interpretar e integrar varias disciplinas geofísicas en un único modelo de interpretación, en este estudio nos permitirá construir secciones geoeléctricas que determinaran la estratigrafía local del sitio.

#### **5.4. Método de Interpretación**

En general la finalidad del método de interpretación con las técnicas de corriente continua es determinar la distribución espacial de las resistividades verdaderas en el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente obtenidos. Lo que nos permita definir las características del subsuelo en la zona estudiada.

La idea básica para la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales es la comparación de la curva de campo que se desea interpretar con las curvas teóricas, hasta encontrar una de estas que coincida o se aproxime con la primera. Debido a estas curvas se representan en escalas logarítmicas, con los que se consigue una reducción en el número de curvas teóricas necesarias, es decir, por propiedades de los gráficos logarítmicos, la multiplicación de todos los espesores o de todas las resistividades por una constante solo produce un desplazamiento sin cambiar la forma y tamaño.



## 5.5. Construcción de Mapas de Isoresistividad

Durante la aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales se obtuvieron datos que sirvieron para la generación, en primera instancia de las pseudosecciones de resistividad aparente, con las cuales nos mostrara una idea de la distribución litológica que se encuentra en el sitio haciendo uso de la distribución de la resistividad aparente en planta y distintas profundidades.

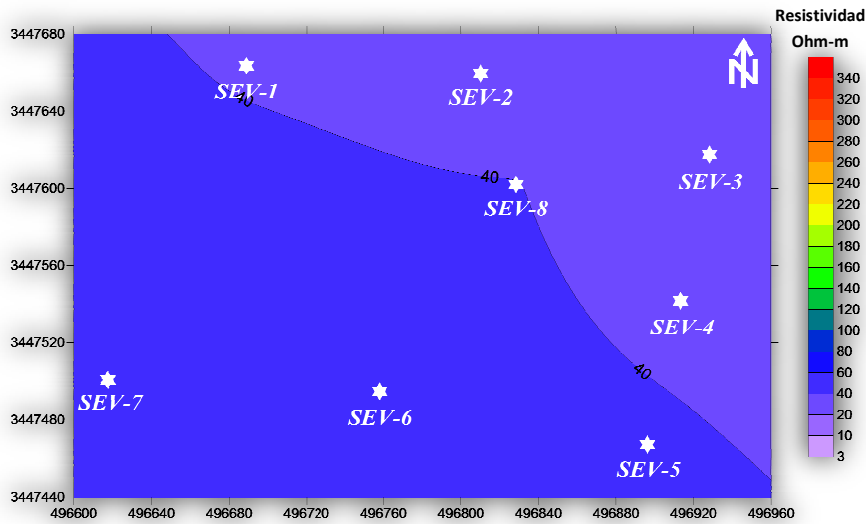
La construcción de estas pseudosecciones o mapas de isoresistividad aparente se realizaron mediante el programa GOLDEN SOFTWARE SURFER VERSIÓN 8.09, utilizando el método de interpolación kriging, a manera de colocar en cada mapa de isoresistividad aparente, las coordenadas UTM de los SEV , y así obtener su ubicación y las resistividades aparentes obtenidas, dependiendo las distintas aberturas electródicas AB/2 de 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200 y 300 metros, definiéndolas mediante un criterio de representatividad del medio. Las profundidades aproximadas son:

- |           |             |
|-----------|-------------|
| 1. 1.0 m  | 9. 13.33 m  |
| 2. 1.33 m | 10. 16.67 m |
| 3. 1.67 m | 11. 23.33 m |
| 4. 2.33 m | 12. 33.33 m |
| 5. 3.33 m | 13. 50.0 m  |
| 6. 5.0 m  | 14. 66.67 m |
| 7. 6.67 m | 15. 100.0 m |
| 8. 10.0 m |             |

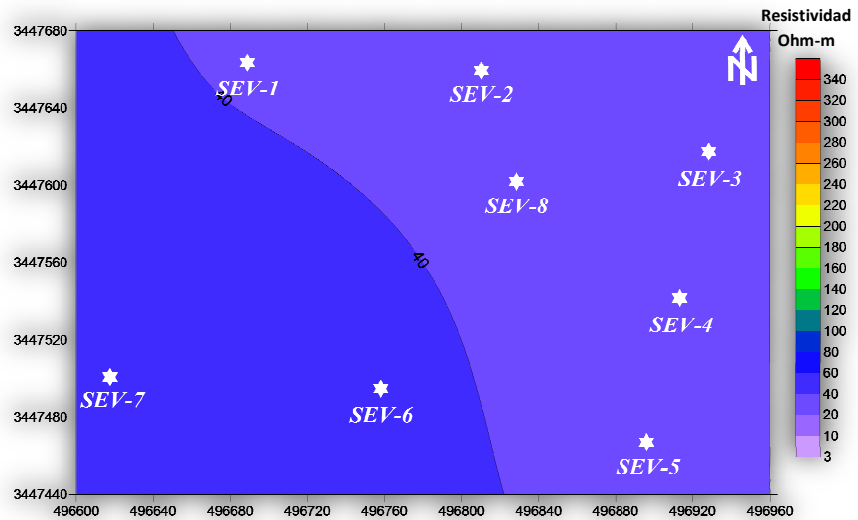
Cabe mencionar que la profundidad de investigación estimada se considera para el arreglo Schlumberger de 1/3 de la abertura en AB/2.

## 5.6. Mapas de Isoresistividad Aparente

A continuación se muestran los mapas de iso-resistividad de acuerdo a las profundidades aproximadas propuestas anteriormente:

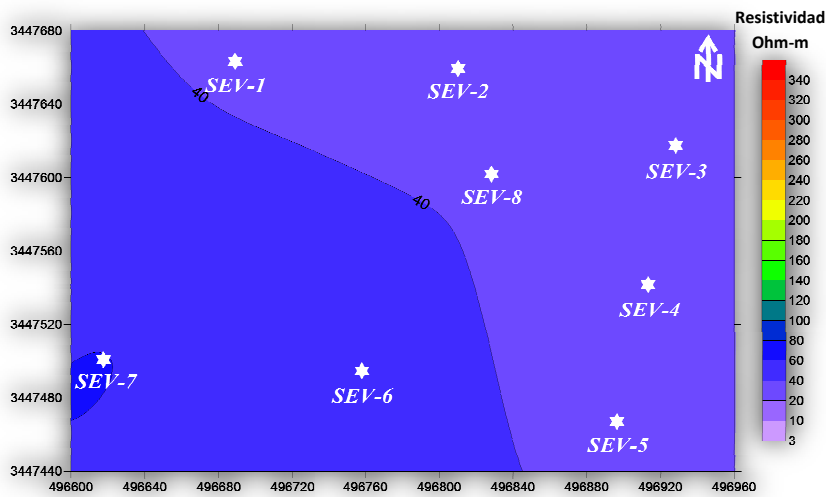


(a)

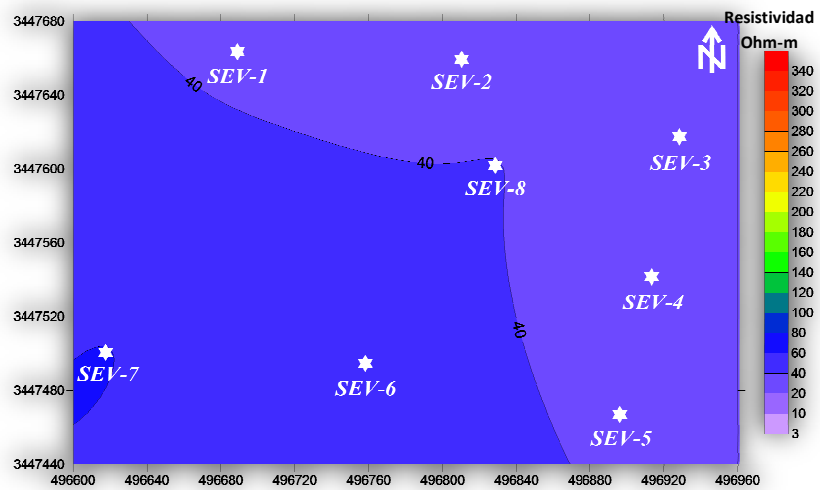


(b)

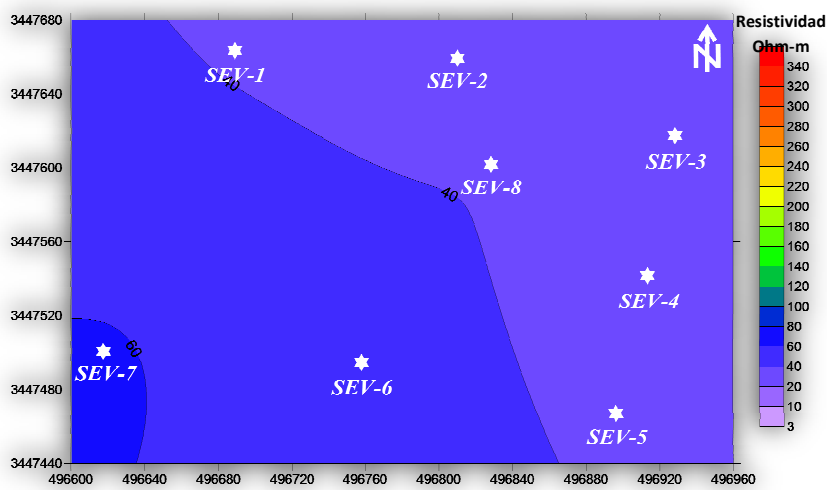
Figura 27. Mapas de Isoresistividad para  $AB/2= 3$ (a) y 4(b) Metros



(a)

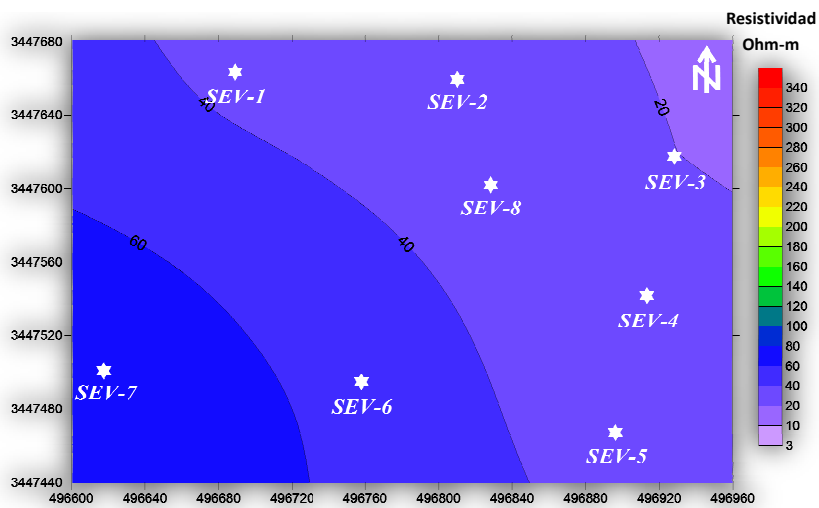


(b)

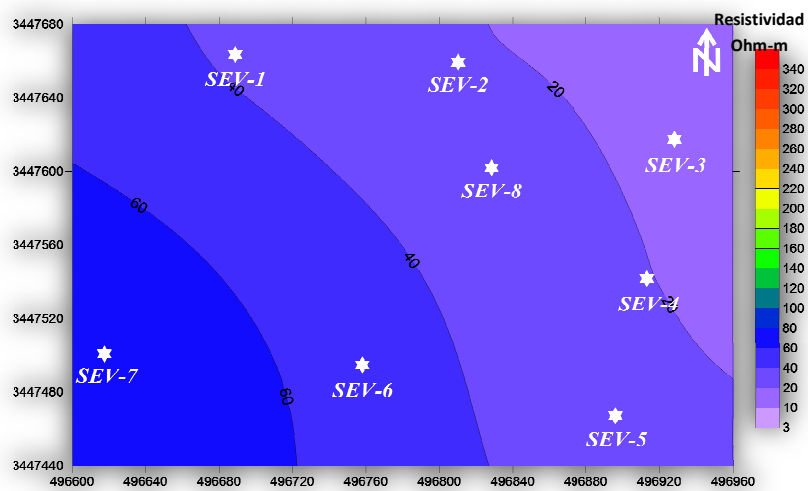


(c)

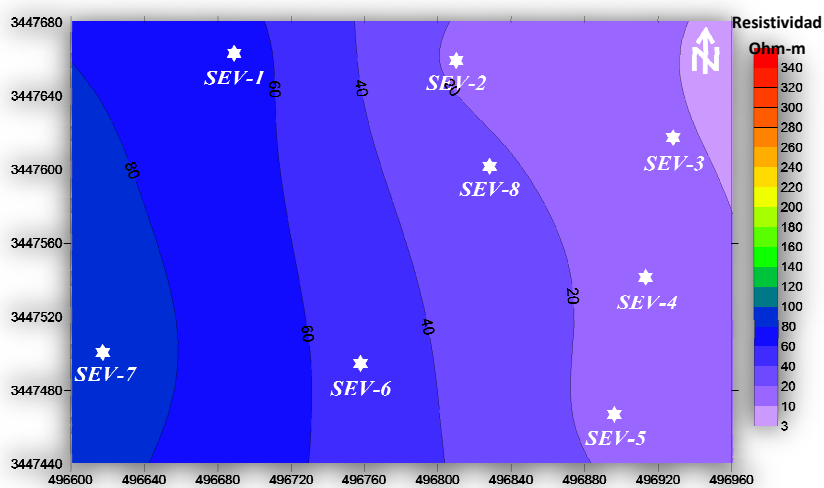
Figura 28. Mapas de Isoresistividad para  $AB/2= 5(a), 7(b)$  y  $10(c)$  Metros.



(a)

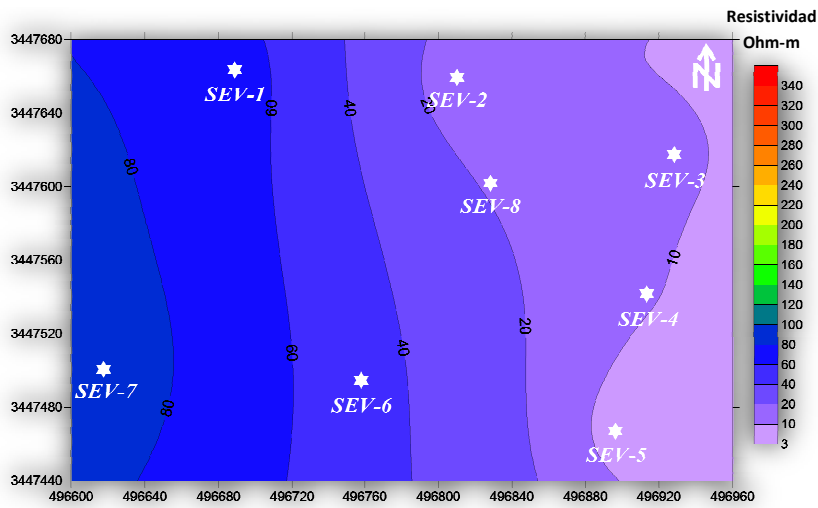


(b)

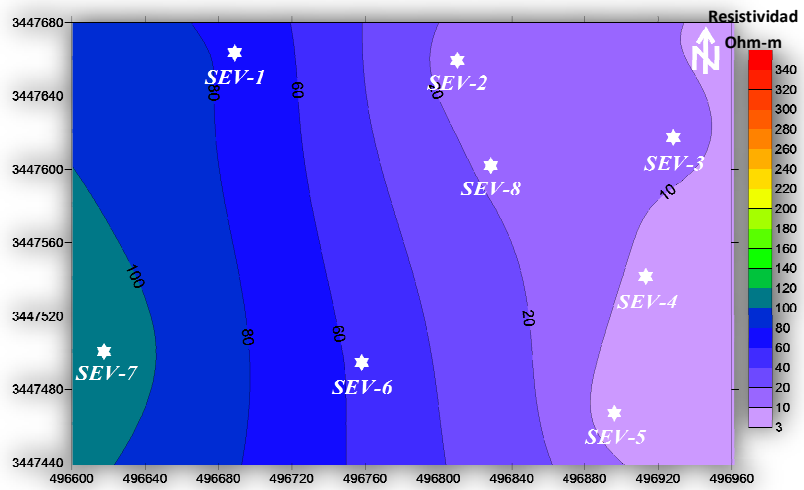


(c)

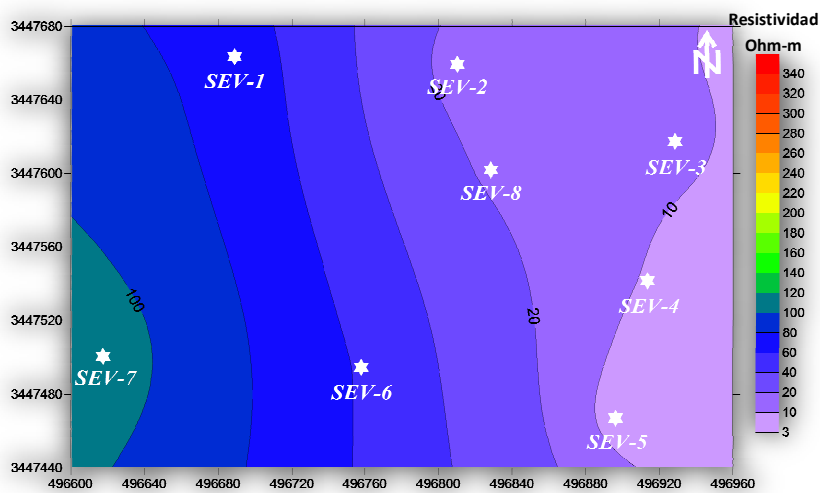
Figura 29. Mapas de Isoresistividad para  $AB/2= 15(a)$ ,  $20(b)$  y  $30(c)$  Metros.



(a)

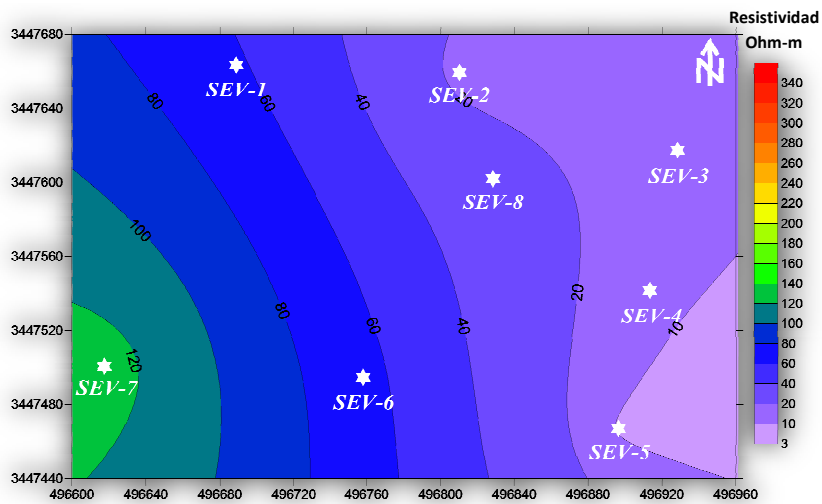


(b)

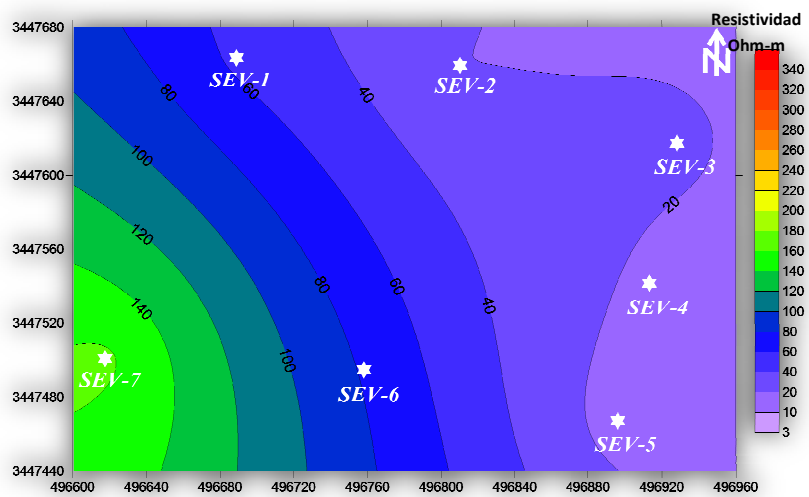


(c)

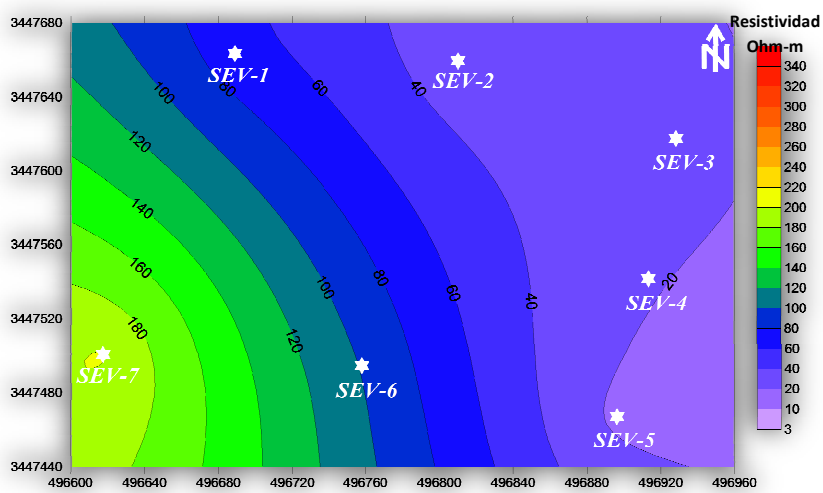
Figura 30. Mapas de Isoresistividad para  $AB/2= 40(a), 50(b)$  y  $70(c)$  Metros.



(a)

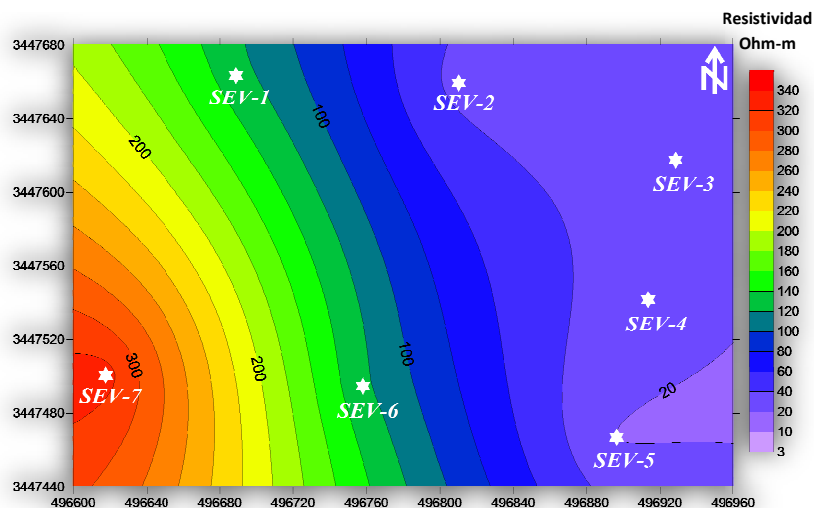


(b)



(c)

Figura 31. Mapas de Isoresistividad para  $AB/2= 100$ (a),  $150$ (b) y  $200$ (c) Metros.



**Figura 32. Mapas de Isoresistividad para AB/2= 300 Metros.**

### **5.7. Análisis e Interpretación de los Mapas de Isoresistividad Aparente**

Para este estudio se consideraron la relación “Resistividad – Tipo de Litología”, haciendo uso de la tabla de valores de resistividad de Kellery Frischknecht 1966, Orellana 1982, considerando las siguientes relaciones:

1. Conglomerado: 2000 - 10000 Ohm-m
2. Conglomerado poco consolidado compuesto primordialmente de arena y grava: > 70 Ohm-m
3. Suelo depositado recientemente compuesto por arena y gran contenido de desechos sólidos: 25 a 40 Ohm-m
4. Conglomerado poco consolidado compuesto primordialmente de arena y grava con presencia de lixiviado: < 15 Ohm-m
5. Arena arcillosa: 30 - 225 Ohm-m
6. Conglomerado saturado: 56 – 76 Ohm-m

Es importante mencionar que la resistividad de un cuerpo rocoso dependerá, primordialmente, de la porosidad, la permeabilidad y la saturación de agua, por lo que factores como el grado de humedad, la concentración de electrolitos disueltos, temperatura y fase en que se encuentra el agua, la cantidad de poros, dimensión de los mismos e interconexiones entre cada uno de ellos, jugarán un papel muy importante.

De acuerdo al análisis mediante los mapas de iso-resistividad y a la correlación geológica entre resistividades aparentes obtenidas a distintas profundidades de investigación dada por la abertura AB designada son descritas a continuación:

Se observa una clara predominación de valores de resistividad menores a 50 Ohm-m, en los primeros metros de abertura AB, abarcando toda el área de trabajo (Figura 27 a 29), estos valores pueden correlacionarse con materiales depositados recientemente y con contenido de desechos sólidos tendiendo a bajar los valores de resistividad en la parte oriente del área de estudio posiblemente por la presencia de un líquido que envuelve al material.

Conforme la abertura AB va en aumento y por tanto se va presentando un aumento en la profundidad de investigación, es más notorio que en la parte oriente de la zona de estudio se presente una mayor acumulación de material con valores de resistividad bajos (Figura 30 y 31), por lo que al llegar a la abertura máxima de AB, se puede observar que esta parte se considera la más contaminada y presenta un mayor contenido de desechos sólidos envueltos por un líquido que posiblemente sea el lixiviado (Figura 32), siendo también notable la reducción del área con resistividades bajas, mientras que en la parte poniente, los valores de resistividad tienden a ser elevados, llegando a ser de arriba de los 250 Ohm-m, pudiendo ser asociados a materiales sedimentarios sin impregnación o mínima impregnación de lixiviado.

En el plano TJ-1, mostrado en el Anexo C se muestran las Pseudosecciones o Mapas de Iso-resistividad Aparente colocados de acuerdo a la abertura AB, considerando que la profundidad de investigación aproximada corresponde 1/3 de la abertura AB

A continuación se muestran las 8 curvas sintéticas a partir de los valores de  $\rho_a$ , mostrados en dichas curvas como puntos de color verde. Estos valores de  $\rho_a$  corresponden a los 8 Sondeos Eléctricos Verticales obtenidos en campo a diferentes aberturas. En la parte inferior de cada uno de los gráficos se observa el número de capas, las resistividades y profundidades reales obtenidas a través del algoritmo basado en el método de aproximaciones sucesivas, utilizando las funciones de Kernel y de Bessel.



## 5.8. Interpretación de las Curvas de Resistividad Aparente Obtenida en los Sondeos Eléctricos Verticales.

### 5.8.1. Sondeo Eléctrico Vertical 1

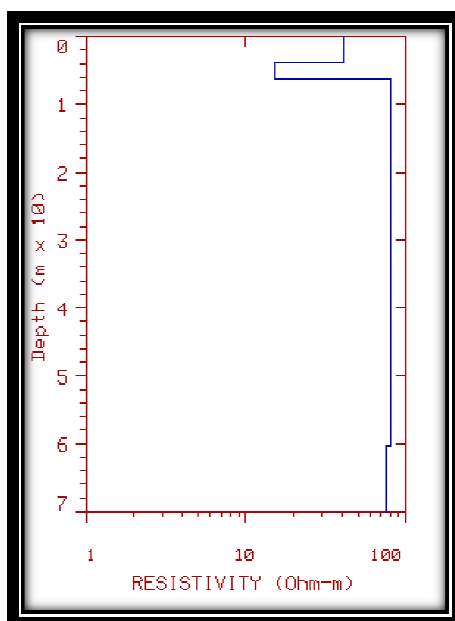
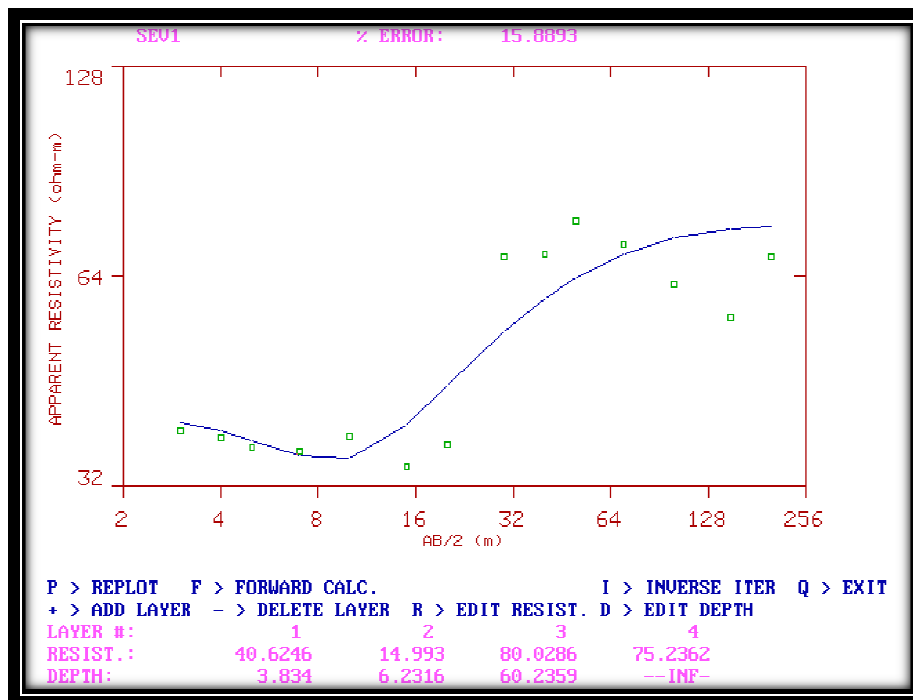


Figura 33. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 1.

Del resultado obtenido mediante la comparación de los datos de campo y la curva calculada, se obtuvo un modelo de ajuste con 3 capas.

La primera y más superficial (UG1), está formado por una capa de materiales de relleno (basura), presentándose con 3.83 m de espesor y resistividad de 40.62 Ohm-m, este horizonte podemos caracterizarla como una unidad generadora de lixiviados.

Una segunda capa (UG2) situada a 3.83 m de profundidad con un espesor de capa aproximado de 2.39 m, se encuentra un estrato con resistividad de 14.99 Ohm-m, posiblemente conformado por un conglomerado compuesto por arena y grava, los cuales se encuentran impactados por lixiviados provenientes de la capa superior.

Subyaciendo a los dos paquetes anteriores se detectan resistividades del orden de 80.02 Ohm-m, este valor de resistividad se asociada a un conglomerado conformado por arena y gravas (UG3), el cual no se encuentra impregnado por el lixiviado, pero no se descarta la posibilidad de a estos últimos tres cuerpos litológicos presenten en un futuro cierta impregnación del lixiviado, esta capa presentando un espesor indefinido, y también se caracteriza como una capa permeable.

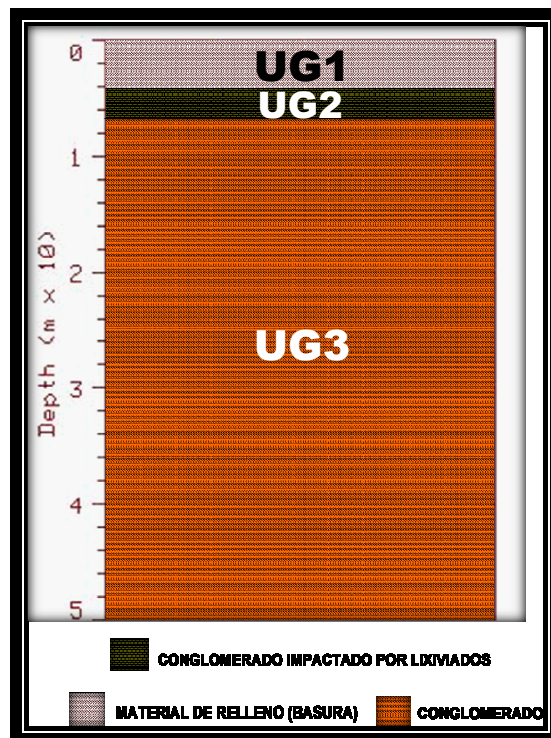


Figura 34. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 1.

### 5.8.2. Sondeo Eléctrico Vertical 2

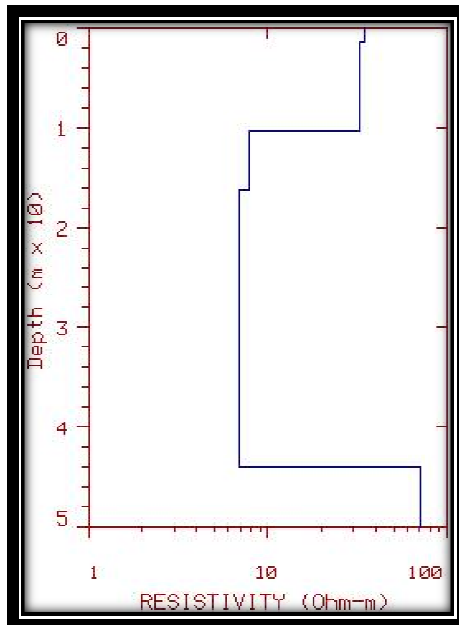
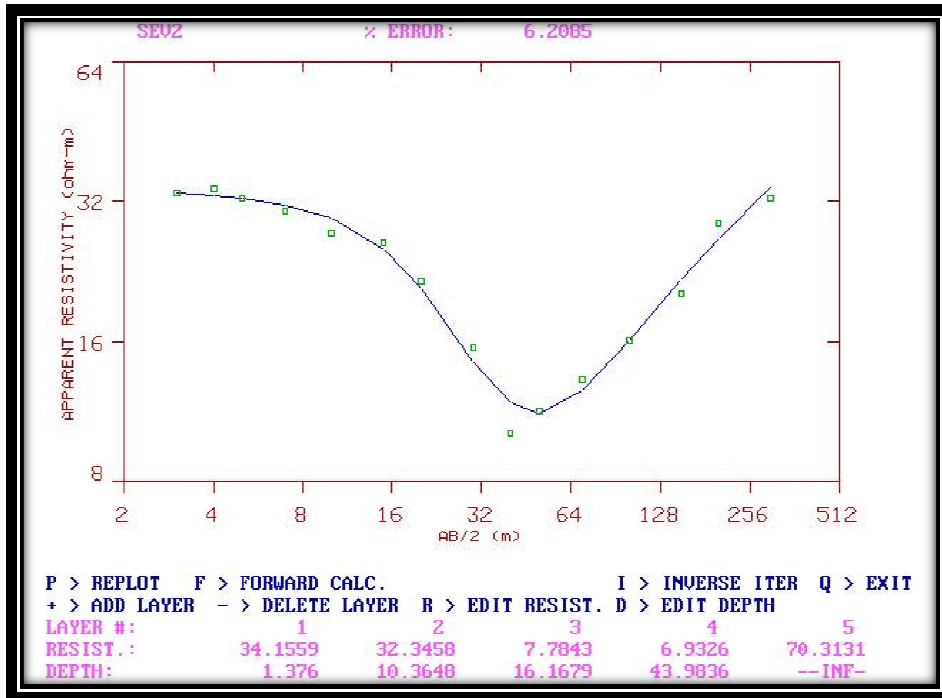


Figura 35. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 2.

El segundo Sondeo Eléctrico Vertical se realizó aproximadamente a 120 m al este del SEV-1, determinando la estratigrafía y obteniendo un modelo con 3 capas.

La capa superficial (UG1) formada por materiales de relleno, se presenta con un espesor aproximado de 10.35 m y resistividad de 34.15 Ohm-m. Este horizonte podemos caracterizarla como una unidad generadora de lixiviados.

Por debajo de la capa anterior se localiza un estrato asociado a el terreno natural conformado por conglomerados de arena y grava (UG2), los cuales se encuentran ya impregnados por lixiviados provenientes de la capa superior, la resistividad que presenta es del orden de 7.78 Ohm-m, con un espesor aproximado de 33.61 m. Siendo un material poco consolidado, este cuerpo litológico presenta la propiedad de ser permeable.

Por último a partir de 43.98 m de profundidad se detectan resistividades del orden de 70.31 Ohm-m, esta resistividad se asocia a un conglomerado conformado por arena y gravas (UG3), el cual aun no está impregnada por el lixiviado, pero no se descarta la posibilidad de que este cuerpo litológico presente en un futuro cierta impregnación del lixiviado, esta capa presentando un espesor indefinido y se caracteriza como una capa permeable.

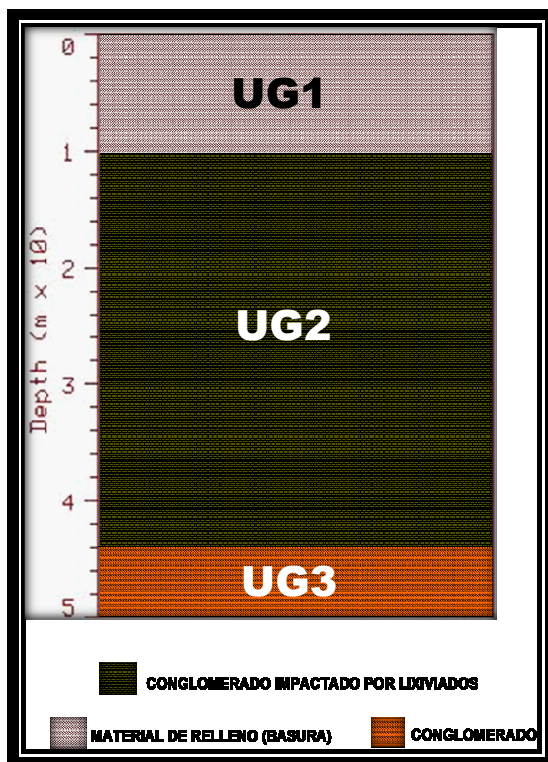


Figura 36. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 2.

### 5.8.3. Sondeo Eléctrico Vertical 3

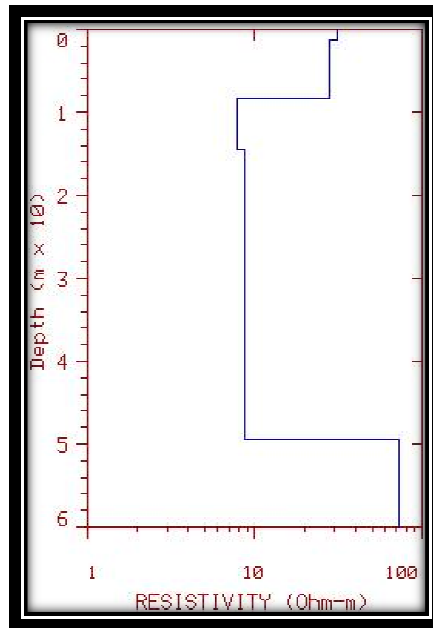
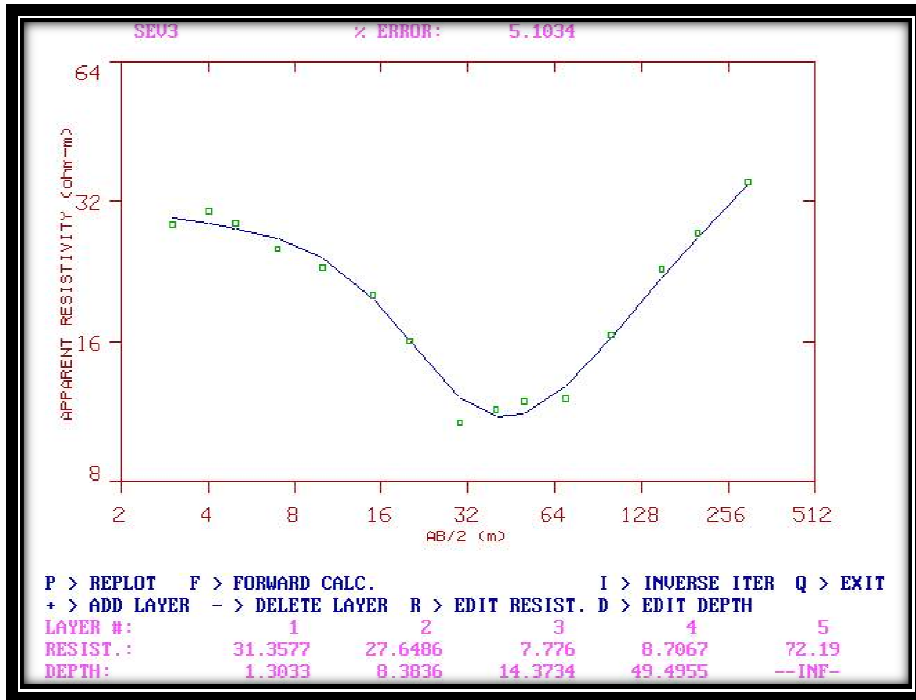


Figura 37. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 3.

El Sondeo Eléctrico Vertical 3 se realizó aproximadamente a 125 m al este del SEV-2, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 3 capas.

El estrato más superficial, está formado por una capa de materiales de relleno (basura) (UG1), presentándose con 8.38 m de espesor aproximado y resistividad de 31.37 Ohm-m, este horizonte lo caracterizamos como una unidad generadora de lixiviados.

Una segunda capa se presenta subyaciendo al paquete anterior, con una resistividad de 8.70 Ohm-m y un espesor aproximado de 41.10 m asociado a el terreno natural conformado por conglomerados compuesto por arena y grava (UG2), los cuales se encuentran impactados por lixiviados provenientes de la capa superior. Siendo un material poco consolidado, este cuerpo litológico presenta la propiedad de ser permeable.

Como ultima capa a 49.49 m de profundidad se detectan resistividades del orden de 72.19 Ohm-m, la cual es asociada a un conglomerado conformado por arena y gravas (UG3), el cual aun no está impregnada por el lixiviado, pero no se descarta la posibilidad de que este cuerpo litológico presente en un futuro cierta impregnación del lixiviado, esta capa presentando un espesor indefinido, y también se caracteriza como una capa permeable.

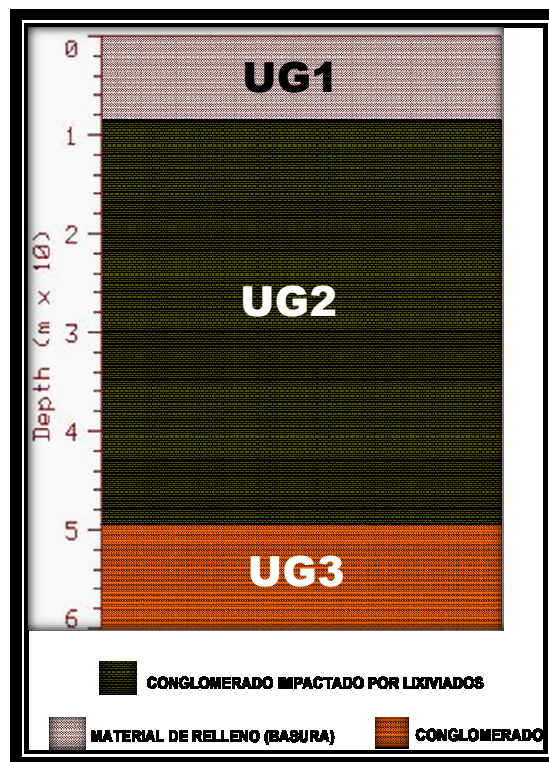


Figura 38. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 3.

### 5.8.4. Sondeo Eléctrico Vertical 4

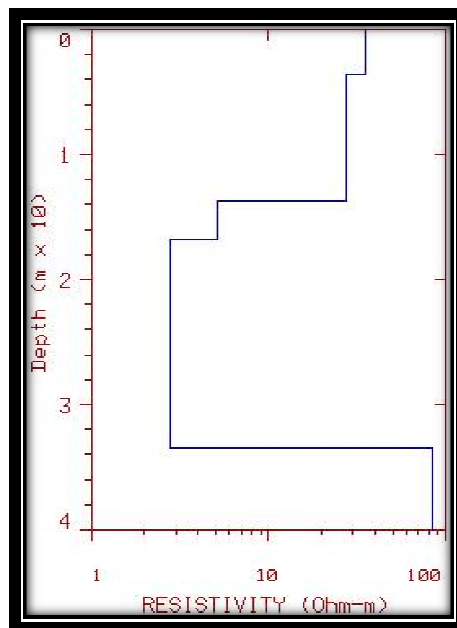
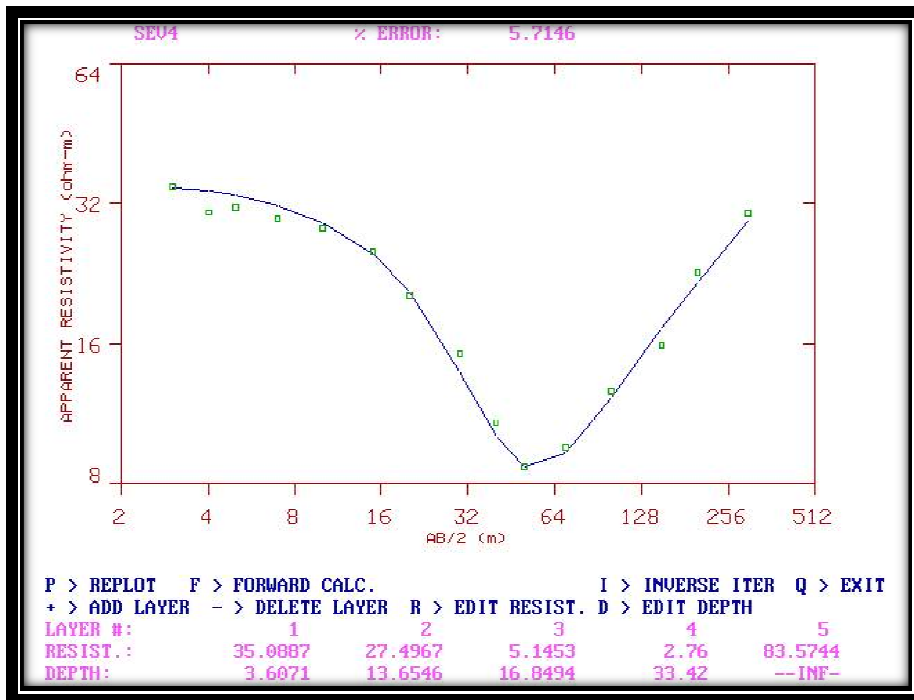


Figura 39. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 4.

El Sondeo Eléctrico Vertical 4 se realizó aproximadamente a 80 m al sur del SEV-3, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 3 capas.

Una capa superficial de 35.08 Ohm-m de resistividad y espesor aproximado de 13.64 m, se encuentra formado por una capa de materiales de relleno (basura) (UG1), este horizonte lo caracterizamos como una unidad generadora de lixiviados.

Alrededor de los 13.64 m de profundidad se detecta un estrato presentando una resistividad del orden de 5.14 Ohm-m, el espesor de este paquete litológico impregnado por lixiviado es alrededor de 19.76 m. Esta capa se asocia al terreno natural conformado por conglomerados compuesto por arena y grava (UG2). Siendo un material poco consolidado, este cuerpo litológico presenta la propiedad de ser permeable.

Por último a partir de 33.42 m de profundidad se detectan resistividades del orden de 83.57 Ohm-m, resistividad asociada a un conglomerado conformado por arena y gravas, el cual aun no está impregnada por el lixiviado (UG3), pero no se descarta la posibilidad de que este cuerpo litológico presente en un futuro cierta impregnación del lixiviado, esta capa presentando un espesor indefinido, y se caracteriza como una capa permeable.

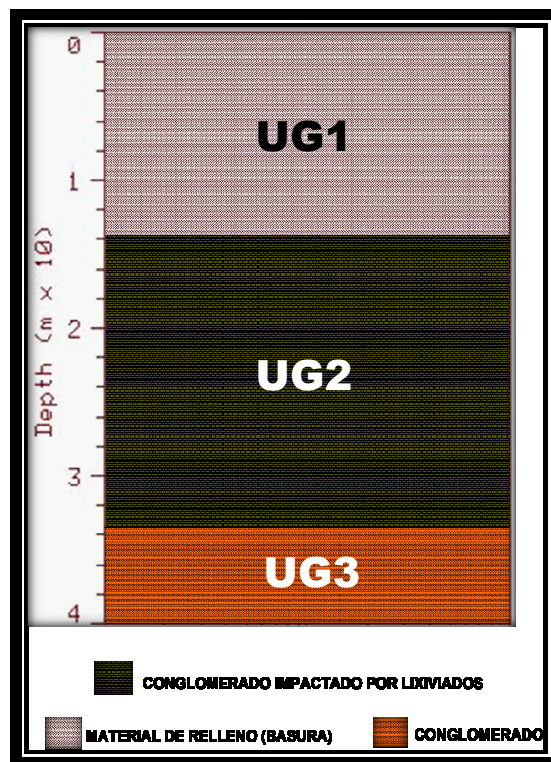


Figura 40. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 4.



### 5.8.5. Sondeo Eléctrico Vertical 5

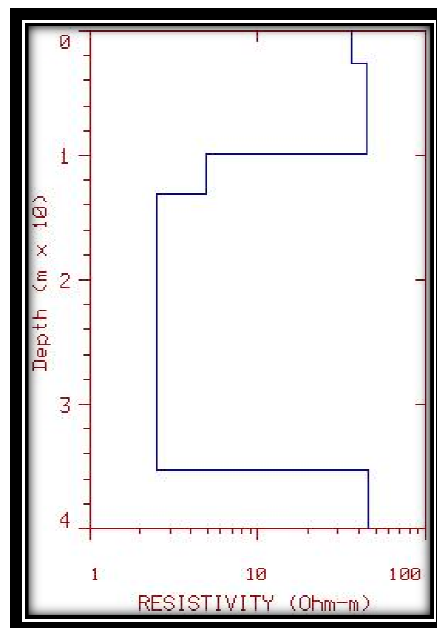
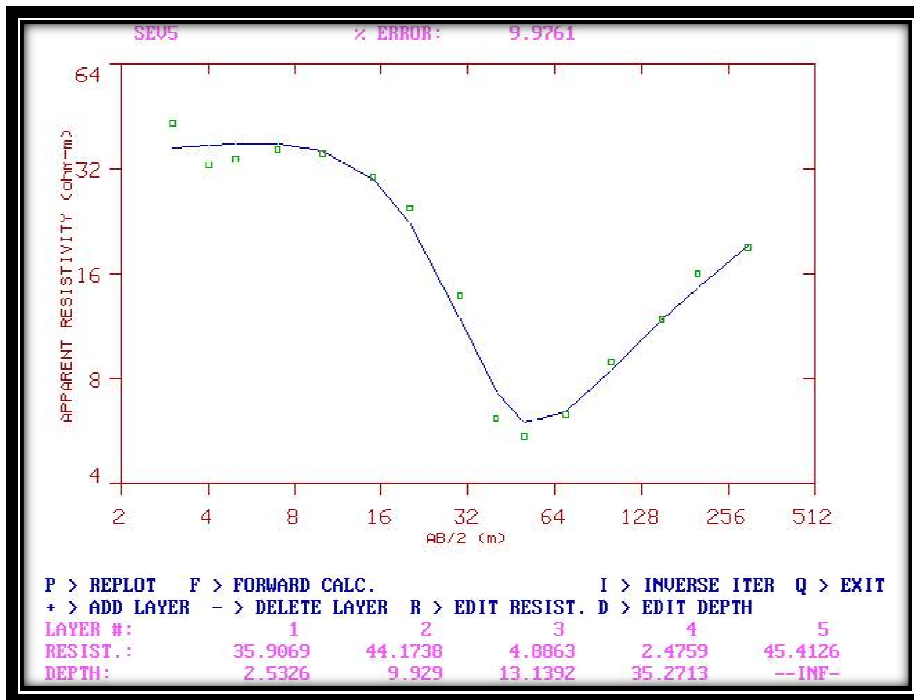


Figura 41. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 5.

El Sondeo Eléctrico Vertical 5 se realizó aproximadamente a 76 m al sur del SEV-4, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 3 capas.

Una capa superficial formada por una capa de materiales de relleno (basura) (UG1), presentándose con 9.92 m de espesor y resistividad de 44.17 Ohm-m, este horizonte podemos caracterizarla como una unidad generadora de lixiviados.

Por debajo del estrato anterior se encuentra un estrato de 4.88 Ohm-m, con espesor de 25.34 m, el cual se asocia al terreno natural conformado por conglomerados compuesto por arena y grava impactadas por lixiviados provenientes de la capa superior (UG2). Siendo un material poco consolidado, este cuerpo litológico presenta la propiedad de ser permeable.

Por último a partir de 35.27 m de profundidad se detectan resistividades alrededor de 50 Ohm-m, resistividad asociada a un conglomerado compacto conformado por arena y gravas, el cual aun no está impregnada por el lixiviado (UG3). Esta capa presenta un espesor indefinido y, también, se caracteriza como una capa permeable. Es importante mencionar que este cuerpo posiblemente será afectado por el lixiviado proveniente de las capas superiores.

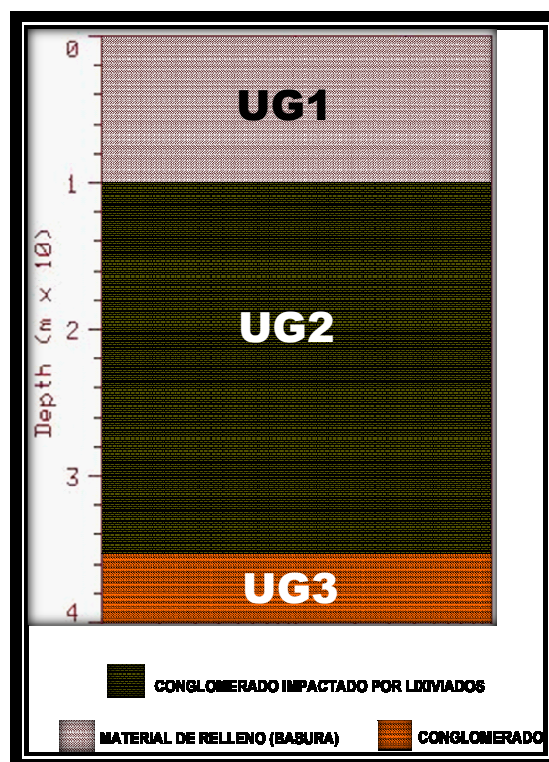


Figura 42. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 5.

### 5.8.6. Sondeo Eléctrico Vertical 6

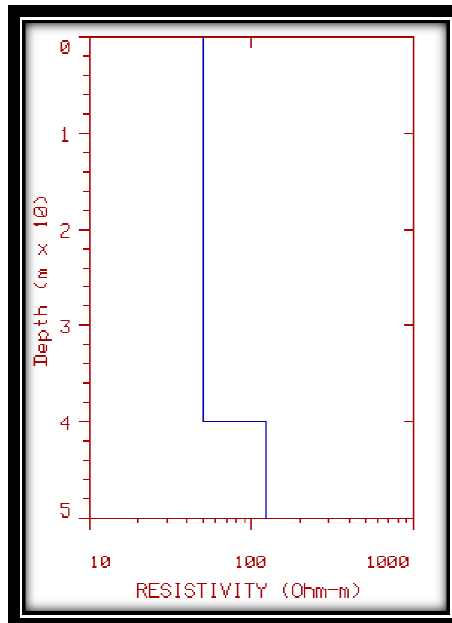
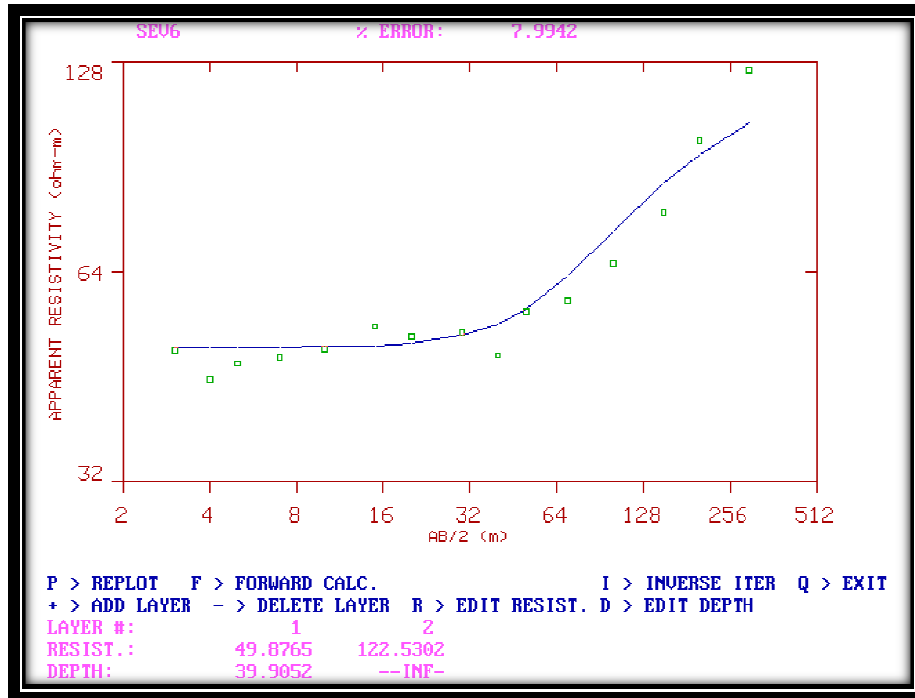


Figura 43. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 6.

El Sondeo Eléctrico Vertical 6 se realizó aproximadamente a 141 m al oeste del SEV-5, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 2 capas.

Una capa superficial de resistividad de 49.87 Ohm-m con 39.90 m de espesor aproximado (UG1), formado por un conglomerado conformado por arena y gravas, este conglomerado presenta muy poco materiales de relleno (basura). Este estrato, no presenta impregnaciones de lixiviado.

Por último a partir de 39.90 m de profundidad se detectan resistividades del orden de 120 Ohm-m, resistividad asociada a un conglomerado muy compacto conformado por arena y mayor cantidad de gravas (UG2). Este estrato, al igual que el anterior no presenta impregnaciones de lixiviado, pero la posibilidad de que este cuerpo litológico y el estrato anterior presente en un futuro cierta impregnación del lixiviado no se descarta. Esta capa presenta un espesor indefinido, y también se caracteriza como una capa semipermeable.

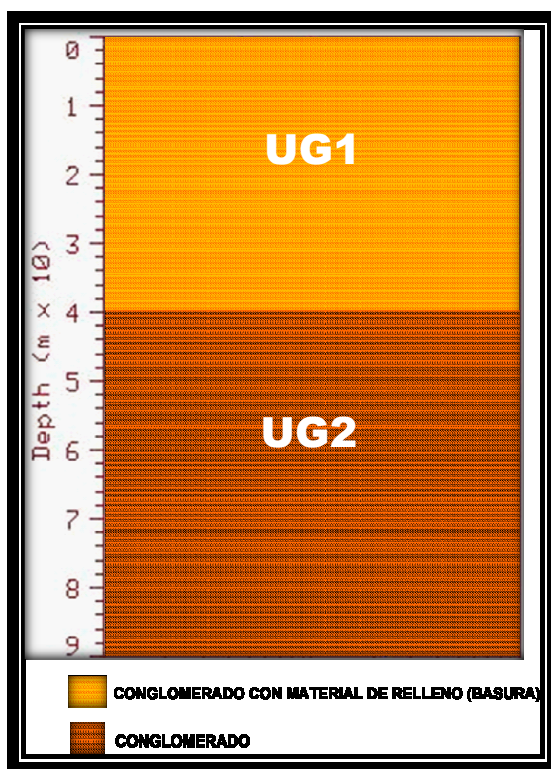


Figura 44. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 6.

### 5.8.7. Sondeo Eléctrico Vertical 7

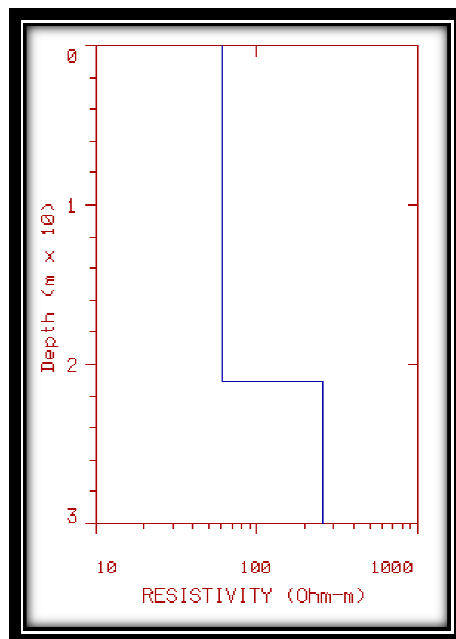
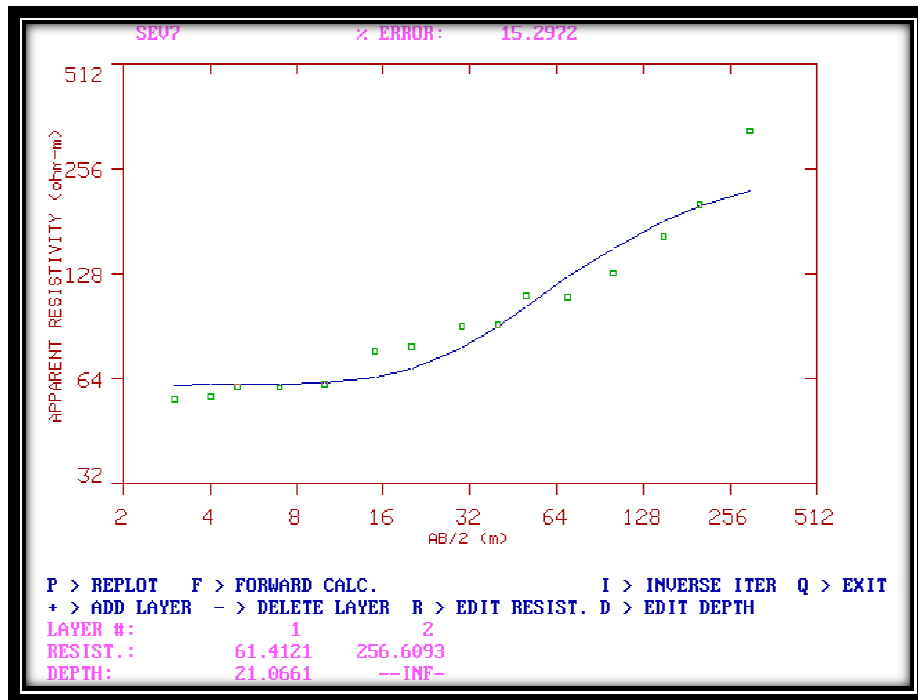


Figura 45. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 7.

El Sondeo Eléctrico Vertical 7 se realizó aproximadamente a 141 m al oeste del SEV-6, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 2 capas.

La primera capa se conforma por un conglomerado conformado por arena y gravas (UG1), este conglomerado presenta muy poco materiales de relleno (basura) y una mayor consolidación, presentándose con 21.16 m de espesor y resistividad de 61.41 Ohm-m, este horizonte podemos caracterizarla como un estrato aún no impregnado por lixiviado.

Se detecta una última capa a 21.06 m de profundidad con resistividades mayores a 200 Ohm-m, resistividad asociada a un conglomerado muy compacto conformado por arena y mayor cantidad de gravas (UG2), no impregnado aun por el lixiviado. Esta capa presentando un espesor indefinido, y también se caracteriza como una capa semipermeable.

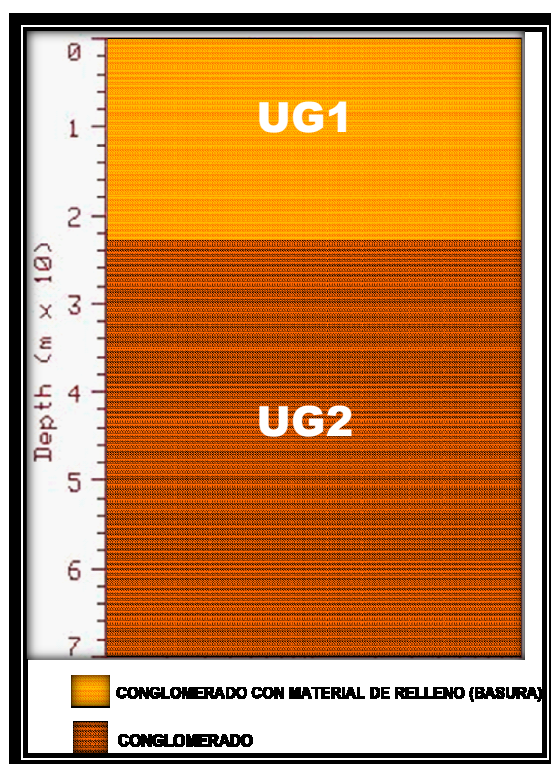


Figura 46. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 7.

### 5.8.8. Sondeo Eléctrico Vertical 8

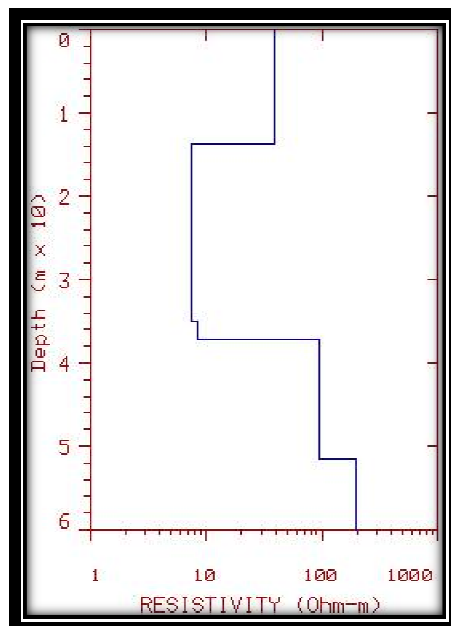
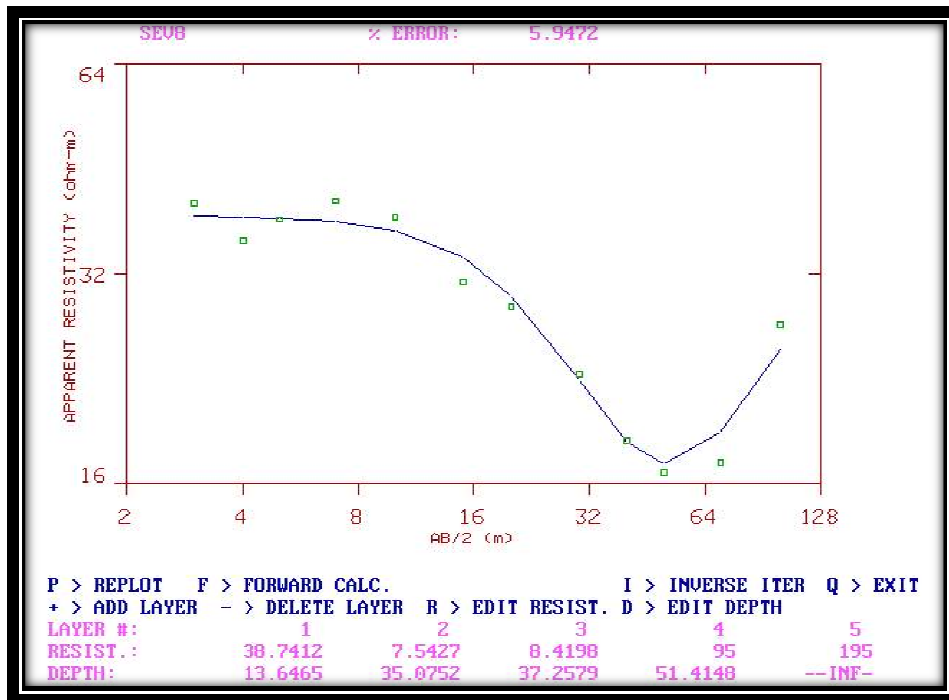


Figura 47. Perfil y Modelo de Capas del Sondeo Eléctrico Vertical 8.

El Sondeo Eléctrico Vertical 8 se realizó aproximadamente a 61 m al sur del SEV-2 y a 105 m al noroeste del SEV-4, determinando la estratigrafía particular de este sitio y obteniendo un modelo de ajuste con 3 capas.

Presentándose como la primera y más superficial (UG1), es la conformada por materiales de relleno (basura), presentando un espesor de 13.64 m y resistividad del orden de 38.74 Ohm-m, este horizonte podemos caracterizarla como una unidad generadora de lixiviados.

Subyaciendo al paquete anterior se detecta un estrato asociado a el terreno natural conformado por conglomerados compuesto por arena y grava, los cuales se encuentran impactados por lixiviados provenientes de la capa superior (UG2), la resistividad que presenta es del orden de 8.41 Ohm-m, el espesor de este paquete es alrededor de 23.61 m. Este cuerpo litológico presenta la propiedad de ser permeable.

Por último a partir de 37.25 m de profundidad se detectan resistividades mayores a 100 Ohm-m, resistividad asociada a un conglomerado compacto conformado por arena y gravas, el cual aun no está impregnada por el lixiviado (UG3), pero no se descarta la posibilidad de que este cuerpo litológico presente en un futuro cierta impregnación del lixiviado, el espesor de capa es indefinido, y se caracteriza como capa semipermeable.

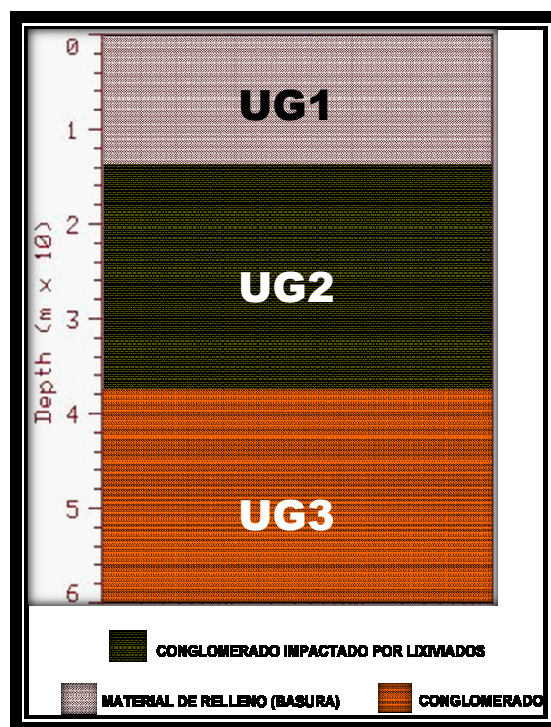


Figura 48. Modelo de Capas Propuesto Para el Sondeo Eléctrico Vertical 8.



## 5.9. Secciones Geoelectricas

Para poder generar las secciones geoelectricas fue necesario el tomar en consideración la orientación del azimut en los 8 Sondeos Eléctricos Verticales, la cual debe de ser la misma, para que de esta forma ayudándonos de la información geológica obtenida mediante el procesamiento de cada uno de los Sondeos Eléctricos Verticales se pueda comprender el comportamiento litológico y posteriormente hidrogeológico que nuestra zona de estudio presenta. Se obtuvieron un total de cuatro cortes, mostrados a continuación:

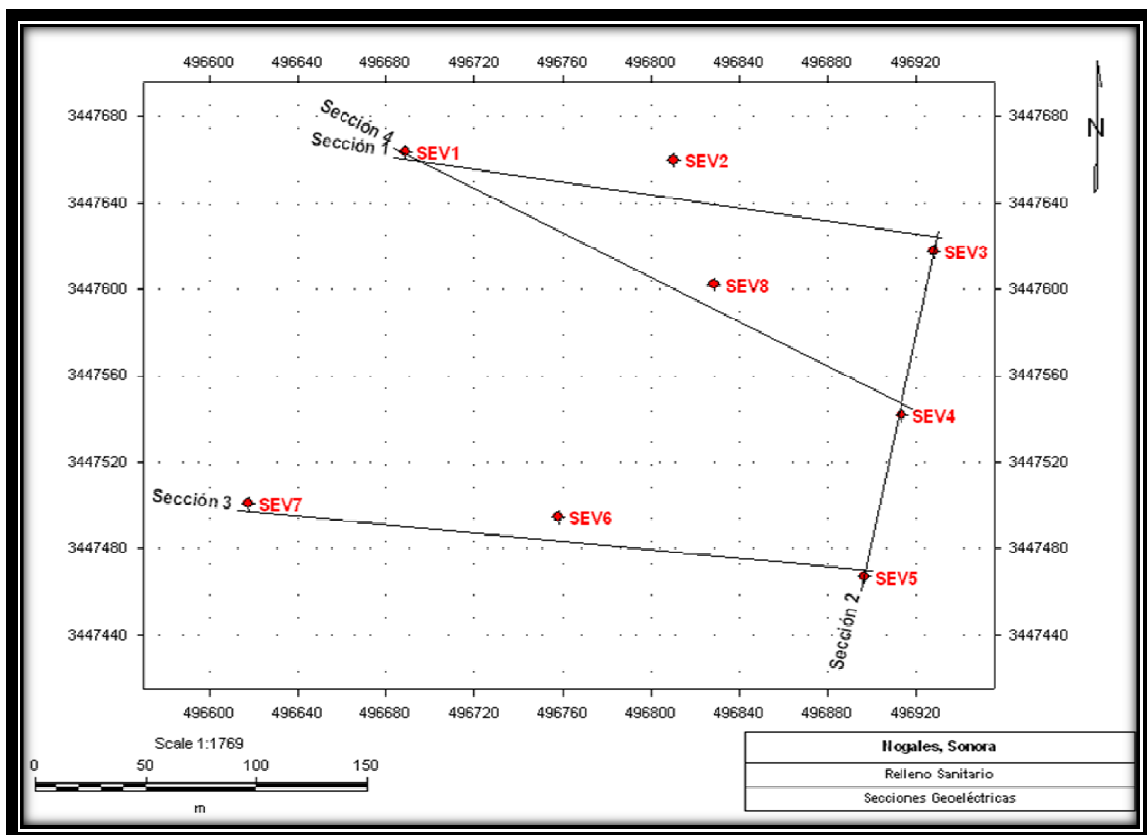


Figura 49. Secciones Geoelectricas Realizadas.

### 5.9.1. Sección Geoelectrica 1:

Se realizo el procesamiento mediante el software WinGLink, junto con los modelos de capas obtenidos a partir del software RESIX PLUS y mediante la información geológica recopilada y analizada, así como la calibración de los mismos, obtenemos el siguiente resultado:

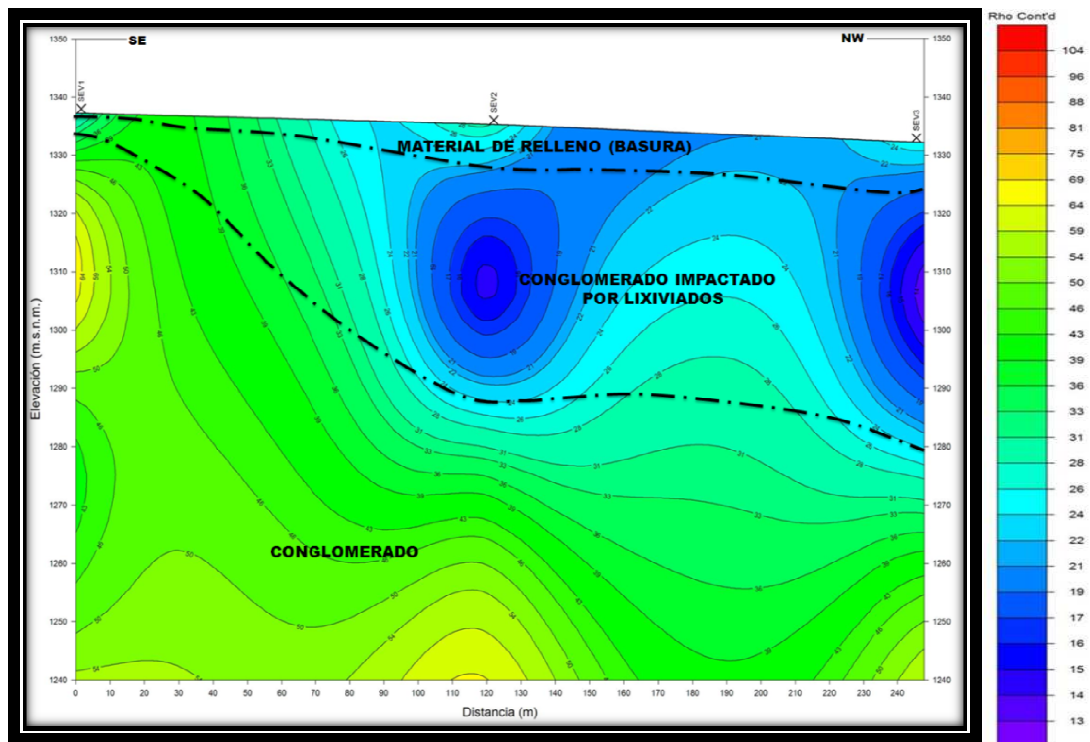


Figura 50. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 1.

5.9.2. Sección Geoeléctrica 2:

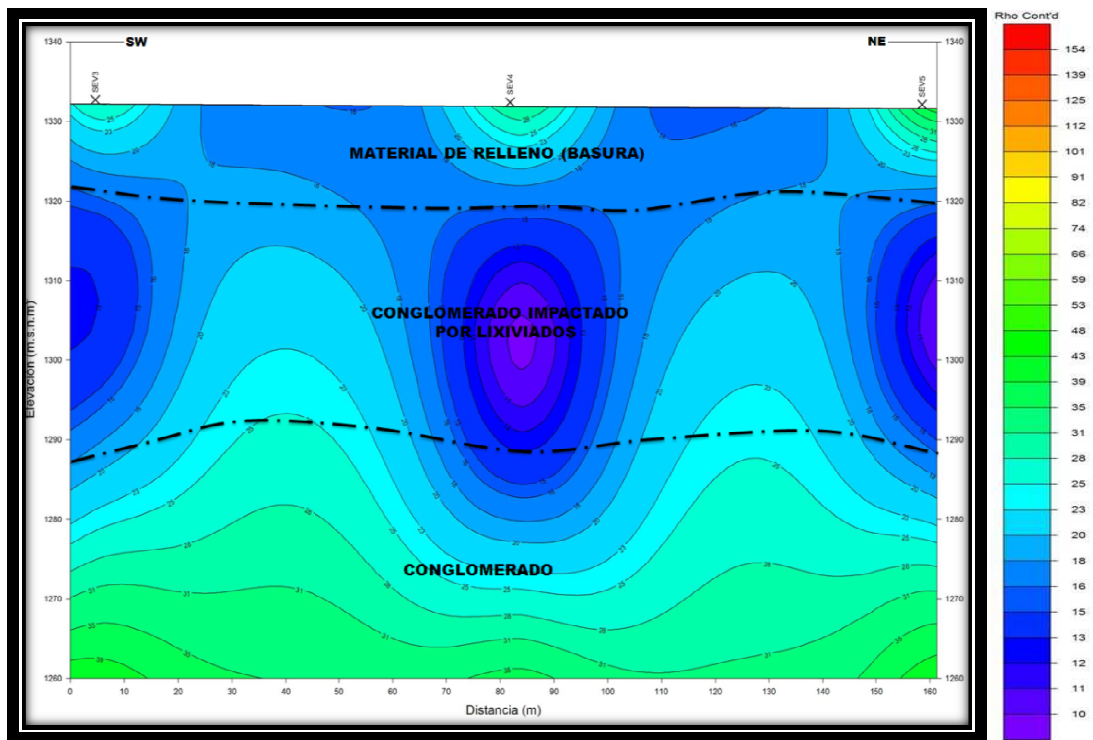


Figura 51. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 2.

### 5.9.3. Sección Geoeléctrica 3:

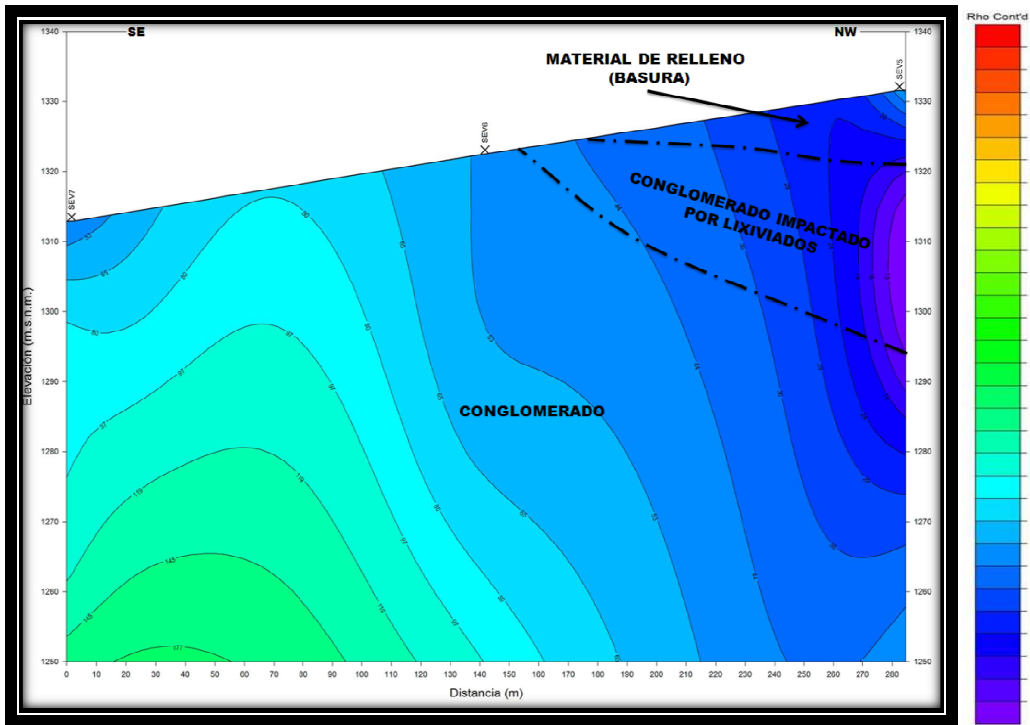


Figura 52. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 3.

### 5.9.4. Sección Geoeléctrica 4:

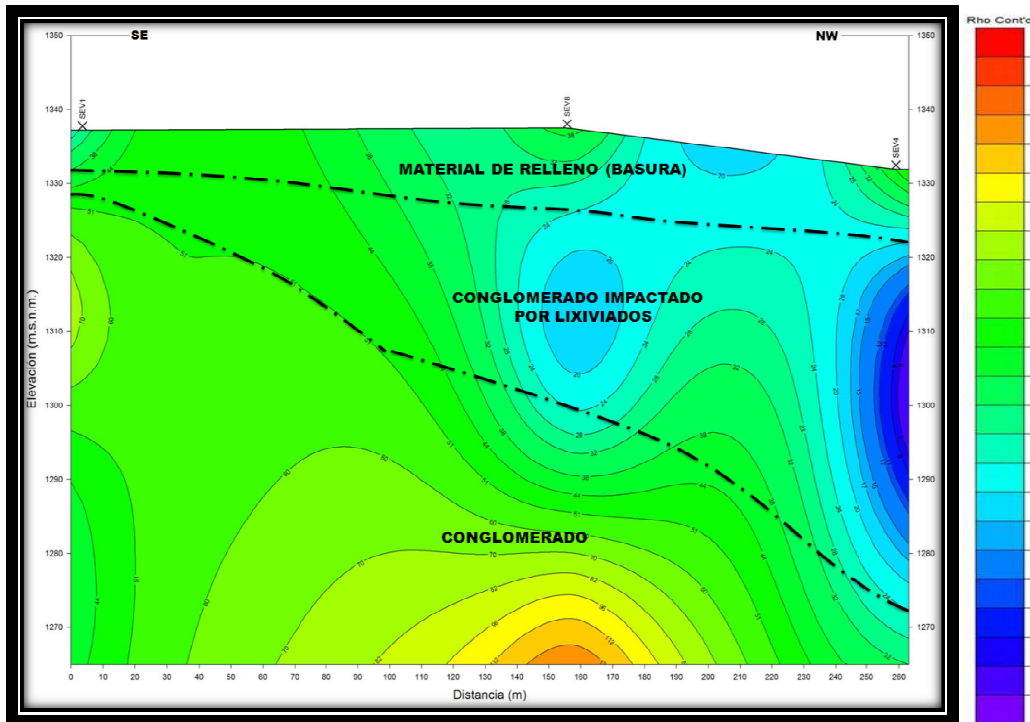


Figura 53. Modelo Obtenido de la Sección Geoeléctrica 4.

## 5.10. Análisis e Interpretación de las Secciones Geoeléctricas

### Sección Geoeléctrica 1

La Sección Geoeléctrica 1 conformado por los SEV-1, SEV-2 y SEV-3, se detectaron los siguientes paquetes geológicos.

Localizamos una capa superficial donde se detectan resistividades que van del orden de 20 a 40 Ohm-m indicativas de materiales de relleno (basura), presentando un espesor máximo de 10 m al centro de la sección y como espesor mínimo en la parte donde se encuentra colocado el SEV-1 (UG1). Este primer paquete de rellenos constituido por basura, conforma la superficie del terreno, el cual al parecer ha sido cortado y rellenado.

Por debajo del paquete anterior se detectaron resistividades bajas del orden de 14 a 22 Ohm-m, asociadas a el terreno natural conformado por conglomerados, los cuales se encuentran impactados por lixiviados provenientes de la capa superior (UG2), el espesor máximo de este paquete litológico impregnado por lixiviados es alrededor de 40 m en la parte donde fue realizado el SEV-3. Debido a los valores de resistividad presentes en la zona, este paquete se caracteriza por ser de un material permeable.

Subyaciendo a los dos paquetes anteriores se detectan resistividades mayores a 70 Ohm-m asociadas a un paquete geológico constituido por conglomerado, en estado natural (UG3). El espesor de este paquete litológico es de más de 80 m, y conforma el basamento geológico del sitio, también es posible que en este horizonte geológico se encuentre el acuífero de la región.

Mediante la geología local del sitio y en los resultados obtenidos del estudio Geofísico, obtenemos el siguiente modelo:

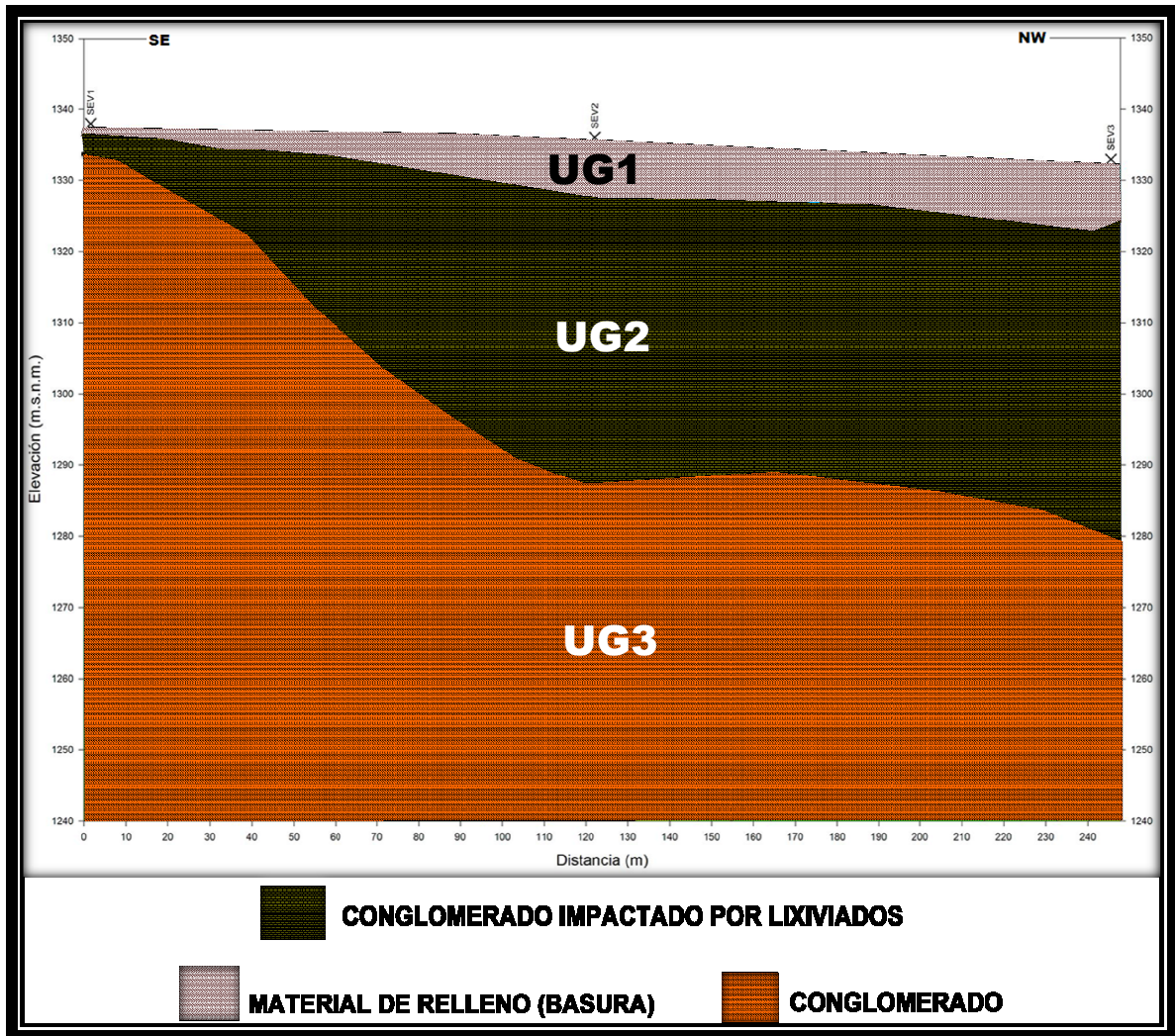


Figura 54. Modelo de Capas Propuesto para la Sección Geoeléctrica 1.

## **Sección Geoeléctrica 2**

La Sección Geoeléctrica 2 muestra conformado por los SEV-5, SEV-4 y SEV-3, se detectan los siguientes paquetes geológicos.

Superficialmente corresponde a un paquete litológico con registro de resistividades del orden de 18 a 35 Ohm-m y con un espesor máximo de 15 m en la parte central de la sección, asociando este cuerpo litológico a un material de relleno (UG1). Este primer paquete de rellenos constituido por basura conforma la superficie del terreno, el cual en esta zona presenta prácticamente uniformidad a profundidad.

Como segunda capa litológica localizada, encontramos resistividades del orden de 7 a 12 Ohm-m, asociadas al terreno natural conformado por conglomerados, los cuales se encuentran ya impregnados por lixiviados provenientes de la capa superior (UG2), lo que distingue a esta capa como un material permeable. El espesor máximo de este paquete litológico es alrededor de 45 m.

Por último, alrededor de los 50 m de profundidad se detectan resistividades mayores a 60 Ohm-m, asociadas a un conglomerado, en estado natural (UG3). El espesor que este paquete litológico presenta es de más de 80 m, y conforma el basamento geológico del sitio haciendo posible que en este horizonte geológico se encuentre el acuífero de la región.

Mediante la geología local del sitio y en los resultados obtenidos del estudio Geofísico, obtenemos el siguiente modelo:

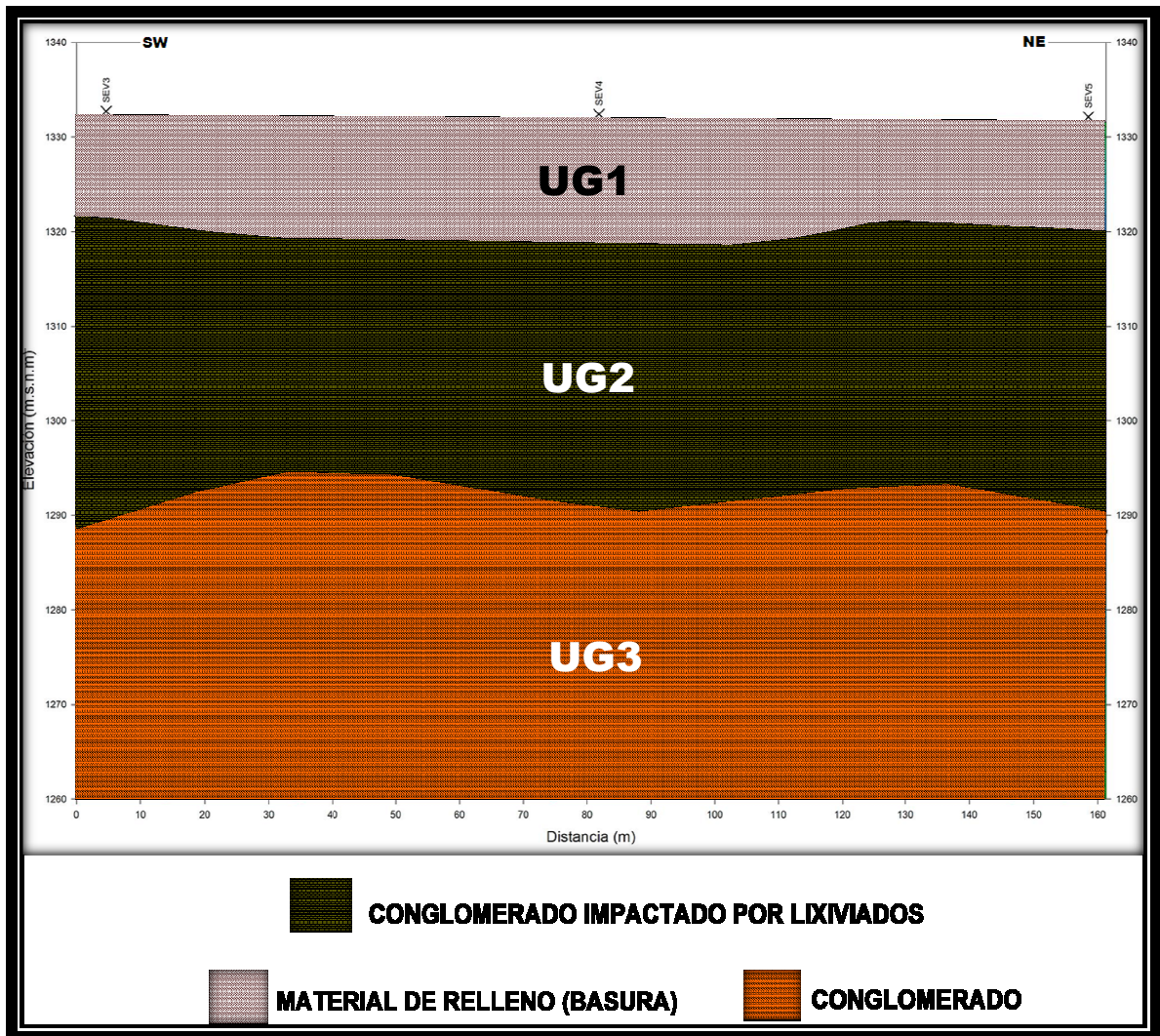


Figura 55. Modelo de Capas Propuesto para la Sección Geoeléctrica 2.

### **Sección Geoeléctrica 3**

La Sección Geoeléctrica 3 muestra el perfil de resistividad conformada por los SEV-5, SEV-6 y SEV-7.

Superficialmente y en las inmediaciones del SEV-5 se detectan resistividades del orden de 16 a 29 Ohm-m indicativas de materiales de relleno, con un espesor máximo de 10 m en la dirección Este del perfil (SEV-5), hacia a la dirección Oeste (SEV-6 y 7), este horizonte se acuña tendiendo a desaparecer antes de llegar al sitio donde se realizó el SEV- 6. Este primer paquete de rellenos constituido por basura conforma la superficie del terreno, el cual al parecer ha sido seccionado y rellenado (UG1).

Como segunda capa, por debajo de la anterior se detectan resistividades menores a 15 Ohm-m, correspondientes a un conglomerados ya impactado por lixiviados provenientes de la capa superficial, el espesor de este paquete litológico impregnado por lixiviados es alrededor de 20 m (UG2), reduciendo su espesor hasta desaparecer en las inmediaciones del SEV-6. Este paquete se caracteriza por ser de un material permeable.

Presentando como ultima capa geológica a un conglomerado, en estado natural detectando resistividades mayores a 51 Ohm-m y esta capa se encuentra aflorando en superficie en el sitio donde se realizo el SEV- 6 y 7, presentando cambios de resistividades causadas por el grado de compactación y consistencia de clastos del material (UG3). Presenta un espesor indefinido considerando que este estrato esta conformando el basamento geológico del sitio.



Usando la geología local del sitio y en los resultados obtenidos del estudio Geofísico, obtenemos el siguiente modelo:

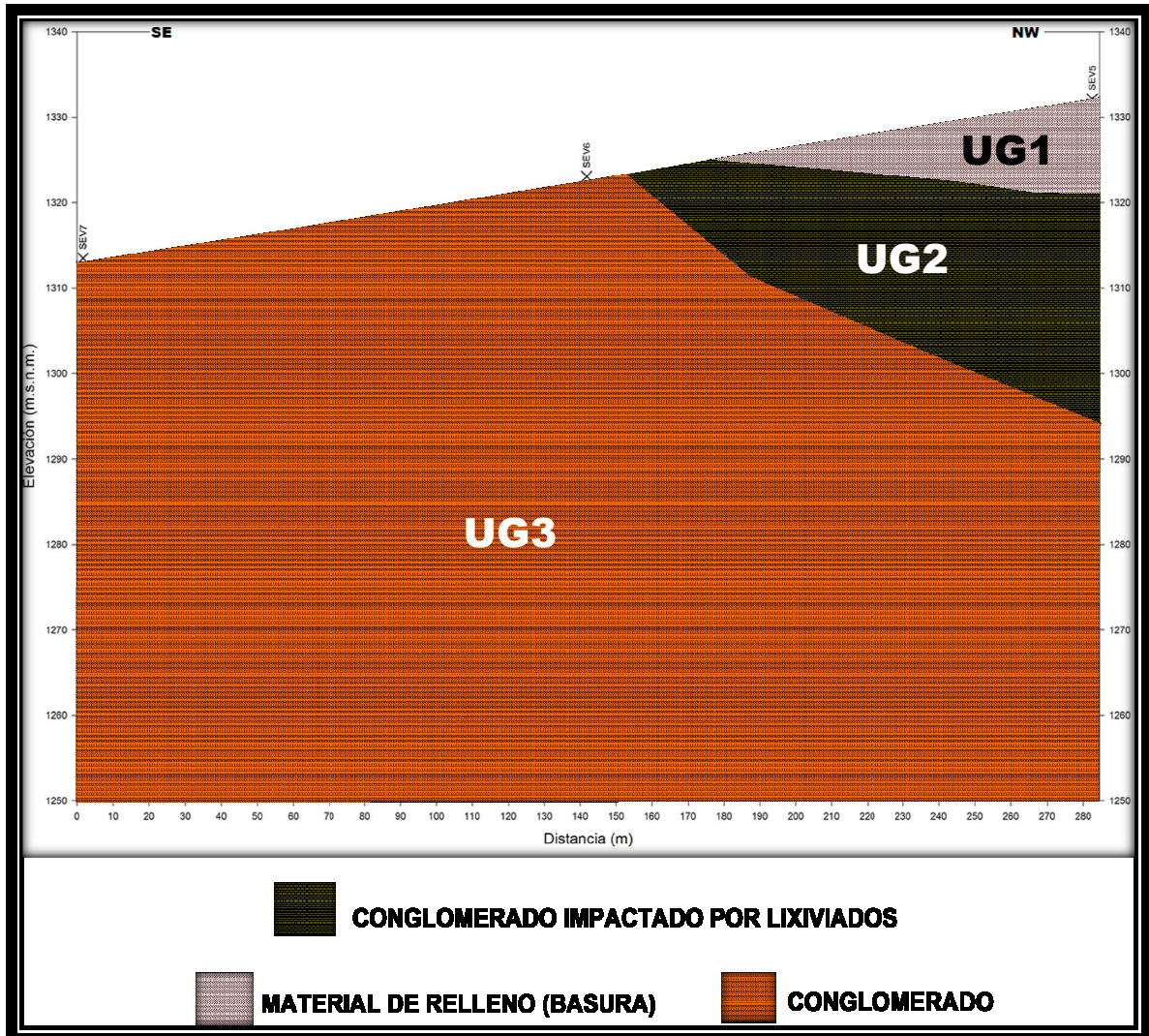


Figura 56. Modelo de Capas Propuesto para la Sección Geoeléctrica 3.

#### **Sección Geoeléctrica 4**

La Sección Geoeléctrica 4 conformada por los SEV-1, SEV-8 y SEV-4, se detectan los siguientes paquetes geológicos.

Como capa somera, se asocia a materiales de relleno (basura) con resistividades de 24 a 40 Ohm-m, con un espesor máximo de 13 m al Sureste de la sección. Este primer paquete de rellenos constituido por basura, conforma la superficie del terreno (UG1), el cual al parecer ha sido cortado y rellenado.

Como segunda capa asociadas al terreno natural conformado por conglomerados, caracterizándolo como un material permeable y por lo cual se encuentran impactados por lixiviados provenientes de la capa superior (UG2), presentando valores de resistividad de 8 a 20 Ohm-m, como espesor máximo de este paquete litológico impregnado por lixiviados es alrededor de 50 m al Sureste de la sección y reduciéndose acercándonos a las inmediaciones del SEV-1..

Por debajo de los dos paquetes descritos anteriormente, se detectaron resistividades de mayores a 50 Ohm-m asociadas a un conglomerado, en estado natural (UG3). El espesor de este cuerpo litológico es de más de 80 m, y conforma el basamento geológico del sitio, mismo que aloja el acuífero de la región.

Correlacionando la geología local y en los resultados obtenidos del estudio Geofísico, obtenemos el siguiente modelo:

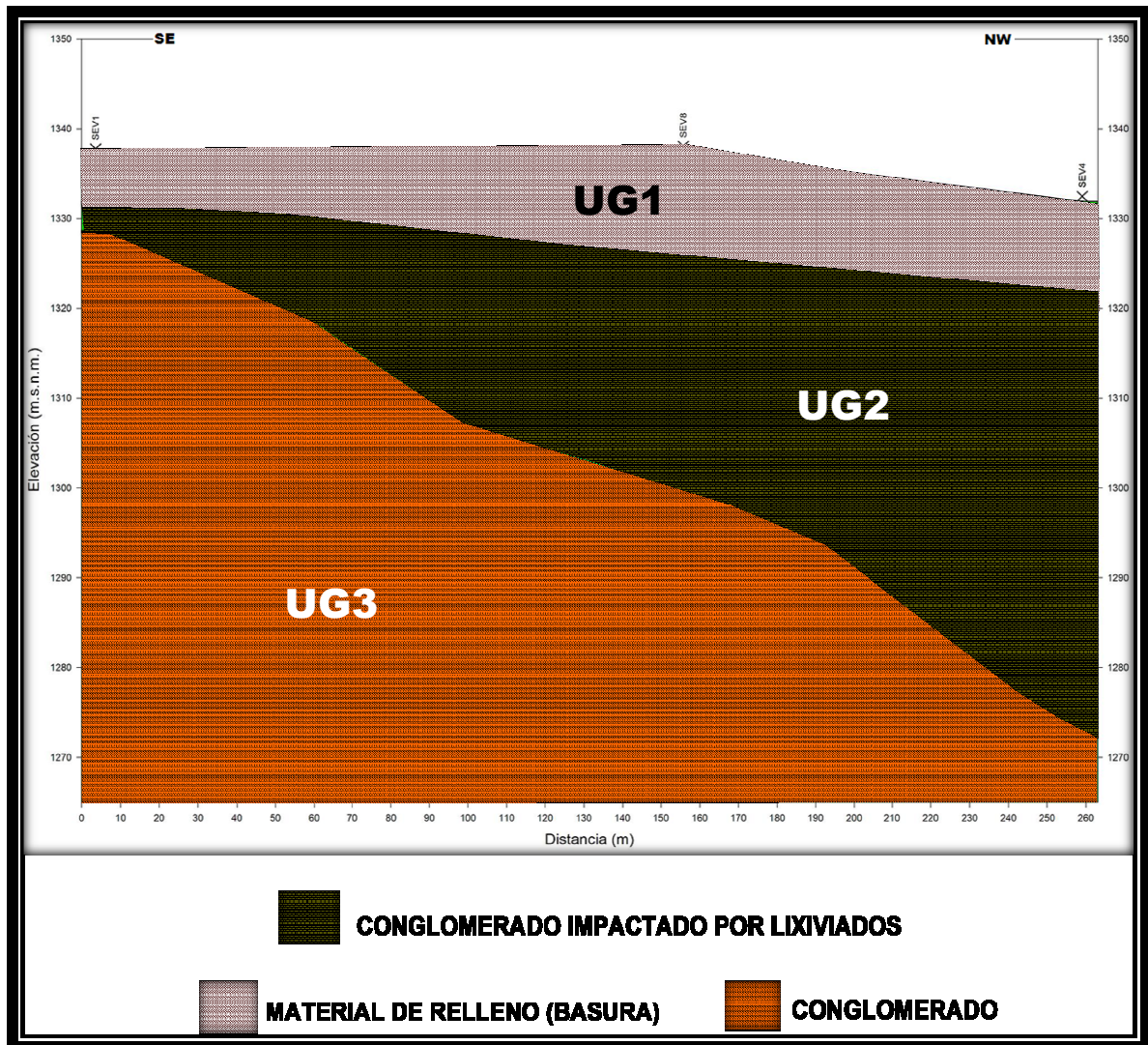


Figura 57. Modelo de Capas Propuesto para la Sección Geoeléctrica 4.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la exploración geofísica se tienen las siguientes conclusiones:

- 1) Las unidades geológicas que predominan en el área de estudio son materiales clásticos de mediana a alta permeabilidad lo que ha permitido el flujo vertical de lixiviados en el subsuelo del sitio, llegando a presenciarse la infiltración de este.
- 2) Es importante resaltar que en el área de estudio no se detectaron estructuras geológicas regionales como fracturas, fallas o agrietamientos, que agraven la migración de lixiviados, hacia el subsuelo profundo.
- 3) En el sitio donde se realizó el SEV 6 y 7 casi no se tiene presencia de material de relleno (basura), por lo que en esta zona no se presentan indicios de lixiviados.
- 4) A partir de los resultados encontrados en las secciones calculadas, estas nos indican una zona con importantes cantidades de rellenos saturados, es decir, existe una mayor concentración de desechos en la parte Oriente del sitio, provocando que en esta región el subsuelo de esta zona es el más impactado por lixiviados, de esta manera en esta región los materiales que presentan impregnación del lixiviado podremos encontrarlos a por lo menos 40 m de profundidad, zona donde se realizó la Sección Geoeléctrica 2.
- 5) A través de este estudio realizado, así como la geología investigada, se podría decir que el área estudiada presenta superficialmente materiales clásticos, los cuales presentan la característica de tener de mediana a alta permeabilidad. Debido a la constitución que presenta, el acuífero funciona como *semiconfinado* donde el confinamiento superior está constituido por conglomerados y el confinamiento inferior está constituido por rocas ígneas, originada en la actividad ígnea que hubo en el lugar debido la tectónica distensiva ocurrida en el Mioceno.

- 6) De acuerdo con información recabada en la Comisión Nacional del Agua, la zona de estudio presenta una dirección del flujo subterráneo principal N-S; obtenida mediante la elevación de los niveles de agua que varían entre 1190 y 1000 m.s.n.m., por lo anterior se infiere que el flujo de agua es de los flancos montañosos hacia los valles en dirección al sur. Debido a esto se estima que el nivel estático en la región se encuentra a profundidades de 142 m a 150 m, basándonos en este dato y en que la unidad que conforma el terreno natural expuesto en superficie se clasifica como conglomerados del terciario, de gran espesor y que debido a su permeabilidad el estrato permite la infiltración de los lixiviados hasta una profundidad que finalmente puede llegar a contaminar el acuífero de la región.
- 7) Por lo anteriormente mencionado y documentado, es factible que el relleno de Nogales, Sonora sea un potencial foco de contaminación a nivel atmosférico y para los acuíferos de la zona. Por lo que es recomendable hacer una comprobación mediante métodos directos, como podrían ser cortes litológicos de pozos para corroboración de este estudio Geofísico.
- 8) Se recomienda realizar un análisis de la calidad del agua en los pozos cercanos, para evaluar si el flujo de lixiviados al subsuelo profundo del sitio ha alcanzado el acuífero del lugar el cual se estima se encuentra a profundidades de entre 142 y 150 m.

**ANEXOS**

***Anexo A. Anexo Fotográfico***



**Reconocimiento del Terreno para la Realización del Estudio.**



**Equipo de Exploración Geoeléctrica en la Zona de Estudio.**



**Instalación del Equipo de Exploración Geoeléctrica para Realizar el SEV-1.**



**Instalación del Equipo de Exploración Geoeléctrica para Realizar el SEV-3.**



**Instalación del Equipo de Exploración Geoeléctrica para Realizar el SEV-5.**



**Instalación del Equipo de Exploración Geoeléctrica para Realizar el SEV-7.**





**Instalación del Equipo de Exploración Geoeléctrica para Realizar el SEV-8.**



**Adquisición de Datos**

## **Anexo B.**

### ***Legislación y Reglamentación Existente (SEDUE, Gacetas Ecológicas. 1989, 1990.)***

#### **Nivel Federal**

Las reformas realizadas a los artículos 27 y 73 de la Constitución Mexicana, con que se elevó a rango constitucional la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico, son la base principal de sustento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, sus reglamentos y normas.

#### **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.**

Esta Ley, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 28 de enero de 1988, entró en vigor el primero de marzo del mismo año; es la ley reglamentaria de las disposiciones constitucionales que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente.

En relación con la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios (artículo 134):

Las descargas, depósitos o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en el suelo se sujetarán a lo que disponga esta Ley, sus disposiciones reglamentarias y las normas técnicas ecológicas correspondientes (artículo 139).

Se deben controlar los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos.

Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se considerarán, entre otros casos (artículo 136):

En la operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios y

En las autorizaciones para la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos.

Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar modificaciones en el suelo que alteren su aprovechamiento, uso o explotación, y los riesgos y problemas de salud.

A su vez, la instalación y operación de los sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de los residuos peligrosos requerirá de la autorización previa de la SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología).

### **Reglamento de la Ley en Materia de Residuos Peligrosos.**

Este reglamento fue publicado en el Diario Oficial de la Federación del 25 de noviembre de 1988, habiendo entrado en vigor al día siguiente de su publicación.

La aplicación de este reglamento compete al Ejecutivo Federal por conducto de la SEDUE, sin perjuicio de las atribuciones que correspondan a otras dependencias del propio Ejecutivo Federal. Las autoridades del Distrito Federal, de los estados y los municipios podrán participar como auxiliares de la Federación en la aplicación del presente reglamento (artículo 2).

Le compete a la SEDUE (artículo 4):

Determinar y publicar en el Diario Oficial de la Federación los listados de residuos peligrosos, así como sus actualizaciones, en los términos de la Ley.

Autorizar la instalación y operación de sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de los residuos peligrosos.

Dar a sus residuos peligrosos la disposición final que corresponda de acuerdo con los métodos previstos en el reglamento y con forme a lo dispuesto por las normas técnicas ecológicas aplicables.

Se requiere autorización de la SEDUE para instalar y operar sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y

disposición final de los residuos peligrosos, así como prestar servicio en dichas operaciones, sin perjuicio de las disposiciones aplicables en materia de salud y seguridad e higiene en el trabajo (artículo 10).

Para las instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, previo a obtener la autorización indicada en el artículo anterior, el responsable del proyecto debe presentar ante la SEDUE la manifestación de impacto ambiental (artículo 11).

El transportista y el destinatario de los residuos peligrosos deben entregar a la SEDUE un informe semestral sobre los residuos que hayan recibido durante ese período, para su transporte o disposición final (artículo 25).

Los sistemas de disposición final previstos en el reglamento son:

Confinamientos controlados

Confinamientos en formaciones geológicas estables.

Receptores de agroquímicos

La selección del sitio, así como el diseño y construcción de confinamientos controlados y de receptores de agroquímicos deben sujetarse a las normas técnicas ecológicas respectivas (artículo 32).

El proyecto para la construcción de un confinamiento controlado debe comprender como mínimo, celdas de confinamiento, obras complementarias y en su caso, celdas de tratamiento (artículo 32).

Una vez que los residuos peligrosos han sido depositados bajo alguno de los sistemas referidos en el artículo 31, el generador o en su caso la empresa de servicios contratada para la disposición final, deben presentar a la SEDUE un informe mensual con la siguiente información (artículo 34):

Cantidad, volumen y naturaleza de los residuos peligrosos depositados.

Fecha de disposición final de los residuos peligrosos.

Ubicación del lugar de disposición final.

Sistema de disposición final utilizado para cada tipo de residuo.

A su vez, los lixiviados que se originen en las celdas de confinamiento o de tratamiento de un confinamiento controlado, deben recolectarse y tratarse para evitar la contaminación del ambiente y el deterioro de los ecosistemas (artículo 35).

La SEDUE puede determinar que ciertos residuos no deben ser depositados en ninguno de los sitios a que se refiere el reglamento. Es tos residuos deben tratarse de acuerdo a las normas correspondientes (artículo 40).

Por otro lado, no se concederá autorización para la importación de residuos peligrosos, cuyo único objeto sea su disposición final en el territorio nacional (artículo 53).

Se concedió un plazo de seis meses, contados a partir de la fecha en que entró en vigor el presente reglamento, para que las personas físicas o morales que a esa fecha se encuentren generando residuos, cumplieran con los requisitos y presentaran las solicitudes de autorización, los proyectos y los programas exigidos en el mismo.

Dentro de dicho plazo debieron presentar, además, un inventario sobre el volumen, características y procesos de generación de sus residuos peligrosos (artículo 3, Transitorio). Dado que este reglamento entró en vigor el 6 de noviembre de 1988, este plazo venció el 26 de mayo de 1989.

### **Normas Técnicas Ecológicas en Materia de Control de los Residuos Peligrosos.**

A la fecha se han publicado algunas normas técnicas ecológicas aplicables al generador de residuos peligrosos, y otras que se aplican a los sitios de disposición final.

#### A.- NTE-CRP-001/88

Esta norma técnica ecológica establece los criterios para la determinación de las características de peligrosidad de un residuo y el listado de los mismos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 6 de junio de 1988 y entró en vigor el día siguiente de su publicación.

#### B.-NTE-CRP-002/88

Esta norma técnica ecológica establece los procedimientos para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar la toxicidad al ambiente de un residuo. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 14 de diciembre de 1988. Esta norma entró en vigor el día siguiente de su publicación.

En esta norma se señalan las condiciones para llevar a cabo la prueba de extracción ya sea para un residuo volátil o no volátil, con el fin de determinar su toxicidad al ambiente.

Esta prueba está diseñada para simular las condiciones de disposición de un residuo y la posibilidad de formación de lixiviados, los cuales podrían alcanzar los acuíferos y contaminarlos, si el residuo no ha sido correctamente dispuesto.

#### C.- NTE-CRP-003/88

Esta norma técnica ecológica establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma técnica ecológica NTE-CRP-001/88. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de diciembre de 1988. Esta norma entró en vigor el día siguiente de su publicación.

Entre los requisitos que debe reunir el sitio destinado al confinamiento controlado de residuos peligrosos, se consideran los siguientes factores (artículo 4):

Geohidrológicos	De crecimiento de centros de población
Hidrología superficial	Sísmicos
Ecológicos	Topográficos
Climáticos	De acceso al sitio

Sin embargo, en caso de que el sitio seleccionado no cumpla con los requisitos señalados en el artículo 4, la SEDUE podrá autorizar la realización de medidas y obras cuyos efectos resulten equivalentes a los que se obtendrían de los requisitos indicados, cuando se acredite técnicamente su efectividad.

#### D.- NTE-CRP-008/88

Esta norma técnica ecológica establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos radiactivos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 1988. Esta norma entró en vigor el día siguiente de su publicación.

La federación hasta la fecha no ha expedido ninguna norma en lo referente a las condiciones que deben de cumplir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.

#### E.- NTE-CRP-009/88

Esta norma técnica ecológica establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado para residuos peligrosos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de septiembre de 1988. Entró en vigor el día siguiente de su publicación.

En esta norma se consideran las siguientes obras complementarias (artículo 4):

Áreas de acceso y de espera, Cerca perimetral y de seguridad, Caseta de vigilancia, Caseta de pesaje y báscula, Laboratorio, Caminos, Área de almacenamiento temporal, Área de emergencia, Área de limpieza, Drenaje, Instalaciones de energía eléctrica, Señalamientos, Pozos de monitoreo, Área de amortiguamiento, Taller de mantenimiento, Área administrativa, Servicios de primeros auxilios, Servicios sanitarios.

#### F.- NTE-CRP-010/88

Esta norma técnica ecológica establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de confinamiento controlado para residuos peligrosos determinados por la norma técnica ecológica NTE-CRP-001/88.

Entre los requisitos a observar en el diseño y construcción de una celda están (artículo 4):

- ❖ Contar con sistemas de captación de lixiviados
- ❖ Contar con sistemas de ventea, cuando los residuos sean capaces de producir gases o vapores.
- ❖ La altura de la estiba
- ❖ Las condiciones de impermeabilización
- ❖ Los muros de contención
- ❖ Espacios para asegurar el acceso y maniobras del equipo necesario para movilizar los residuos
- ❖ Pendientes de los taludes de la celda
- ❖ La necesidad de efectuar análisis estructural de los taludes y fondo de la celda
  
- ❖ Sobre la cubierta de la celda

También se indican los residuos que pueden ser depositados en las celdas y las condiciones de disposición (artículo 5). Además, se señalan los requisitos para el diseño y construcción de los sistemas de captación de lixiviados (artículo 6) y del sistema de venteo (artículo 7).

#### G.- NTE-CRP-011/89

Esta norma técnica ecológica establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989 y entró en vigor el día siguiente de su publicación.

Se requiere del uso de bitácoras y libros de registro de recepción de los residuos en el confinamiento, pesaje, análisis de laboratorio, plano general de las áreas y registro de monitoreos efectuados (artículo 4).



Se señalan las condiciones de recepción y pesaje de los residuos, los análisis de laboratorio a efectuar a los residuos, tratamientos, asignación del área y celdas de confinamiento y del monitoreo permanente para detectar posibles lixiviados y emisiones de gases y vapores generados en el interior de las celdas de confinamiento, así como de la calidad de las aguas subterráneas.

### **Formatos Requeridos**

#### **A.- Manifiesto de Entrega, Transporte y Recepción de Residuos Peligrosos.**

Se indica el formato para el manifiesto para el transporte y recepción de residuos peligrosos. Incluye el instructivo para el llenado del manifiesto. Fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de mayo de 1989.

#### **B.- Manifiesto para el caso de Derrame de Residuos Peligrosos por Accidente.**

Se indica el formato y se dan las instrucciones para el llenado del manifiesto para el caso de derrame de residuos peligrosos por accidente. Fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de mayo de 1989.

#### **C.- Reporte Semestral de Residuos Peligrosos.**

Enviados para su Reciclo, Tratamiento, Incineración o Confinamiento.

Se indica el formato y se dan las instrucciones para el llenado del reporte semestral de residuos peligrosos enviados para su reciclo, tratamiento, incineración o confinamiento. Fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de mayo de 1989.

#### **D.- Reporte Mensual de Residuos Peligrosos Confinados en Sitios de Disposición Final.**

Se indica el formato y se dan las instrucciones para el llenado del reporte mensual de residuos peligrosos confinados en sitios de disposición final. Fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de mayo de 1989.

### **Reglamento de la Ley en Materia de Impacto Ambiental.**

El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de impacto ambiental fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de junio de 1988 y entró en vigor al día siguiente de su publicación (artículo 1, Transitorio).

De acuerdo a este reglamento, las personas físicas o morales que pretendan realizar obras o actividades públicas o privadas, que pudieran causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señalados en los reglamentos y las normas técnicas ecológicas vigentes, deben contar con autorización previa de la SEDUE en materia de impacto ambiental.

Entre las actividades que deben cumplir con este requisito están las instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos (artículo 5, fracción VII).

Para obtener esta autorización, previo a la realización de la obra o actividad, se debe presentar a la SEDUE una manifestación de impacto ambiental (artículo 6).

Para aquellas obras o actividades consideradas como altamente riesgosas, además de la presentación de la manifestación de impacto ambiental, se debe presentar un estudio de riesgo, en los términos previstos por los ordenamientos que rijan dichas actividades (artículo 6).

### **Reglamentación Municipal**

De no más de 10 años a la fecha inició el fenómeno de la preocupación por el ambiente y el nacimiento de una cultura ecológica con mayor presencia en los municipios con mayor población, de esta situación se han derivado una serie de presiones a las cuales los municipios ya no se han podido hacer de lado.

Con base a ello y por la importancia política que se ha dado al mejoramiento del ambiente, se han desarrollado en los municipios una buena cantidad de reglamentos derivados del bando y que buscan el establecimiento de mejores y mayores controles para el manejo, tratamiento y disposición de los residuos sólidos municipales. Sin embargo en ninguna reglamentación municipal se establecen los factores que se deben considerar para la selección de un sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales.

## Factores a Considerar en la Selección de un Sitio para la Disposición de Residuos Sólidos y Peligrosos.

### Disposición de Residuos Sólidos Municipales.

En los siguientes incisos se presentan una serie de factores que deben ser considerados para la selección de un sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales mediante la utilización de rellenos sanitarios.

A continuación se presenta en forma fragmentada la relación de los factores principales a considerar:

Ubicación y característica físicas.	Uso actual del suelo en la zona.
Superficie disponible.	Disponibilidad de servicios públicos.
Restricciones de planeación urbana del sitio.	Disponibilidad de material de cobertura.
Distancia a los centros generadores.	Dirección de vientos en la zona.
Posibilidad de acceso al sitio.	Características geológicas de la zona.
Tenencia de la tierra.	Características hidrológicas del sitio.
Propiedades adyacentes al sitio.	Censo de pozos de abastecimiento de agua potable en las proximidades del sitio.

Requerimientos para la Utilización del Sitio:

Facilidades para la preparación del sitio.
Planificación urbana del lugar.
Costos de preparación y uso final.
Tendencias de desarrollo de la zona urbana.
Facilidad de adquisición o renta.
Necesidades de uso final del sitio.

Trabajos de la Infraestructura:

Facilidad de construcción de drenajes y caminos.
Facilidad de construcción de oficinas y áreas de servicios.
Facilidad de conectarse a los servicios públicos.

Factores Ecológicos:

No ubicarse en zonas de reserva ecológica.
Diseñar las operaciones para evitar la contaminación del medio ambiente.
Que el uso final del sitio sea compatible con su entorno.

Factores Sociales:

Contar con la aceptación de la comunidad.
---

Para el caso de la selección de un sitio para relleno sanitario, aquí en México hasta hace apenas diez años se inició la incorporación de métodos geotécnicos para determinar una serie de características necesarias para dar los elementos de juicio para la decisión final sobre el sitio que presentará condiciones favorables para llevar a cabo la construcción y operación de un relleno sanitario.

Así se incorporaron técnicas de geología, geohidrología, geofísica y de mecánica de suelos para determinar las características del suelo, la estratigrafía y las condiciones del agua subterránea en la zona.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad no existe ningún tipo de reglamentación en cuanto a la selección de sitios para la disposición de residuos sólidos municipales en el país.

## **Disposición de Residuos Peligrosos**

La selección de sitios para el establecimiento de confinamientos controlados está regida por la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-008/88.

Esta norma técnica ecológica establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos radiactivos.

La norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 1988. Esta norma entró en vigor el día siguiente de su publicación.

Entre los requisitos que debe reunir el sitio destinado al confinamiento controlado de residuos peligrosos, se consideran los siguientes factores (artículo 4):

Geohidrológicos	De crecimiento poblacional
Hidrología superficial	Sísmicos
Ecológicos	Topográficos
Climáticos	De acceso al sitio

Sin embargo, en caso de que el sitio seleccionado no cumpla con los requisitos señalados en el artículo 4, la SEDUE podrá autorizar la realización de medidas y obras cuyos efectos resulten equivalentes a los que se obtendrían de los requisitos indicados, cuando se acredite técnicamente su efectividad.

Esta norma debe ser revisada con periodicidad para que no queden obsoletas o incumplibles, como es el caso de algunos de los factores los que prácticamente desecha una gran parte de la república al no poder cumplir con los aspectos de sismicidad y de la distancia a los centros de población.

**(FACTORES A CONSIDERAR EN LA SELECCION DE  
SITIOS PARA LA DISPOSICION FINAL DE  
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS.)**

**A. Dávila Villarreal**

**Anexo C. Plano TJ**

**Pseudosecciones Colocados de Acuerdo a la abertura AB**

**\* VER MAPA ANEXO**

## REFERENCIAS

ALVAREZ M.C., ET AL. 1990. *Evaluación de la producción de lixiviados en un relleno sanitario: métodos*. VII Congreso SMISA, Oaxaca, Oax.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Los Chirriones, Estado de Sonora*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F., Abril de 2002.

CONSORCIO AMBIENTAL Y DE SERVICIOS S.A. DE C.V. "Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad General del Relleno Sanitario Metropolitano Poniente "Picachos". Guadalajara. 1999

GEORGE TCHOBANOGLIOUS "Desechos Sólidos Principios de Ingeniería y Administración". Venezuela 1982

GRIFFITHS, D.H. y KING, R.F., *Geofísica Aplicada para Ingenieros y Geólogos*. Pergamon Press, España. 1972.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx) (Enero de 2009)

KELLER, George. ELECTRICAL METHODS IN GEOPHYSICAL PROSPECTING. Ed. Pergamon Press. Great Britain, 1966

LÓPEZ RAMOS, E., *Geología General de México*; Quinta Edición, Vol. 1, México D.F. 1981

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de Protección Ambiental para la Selección del Sitio, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura y Obras Complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial.

ORELLANA, E., *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Editorial Paraninfo, Madrid, España, 1972.

Página web de "BioEngineer", Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 2008

Página web del H. Ayuntamiento de Nogales Sonora.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 1997. *Carta Geológica-Minera de Nogales, Sonora, H12-2*, Esc. 1:250000

SEDUE, Gacetas Ecológicas. 1989, 1990.

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS A.C. 1991. *Simposio Geotecnia y Medio Ambiente*.

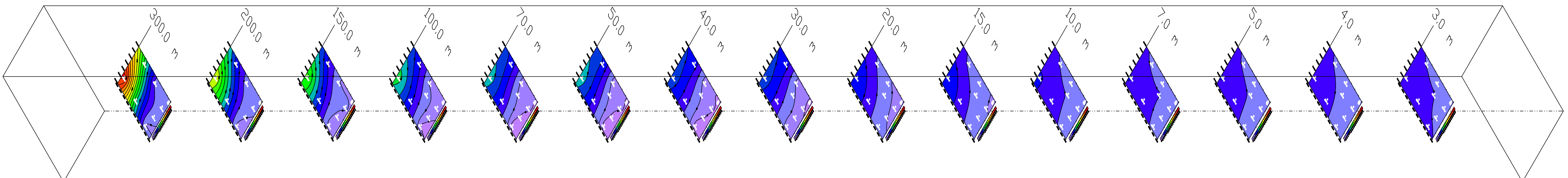
TELFORD, W.M., L.P. Gerdart y R.E. Sheriff, 1990. *Applied Geophysics: Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge.



TINAJERO J.A, 1982. *Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. (Geohidrología)*. CPNH. SARH.

URBIETA GÓMEZ J., 2001. *La Tomografía eléctrica en los métodos de corriente continúa*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

WALTER LUIS MOLINA PADRÓN. *Comparación de los Métodos 1-D y 2-D de Resistividad Eléctrica por Medio de Sondeos Tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger*. Tesis de Licenciatura. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas 2006.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIDAD: REILLENOS SANITARIO DE NOGALES, SONORA

AUTOR: IBÁÑEZ MARTÍNEZ JAVIER ALEXANDER

ESCALA: 1:

NOMBRE: MAPAS DE ISORESISTIVIDAD APARENTE COLOCADOS DE ACUERDO LA ABERTURA DE LOS ELECTRODOS

PLANO: T.J