
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA**

**Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales.
(Ingeniería)**

Caracterización de Suelo Agrícola Mediante Tomografía
de Resistividad Eléctrica y Análisis Físicoquímico en el
Municipio de San Antonino Castillo de Velasco, Oaxaca,
México.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:
Gallardo Castillo Gilberto

Directores:
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. Junio/2017



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 29 del mes de junio del año 2017, el (la) que suscribe GALLARDO CASTILLO GILBERTO alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro A150059, adscrito(a) al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** y la **M.C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres** y cede los derechos del trabajo titulado Caracterización de Suelo Agrícola Mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica y Análisis Físicoquímico en el Municipio de San Antonino Castillo de Velasco, Oaxaca, México, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones posgradoax@hotmail.com ó gilgallardo-1312@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


GALLARDO CASTILLO GILBERTO
Nombre y firma del alumno(a)





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca Siendo las 10:00 horas del día 29 del mes de junio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR UNIDAD OAXACA para examinar la tesis titulada:

Caracterización de Suelo Agrícola Mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica y Análisis Físicoquímico
En el Municipio de San Antonino Castillo de Velasco, Oaxaca, México.

Presentada por el alumno:

Gallardo Castillo
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s) Gilberto

Con registro:

A	1	5	0	0	5	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte
Jiménez

M.C. María de los Angeles Ladrón
de Guevara Torres

Dr. Víctor Guillermo Jiménez
Quero

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Pedro Montes García

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano
Barrita

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi madre Genoveva del Carmen, mi madrina Guadalupe Hernández y mis hermanas Elena y Daniela que son mi vida y me dan aminos a todo momento ya que, sin su apoyo, no hubiera sido posible lograrlo se los debo todo a ustedes.

A la M. en C. María Ladrón de Guevara Torres, por las lecciones que me impartió, las experiencias que adquirí en las salidas y todo el conocimiento que compartió conmigo, pero principalmente por su paciencia, tolerancia, compromiso y dedicación que invirtió apoyándome a mí y a mi trabajo de tesis.

Al Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez, por su paciencia, su compromiso, por compartir su experiencia y alentarme para participar en congresos para mejorar mi formación y mi investigación.

Al Dr. Mario Enrique Fuente Carrasco, al Dr. Francisco Castellanos León y al Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, por su pasión al compartir sus enseñanzas y conocimientos.

Al Dr. Celerino Robles Pérez por tenerme la confianza de permitirme trabajar mis muestras en el laboratorio de suelos.

A mis nuevos amigos y compañeros de ciencias Guillermo, Rosy, Montse, Ricardo, Edwin, Andy y Roxana por acompañarme y apoyarme en esta etapa.

A mis viejos amigos Oscar, Eduardo, Dante, Luis Eduardo, Mariana PQ, Mich, y a todos los demás que no mencione y que me han apoyado y alegría fuera de la escuela.

A mi novia Patricia por darme su cariño y apoyo en todo momento.

A la familia Gaxiola Vargas por apoyarme y brindarme su amistad durante esta etapa.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo brindado durante estos dos años de formación científica, mediante su programa de becas de posgrado.

Al Instituto Politécnico Nacional y al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca por darme un espacio y su apoyo en becas para incrementar mi conocimiento.

Resumen

A pesar de que se consideran los pesticidas y agroquímicos medios rentables de control de plagas y malezas; el impacto ambiental del uso repetido de plaguicidas ha impulsado la investigación de agentes que pueden emigrar de los campos tratados. Estudios hidrogeológicos recientes en la subcuenca del valle de Ocotlan, en Oaxaca, encontraron una alta conductividad eléctrica en pozos de la zona norte de la subcuenta, cerca de áreas de cultivo del municipio de San Antonino de Castillo Velasco, que podría deberse a las prácticas agrícolas de la zona. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue realizar una caracterización por medio de tomografía de resistividad eléctrica en un predio agrícola de la subcuenca, apoyándose con pruebas de laboratorio de suelos para identificar anomalías asociadas a contaminantes de origen agrícola. La zona de estudio comprende un predio agrícola ubicado en la localidad de Yasebache perteneciente al municipio de San Antonio Castillo Velasco; el cual se localiza en la parte central del Estado. El equipo que se empleó para la adquisición de los datos de campo fue el SYSCAL Jr. El método utilizado fue tomografía de resistividad eléctrica con un arreglo de Dipolo-Dipolo. En la zona de estudio se realizaron cinco perfiles para obtener los datos de la tomografía, la orientación de los perfiles fue N-S con la orientación de los cultivos. El incremento en el factor n se dio hasta $n=7$ (siete niveles) alcanzando una profundidad aproximada de 2.5 m en los cuatro primeros perfiles y de 15m en el quinto. Los datos obtenidos se procesaron con el software RES2DINV. Se tomaron muestras de suelos de al inicio, la parte central y al final de la línea donde se realizaron los perfiles. Las muestras se colectaron a dos profundidades (30 cm y 70 cm). Se le analizó el contenido de materia orgánica, nitrógeno total e inorgánico, fósforo asimilable y pH por el laboratorio central universitario de suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo. También se analizó la textura del suelo con la prueba de Bouyocous y se analizó la resistividad de los mismos con cajas de resistividad eléctrica construidas y calibradas por nuestra parte en laboratorios del instituto. Los resultados del análisis de suelo nos demostraron que el suelo es pobre en materia orgánica y en nitrógeno con pH ligeramente alcalino y de textura mayormente arenosa con un considerable contenido de fósforo asimilable y con valores de resistividad más bajos de lo que corresponden al tipo de suelo analizado que significa que tiene elementos que los han vuelto más conductores. Los valores de resistividad de los perfiles a pesar de ser menores a valores típicos de materiales que constituyen el suelo (arenas y gravas), pudiendo identificar el nivel freático y la distribución de los horizontes del suelo. Se correlacionaron los valores de resistividad con los análisis de suelo sin embargo solo se encontró una buena correlación entre la materia orgánica y el nitrógeno total. Con los resultados anteriores se concluye que la presión ejercida al suelo para producir ha deteriorado al mismo y aunque no existen anomalías significativas para poder asegurar si existe o no contaminación, se puede inferir que se ha alterado la electro conductividad del terreno por la aplicación de productos agrícolas que por las características geohidrológicas del área podrían llegar a emigrar de los primeros horizontes el suelo hasta el nivel freático por lo que es importante realizar más estudios que incluyan el análisis de agua en la zona.

Abstrac

Even when the pesticides and agrochemicals been considered cost-effective means of pest and weed control; the repeated use of pesticides has promoted the investigation of agents which may migrate from treated fields causing environmental impact. Recent hydrogeological studies in the Ocotlan Valley sub-basin in Oaxaca found high electrical conductivity in northern wells, near San Antonino de Castillo Velasco municipality, which could be related to agricultural practices of the area. Therefore, the objective of these investigation was to realize a characterization by electrical resistivity tomography in an agricultural field of the sub-basin, supported by soil laboratory tests to identify anomalies associated with contaminants of agricultural origin. The study area comprises an agricultural estate located in the town of Yasebache belonging to the municipality of San Antonio Castillo Velasco. The equipment used for the acquisition of the field data was a SYSCAL Jr. the method used was electrical resistivity tomography with a Dipole-Dipole arrangement. In the study area five profiles was made to obtain the data, the orientation of the profiles was N-S which is the same from the crops orientation. The increase in factor n was given to $n = 7$ (seven levels) reaching a depth of approximately 2.5 m in the first four profiles and 15 m in the fifth. The data obtained was processed with RES2DINV software. Soil samples was taken from the beginning, central and at the end of every line where the profiles were made. Samples was collected at two depths (30 cm and 70 cm). The content of organic matter, total and inorganic nitrogen, assimilable phosphorus and ph was analyzed by the central university soil laboratory of the Autonomous University of Chapingo. The soil texture was analyzed with the bouyocus method and the soil resistivity was calculated whit electrical resistivity boxes by our part in the laboratories of the institute. The results obtained of the soil analysis showed that the soil is poor in organic matter and nitrogen, with ph slightly alkaline and of mostly sandy texture with a considerable assimilable phosphorus content and with low values of resistivity, consideraiting the tipical values of that type of soil, which means that the elements have made them more conductive. Even when values of resistivity of the profiles are smaller than the typical values of materials that constitute the soil (sand and gravel), we being able to identify the water table and the distribution of the horizons of the soil. The values of resistivity were correlated with the soil analysis, however, only a good correlation was found between organic matter and total nitrogen. With the previous results were concluded that the pressure exerted by agrochemicals has deteriorated the soil even when there are no significant anomalies to be able to assure if is or is not contamination, we can inferred that the electro conductivity of the ground has been altered by the application of Agricultural products, and considaraiting the geohydrological characteristics of the basin, that elements can move out from the first horizons to the aquifer; for that we recomendad more studies that include the analysis of water in the area.

Índice

1.	Introducción.....	4
1.1.	Planteamiento del problema.....	6
1.2.	Justificación.....	7
2.	Objetivos.....	8
2.1.	General.....	8
2.2.	Específicos.....	8
3.	Hipótesis.....	9
4.	Antecedentes.....	9
5.	Marco conceptual.....	10
5.1.	Resistividad eléctrica y geofísica.....	10
5.1.1.	Historia del empleo del método geoelectrico de corriente directa.....	11
5.2.	Fundamentos de electricidad.....	12
5.2.1.	Carga eléctrica y campo eléctrico.....	12
5.2.2.	Potencial eléctrico, diferencia de potencial.....	12
5.2.3.	Resistividad de los materiales naturales.....	13
5.2.4.	Superficies equipotenciales.....	14
5.2.5.	Método de tomografía de resistividad eléctrica.....	15
5.2.6.	Transferencia de carga.....	16
5.2.7.	Sorción.....	16
5.2.8.	Difusión.....	17
5.2.9.	Nitrógeno.....	19
5.2.10.	Fosforo.....	19
5.2.11.	Glifosato.....	19
5.2.12.	Absorbentes y los factores que afectan a la sorción.....	20
5.2.13.	La competencia glifosato y fosfato.....	21
5.2.14.	Degradación del glifosato.....	21
6.	Marco teórico.....	23
6.1.	Principios.....	23
6.2.	Fuente puntual en un semiespacio.....	26

6.3.	Factor geométrico y resistividad aparente	29
6.4.	Arreglo de electrodos.....	31
6.4.1.	Matriz Wenner.....	32
6.4.2.	Matriz dipolo-dipolo.....	33
6.4.3.	Matriz Schlumberger.....	34
6.4.4.	Cálculo de la profundidad de investigación.	35
6.5.	Ley de Archie's - fluido de poro conductor y de la matriz de la roca resistiva...	35
6.6.	Limitaciones la ley de Archie's - relajación de granos minerales	36
6.7.	Modelo de inversión 2D.....	36
7.	Metodología.....	38
7.1.	Área de estudio	39
7.1.1.	Macro localización.....	39
7.1.2.	Edafología	41
7.2.	Hidrogeología	42
7.3.	Climatología y meteorología.	43
7.4.	Uso de suelo y vegetación	43
7.5.	Construcción, calibración y pruebas de cajas de resistividad para suelos	43
7.6.	Toma de muestras de suelo.....	45
7.7.	Análisis de suelos	46
7.8.	Prueba de resistividad del suelo en laboratorio	46
7.9.	Pruebas de resistividad en campo	47
7.10.	Frecuencia de toma de datos.....	48
8.	Resultados y discusión.....	48
8.1.	Resultado de suelos en laboratorio	48
8.2.	Pruebas de cajas de resistividad para suelos.....	50
8.3.	Tomografía de resistividad eléctrica	53
8.3.1.	Perfil 1	53
8.3.2.	Perfil 2	54
8.3.3.	Perfil 3	55
8.3.4.	Perfil 4	56
8.3.5.	Perfil 5	57

8.3.6. Correlación	58
9. Conclusión.....	59
10. Bibliografía	60

Índice de Tablas

Tabla 1 Resultado de los análisis de textura de suelo por el método Bouyocus.....	49
Tabla 2 Resultado de los análisis de suelo UACH.....	50
Tabla 3 Resultados del análisis de las resistividades de suelos en laboratorio.	52
Tabla 4. Matriz de correlación entre las variables del análisis de muestras. Coeficiente r de Pearson esta dado en el triángulo inferior (color azul) y el coeficiente de determinación r ² está dado en el triángulo superior (color verde).....	59

Índice de Figuras

Figura 1 Valores típicos de resistividad y conductividad eléctrica de distintos materiales.	14
Figura 2 Contaminación difusa en México (Cotler Ávalos 2010)	18
Figura 3 Degradación del Glifosato (modificado de Jayasumana et al., 2014)	23
Figura 4 Flujo de corriente en un semiespacio modificado de Loke 2011	26
Figura 5 Ejemplo de un suelo Heterogéneo	30
Figura 6 Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos obtenida para una distancia eléctrica de 5.0 m.	32
Figura 7 Arreglo Wenner	33
Figura 8 Arreglo Dipolo Dipolo	34
Figura 9 Arreglo Schlumberger	35
Figura 10 Arreglo de bloque rectangulares utilizados en el modelo 2D	37
Figura 11 Secuencia de medidas para aumentar una pseudosección utilizando una configuración de múltiples electrodos controlado por ordenador	38
Figura 12 Orden Cronológico de Actividades a Realizadas	39
Figura 13 Diagrama de Actividades	39
Figura 14 Macro Localización	40
Figura 15 Micro Localización.....	40
Figura 16 Edafología de la zona de estudio	41
Figura 17 Hidrogeología de la zona de estudio.....	42
Figura 18 Uso de suelo y Vegetación de la zona de estudio Martínez Sánchez 2016 ...	43
Figura 19 Diagrama de construcción de las Cajas de Resistividad de Suelos.....	44
Figura 20 Equipo Syscal Jr SwitchPro de 24 canales de Iris Instruments.....	47
Figura 21 Ubicación de las líneas de Tomografía	48

Figura 22Comportamiento del Glifosato con respecto a la concentración en el primer día.	51
Figura 23Comportamiento del Glifosato con respecto a la concentración a los 3 días.	51
Figura 24 Resultados del análisis de las resistividades de suelos en laboratorio.	52
Figura 25 Perfil 1 de toma de datos.	54
Figura 26Perfil 2 de toma de datos.	55
Figura 27Perfil 3 de toma de datos.	56
Figura 28Perfil 4 de toma de datos.	57
Figura 29 Perfil 5 de toma de datos.	58

1. Introducción

Los sistemas agrícolas han evolucionado enormemente desde la mitad del siglo pasado, especialmente desde la última guerra mundial, empleando un gran esfuerzo científico y económico para resolver el desabasto de alimentos a nivel global. Durante la década de los 60 y 70's fue el primer gran desarrollo agrícola con la llamada revolución verde; la cual se esperaba que terminara con el problema de hambre y malnutrición global (FAO, 2000). México no fue ajeno a esta revolución verde y a las transformaciones ocurridas en el espacio rural, resultado de la dinámica del espacio global, que respondía a una exigencia mundial más que a las necesidades o intereses del espacio rural mexicano (Pichardo, 2006).

La introducción de agentes o sustancias que alteran el medio donde se vierten y que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso se define como contaminación. Un suelo contaminado es aquel que ha superado su capacidad de amortiguación para una o varias sustancias y como consecuencia pasa a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera y los organismos (Martínez Gaspar et al., 2011)

A pesar de que se consideran los pesticidas y agroquímicos medios rentables de control de plagas y malezas; el impacto ambiental del uso repetido de plaguicidas ha impulsado la investigación, sobre el destino ambiental de estos agentes, que pueden emigrar de los campos tratados ya sea mediante el aire, la tierra y especialmente en el agua (Steven et al., 1997; Arias-Estévez et al., 2008; Montes et al., 2014; Ccancapa et al., 2016). Al ser sustancias antropogénicas, el destino ambiental de agroquímicos se inicia desde la aplicación en los campos agrícolas y donde el destino de este tipo de sustancias en el medio ambiente se ve afectado por procesos químicos, físicos, biológicos e hidrometeorológicos en suelo, agua y aire. De estos procesos se pueden separar en los procesos de transporte, procesos de transformación y los procesos de transferencia (Gassmann, 2013).

Procesos de transporte se refieren a la translocación de sustancias fuera de su punto de aplicación que da lugar a la contaminación. En el medio ambiente, los principales medios de transporte son el aire y el agua. La contaminación del agua a partir de compuestos químicos aplicados en el suelo está estrechamente correlacionado con una combinación de factores: fisicoquímica propiedades de los compuestos, características edafológicas (especialmente la sorción), las prácticas agrícolas y la precipitación sitio (Pacioni et al., 2010; Molina, 2013).

La sorción es el proceso por el cual los productos agroquímicos entran en asociación a las partículas del suelo. Está influenciada por la textura del suelo, distribución de tamaño de las partículas del suelo, humedad del suelo, carbono orgánico del suelo, el pH y la temperatura (Wauchope et al., 2002) y puede ser responsable de un retraso o incremento de concentración de sustancias en el agua. Para sustancias tales como el herbicida glifosato los minerales juegan un papel importante en el proceso de sorción de la arcilla (Vereecken, 2005). En el caso del ion nitrato, este es muy móvil en el suelo; por ejemplo estudios reportaron impactos del NO_3^- – por lixiviación y la contaminación de las aguas subterráneas, incluso si el movimiento del fósforo (P) depende de la capacidad de absorción del suelo, algunas prácticas de manejo agrícola y las condiciones climáticas pueden dar lugar a la acumulación de P en el subsuelo y en su lixiviación a las aguas subterráneas (Heredia y Fernández Cirelli, 2007).

La contaminación por compuestos tóxicos persistentes (CTP) en la población en general es un hecho relevante desde una perspectiva de salud pública; estudios internacionales sugieren que dosis de algunos CTP por debajo de los niveles que normalmente se consideran «seguros» pueden causar efectos biológicos y clínicos relevantes (Porta et al., 2002). En México el glifosato (producto agroquímico en diferentes presentaciones comerciales), controlador de malezas, es el herbicida más utilizado en el país y considerado el pesticida más utilizado a nivel global; ha migrado de los sitios de aplicación y ha sido encontrado incluso en áreas naturales protegidas del sur del país por procesos de transporte (Ruiz-Toledo, J., R. Castro, et al., 2014).

Recientemente, avances considerables se han logrado en la supervisión del agua en su tránsito y el transporte de solutos en el suelo mediante tomografía de resistividad

eléctrica (ERT). La distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo a partir de medidas efectuadas desde la superficie puede estimar la estructura y resistividad eléctrica del subsuelo y se relaciona con varios parámetros geológicos como el contenido en fluidos y la porosidad (Sudha et al., 2009, Peinado-Guevara et al., 2009, Delgado Rodríguez et al., 2012). Por ello el estudio de resistividad ha resultado muy útil en el conocimiento del estado del suelo y para conocer sus características por ser versátil a la hora de realizar análisis del subsuelo dado que permite trabajar en profundidades muy variables y abordar múltiples objetivos.

Esta técnica junto con el análisis de suelos y agua arroja resultados que nos permiten predecir el comportamiento de contaminantes y realizar acciones de remediación precisas (Arato et al., 2013) ya que puede medir la capacidad de infiltración del agua en el suelo midiendo la resistividad eléctrica que ejerce a la corriente a esta en el suelo; por lo que ha sido ampliamente utilizada y propuesta en diversos trabajos para caracterizar, evaluar, delimitar y modelar el flujo de distintos agentes contaminantes (Godio y Naldi, 2003; Cassiani et al., 2009; De Carlo et al., 2009; Binley et al., 2010; Camporese et al., 2011; Rosales et al., 2012; Cassiani et al., 2012; Metwaly et al., 2013, Wehrer et al., 2014; Cassiani et al., 2014; Casado et al., 2015). Esta técnica se ha aplicado con frecuencia para visualizar el flujo heterogéneo y comportamiento de transporte (Wehrer et al., 2014)

1.1. *Planteamiento del problema*

Las actividades agrícolas incluyen normalmente el uso de fertilizantes y plaguicidas que pueden alcanzar las aguas superficiales y subterráneas. Los principales rasgos distintivos de la contaminación de origen agrícola son su carácter difuso y la necesidad de que los contaminantes atraviesen la zona no saturada hasta llegar al acuífero. Las fuentes de agroquímicos en el medio ambiente o bien puede especificarse como difusivo o como fuentes puntuales; las puntuales espacialmente restringidas a puntos de descarga bien definidas (por ejemplo, plantas de tratamiento de aguas residuales), que facilitan su manejo, las fuentes difusas entran de corrientes constantemente a lo largo de

una red fluvial por lo tanto, las áreas que contribuyen una gran parte de la carga contaminante se denominan zonas de origen críticos (CSA) (Gassmann et al., 2015).

En la participación en estudios hidrogeológicos efectuados entre el 2015 y 2016 en la subcuenca del valle de Ocotlán, que se encuentra dentro de la subcuenca RH20C R. Atoyac – Oaxaca de Juárez, se encontraron una alta conductividad eléctrica en pozos en la zona norte de la subcuenta, cerca de áreas de cultivo del poblado de San Antonino de Castillo Velasco, que podría deberse a las prácticas agrícolas de la zona.

Los altos niveles de nitratos son causados en gran parte por el hombre, particularmente en relación con el uso de fertilizantes nitrogenados y estiércol, que constituye una fuente difusa (Vithanage et al., 2014) numerosos estudios han sugerido la lixiviación de NO_3^- después de altas tasas de entrada de fertilizantes químicos y debido a la mineralización del N orgánico ya presente en los suelos puede causar la degradación de la superficie y la calidad del agua subterránea (Hamdi et al., 2013). De manera similar, el transporte de compuestos potencialmente absorbibles tales como el fosfato (P), glifosato y su metabolito el ácido amono metil fosfórico (AMPA) desde ambiente terrestre a los ambientes acuáticos puede ocurrir en solución y en suspensión tanto disueltos y en forma de partículas unidas que se pueden mover por lixiviación a través del subsuelo y por flujo superficial (escorrentía superficial) y generar eutrofización (Borggaard et al., 2008, Charles Humphrey et al., 2014).

La Organización Mundial de la Salud declaró (2015) que el glifosato es “un probable carcinógeno para los seres humanos” y lo clasificó en el Grupo 2 (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) y lo define “como probablemente carcinógeno para el ser humano”.

1.2. *Justificación*

La delimitación y caracterización de zonas vulnerables a la contaminación agroquímica por lixiviación es de carácter muy importante, más aún en una zona donde existe escasez

del recurso agua y donde realizan obras de recarga, ya que puede promover el transporte de agentes contaminantes al acuífero y poner en riesgo el agua de consumo humano.

Debido a que los métodos geoelectrónicos como la tomografía de resistividad eléctrica han sido muy exitosos para poder realizar una caracterización y modelación de plumas contaminantes en el suelo, es una alternativa técnica y económicamente viable. Estos métodos al ser apoyados con análisis físicoquímicos del suelo incrementan la exactitud y el grado de confianza de la información obtenida por la correlación que existe entre los distintos elementos del suelo con la resistencia ejercida al paso de corriente (principio de esta técnica). Sin embargo, a pesar de la escasa bibliografía e investigación sobre la caracterización de fosfatos agrícolas y glifosato por TRE existe una amplia bibliografía sobre los procesos involucrados en la sorción y transporte de estos agentes en el suelo que pueden correlacionarse con información obtenida por TRE en campo.

2. Objetivos

2.1. General

- Realizar una caracterización por medio de tomografía de resistividad eléctrica en un predio agrícola, apoyándose con pruebas de laboratorio de suelos para interpretar anomalías asociadas a contaminantes.

2.2. Específicos

- Identificar las características edafológicas de la zona de estudio.
- Encontrar la correlación entre las características físicoquímicas del suelo y la resistividad del mismo para interpretar mejor los resultados de la tomografía de resistividad eléctrica.
- Identificar la presencia de contaminantes en el área de estudio.

3. Hipótesis

- El suelo estudiado presentará una serie de anomalías asociadas a sobrefertilización y aplicación de herbicidas.
- Existe una pluma de contaminante por glifosato, fosforo y/o nitrógeno debido a la intensa actividad agrícola que pone en riesgo a la calidad del recurso hídrico en el acuífero.
- Existe una correlación entre la conductividad del suelo con la presencia y contenido de nitratos, fosfatos y glifosato en el mismo.

4. Antecedentes

Huang, et al., 2014 determinó la distribución espacial de N difusa de carga y ocho parámetros de propiedad del suelo a escala de subcuenca y analizó su relación espacial, para determinar qué se pueden utilizar los parámetros del suelo para evaluar de manera fiable el difuso N, y así entender la relación de las propiedades del suelo a dos profundidades con la difusión. Iital et al., 2008 y Bechmann et al., 2008 estudiaron y encontraron patrones de pérdida de nitrógeno en el suelo, de Estonia y Dinamarca respectivamente, recomendando un programa de monitoreo espacial y temporal.

Diversos estudios de modelación y análisis directo se han realizado en los últimos años para detectar la presencia de glifosato en el suelo, así como su transporte al agua. Aparicio et al., 2013 realizó diversos análisis fisicoquímicos a diferentes muestras de suelo y agua para encontrar concentraciones de glifosato y determinar su destino final muy similar fue el estudio realizado Ruiz-Toledo, J., R. Castro, et al., 2014 para encontrar concentraciones en áreas naturales protegidas en el estado de Chiapas. Esto debido a que el contenido de agua y la conductividad eléctrica de la solución del suelo son los principales factores que afectan a la conductividad eléctrica en volumen (Friedman, 2005).

La tomografía de resistividad eléctrica aporta datos que permiten predecir el comportamiento de contaminantes y realizar acciones de remediación precisas, así como

proponer zonas de manejo especial para disminuir el daño ambiental y evitar posibles daños a la salud de las personas (Arato et al., 2013). Esta técnica permite visualizar anomalías resistivas en las propiedades intrínsecas del suelo para inferir la presencia de distintos tipos de contaminantes, propiedades hidráulicas e inclusive elementos que se encuentran y componen la matriz del suelo estudiada (Cassiani et al., 2009, Campoprese et al., 2011, De Carlo et al., 2013, Casado et al., 2015).

En la agricultura también se ha utilizado dicha técnica; Márquez Molina et al., 2014 utilizaron la conductividad eléctrica en la matriz de suelos franco arenosos de hasta 1 m de profundidad y mencionan un buen comportamiento en la exploración geofísica para la cartografía de nitrógeno y fósforo, asociado principalmente con el contenido de agua que es el camino de transporte de iones a través del medio poroso; concluyendo que funciona como un buen indicador espacial de agua, nitrógeno y fósforo biodisponible. Sainato et al., 2010 y 2015 estudiaron el suelo de dos granjas de ganado vacuno para identificar anomalías relacionadas con lixiviados de nitratos asociados al estiércol y Sainato et al., (2015) realizaron una comparación entre la resistividad eléctrica de tres suelos con diferentes niveles de aplicación del herbicida.

5. Marco conceptual.

5.1. Resistividad eléctrica y geofísica

Existen diversas técnicas geofísicas eléctricas como las electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales o la conductividad. Delimitan capas del subsuelo, obteniendo sus espesores y resistividades, e intentan identificar el tipo de roca de acuerdo con el valor de su resistividad (Sánchez, 2011)

La medición de la resistividad del terreno es la técnica geofísica más comúnmente empleada en las investigaciones hidrogeológicas, pero es quizás uno de los menos comprendidos. Si se utiliza correctamente la técnica de la resistividad es una de las más rentables y de gran alcance de las herramientas geofísicas (Kirsh, 2006).

5.1.1. Historia del empleo del método geoelectrico de corriente directa.

La inyección de corriente a partir de electrodos ubicados en la superficie del terreno es conocido generalmente como método de corriente directa (DC). Este método permite 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.

Los métodos de exploración geoelectrica se han desarrollado relativamente reciente, aunque desde 1720 ya existían trabajos de Gray y Wheeler sobre la resistividad de las rocas. Robert Fox en 1815 descubrió el fenómeno de polarización espontánea, el cual sugiere ser utilizado para la prospección de yacimientos. En el año de 1883, Charles E. Brown, miembro del USGS, patentó un sistema de prospección eléctrica con dos electrodos, utilizando campos eléctricos producidos artificialmente.

Conrad Schlumberger, considerado como “padre de la prospección eléctrica”, en 1912 inicia estudios para prospección de yacimientos utilizando la conductividad eléctrica de las rocas, donde estimulaba la tierra por una fuente controlada y midiendo los potenciales artificiales.

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. Por el año de 1915 Conrad y Frank Wenner, de forma separada idean el dispositivo tetraelectrónico, arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), de este tipo de dispositivo se fundamenta toda la prospección geoelectrica en la actualidad (Orellana, 1982).

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), formando en 1926 en la ciudad de París la primera organización dedicada a este tipo de estudio, la Société de Prospection Electrique.

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

5.2. *Fundamentos de electricidad*

5.2.1. Carga eléctrica y campo eléctrico.

Una carga eléctrica genera a su alrededor un campo eléctrico que atrae a cargas del signo contrario y repele las de igual signo. La fuerza con la que se repele o atrae una carga unitaria se denomina Intensidad de campo. Si existen varias cargas eléctricas, la fuerza con la que una q es atraída se obtendrá sumando los vectores debido a cada uno de los campos (Thangarajan et al., 2007).

5.2.2. Potencial eléctrico, diferencia de potencial

El Potencial es el trabajo que realiza el campo para repeler una carga de 1 culombio hasta el infinito o viceversa. La Diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico es el trabajo que hay que realizar para mover una carga de 1 culombio de un punto a otro contra las fuerzas del campo. La Unidad *voltio* Entre dos puntos de un campo eléctrico hay una diferencia de potencial 1 voltio cuando hay que efectuar un trabajo de 1 joules para mover 1 coulomb de un punto a otro (Ibid).

En la tierra se genera potencial eléctrico y se disipa en la misma debido a los fenómenos que se dan en su interior, (Gasulla 1999).

1. Se genera potencial eléctrico por magnetismo; la tierra es un imán gigante en movimiento.
2. Por acción química; El agua salada del mar y el agua dulce de ríos y lagos hacen de la superficie de la tierra una gigantesca pila voltaica que genera potencial eléctrico.

3. La luz del sol incide en la superficie de la tierra y el mar que hace de ella una fotocelda gigante generando diferencia de potencial eléctrico.
4. Se genera electricidad por calor en magma ígneo de la tierra que genera potencial eléctrico.
5. Por presión se genera potencial eléctrico en las placas tectónicas que están en movimiento continuo.
6. En la atmósfera entre los gases tienen un frotamiento continuo debido a la velocidad del aire y la radiación solar generan cargas electrostáticas el potencial acumulado es eliminado en las primeras lluvias a la tierra a través de las descargas atmosféricas.

5.2.3. Resistividad de los materiales naturales

La resistividad eléctrica ρ de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene de un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo. Según el sistema de unidades elegido, la resistividad se mide en ohm.centímetro u ohm.metro (Ωm). En la exploración eléctrica se utiliza el Ωm por ser una unidad mayor ($1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$). La magnitud inversa de la resistividad, se denomina conductividad eléctrica. Sus dimensiones se dan en siemens por metro o siemens por centímetro (Sm/m , Sm/cm), (González, 1980).

A una roca como conductor de corriente eléctrica se le puede considerar como un agregado que consta de una estructura sólida mineral de líquidos y gases. En la resistividad de un agregado influyen los siguientes factores:

- 1) La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca, 2) la resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca; 3) la humedad de la roca; 4) la porosidad de la roca; 5) los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros; 6) los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral. 7) edad de la roca; 8) temperatura.

La resistividad en los materiales naturales varía desde 10^{-8} en los metales nativos hasta 1015 en micas (perpendicularmente a la foliación). Los valores de resistividad de una roca están determinados por el agua que contiene, por la porosidad y por la salinidad del agua (Sánchez, 2011). En la siguiente tabla se presentan valores típicos de resistividad de diversos materiales, tantas rocas, suelo y algunos químicos.

Material	Resistividad ($\Omega\cdot m$)	Conductividad eléctrica (siemens/m)
Rocas ígneas y metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^5$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^5$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^4$	$2.5 \times 10^{-5} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^5$	$4 \times 10^{-6} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^5$	$5 \times 10^{-6} - 10^{-2}$
Rocas sedimentarias		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Lutita	$20 - 2 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.02$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Aguas y Suelos		
Arcilla	1-100	0.01-1
Aluvión	10-800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua subterránea (no contaminada)	10-100	0.01-0.1
Agua marina	0.2	5
Químicos		
Hierro	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
0.01M Cloruro de potasio	0.708	1.413
0.01M Cloruro de sodio	0.843	1.185
0.01M Acido acético	6.13	0.163
Xileno	6.998×10^{10}	1.429×10^{-11}

Figura 1 Valores típicos de resistividad y conductividad eléctrica de distintos materiales.

5.2.4. Superficies equipotenciales

Son un lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial (El potencial toma un valor constante), cuando una carga se mueve sobre una superficie equipotencial la fuerza electrostática no realiza trabajo, puesto que la ΔV es nula.

Por otra parte, para que el trabajo realizado por una fuerza sea nulo, ésta debe ser perpendicular al desplazamiento, por lo que el campo eléctrico (paralelo a la fuerza) es siempre perpendicular a las superficies equipotenciales.

Las propiedades de las superficies equipotenciales se pueden resumir en:

- Las líneas de campo eléctrico son, en cada punto, perpendiculares a las superficies equipotenciales y se dirigen hacia donde el potencial disminuye
- El trabajo para desplazar una carga entre dos puntos de una misma superficie equipotencial es nulo.
- Dos superficies equipotenciales no se pueden cortar

5.2.5. Método de tomografía de resistividad eléctrica

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) llegaron a ser un método de exploración de amplio uso, sin embargo, la falta de información de forma horizontal llegó a limitar su uso en otras ramas de la exploración; en especial con fines ambientales (Barker, 1981; Dahlin, 1996). Es entonces cuando nace la necesidad de buscar un nuevo método que tenga la posibilidad de adquirir información del subsuelo no sólo de forma vertical, sino también horizontal.

El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), se crea para estudiar áreas de geología compleja, donde el subsuelo está lejos de ser un bloque de estratos horizontales. Por medio de un dispositivo tetraelectródico, esta técnica consiste en designar dos electrodos de corriente C1 y C2. Posteriormente los otros dos electrodos P1 y P2, medirán la diferencia de potencial del campo creado. Esta diferencia dará información del subsuelo, por medio de valores de resistividad aparente.

La tomografía eléctrica en 2D toma en consideración tanto cambios de resistividad de forma horizontal como vertical; haciéndola ideal para fines de geotecnia, ambientales, arqueológicos, hidrogeológicos, entre otros. Como resultado, se obtiene un perfil de resistividades aparentes conocida como pseudosección.

La pseudosección resulta ser una primera aproximación de la distribución de resistividad en el subsuelo, sin embargo, es necesario un procesamiento e inversión de estos datos previo a su interpretación. Por lo que resulta ser un error común tratar de dar una interpretación con una pseudosección, ya que la pseudosección da una visión deformada del subsuelo (Loke, 2012).

5.2.6. Transferencia de carga

El objetivo final de un Sondeo de resistividad es la determinación de la estructura geológica. Para ello tenemos que entender la corriente eléctrica que pasa a través de las rocas. El transporte de transferencia de corriente o carga eléctrica se lleva a cabo de las siguientes maneras.

1. Conducción electrónica. Aquí el flujo de corriente es por el movimiento de los electrones en un medio conductor.
2. Iónico (electrolítico) Conducción. En poros, rocas llenas de agua, la carga eléctrica puede ser transportada por los iones en solución en el electrolito. La resistividad de la roca disminuye al aumentar la porosidad y también con el aumento de la salinidad del electrolito.
3. arcillas. En minerales de arcilla, el flujo eléctrico se lleva a cabo por medio de carga superficial acumulada en la superficie de cada mineral de arcilla individual.

La resistividad volumétrica de una roca dependerá, por lo tanto, en:

- (A) la cantidad de minerales conductivos presentes,
- (B) la cantidad de agua,
- (C) la salinidad del agua, y
- (D) la cantidad de arcilla.

5.2.7. Sorción

Cualquier remoción de un compuesto de la solución a una fase sólida definimos como sorción, mientras que el proceso inverso, la liberación de iones o moléculas de sólidos del suelo en la solución, definimos como desorción (Sposito, 2004). Cuando se habla de procesos de adsorción, se le llama adsorción / absorción de fase sólida del sorbente; solutos en la fase líquida que podrían potencialmente ser adsorbidos se conocen como sorbidos, y componentes que se acumulan en o dentro de un sólido se

denominan sorbatos; dentro de los productos químicos y agroquímicos se pueden agrupar en tres categorías absorbentes: (a) orgánicos no cargados que presentan una gama de polaridades (no polares a polares), basado en la distribución de electrones a través de la molécula (ejemplo, el compuesto de anillo aromático, benceno o la sacarosa uno con distribución de electrones uniforme no polar y el otro distribución no uniforme de los electrones y altamente polar) (b) Catiónicos que están cargados positivamente, ya que tienen menos electrones que protones (Ejemplo, los cationes divalentes Ca^{2+} y Pb^{2+}); y (c) Aniónicos que están cargadas negativamente, ya que tienen más electrones que protones (por ejemplo, el nitrato NO_3 o el ortofosfato de nutrientes, PO_4) (Sposito, 2008).

La sorción es un proceso cinético, lo que significa que el equilibrio de sorción no se alcanza instantáneamente. Se compone de dos etapas: una reacción cinética rápida es seguida por una reacción lenta, como resultado de la difusión en los agregados del suelo (Boesten y Van der Pas., 1988).

5.2.8. Difusión

El movimiento de un fluido desde una zona de mayor concentración a un área de menor concentración. La difusión es una consecuencia de las propiedades cinéticas de las partículas de materia. Las partículas se mezclan hasta que se distribuyen uniformemente.

5.2.8.1. Contaminación difusa

La contaminación difusa puede ser definida como la introducción de contaminantes a un curso de agua superficial o sistema de agua subterráneo, a través de vías indirectas, como el lavado de contaminantes a través del suelo, o desde fuentes que no es posible establecer con exactitud en un lugar o sitio específico la cual puede ser continua o intermitente (relacionado con actividades agrícolas estacionales), siendo esta última la más común.

La contaminación difusa resulta entonces de un efecto acumulativo que es producto de pequeños aportes individuales realizados desde sitios diversos, que terminan afectando

los cuerpos de agua de una cuenca hidrográfica, las aguas subterráneas y muchas veces también el área marina asociada. En los cuerpos de agua, el exceso de nutrientes — especialmente el nitrógeno y el fósforo— conduce a una degradación de la calidad del agua conocida como eutrofización, que se acompaña de un aumento de biomasa, la cual a su vez conlleva una mayor turbidez y escasez de oxígeno (hipoxia).

La movilidad y la persistencia determinan la contaminación potencial de un pesticida. La movilidad se refiere a la facilidad de movimiento en el suelo y la persistencia a la vida media del pesticida, o bien al tiempo requerido para que la mitad de la cantidad inicial del pesticida aplicado se degrade o se libere como CO₂.

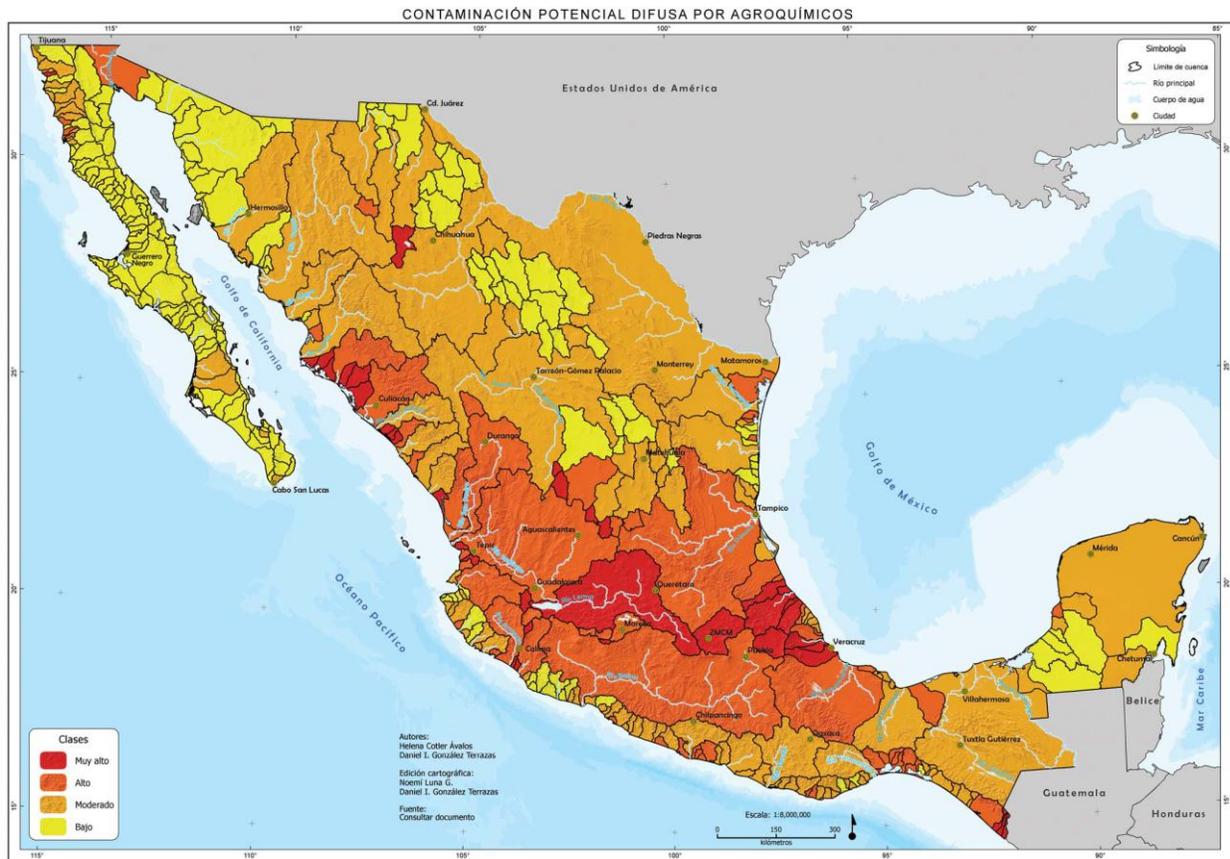


Figura 2 Contaminación difusa en México (Cotler Ávalos 2010)

5.2.9. Nitrógeno

La capacidad del suelo para adsorber aniones puede reducir la lixiviación de NO_3 a los horizontes más profundos y maximizar el NO_3 disponible para la nutrición de la planta, sin embargo, la movilidad de NO_3 es controlada principalmente por una serie de propiedades del suelo, incluidas las concentraciones de hierro y óxido de aluminio, el contenido de materia orgánica, el pH de las soluciones del suelo, y la textura del suelo y la mineralogía de la arcilla (Wissem Hamdi et al., 2014)

5.2.10. Fosforo

Fosforo (P) es un elemento natural que se puede encontrar en la tierra de la corteza, el agua y todos los organismos vivos. El fósforo (P) es uno de los 16 elementos que son esenciales para el crecimiento vegetal. Los suelos, según Virginia son naturalmente bajos en fósforo y la mayoría de los sistemas de cultivo de estos suelos requieren fósforo suplementario para maximizar su potencial de rendimiento. La investigación ha documentado que la aplicación de fósforo de los fertilizantes aumenta el crecimiento del cultivo y los rendimientos en suelos que son naturalmente bajos en fósforo. Aunque los beneficios económicos de la fertilización con fósforo en la producción de cultivos están bien documentados, el exceso del mismo en el suelo una amenaza potencial para la calidad del agua. (Mullins 2000).

5.2.11. Glifosato

El glifosato [N- (fosfometil) glicina], que es el ingrediente activo bode Roundup y otras formulaciones de herbicidas, es un amplio espectro, después del brote, herbicida no selectivo. El químico más vendido del mundo utilizado para el control de malezas agrícola, silvícola y urbano; este amplio uso puede ser atribuirse a la alta eficiencia de eliminación de malezas, baja toxicidad para los organismos no objetivo y al parecer presenta un riesgo muy limitado de lixiviación a las aguas subterráneas debido a glifosato parece estar inactiva en los suelos por la fuerte absorción y degradación relativamente rápida (Schuette 1998). La absorción del suelo y la degradación de glifosato exhiben gran variación en función de la composición del suelo y sus propiedades.

En comparación con otros pesticidas, el glifosato posee características únicas de sorción en el suelo esto debido a que es un ácido poliprótico, que dentro del intervalo de pH de 4-8 en la mayoría de los suelos, con aniones mono- y divalentes que tienen alta afinidad con cationes trivalentes tales como Al^{3+} y Fe^{3+} 0,37-39. El P lleva una reacción de intercambio ligando del fosfato en la superficie de materiales con grupos funcionales (Frossard et al., 2000). El nitrato por su parte se ha informado de que la movilidad está a menudo relacionada con el contenido de materia orgánica y podría ser debido a la mayor capacidad de intercambio catiónico siendo muy móvil en el suelo. Ya que el fosfato y glifosato reacciona de manera similar pueden competir por los sitios de la superficie, que puede afectar de sorción de glifosato, y por lo tanto la movilidad, en suelos ricos en fosfato (Schuette 1998)

5.2.12. Absorbentes y los factores que afectan a la sorción

El glifosato y el fosfato pueden ser adsorbido sobre superficies-carga variable, los principales sitios de sorción del suelo se encuentran en las superficies de aluminio y óxidos de hierro, silicatos de aluminio mal ordenados (alofano / imogolita) y los bordes de silicatos estratificados. En consecuencia, los suelos enriquecidos con estos minerales-carga variable se han demostrado ser eficaces sorbentes de glifosato, mientras que los suelos dominados por minerales carga permanente tales como ilita, esmectita y de vermiculita son menos sorbentes. La sorción aumenta al aumentar la superficie específica de los sorbentes, pero disminuye al aumentar el pH. La materia orgánica del suelo (SOM) no parece sorber glifosato, pero puede afectar indirectamente a la sorción de glifosato.

La sorción de fosfato y glifosato por suelos normalmente consiste en una sorción inicial rápida que representa la mayor parte la absorción, seguido por una reacción lenta, que puede continuar durante varios días, de sorción de cantidades menores (Henríquez, C. 2005). Luego de este proceso de intercambio ligando, la sorción prosigue con reacciones más lentas, como de difusión al estado líquido en los microporos, difusión al estado sólido o bien precipitación.

La precipitación ocurre bajo ciertas condiciones de abundancia de compuestos libres en la solución como Al o Ca por ejemplo (Olsen y Khasawneh., 1980). La movilidad, y por lo tanto lixiviabilidad, de un compuesto en el suelo depende de sus características de sorción y de saturación.

5.2.13. La competencia glifosato y fosfato

El glifosato y el fosfato son a la vez absorbido por intercambio de ligandos en Al-OH y Fe-OH sitios de superficie de carga variable en la formación de una fuerte competencia Al-O-P o Fe-O-P para los sitios de sorción entre glifosato y P por lo tanto, el fosfato que parece obvio y puede tener un impacto severo en la unión de glifosato, y por lo tanto lixiviación.

Estos resultados sugieren que, además de sorción competitivo, sorción de glifosato y fosfato también puede ser aditiva, es decir, algunos sitios de la superficie son sitios comunes capaces de sorber ambos sorbatos, mientras que otros sitios son específicos, ya sea para el glifosato o fosfato. La preocupación ambiental en relación con glifosato / fosfato de competencia se atribuye a la sorción glifosato suprimida en el enriquecimiento fosfático del suelo porque reducirá la sorción y puede conducir a un mayor riesgo de lixiviación de glifosato para el medio ambiente acuático.

5.2.14. Degradación del glifosato

La degradación principal de glifosato se lleva a cabo por diversos microorganismos, que, junto con los factores del suelo que afectan a la degradación y la velocidad de degradación, se considerarán posteriormente.

AMPA se escinde para producir fosfato inorgánico y metilamina, que es en última instancia mineralizada a CO₂ y NH₃, varios estudios en los que se ha demostrado que el glifosato se utiliza como una fuente de fósforo, pero no como una fuente de carbono o nitrógeno, por algunos microorganismos y que el fosfato afecta a la degradación de glifosato negativamente.

Los suelos pueden presentar una gran variabilidad en su capacidad para degradar el glifosato; la mineralización / degradación de glifosato en el suelo también se ha encontrado que se correlaciona inversamente con la capacidad de sorción de glifosato de la tierra, es decir, si la sorción es fuerte, entonces la mineralización / degradación es baja, posiblemente debido a que la biodisponibilidad es baja. La mineralización máxima en un perfil de suelo arcilloso se encontró 1.90-2.26m por debajo de la superficie del suelo, es decir, a una profundidad donde las capas del suelo no han estado expuestas a glifosato.

La degradación de glifosato tiene lugar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas, aunque la degradación en condiciones anaeróbicas es normalmente menor.

La mineralización inicial de glifosato en el suelo es rápida, lo que corresponde a la degradación de la solución del suelo glifosato, seguido por una tasa decreciente gradualmente que se ha atribuido a la desorción limitante de la velocidad de glifosato unido a la superficie del suelo.

Dependiendo de los contenidos de común frente a sitios específicos en los suelos, la degradación de glifosato puede depender más o menos de la disponibilidad de fósforo, es decir, en suelos dominados por los sitios comunes, que prefieren fósforo, la adición de fósforo aumentará desorción glifosato y por lo tanto acelerar la degradación, mientras que la tasa de degradación del glifosato será poco afectada por el fósforo en los suelos principalmente poblado por sitios específicos. Alternativamente, la diferente influencia de fósforo sobre la degradación de glifosato puede explicarse por la estimulación de *Pseudomonas* mediante la adición de fósforo lentamente en la mineralización de suelos.

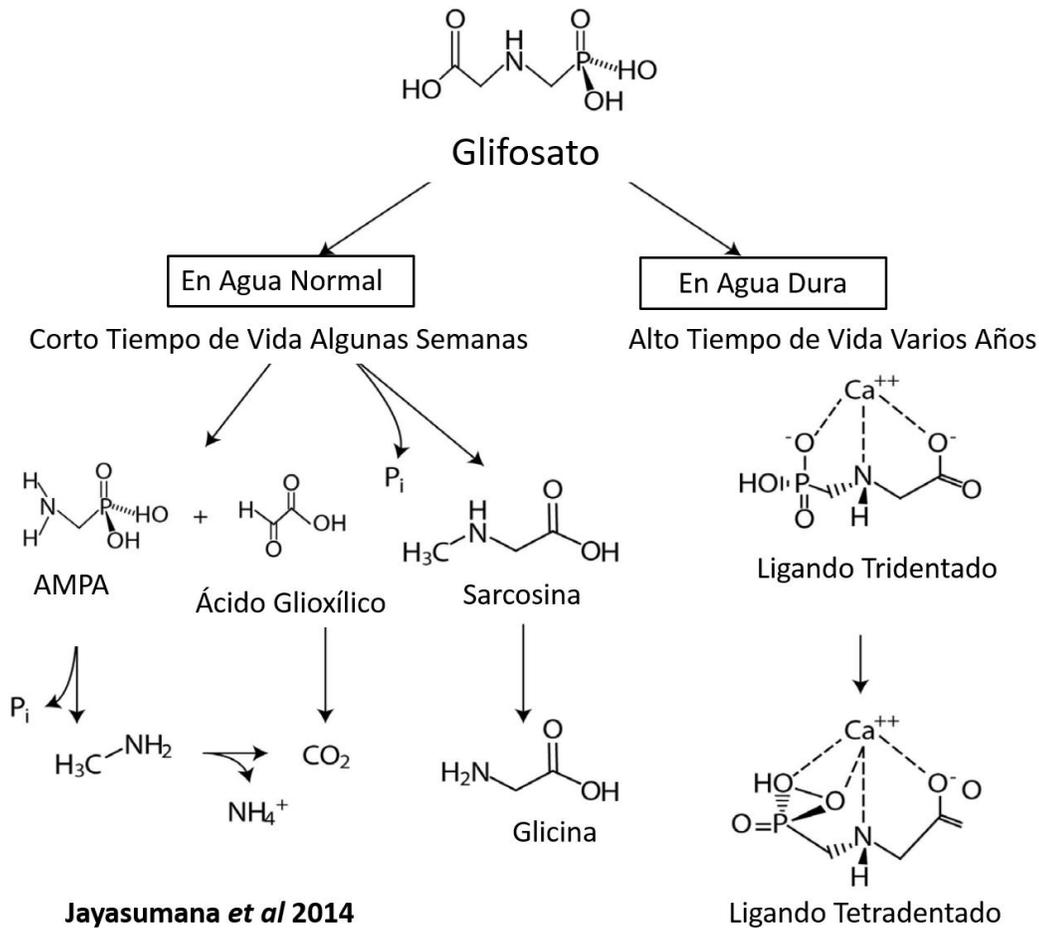


Figura 3 Degradación del Glifosato (modificado de Jayasumana et al., 2014)

La típica vida media del glifosato se encontró que era 92 días en agua y 47 días en el suelo, sin embargo; la absorción de agentes quelantes o metales ha demostrado que disminuye la biodegradabilidad de glifosato. Los estudios radiactivos ^{14}C -glifosato han demostrado que la vida media puede aumentar hasta 7 años o incluso hasta 22 años en el suelo (Jayasumana et al. 2014)

6. Marco teórico.

6.1. Principios

Para establecer las leyes físicas del campo electromagnético se fundamentaron en las ecuaciones de Maxwell que explican el comportamiento del mismo:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \text{ (Ley de Faraday)} \quad (6.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r})}{\partial t}; \text{ (Ley de Ampere)} \quad (6.2)$$

donde, \vec{E} es el campo eléctrico [V/m], B es el campo de inducción magnética [T], \vec{H} es el campo magnético [A/m], \vec{J} es la densidad de corriente [A/m²] y \vec{D} es el campo de desplazamiento [C/m²].

Si consideramos que es un campo estacionario, donde no varía la magnitud ni dirección respecto al tiempo, como se acostumbra en el caso de la prospección eléctrica, se deberán anular las derivadas temporales de las dos ecuaciones anteriores. Con ello, las ecuaciones de Maxwell para este caso en particular quedarán como Jc:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad (6.3)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}_I + \vec{J}_C \quad (6.4)$$

Donde \vec{J}_I se conoce como densidad de corrientes impresas, mientras que \vec{J}_C es la densidad de corriente de conducción las cuales obedecen a la Ley de Ohm.

La ecuación 6.3 nos indica que el campo eléctrico es un campo conservativo e irrotacional; por lo que se puede relacionar mediante el gradiente de una función escalar, como lo es el potencial U, esta relación entre el potencial U y la intensidad del campo eléctrico \vec{E} , se puede representar por la siguiente ecuación (Loke, 2009)

$$\vec{E}(\vec{r}) = \nabla U(\vec{r}) \quad (6.5)$$

En la ecuación anterior, se incluye el signo menos por una convención comúnmente aceptada (Orellana, 1982), pues las líneas del campo señalan la dirección de disminución del potencial.

Por otro lado, la Ley de Ohm rige el flujo de corriente en el subsuelo. Considerando un medio homogéneo e isótropo, se puede expresar la Ley de Ohm en su forma diferencial como

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r}) \quad (6.6)$$

donde σ es la conductividad del medio dado en [S/m]; \vec{J} es la densidad de corriente anteriormente mencionada, al igual que \vec{E} , que es la intensidad de campo eléctrico. Esta ecuación nos indica que la densidad de corriente \vec{J} en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo \vec{E} en el mismo punto; y es proporcional a éste por medio de un factor de proporcionalidad σ .

Sustituyendo \vec{E} de la ecuación 5.5, en la ecuación anterior, tenemos la siguiente expresión

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \nabla U(\vec{r}) \quad (6.7)$$

En todos los puntos se cumplirá la siguiente ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0 \quad (6.8)$$

que por ser un medio estacionario, la densidad de corriente J^{\rightarrow} se reducirá a

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0 \quad (6.9)$$

Sustituyendo J^{\rightarrow} de la ecuación 2.8, en la ecuación anterior, nos queda

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = \frac{-\nabla \sigma \cdot \nabla \mu}{\sigma} \quad (6.10)$$

Desarrollando la ecuación anterior

$$\nabla \sigma \cdot \nabla U(\vec{r}) + \sigma \nabla^2 U(\vec{r}) = 0 \quad (6.11)$$

Esta ecuación será válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos, ni en las superficies de discontinuidad de la resistividad (Orellana, 1982).

Además, a partir de ecuación de Laplace, se puede concluir también que la divergencia de la densidad de corriente \vec{J} para un medio homogéneo e isótropo será cero; como se observa en la ecuación 6.9.

6.2. Fuente puntual en un semiespacio

Se va a considerar un caso simple, donde se tiene un primer semiespacio; el cual es homogéneo, de resistividad ρ , que representa la capa de tierra. Sobre este semiespacio, se tiene un segundo semiespacio de resistividad infinita la cual será la capa de atmósfera que se encuentra sobre el subsuelo. Los electrodos, al ser pequeños a comparación de las dimensiones del estudio, se considerarán como fuentes puntuales en la frontera de ambos semiespacios

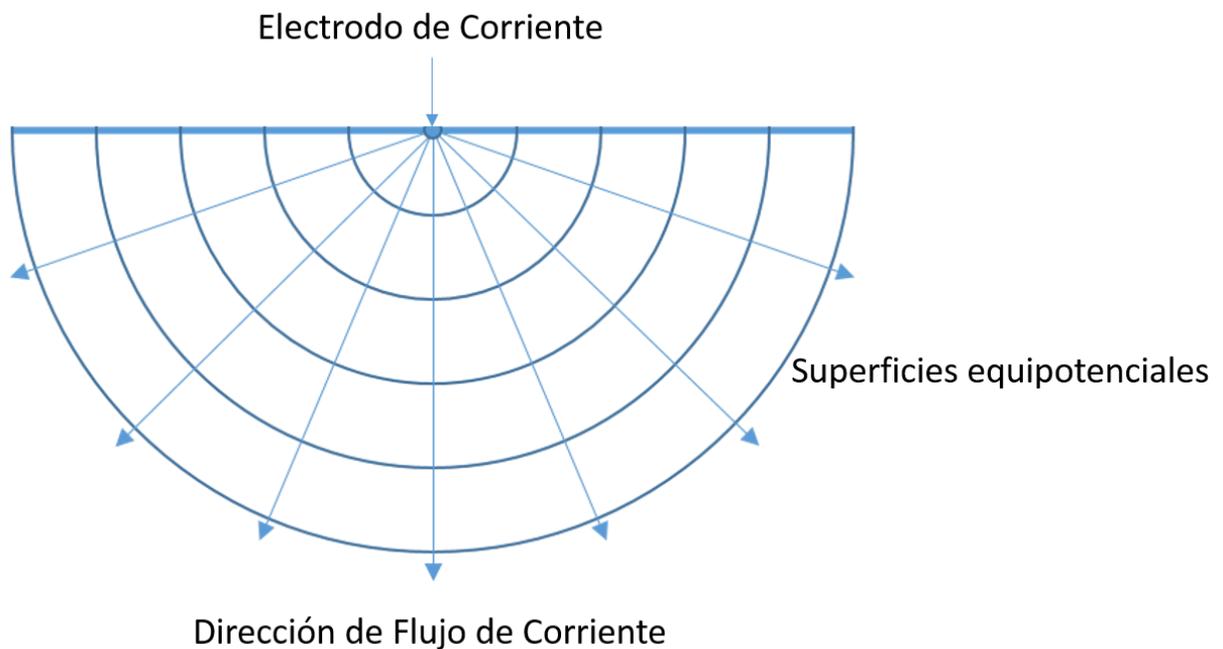


Figura 4 Flujo de corriente en un semiespacio modificado de Loke 2011

El potencial producido por una fuente puntual (un electrodo), varía inversamente a la distancia de éste, pues la corriente fluye radialmente desde la fuente, como se puede observar en la figura anterior.

Al considerar la solución de un semiespacio homogéneo e isótropo, se cumple que la conductividad del medio σ es constante; por lo que se puede expresar la ecuación 2.12 como

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -I\rho\delta(\vec{r}); \text{ para } z>0 \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \text{ para } z=0 \quad (6.13)$$

Ya que las dos ecuaciones anteriores, representan ecuaciones diferenciales con condiciones de frontera, se puede utilizar las funciones de Green para transformar éstas ecuaciones a ecuaciones integrales. Si utilizamos funciones de Green, la ecuación para $z>0$, queda expresada como

$$U(\vec{r}) = -\int_v G(\vec{r} - \vec{r}') \nabla^2 U(\vec{r}) dv + \int_s \left(G(\vec{r} - \vec{r}') \frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} - U \frac{\partial G(\vec{r} - \vec{r}')}{\partial \eta} \right) ds \quad (6.14)$$

Una de las condiciones de frontera más utilizadas para definir el problema son las condiciones de Dirichlet, que fijan el valor del potencial sobre el contorno. En este caso las líneas equipotenciales son paralelas a los contornos. También existen las condiciones de frontera de Neumann, las cuales fijan el valor de la derivada normal de los potenciales sobre el contorno. En este caso las líneas equipotenciales son normales a los contornos. Utilizando las condiciones de frontera de Neumann, la función de Green ($r^{\vec{r}}, r'$), satisface la ecuación diferencial

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \text{ para } z > 0 \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial G(\vec{r}')}{\partial \eta} = 0 ; \text{ para } z=0 \quad (6.16)$$

La función de Green que satisface las dos ecuaciones anteriores para el problema en el semiespacio es

$$G(\vec{r} - \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{1}{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} + \frac{1}{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2} \right] \quad (6.17)$$

Sustituyendo en la ecuación 6.14, las ecuaciones 6.12, 6.13 y 6.16, el potencial $U(\vec{r})$ queda expresado por

$$U(\vec{r}) = I\rho \int_v G(\vec{r} - \vec{r}') \delta(\vec{r}) dv = G(\vec{r}, h) \quad (6.18)$$

Con las propiedades de la función impulso de la integral de la última ecuación, se puede expresar como:

$$\int_v G(\vec{r} - \vec{r}') \delta(\vec{r}) dv = G(\vec{r}, h) \quad (6.19)$$

Donde $\delta(\vec{r}) = \delta(x' + y' + z')$.

Sustituyendo la anterior ecuación en (6.18), el potencial se puede expresar como

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}} \right] \quad (6.20)$$

Si consideramos que la fuente puntual está en la interface, es decir $h=0$, el potencial se puede minimizar a la siguiente expresión

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (6.21)$$

Donde $R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z)^2}$ y que el campo eléctrico se describe con la ecuación $\vec{E}(\vec{r}) = \nabla U(\vec{r})$.

Con la última ecuación, se puede comprobar que el potencial dependerá de la distancia de la fuente. Además, resulta importante destacar que, en campo, se realizan mediciones de la diferencia de potencial; que posteriormente, conociendo R en la ecuación 6.21, se obtiene la resistividad.

6.3. Factor geométrico y resistividad aparente

Es necesario para crear un campo eléctrico en el subsuelo, contar con un generador de corriente. En la mayoría de estudios, este generador inyectará una corriente continua por medio de dos electrodos; mientras que la diferencia de potencial se medirá con otros dos electrodos. Ésta diferencia de potencial se verá directamente afectada de acuerdo a la posición de los electrodos. Como se había mencionado anteriormente, un electrodo puntual, inyectando una corriente I generará un potencial U a cierta distancia desde la fuente. Si los dos puntos de medición y la fuente se encuentran en una superficie de un semiespacio homogéneo con resistividad ρ , este potencial estará dado por

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (6.22)$$

Adaptando este caso para la situación descrita en esta sección, R estará en función del espaciamiento entre los cuatro electrodos. Midiendo el potencial entre P1 y P2 debido a la corriente I ; y conociendo la configuración de los electrodos, se puede obtener valores de resistividad

$$U(\vec{r}) = I\rho \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (6.23)$$

donde r_i será el espacio que se encuentra entre los electrodos de corriente y de potencial, como se muestra en la siguiente ecuación

$$U(\vec{r}) = I\rho \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{c_1P_1} - \frac{1}{c_1P_2} - \frac{1}{c_2P_1} + \frac{1}{c_2P_1} \right) \right] \quad (6.23)$$

Si en la última ecuación se despeja ρ , y todo lo contenido dentro de los corchetes se reemplaza por un factor $1/k$, podemos simplificar de gran manera la ecuación, y así conocer la resistividad.

$$\rho = k \frac{\nabla U}{I} \quad (6.24)$$

La constante k en esta ecuación se conoce como factor de configuración o factor geométrico (Knödel, 2007), que como se mostró arriba, puede ser fácilmente calculado. Sin embargo, ya existen tablas en donde se indica el valor de k para los arreglos más comunes.

Las ecuaciones obtenidas, han sido para un semiespacio homogéneo. Caso contrario, en la naturaleza el medio se comporta como heterogéneo; en donde están presentes cuerpos y estratos de todos tamaños y espesores con diferente resistividad. Por esta razón al realizar un estudio de este tipo, se obtiene valores de resistividad aparente ρ_a . La mayoría de instrumentos de medición lo que proporcionan son valores de resistencia, es decir $R= U/I$; por lo que comúnmente se calcula la resistividad aparente de la siguiente manera

$$\rho_a = kR \tag{6.25}$$

El valor de resistividad aparente, no es el verdadero valor de la resistividad del subsuelo; este valor expresa la resistividad en el centro del arreglo (punto de atribución). Con el ejemplo que se muestra a continuación, la resistividad aparente del arreglo mostrado no se puede considerar como el promedio, ni la media ponderada de las tres resistividades presentes; ya que la resistividad aparente obtenida puede ser menor o mayor a las demás a su alrededor (Orellana, 1982).

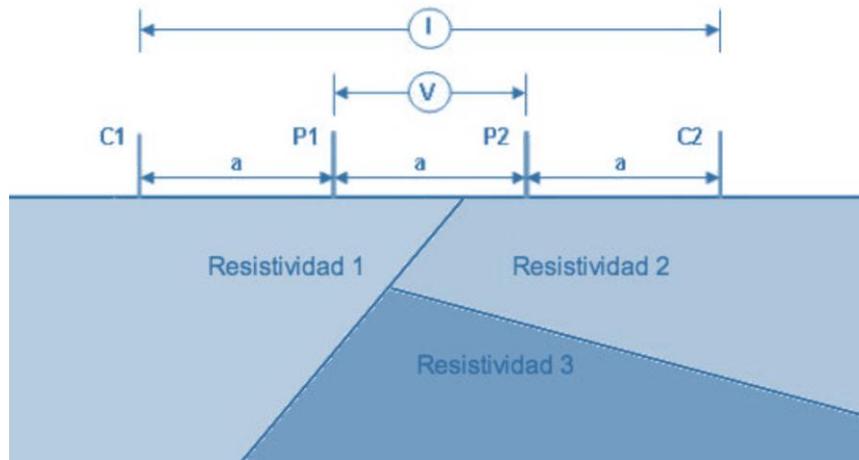


Figura 5 Ejemplo de un suelo Heterogéneo

Para obtener valores de resistividad verdadera del subsuelo, a partir de valores de resistividad aparente, se presenta el problema de “inversión.

6.4. *Arreglo de electrodos*

En los estudios de tomografía se tienen varios tipos de arreglos, presentándose en distintos acomodos geométricos los cuales presentan diferentes características, que con base en ellas se puede escoger cuál es el mejor arreglo para satisfacer los objetivos del estudio.

Una de estas características que se toman en cuenta para realizar un estudio, es la profundidad de investigación. Para determinar esta característica de los dispositivos geoelectricos se han definido distintos procedimientos matemáticos basados generalmente en la función de sensibilidad de Frechet. Esta función valora el grado en el cual un cambio de resistividad de una sección del subsuelo provoca una variación en el potencial medido en los electrodos de la línea geoelectrica (Loke, 2010). A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida.

La Figura muestra un gráfico en donde se observa que la profundidad media de investigación para los diferentes conjuntos. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad. Lo cual da una idea de la profundidad a la que se puede sondear con un dispositivo geoelectrónico en particular para la planeación y verificación de los datos adquiridos en campo. No obstante, la profundidad real de investigación puede variar drásticamente si en la parte superficial existen grandes contrastes de resistividad.

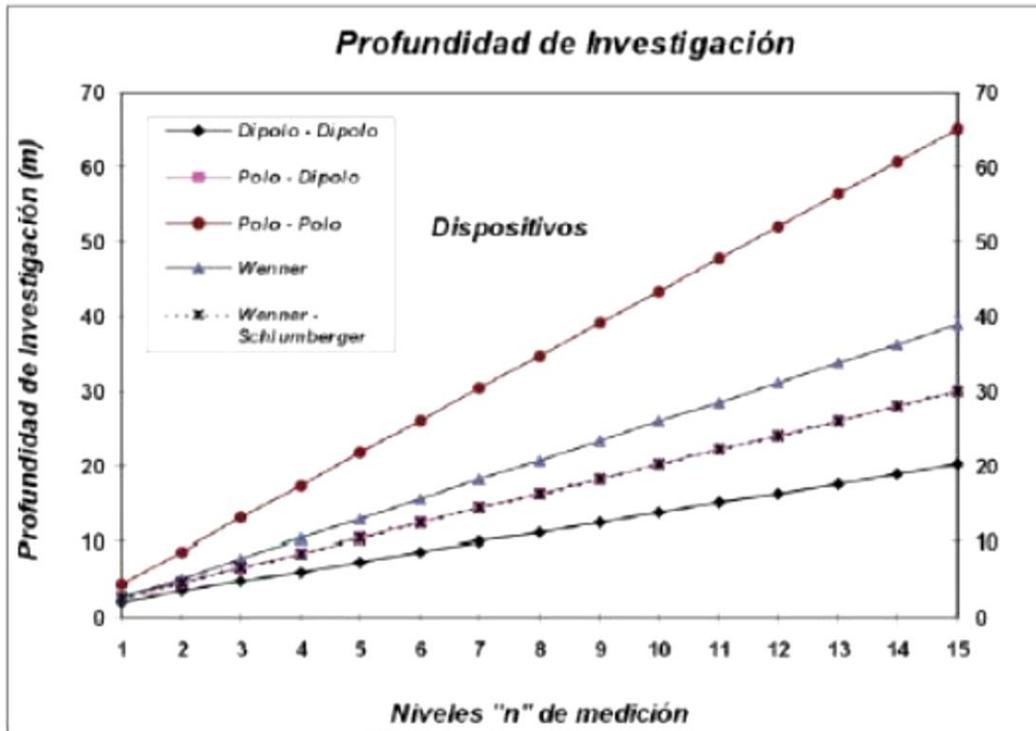


Figura 6 Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos obtenida para una distancia eléctrica de 5.0 m.

6.4.1. Matriz Wenner

Este tipo de arreglo tiene tres variaciones, siendo la más común Wenner Alpha, la cual consiste en ubicar los dos electrodos de potencial en el centro, y dejar los dos electrodos de corriente a los extremos. El espaciamiento entre estos cuatro electrodos será a una distancia a , entre cada uno de ellos. Posteriormente se recorren para adquirir datos a lo largo del perfil. Para tomar datos en diferentes profundidades se incrementa el nivel, en múltiplos de a . Los electrodos siempre se conservan equidistantes, no importa el nivel de profundidad en que se esté midiendo.

Este tipo de arreglo es sensible en cuanto a cambios verticales, por lo que se recomienda para la investigación de estructuras horizontales; como estratos sedimentarios o en geotecnia. Aunque bien sabemos que la profundidad de investigación va a variar por diversos factores que se encontrarán en campo, se puede generalizar su profundidad de investigación a 0.5 veces el espaciamiento a utilizado. Esta profundidad, comparado con

otros arreglos, resulta ser moderada. La resistividad aparente de la tierra se obtiene entonces a partir de la ecuación como:

$$\rho_a = 2\pi aR$$

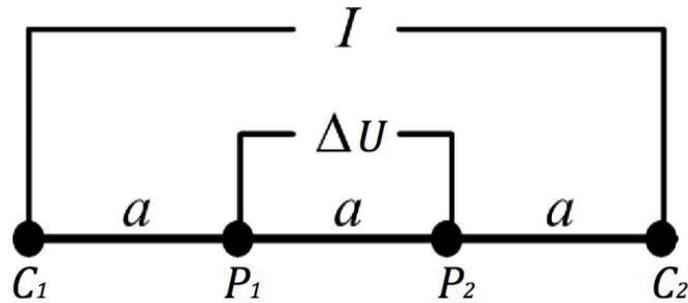


Figura 7 Arreglo Wenner

6.4.2. Matriz dipolo-dipolo

Deficiente para detectar cambios verticales (Estructuras Horizontales). Altamente sensitivo a los cambios horizontales (Estructuras Verticales); pero resulta ser un arreglo con poca profundidad de investigación, aproximadamente un 15% de la longitud total del perfil debido a la mala relación señal-ruido del arreglo; haciendo que los últimos niveles sean muy ruidosos, y en la mayoría de casos inservibles. Este arreglo consiste en colocar los dos electrodos de corriente juntos, al igual que los electrodos de potencial. Se empieza con una distancia inicial a para ambos pares de electrodos. Al incrementar el nivel, los electrodos de corriente se van a separar n veces a , de los electrodos de potencial. Sin embargo, la distancia entre C_1 y C_2 será siempre a ; el mismo caso sucede con el par de electrodos P_1 y P_2 .

Baja intensidad de señal para valores grandes del factor " n ". El voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor " n ". La profundidad media de investigación depende del espaciamiento " a " y el factor " n ". La intensidad de la señal es inversamente proporcional al cubo de n , así que entre más profundo sea el nivel de investigación, la señal será mucho más pobre. Una manera de solucionar un poco este problema, es aumentando de escala el arreglo. En este caso, la resistividad aparente se define por:

$$\rho_a = \pi Rn(n+1)(n+2)a$$

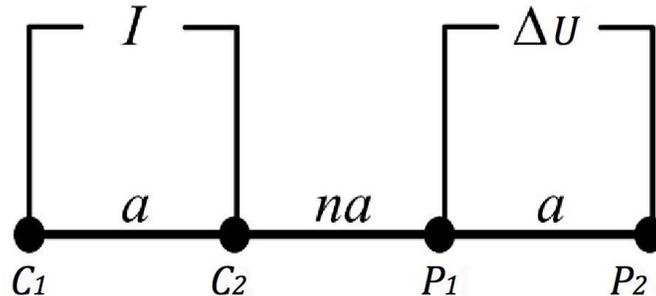


Figura 8 Arreglo Dipolo Dipolo

6.4.3. Matriz Schlumberger

El arreglo Schlumberger es uno de los más utilizados para hacer sondeos eléctricos verticales (SEV). Pazdirek y Blaha (1996), lo definen como un híbrido del arreglo Wenner y del arreglo Schlumberger, el cual se utiliza para hacer sondeos eléctricos verticales (SEV). La diferencia de este arreglo con el Wenner, radica en que la distancia entre los electrodos de potencial siempre será a , sin importar el nivel de estudio. La disposición Schlumberger es una matriz colineal en el que los dos electrodos de potencial interno están estrechamente espaciados, los electrodos de corriente se irán separando de los de potencial, hacia los extremos en múltiplos de a , de acuerdo al nivel que se esté leyendo.

En cuanto a resolución, este tipo de arreglo es ideal cuando se esperan observar estructuras geológicas tanto verticales como horizontales; teniendo una mayor sensibilidad para estructuras horizontales en los primeros niveles, y mayor sensibilidad para estructuras verticales en los últimos niveles. Respecto a su profundidad media de investigación, a partir del nivel $n=3$, es aproximadamente 10% más profundo que un arreglo Wenner Alpha, considerando que tienen una misma longitud total del perfil (Loke, 2012). Se puede decir que aproximadamente la intensidad de la señal es inversamente proporcional al cuadrado de n . La expresión para la resistividad aparente supone que la

separación de los electrodos es infinitamente pequeño, por lo que se mide el gradiente el potencial en el centro de la matriz.

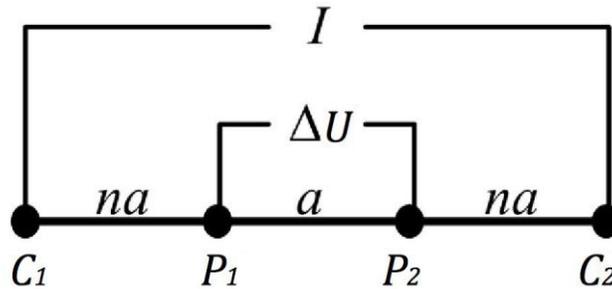


Figura 9 Arreglo Schlumberger

6.4.4. Cálculo de la profundidad de investigación.

La profundidad a la que se sitúa espacialmente cada medida de resistividad (punto de atribución) es un tema de cierta ambigüedad, dado que ésta no solo depende de la disposición de los electrodos (más espaciados mayor profundidad), sino también de la distribución de las resistividades del medio.

La Tabla 3 muestra los factores para calcular la profundidad media de investigación (**ze**) de las diferentes modalidades. L es la longitud total del arreglo. Note que existen valores idénticos para las modalidades Wenner-Schlumberger y polo-dipolo. El factor geométrico esta dado para un espaciamento entre electrodos “a” de un metro.

La profundidad media de investigación nos da una idea de la profundidad a la cual se puede penetrar en el subsuelo con una modalidad en particular. Los valores de la profundidad media son determinados integrando la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977).

6.5. Ley de Archie's - fluido de poro conductor y de la matriz de la roca resistiva

De acuerdo con la ley de Archie, la resistividad de material libre de arcilla saturada de agua puede describirse como:

$$\rho_{\text{Acuifero}} = \rho_{\text{Agua}} * F$$

$\rho_{\text{Acuífero}}$ = resistividad específica de arena saturada

ρ_{Agua} = resistividad específica de agua de los poros

Para el material parcialmente saturado, F puede ser reemplazado por F / SW^2 (SW = grado de saturación = fracción de agua llena el espacio poroso).

El factor de la formación de F combina todas las propiedades del material que influyen en el flujo de corriente eléctrica como la porosidad ϕ , forma de poro, y cementación diagenética.

$$F = a \cdot \phi^{-m}$$

Diferentes expresiones para la m constante del material se utilizan como exponente la porosidad, factor de forma, o (engañoso para los depósitos) el grado de cementación. Factores que influyen en m son, por ejemplo, la geometría de los poros, la compactación, la composición mineral, y las propiedades de la cementación

6.6. *Limitaciones la ley de Archie's - relajación de granos minerales*

La validez de la ley Archie's y fórmulas relacionadas se limita a los materiales con los granos minerales altamente resistivos y conducir el fluido de los poros. Cuando la resistividad del agua de los poros es suficientemente alta que la conductividad eléctrica de los granos minerales es una contribución sustancial a la conductividad eléctrica del acuífero, las formulaciones de Archie ya no son válidas.

6.7. *Modelo de inversión 2D*

En este modelo de inversión 2D, donde se basa el software RES2DINV consiste de un número de bloques rectangulares en 2D (figura 3.13). Estos bloques son igual al número de datos en la pseudosección de resistividades aparentes y son arreglados de igual manera. Los centros en el interior de los bloques se colocan en la profundidad de investigación media (Edward, 1977) para los diferentes espaciamentos usados en los electrodos. La profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamento de los electrodos para el arreglo Wenner. El método convencional de

mínimos cuadrados de Gauss-Newton se utiliza para determinar la resistividad de los bloques rectangulares (parámetros del modelo) que minimizarán las diferencias entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos.

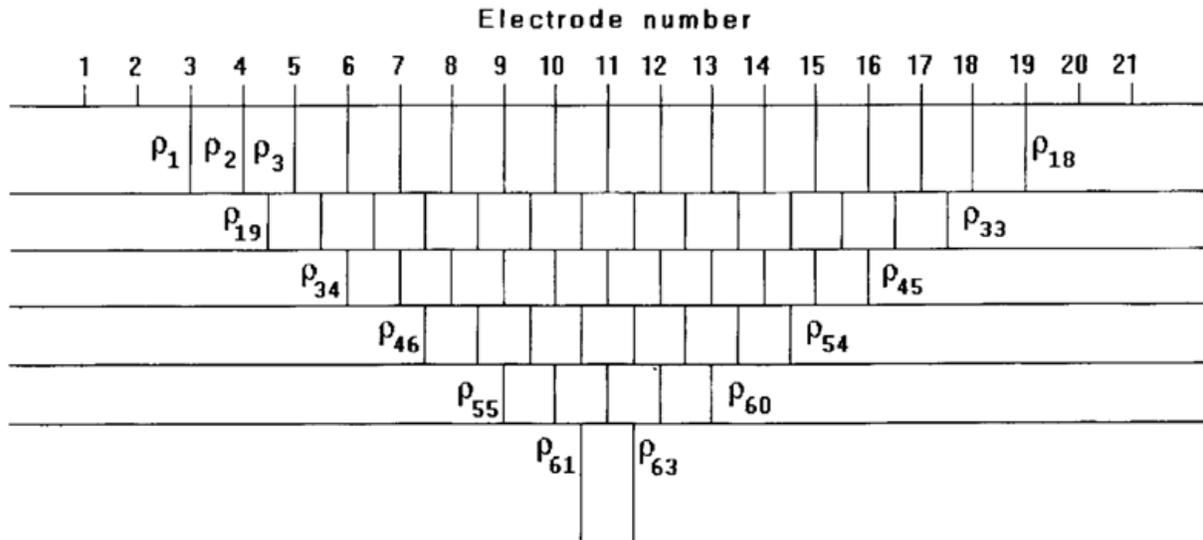


Figura 10 Arreglo de bloque rectangulares utilizados en el modelo 2D

El RES2DINV utiliza un método iterativo que a partir de un modelo inicial trata de encontrar un modelo mejorado cuyos valores de resistividad aparente sean más cercanos a los valores medidos. Un método conocido de inversión iterativa es el método de suavizado limitada, que tiene la forma matemática:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) P_i = J_i^T g_i \quad (6.30)$$

donde i es el número de iteración, J_i es la matriz jacobiana de derivadas parciales, g_i es el vector de discrepancia que contiene las diferencias entre logaritmos de los valores de resistividad aparente medidos y calculados, λ_i es el factor de amortiguamiento y P_i es el vector de la perturbación del modelo de parámetros para la i -ésima iteración. Para 2D C es un filtro utilizado para suavizar las perturbaciones del modelo de parámetros para cierto valor constante (Looke y Barker, 1996).

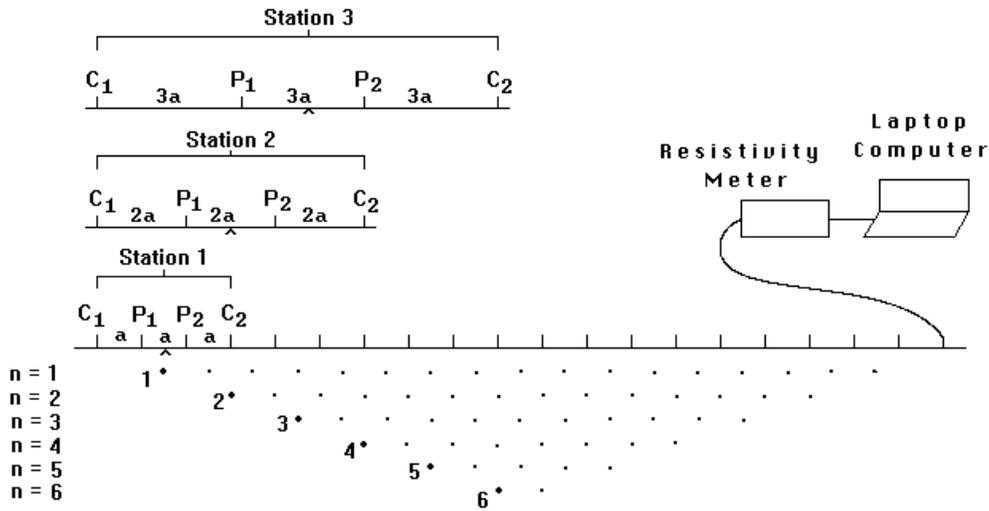


Figura 11 Secuencia de medidas para aumentar una pseudosección utilizando una configuración de múltiples electrodos controlado por ordenador

El propósito de este programa es determinar la resistividad de los bloques rectangulares que producirán un pseudosección resistividad aparente que está de acuerdo con las medidas reales. Para las matrices de Wenner y Schlumberger, el espesor de la primera capa de bloques se fija en 0,5 veces la distancia entre electrodos. Para arreglos polo polos, dipolo-dipolo y polo-dipolo, el espesor se ajusta a alrededor de 0,9, 0,3 y 0,6 veces la separación entre electrodos, respectivamente.

7. Metodología.

La metodología desarrollada durante la siguiente investigación consto de dos partes, la primera que es una serie pruebas y análisis en laboratorio, y la segunda que se refiere a la toma de datos y muestras en campo. Es importante mencionar que las pruebas en ambos casos se hicieron de manera conjunta siguiendo el siguiente orden cronológico:



Figura 12 Orden Cronológico de Actividades a Realizadas

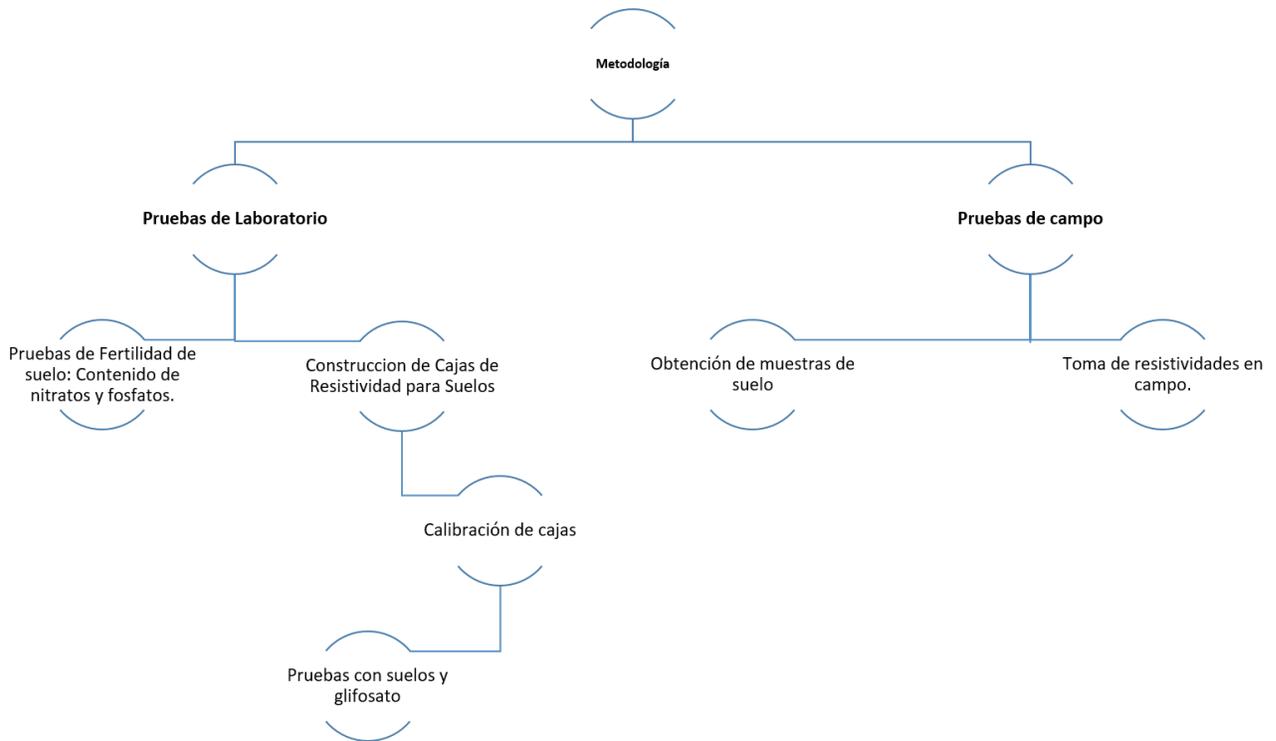


Figura 13 Diagrama de Actividades

7.1. Área de estudio

7.1.1. Macro localización

La zona de estudio comprende parcela agrícola ubicada en la localidad de Yasebache perteneciente al municipio de San Antonio Castillo Velasco; el cual se localiza en la parte central del Estado, en la región de los Valles Centrales. Limitando al norte con el municipio de San Juan Chilateca; al sur con Ocotlán de Morelos, Santa Catarina Minas y San Miguel Tilquiapam; al oriente con San Baltazar Chichicapam; al poniente con Ocotlán de Morelos.

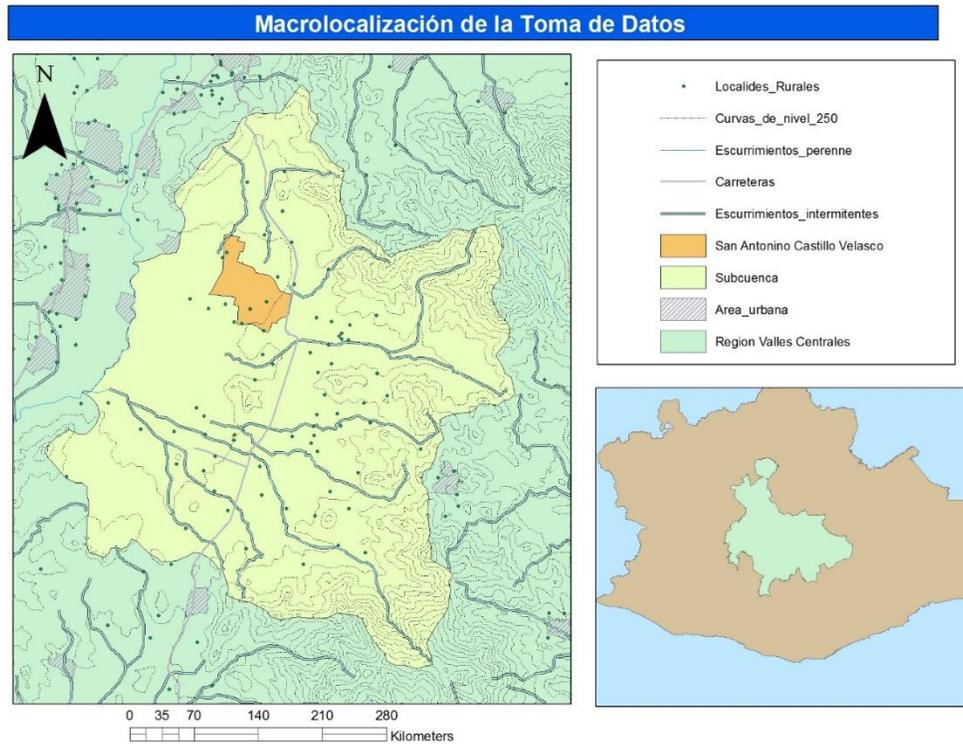


Figura 14 Macro Localización

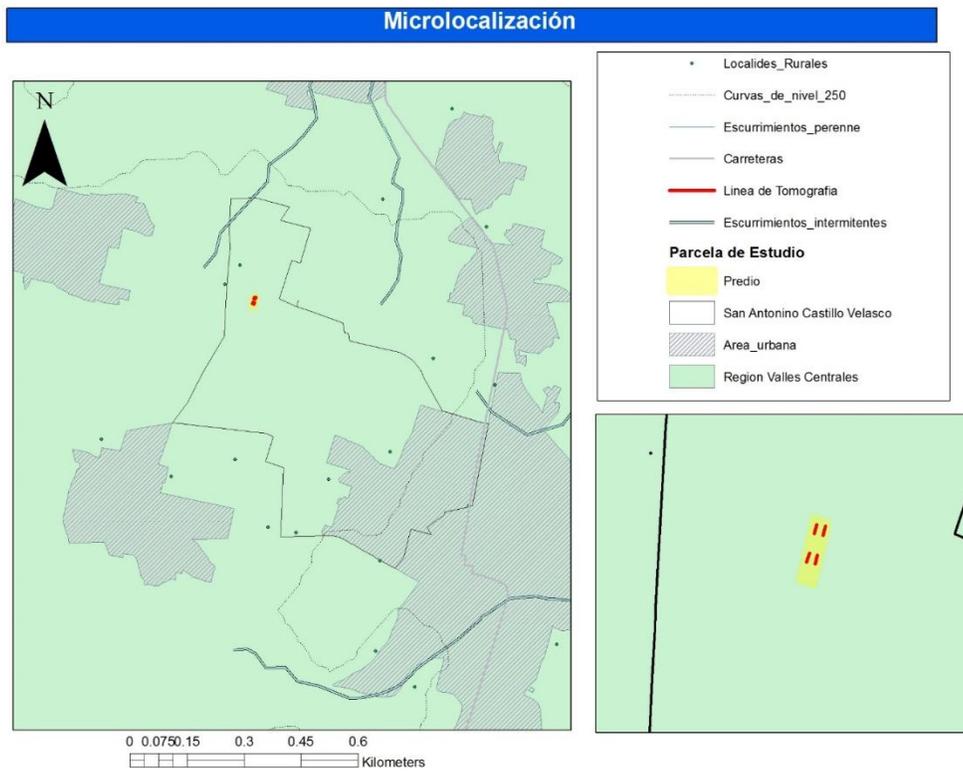


Figura 15 Micro Localización

7.1.2. Edafología

En la cuenca se encuentran 5 grupos de suelo de acuerdo con la clasificación de la FAO 1990. Dominan los luvisoles, seguido por regosol, leptosol y phaeozem, suelos constituidos por materiales con texturas predominantemente finas a medias (Figura 18). En la planicie de la cuenca predominan los suelos arcillosos, los cuales se encharcan y dificultan las labores de labranza cuando están secos o muy húmedos. A continuación, se presenta las características principales de los suelos de la cuenca (INEGI, 2011).

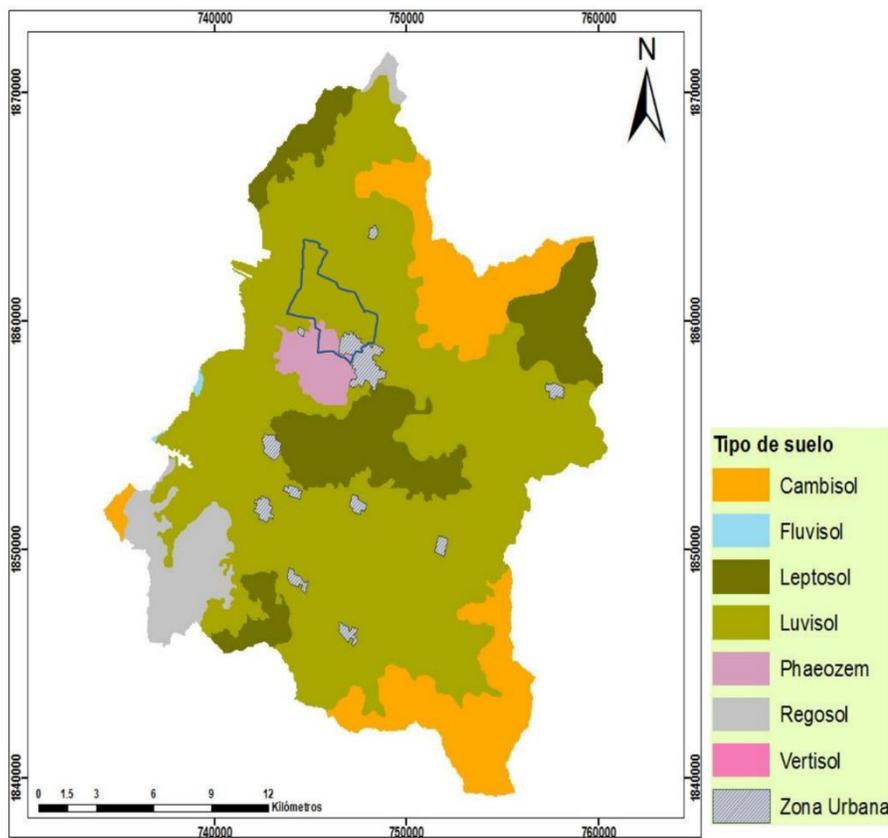


Figura 16 Edafología de la zona de estudio

En nuestra zona de estudio se encuentra Luvisol Del latín luvi, lu: lavar. Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas. La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo.

Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos

moderados, son suelos con alta susceptibilidad a la erosión. En México 4 de cada 100 hectáreas está ocupada por Luvisoles.

7.2. Hidrogeología

La zona de estudio forma parte de la región de los valles de Oaxaca cuya conformación geológica consiste en una planicie acumulativa de sedimentos continentales de edad reciente, que en su mayor parte lo constituyen, cantos rodados, aluvi3n, gravas, arenas limos y arcillas con afloramientos de rocas metam3rficas del tipo gneis de edad precámbrica del tipo andesita (Jensen 2009). La edafología de la zona de estudio comprende principalmente vertisoles y legosoles (INEGI 2007). Comprende parte de la región hidrográfica Costa Chica-Río Verde dentro de la cuenca del Río Atoyac con clave de Subcuenca RH20Ac obtenido del por el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (sIAtl) desarrollado por Inegi (2010). Con la presencia del río Atoyac (al oeste) y los ríos Ocotlán y Lavadero en la parte central-sur de la microcuenca.

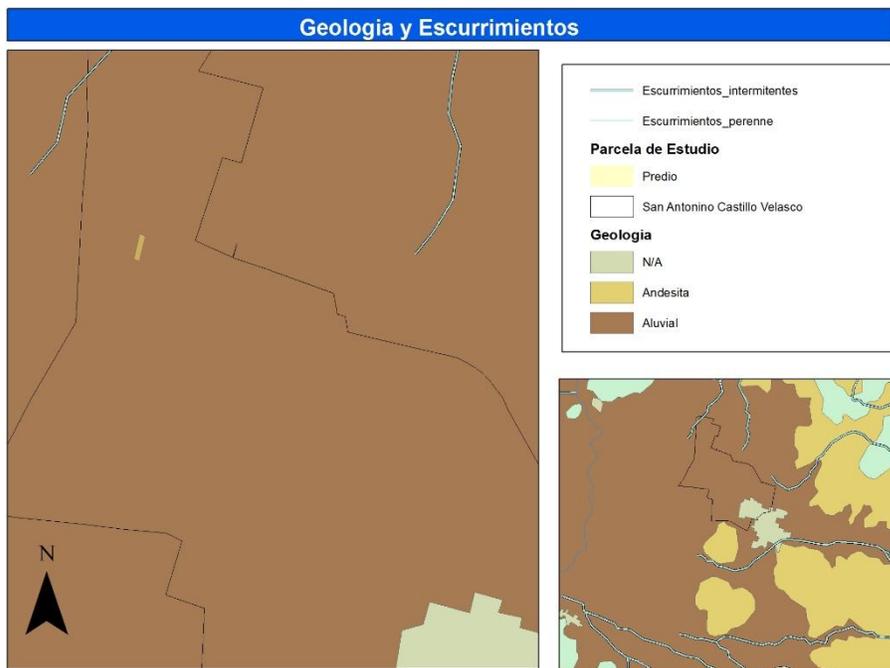


Figura 17 Hidrogeología de la zona de estudio

7.3. Climatología y meteorología.

De acuerdo a la clasificación de Köppen para la República Mexicana, el clima que prevalece en el Municipio del área de estudio es: BS1hw. Semiárido, semicálido,; con un régimen de lluvias de verano; temperatura media anual de 20 °C con una precipitación media anual de 685 mm;

7.4. Uso de suelo y vegetación

La zona de estudio no tiene vegetación natural y la mayor parte del uso del suelo en el territorio se encuentra ocupado por agricultura de temporal y de riego con un porcentaje medio de uso por parte de zonas urbana.

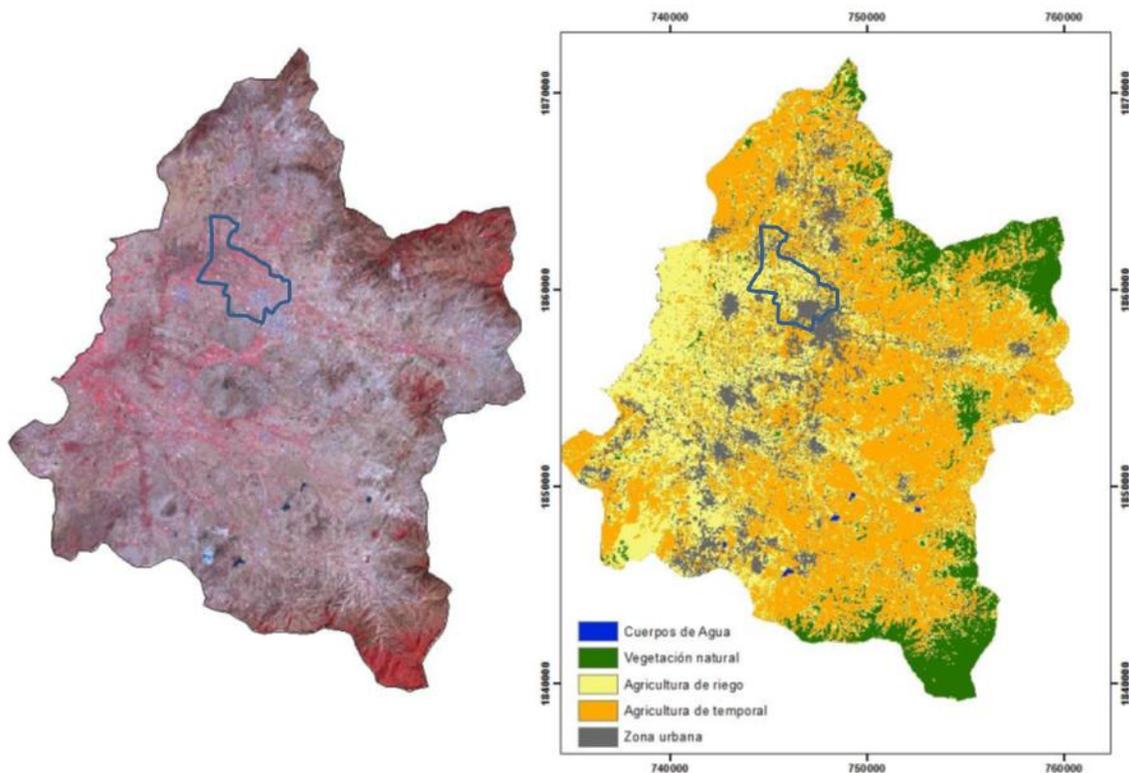


Figura 18 Uso de suelo y Vegetación de la zona de estudio Martínez Sánchez 2016

7.5. Construcción, calibración y pruebas de cajas de resistividad para suelos

Con el fin de conocer el efecto del glifosato en la resistividad del suelo se generaron pruebas de resistividad en laboratorio. Dichas pruebas se realizaron con un

procedimiento similar al utilizado por ASTM para determinar las resistividades de los materiales del suelo con el método de cuatro electrodos Wenner; en el cual cuatro electrodos metálicos se colocan con igual separación en una línea recta en la superficie de la tierra.

Se construyeron 10 cajas para medir resistividad del suelo. Las cajas son de plásticas de polipropileno con capacidad de 8 Fl Oz (equivalente a 236.588 ml) y cuyas dimensiones son de 7.2X11X3.6 cm. Se llenaron y marcaron con 150 ml para perforarlas con taladro y ajustar los electrodos, las cuales contendrán 2 electrodos a los costados con tornillos y una placa metálica, ambos de acero inoxidable, para inyectar corriente y dos electrodos de acero inoxidable para medir la resistencia, como se muestra en la siguiente imagen.

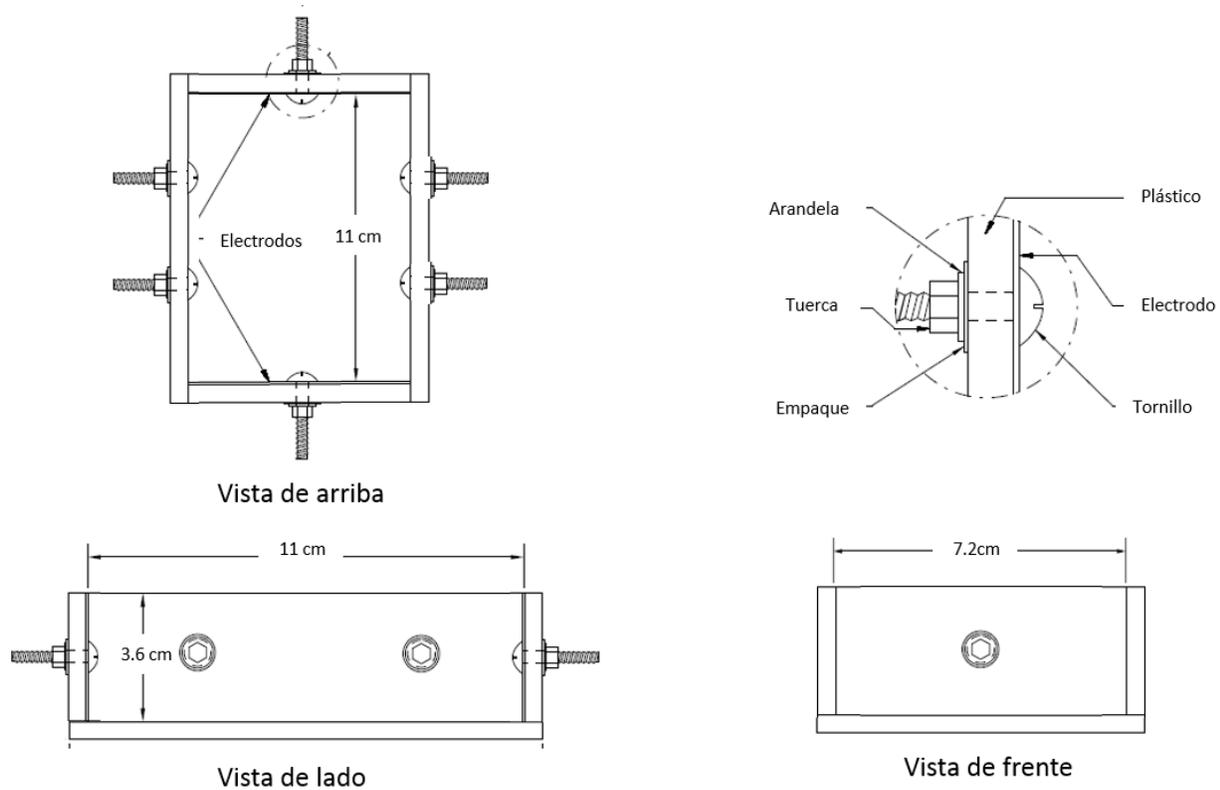


Figura 19 Diagrama de construcción de las Cajas de Resistividad de Suelos

Debido a que las esquinas de la caja son ligeramente curvas el cálculo del factor geométrico puede presentar errores; para solucionar este error se procedió a la calibración de las cajas de resistividad. Para ello se prepararon 5 soluciones salinas de 0.03, 0.3, 3, 15 y 30 g/l las cuales fueron mediadas con un resistivímetro cilíndrico con un factor geométrico ya conocido con el cual se calcularon las resistividades para cada solución.

Una vez obtenidos dichos valores para cada solución, se prosiguió a medir las resistividades de las soluciones en las cajas construidas. Se capturaron las intensidades de corriente y el voltaje de cada caja en con cada solución. Debido a que ya se conocía la resistividad de cada solución y que en principio durante la medición de la resistividad de las soluciones se tiene una corriente conocida I entre el par de electrodos AB y con un potencial ΔU entre el par de electrodos MN, se despejara el factor geométrico obteniendo el mismo de cada lado de la caja.

$$\text{Si } \rho = K \frac{\Delta U}{I} ; \text{ entonces } K = \frac{\Delta U}{I\rho}$$

Una vez obtenidos los valores del factor geométrico de cada cara de la caja se procedió a comprobar el mismo añadiendo un volumen de suelo equivalente a 150 cm³ a cada una para posteriormente saturar el mismo con las soluciones y con agua destilada (esta para conocer la resistividad del suelo). La resistividad medida será dependiente del grado de compactación, el contenido de humedad, solubilidad constituyente, y la temperatura.

7.6. *Toma de muestras de suelo*

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado tomando muestras de suelos del inicio, el centro y al final de cada línea de tomografía a dos profundidades (0.3 m y 0.7 m), similar a lo realizado por Márquez Molina et al., 2014, donde el estrato de interés puede contener una variedad de tipos de suelos y donde diversos autores identifican las mayores concentraciones de agroquímicos. La muestra fue aproximadamente de 2.5 kg.

Se decidió tomar ese número de muestras debido al tiempo, esfuerzo y costo que requiere realizar cada tipo de análisis fisicoquímico por muestra.

7.7. *Análisis de suelos*

Después de la recogida, las muestras de suelo se pesaron y un kg de material se envió al laboratorio central universitario del departamento de suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) donde realizaron los siguientes análisis:

- **pH:** realizado con potenciómetro relación agua suelo 1:2
- **Materia Orgánica:** determinado por el método de Walkey y Black
- **Nitrógeno Total:** determinado por el método de arrastre de vapor de Kendal
- **Nitrógeno Inorgánico:** Extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor.
- **Fosforo Asimilable:** Por el método de Olsen.

Por nuestra parte se realizó la prueba de Bouyocus para determinar porcentajes de limo, arena y arcilla y con ayuda de un triángulo de textura de suelo se determinaron las texturas.

7.8. *Prueba de resistividad del suelo en laboratorio*

Calibradas las cajas de resistividad se procedió a la toma de datos en un suelo testigo para verificar si se lograban apreciar anomalías significativas de la resistividad al añadir glifosato. Se realizaron 3 soluciones de glifosato, tomando como base la proporción recomendada del producto de 4 L por cada 200 L, la primer solución de 20 ml/l, la segunda de 2 ml/l y una tercera de 0.2 ml por L. Asegurándose que cada adición de agua se disperse uniformemente por toda la muestra. Se realizaron pruebas de la misma muestra durante 5 días para encontrar algún cambio de resistividades en el tiempo.

Posteriormente se realizaron pruebas de la resistividad del suelo, donde se llenaron las cajas de resistividad con el suelo colectado y se les adiciono agua destilada. El agua se adiciono uniformemente 50 ml y se midió la resistividad con el equipo SYSCAL Jr calibrado en ahorro de energía, tomando la media de 4 mediciones, posteriormente se le adicionaron otros 30 ml y midiendo la resistividad; en caso de no alcanzar el punto de saturación se le adicionaron otros 20 ml y se midió nuevamente la resistividad.

7.9. Pruebas de resistividad en campo

El equipo que se empleó para la adquisición de los datos de campo fue el SYSCAL Jr (Figura 7.5). Esta unidad de medición de resistividad está diseñada para toma de datos masiva. El equipo contiene un transmisor, receptor y alimentación por lo que es una herramienta muy práctica en campo.



Figura 20 Equipo Syscal Jr SwitchPro de 24 canales de Iris Instruments

El método utilizado fue Tomografía de Resistividad eléctrica con un arreglo de Dipolo-Dipolo por su ventaja en la caracterización de cambios horizontales. Los datos se tomaron con un espaciamiento en los electrodos de $a=1\text{m}$ y un factor inicial de $n=1\text{m}$. En la zona de estudio se realizaron cuatro perfiles, según la información proporcionada del sitio, para obtener los datos de la tomografía eléctrica. Se colocaron 24 electrodos en cada línea una separación entre cada línea de 10 m (figura 5.4), la orientación de los perfiles fue N-S igual que la orientación de los cultivos; similar a lo realizado por Sainato et al., 2015. El incremento en el factor n se dio hasta $n=7$ (siete niveles de investigación) alcanzando una profundidad aproximada de 2.5 m.

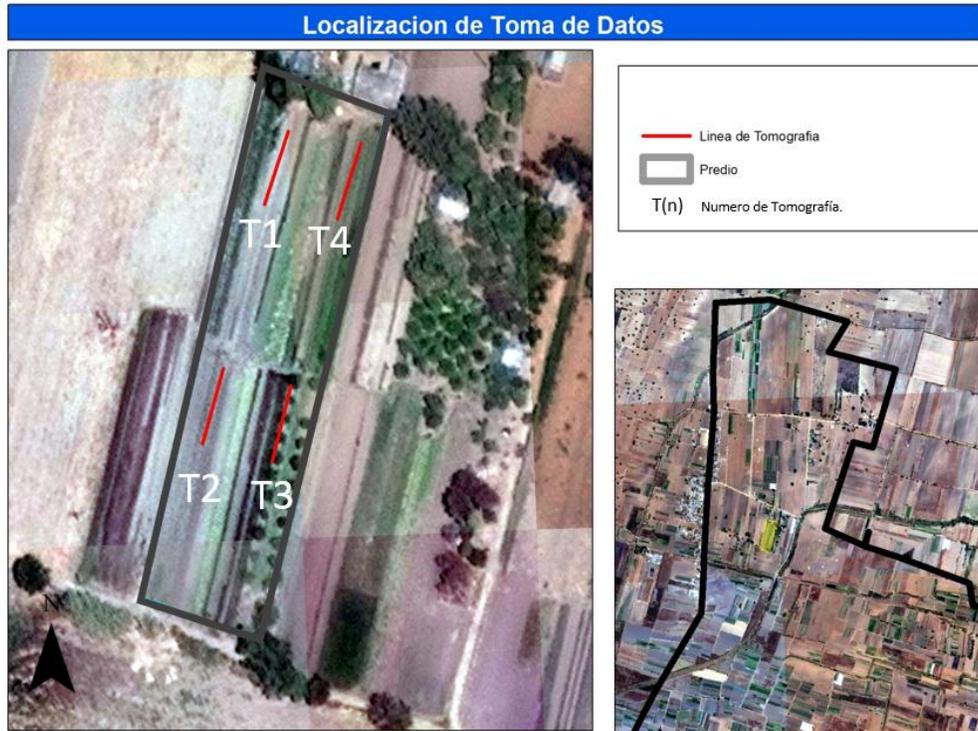


Figura 21 Ubicación de las líneas de Tomografía

7.10. Frecuencia de toma de datos

La toma de datos y colecta de material edafológico se realizó durante la época de secas del 2016 correspondiente al mes de marzo.

8. Resultados y discusión

8.1. Resultado de suelos en laboratorio

De los resultados de los análisis de textura de suelos por el método de Bouyocus realizados por nuestra parte en el instituto se esquematizo en la tabla 8.1 donde se puede apreciar que la textura de la mayoría de las muestras contiene principalmente arenas, seguido de limos y finalmente arcillas, y la mayor parte de los suelos son del tipo franco arenoso. También se puede apreciar en la tabla 8.1 como se incrementan el porcentaje de arenas de las muestras aumentan conforme a la profundidad llegando a cambiar la textura y tipo de suelo.

Tabla 1 Resultado de los análisis de textura de suelo por el método Bouyocus

	% L y Ar	Arcilla	Limos	Arenas	Textura
S1M1 0.3	22.7	10.2	12.5	77.3	Arena Franca
S1M1 0.7	12.7	2.7	10	87.3	Arena
S1M2 0.3	35.2	10.2	25	64.8	Franco Arenoso
S1M2 0.7	17.25	5.2	12.05	82.75	Arena
S1M3 0.3	27.25	2.7	24.55	72.75	Arena Franca
S1M3 0.7	55.2	12.7	42.5	44.8	Franco
S2M1 0.3	15.2	2.7	12.5	84.8	Arena
S2M1 0.7	15.2	2.7	12.5	84.8	Arena
S2M2 0.3	26.8	7.25	19.55	73.2	Arena Franca
S2M2 0.7	29.3	7.25	22.05	70.7	Arena Franca
S2M3 0.3	31.8	9.525	22.275	68.2	Franco Arenoso
S2M3 0.7	34.3	12.025	22.275	65.7	Franco Arenoso
S3M1 0.3	29.3	9.4125	19.8875	70.7	Arena Franca
S3M1 0.7	37.025	9.75	27.275	62.975	Franco Arenoso
S3M2 0.3	11.8	2.25	9.55	88.2	Arena
S3M2 0.7	39.3	9.75	29.55	60.7	Franco Arenoso
S3M3 0.3	26.8	2.25	24.55	73.2	Arena Franca
S3M3 0.7	41.8	7.25	34.55	58.2	Franco Arenoso
S4M1 0.3	37.25	7.475	29.775	62.75	Franco Arenoso
S4M1 0.7	42.25	14.75	27.5	57.75	Franco
S4M2 0.3	37.25	10.2	27.05	62.75	Franco Arenoso
S4M2 0.7	32.25	9.75	22.5	67.75	Franco Arenoso
S4M3 0.3	42.25	12.7	29.55	57.75	Franco Arenoso
S4M3 0.7	37.25	14.75	22.5	62.75	Franco Arenoso

De los resultados de los análisis de suelo recibidos, por parte del laboratorio central universitario del departamento de suelos de la UACH, se esquematizo la siguiente tabla 8.2.

Se puede apreciar que en general los suelos analizados presentan pobre contenido de materia orgánica y bajos niveles de nitrógeno total e inorgánico con un pH ligeramente alcalino sin embargo presenta niveles medios y altos de contenido de fósforo en ambos niveles. Heredia y Fernández 2007 nos mencionan que la adsorción de fósforo por el suelo decrece con la adición del mismo; por lo que sin una buena síntesis del mismo por parte de las plantas puede comenzar a lixiviarse en suelos especialmente en los arenosos (Kang et al., 2010)

Cuadro 8.2.

Tabla 2 Resultado de los análisis de suelo UACH

Clave	Profundidad	pH	% MO	N % total	N. Inorgánico ppm	P ppm
S1M1 0.3	0.3	8.7	0.4	0.02	3.9	8.94
S1M1 0.7	0.7	8.3	0.4	0.03	3.7	7.94
S1M2 0.3	0.3	8.5	1.34	0.05	7.1	7.94
S1M2 0.7	0.7	8.7	0.54	0.03	3.7	10.18
S1M3 0.3	0.3	7.8	1.95	0.08	12	8.69
S1M3 0.7	0.7	8.1	1.34	0.05	8.4	8.94
S2M1 0.3	0.3	8.1	1.08	0.05	5.4	11.92
S2M1 0.7	0.7	8.2	0.4	0.02	7.6	7.7
S2M2 0.3	0.3	8.1	1.01	0.05	6.1	13.65
S2M2 0.7	0.7	8.3	1.14	0.05	5.7	11.42
S2M3 0.3	0.3	8.2	1.61	0.07	3.4	28.05
S2M3 0.7	0.7	8.1	0.87	0.05	8.7	9.68
S3M1 0.3	0.3	8.9	0.87	0.05	3.7	15.39
S3M1 0.7	0.7	8.1	0.81	0.03	3.7	4.47
S3M2 0.3	0.3	8	1.34	0.06	5.4	8.69
S3M2 0.7	0.7	8.2	1.08	0.06	5.4	6.95
S3M3 0.3	0.3	8.2	1.88	0.07	11	5.96
S3M3 0.7	0.7	8.1	0.47	0.03	5.4	8.69
S4M1 0.3	0.3	8.1	1.48	0.07	0	7.2
S4M1 0.7	0.7	8	0.81	0.04	4.6	5.46
S4M2 0.3	0.3	8.2	1.55	0.07	8.6	9.18
S4M2 0.7	0.7	8.1	0.94	0.05	7.6	7.45
S4M3 0.3	0.3	8.2	1.34	0.06	5.4	5.96
S4M3 0.7	0.7	8	0.61	0.04	4.8	5.46
	Nivel muy bajo	< 0.5	<0.049	0 - 10		
	Nivel bajo	0.6 - 1.5	0.05-.1	10 - 20		< 5.5
	Nivel medio	1.6 - 3.5	0.1-0.15	20 - 40		5.5 - 11
	Nivel alto	3.6 - 6.0	0.2-.25	40 - 60		> 11

De acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos

8.2. Pruebas de cajas de resistividad para suelos

8.2.1. Prueba con testigo y glifosato

Se realizó una prueba preliminar con las cajas de resistividad de suelo con un suelo testigo de los primeros 20 cm colectado en las instalaciones del Instituto y saturando una muestra con agua y el resto de las muestras con las concentraciones de glifosato mencionadas anteriormente (0.03, 0.3, 3, 15 y 30 g/l).

Una vez que alcanzó su punto máximo de saturación se prosiguió a medir la temperatura de cada muestra y a iniciar la inyección de corriente y medición del potencial eléctrico. El mismo procedimiento se repitió a los dos días donde se obtuvo las siguientes figuras:

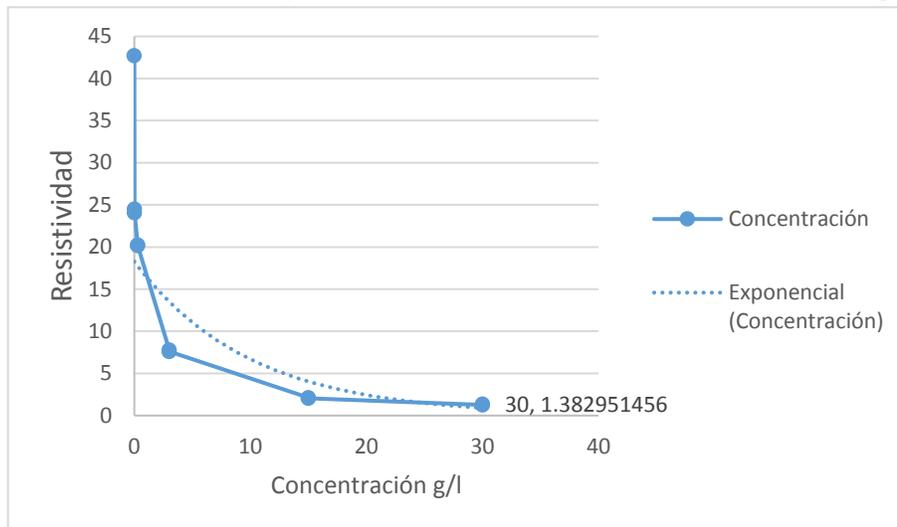


Figura 22 Comportamiento del Glifosato con respecto a la concentración en el primer día.

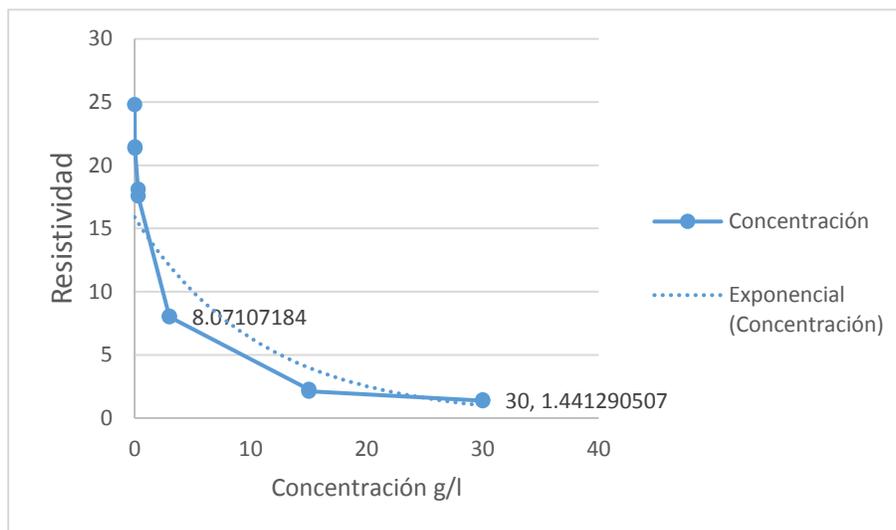


Figura 23 Comportamiento del Glifosato con respecto a la concentración a los 3 días.

Las gráficas nos muestran una disminución en la resistividad con respecto a la concentración o lo que es igual un aumento en la conductividad. Esto se puede explicar por el contenido de sales que se presentan la fórmula que ejercen menor resistencia al paso de corriente.

Otro aspecto importante sobre la relación de la concentración y la resistividad es que se puede apreciar un pequeño aumento de la resistividad después de los dos días de iniciado la toma de datos probablemente debido a la acción microbiana que degrada al compuesto de glifosato y que probablemente altera la conducción electrolítica que forma el compuesto. Considerando también que al ser una capa superficial de suelo contiene una gran cantidad de materia orgánica la cual porta una gran cantidad de microorganismos que pueden descomponer los compuestos.

8.2.2. Pruebas de resistividad de suelos muestreados

En la siguiente tabla con su grafico se pueden apreciar el comportamiento de las resistividades en el suelo estudiado:

Clave	ρ
S1M1 0.3	25.30
S1M1 0.7	43.93
S1M2 0.3	21.73
S1M2 0.7	18.26
S1M3 0.3	21.23
S1M3 0.7	17.72
S2M1 0.3	27.58
S2M1 0.7	43.33
S2M2 0.3	22.98
S2M2 0.7	29.34
S2M3 0.3	21.56
S2M3 0.7	18.96
S3M1 0.3	30.35
S3M1 0.7	44.53
S3M2 0.3	32.29
S3M2 0.7	19.64
S3M3 0.3	17.40
S3M3 0.7	11.60
S4M1 0.3	10.17
S4M1 0.7	13.95
S4M2 0.3	14.39
S4M2 0.7	16.21
S4M3 0.3	12.39
S4M3 0.7	16.84



Tabla 3 Resultados del análisis de las resistividades de suelos en laboratorio.

Figura 24 Resultados del análisis de las resistividades de suelos en laboratorio.

Se calculó el error maestro de las resistividades 3.336 considerando la fórmula:

$$E = Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde

σ es la desviación estándar maestra

n Numero de muestras

α es 0.1

Es importante señalar que las mayores resistividades se obtuvieron en las muestras tomadas al inicio en las líneas S1, S2 y S3 debido quizás a que estas muestras se encontraban en la frontera entre la zona cultivada y la no cultivada.

8.3. Tomografía de resistividad eléctrica

A continuación, se interpretan los perfiles realizados en el sitio de acuerdo con sus propiedades de resistividad. La ubicación de los 4 perfiles se muestra en la figura 7.6.

8.3.1. Perfil 1

En la figura 8.3 se muestra el resultado de la inversión de los datos tomados en campo, donde se puede apreciar en las capas superficiales valores conductores o con resistividades bajas que van de 8.5 a 30 Ω m hasta los primeros 50 cm aproximadamente probablemente por una mayor concentración de sales y humedad en ese perfil de suelo. Después de los primeros 50 cm, comienzan a subir gradualmente la resistencia hasta alcanzar los 95 Ω m; se puede inferir que es debido a un incremento en la presencia de arenas hasta que a 1.5 m existen unos cuerpos significativamente más resistentes con un grosor aproximado de 40 cm y una resistencia mayor a 141 Ω m. A partir del cuerpo resistivo comienza a disminuir significativamente la resistividad en los siguientes 50 cm

donde vuelve a presentar valores de hasta 8 Ωm probablemente debido a la humedad acumulada por el riego.

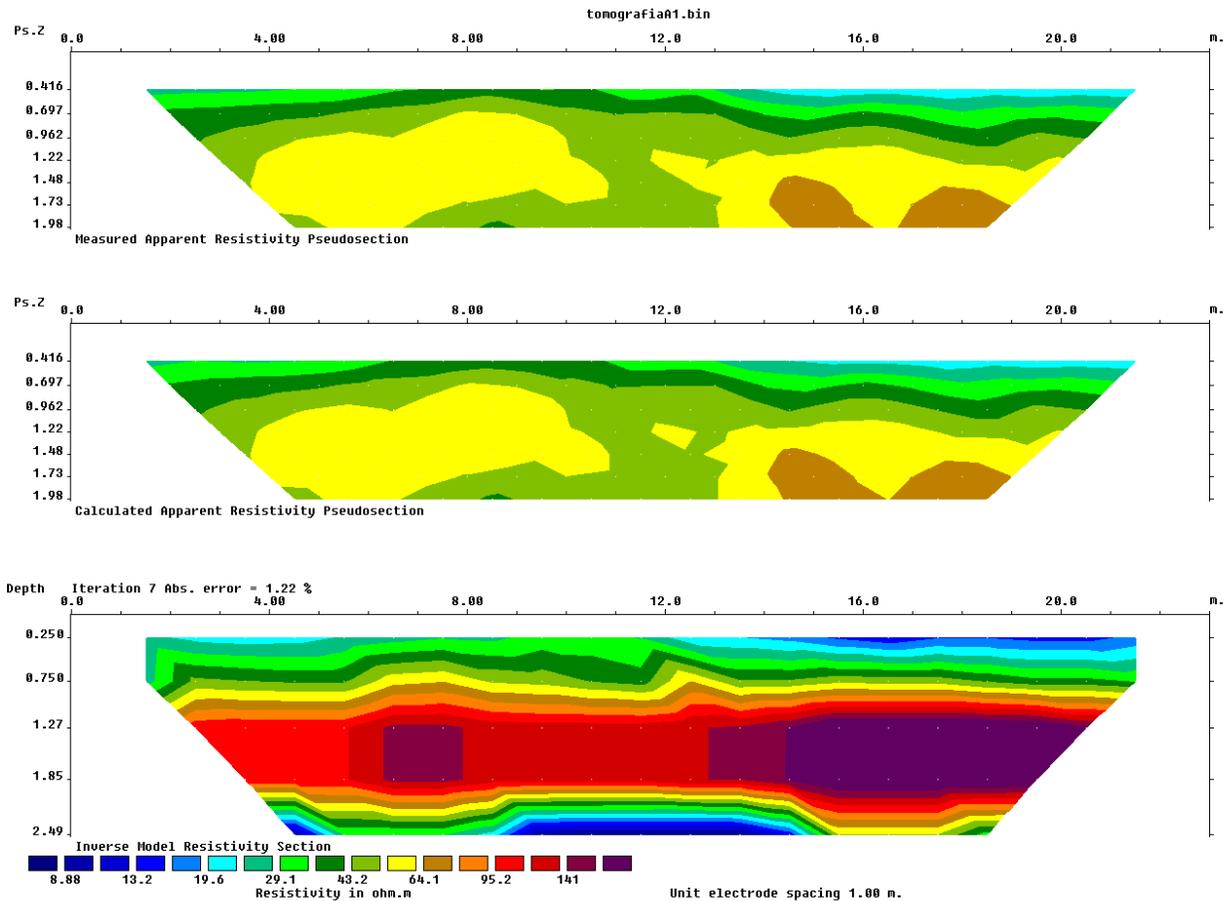


Figura 25 Perfil 1 de toma de datos.

8.3.2. Perfil 2

En la figura 8.4 se muestra el resultado de la segunda inversión de los datos tomados en campo, las cuales se comportan similar a la anterior en donde se puede apreciar en las capas superficiales valores conductores o con resistividades bajas que van de 19.5 a 40 Ωm hasta los primeros 50 cm aproximadamente probablemente por una mayor concentración de sales y humedad en ese perfil de suelo; aunque las resistividades son menores que el perfil anterior debido a un menor contenido de humedad en el suelo. Después de los primeros 50 cm, se incrementa significativamente la resistencia hasta

alcanzar una zona con más de 213 Ωm ; como el caso anterior puede inferir que es debido a un incremento en la presencia de arenas que alcanza hasta los 1.8 m existiendo unos cuerpos significativamente más resistivos probablemente gravas. A partir del cuerpo resistivo comienza a disminuir significativamente la resistividad en los siguientes 50 cm donde vuelve a presentar valores de hasta 20 Ωm probablemente debido a la humedad acumulada por el riego.

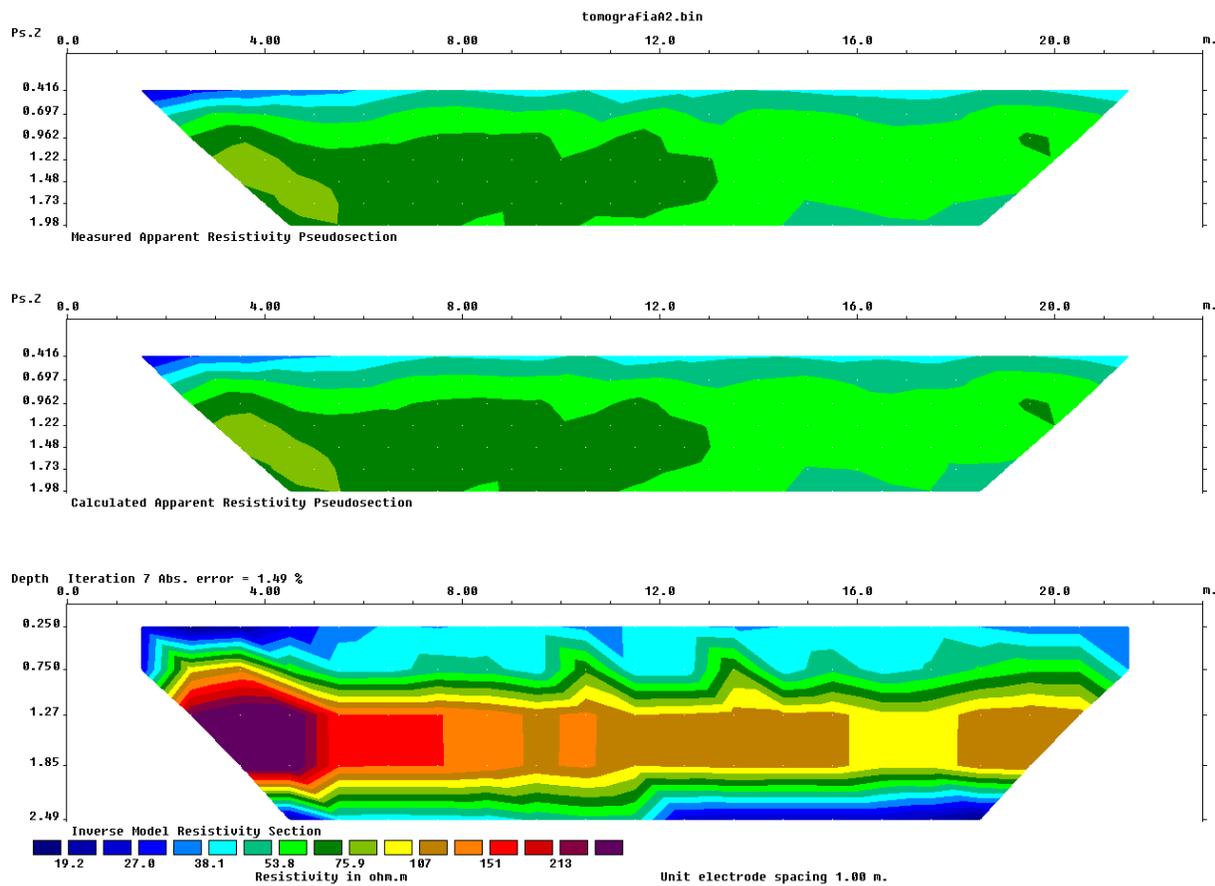


Figura 26 Perfil 2 de toma de datos.

8.3.3. Perfil 3

En la figura 8.5 se muestra el resultado de la inversión del tercer perfil tomados en campo, los cuales se comportan de forma muy diferente a los perfiles anteriores ya que a diferencia de los otros que mostraban una secuencia uniforme este perfil cuenta con zonas con resistividad que va de los 39 a los 55 Ωm . A pesar de aleatoriedad existe la

presencia de una anomalía más resistiva a un metro y medio la cual probablemente se deba a la presencia de gravas y arenas como sucedió con los perfiles anteriores.

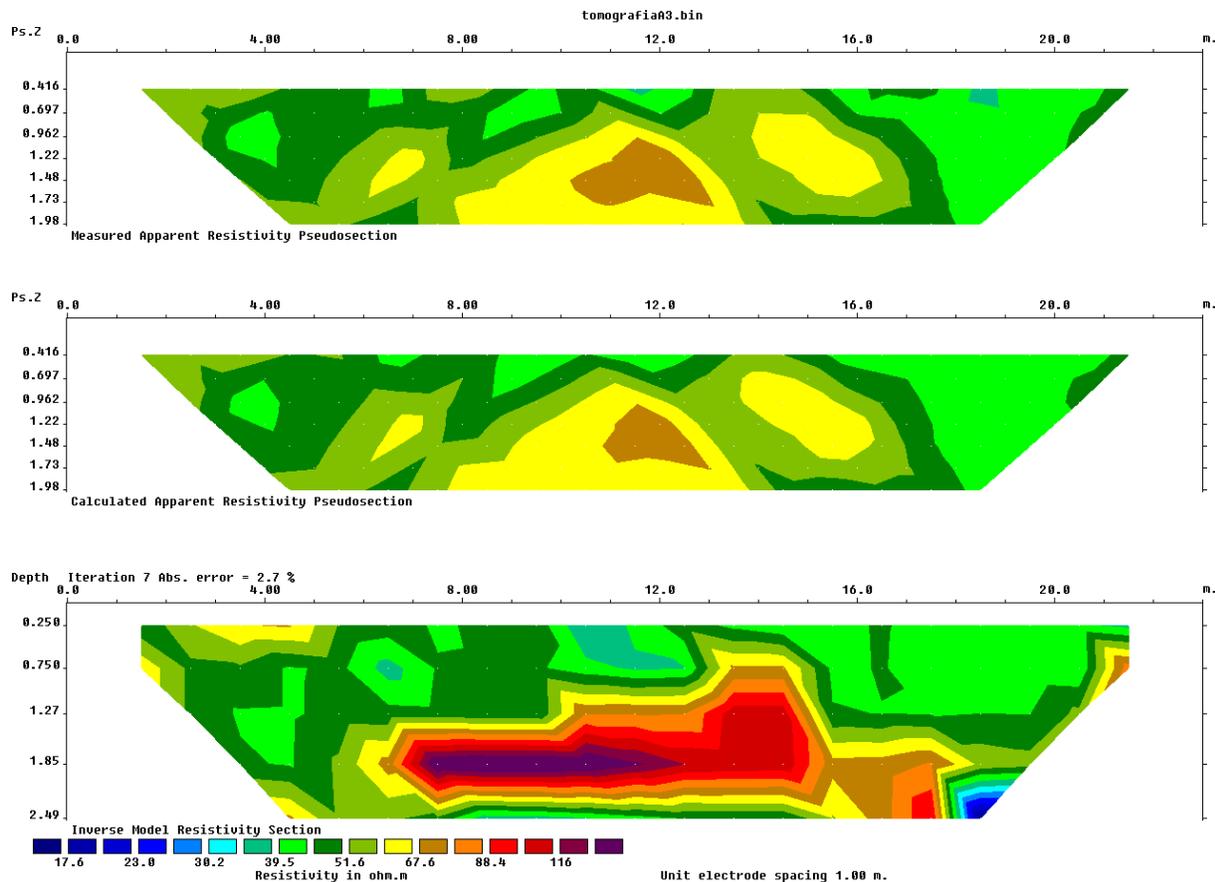


Figura 27 Perfil 3 de toma de datos.

8.3.4. Perfil 4

En la figura 8.4 se muestra el resultado de la inversión del cuarto perfil tomados en campo. Este perfil se comporta de manera muy similar a los dos primeros perfiles con horizontes bien definidos. Cuenta con la presencia de un cuerpo más resistivo, pero de mayor grosor y más somero probablemente debido a que el área donde se realizó no presentaba cultivos que regar por lo que habría un menor contenido de humedad y por lo tanto menor conductividad. Sin embargo, muestra los últimos horizontes con menor conductividad que se puede asociar a una mayor humedad en la parte más baja del perfil.

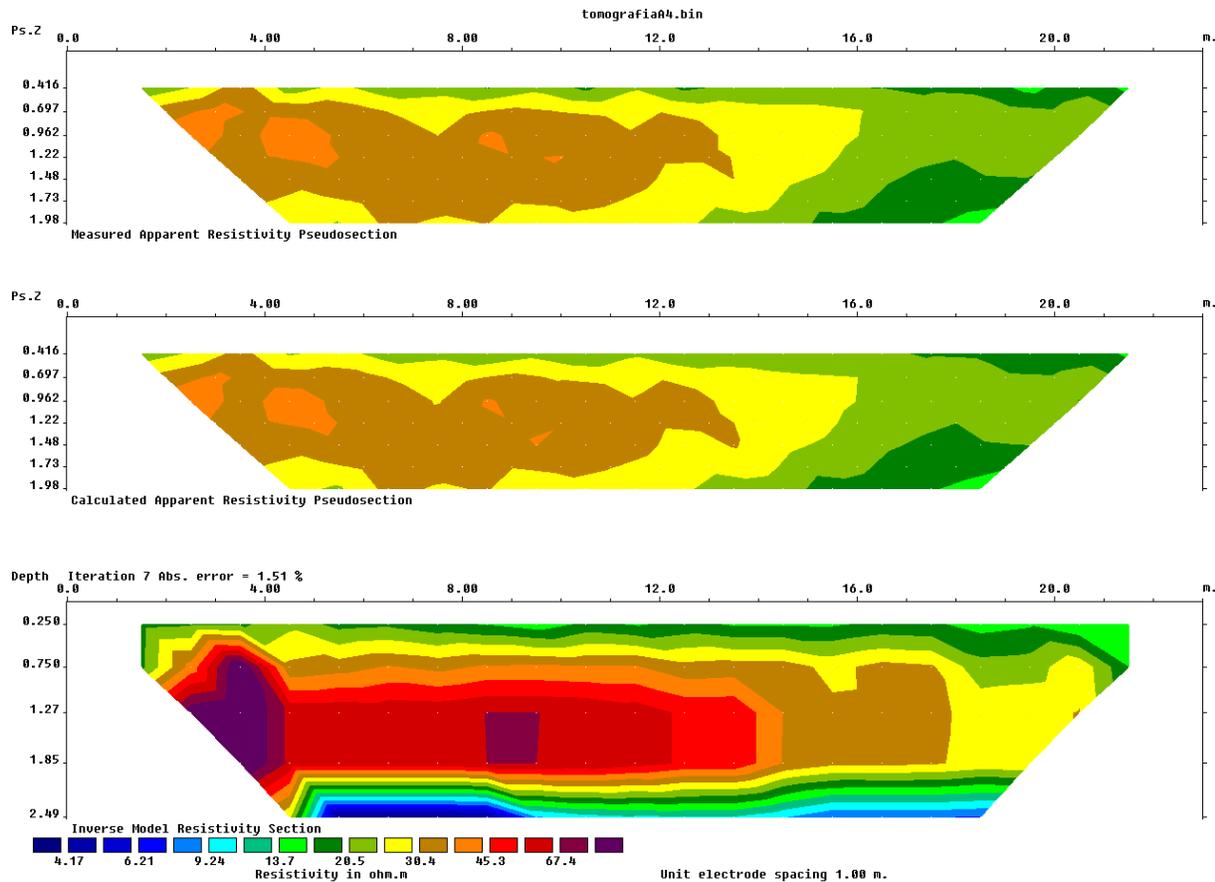


Figura 28 Perfil 4 de toma de datos.

8.3.5. Perfil 5

Al último perfil se le cambió la configuración de electrodos aumentando a 5 m la separación en “a” para poder observar horizontes más profundos y poder observar tanto el nivel freático como un probable comportamiento de los perfiles anteriores, pero a mayor profundidad.

En las capas más someras del perfil se puede apreciar una capa con una resistividad moderadamente alta a dos metros y que van disminuyendo conforme aumenta la profundidad de investigación. Esto coincide con tres de los cuatro perfiles expuestos anteriormente donde se infirió un horizonte de gravas y arenas.

Es importante señalar que aparece una anomalía menos resistiva que comienza aproximadamente a los 60 m de distancia y a 9.5 m de profundidad que llega hasta un punto más resistivo de 55 Ω m. Se infiere que esa zona presentó esa anomalía debido a

que el riego (Tipo Rodado) no alcanzo a humedecer completamente esa zona y que a la altura del punto resistivo se encontraba un pasillo de la parcela por lo que el grado de compactación afecto también la capacidad de absorber agua de esa zona generando esa anomalía. Algunas zonas más resistivas pueden ser debido a la fuerte compactación con bajo contenido de agua a lo largo de la línea similar a lo ocurrido con Sainato et al., 2010 y Márquez Molina et al., 2015.

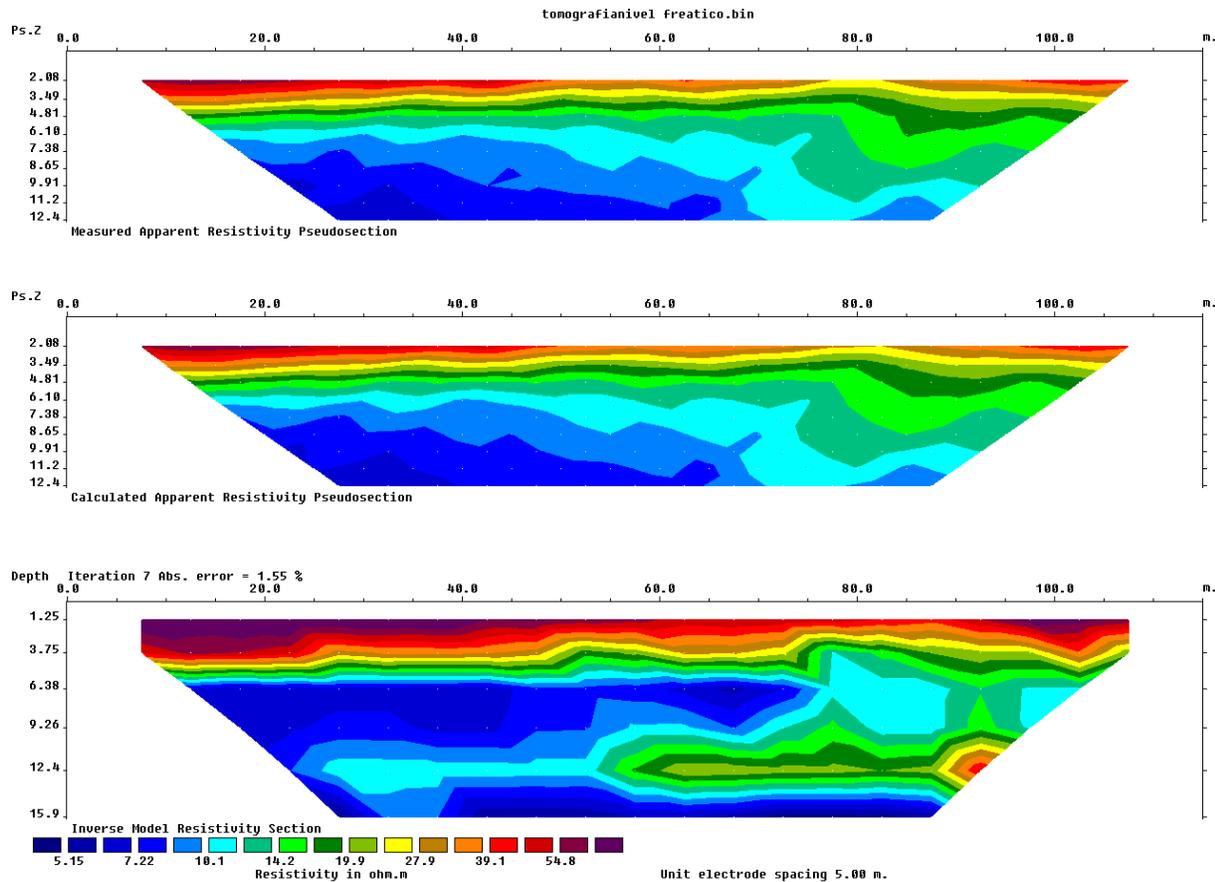


Figura 29 Perfil 5 de toma de datos.

8.3.6. Correlación

Se correlacionaron las variables del análisis químico del suelo correspondientes al pH %MO, N %Total, N. Inorgánico y P asimilable con los datos del análisis de resistividad de suelos obtenidos en laboratorio con una matriz de Pearson (cuadro 8.4). La matriz de correlación muestra correlaciones bajas y muy bajas entre la resistividad con todos los parámetros.

Sin embargo, se encontró una correlación directa alta entre la materia orgánica y el nitrógeno total.

Tabla 4. Matriz de correlación entre las variables del análisis de muestras. Coeficiente r de Pearson está dado en el triángulo inferior (color azul) y el coeficiente de determinación r^2 está dado en el triángulo superior (color verde)

	pH	% MO	N % total	N. Inorgánico (ppm)	P. Asimilable (ppm)	ρ
pH	1	0.1197	0.1295	0.1153	0.0528	0.0197
% MO	-0.345	1	0.8798	0.1831	0.0358	0.0489
N % total	-0.359	0.937	1	0.1068	0.0585	0.0950
N. Inorgánico ppm	-0.339	0.427	0.326	1	0.0327	0.0001
P Asimilable ppm	0.229	0.189	0.241	-0.180	1	0.0066
ρ	0.1402	-0.221	-0.308	0.008	0.081	1

9. Conclusión

Las características edafológicas obtenidas por los análisis de suelos muestran que los primeros horizontes se encuentran alterados por productos y prácticas agrícolas que han modificado el electro conductividad del suelo y los rangos de fertilidad óptimos del mismo. Y se puede inferir que las resistencias bajas se deben a la presencia de humedad y a compuestos que alteran la conducción electrolítica en la solución de la matriz suelo.

Los valores alterados de resistividad del suelo se encuentran ligeramente por debajo de los rangos de resistividad típicos para ese tipo de suelos sin embargo con el apoyo de los análisis fisicoquímicos ayudan a inferir las características de los materiales en la tomografía. Estas características nos indican que el suelo es muy permeable, puede llegar a generar una percolación considerable o lixiviación de compuestos y sales que existan en los primeros horizontes del suelo.

Las concentraciones del uso del glifosato, a pesar de alterar la conductividad son muy bajas para poder generar alguna anomalía significativa con esta técnica.

Este estudio aporta información de un área reducida en la subcuenca por lo que se sugiere realizar más estudios en la zona, incluyendo análisis de aguas para descartar o confirmar si ya existe lixiviación de compuestos de origen agrícola al acuífero.

10. Bibliografía

Aparicio, V. C., E. De Gerónimo, D. Marino, J. Primost, P. Carriquiriborde, J. L. Costa. 2013. "Environmental fate of glyphosate and aminomethyl phosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins." *Chemosphere* 93(9): 1866-1873.

Arato, A., R. M. Cosentini., Della Vecchia, G. Foti, S. Godio, A. Musso, G. 2013. "Electrical resistivity tomography: Combined field and laboratory experiments for the characterization and monitoring of hydrocarbon pollution. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, Vols I and II* 1789-1796.

Bechmann, M., J. Deelstra, P. Stålnacke, H.O. Eggestad, L. Øygarden, A. Pengerud. 2008. Monitoring catchment scale agricultural pollution in Norway: policy instruments, implementation of mitigation methods and trends in nutrient and sediment losses. *Environmental Science & Policy* 11(2): 102-114.

Binley, A., Cassiani, G., Deiana, R. 2010. Hydrogeophysics: Opportunities and challenges. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. Vol. 51 Pag. 267-284.

Boesten, J. J. T. I. y L. J. T. Van der Pas. 1998. Modeling Adsorption/Desorption Kinetics of Pesticides in A Soil Suspension. *Soil science*. Vol. 146.

Borggaard, O. K. and Gimsing, A. L. 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest. Manag. Sci.*, 64: 441–456. doi: 10.1002/ps.1512

Camporese, M. Cassiani, G. Deiana, R. Salandin, P. 2011. Assessment of local hydraulic properties from electrical resistivity tomography monitoring of a three-dimensional synthetic tracer test experiment. *Water Resources Research*.

Casado, I., H. Mahjoub., Lovera R., Fernández J., Casas A. 2015. Use of electrical tomography methods to determinate the extension and main migration routes of uncontrolled landfill leachates in fractured areas. *Science of The Total Environment*.

Cassiani, G. Binley, A. Kemna, A. Wehrer, M. Orozco, A. F. Deiana, R. Boaga, J. Rossi, M. Dietrich, P. Werban, U. Zschornack, L. Godio, A. JafarGandomi, A. Deidda, G. P. 2014. Noninvasive characterization of the Trecate (Italy) crude-oil contaminated site: links between contamination and geophysical signals. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol 21.

Cassiani, G. Godio, A. Stocco, S. Villa, A. Deiana, R. Frattini, P. Rossi, M. 2009. Monitoring the hydrologic behaviour of a mountain slope via time-lapse electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*

Cassiani, G., N. Ursino., Deiana, R. Vignoli, G. Boaga, J. Rossi, M. Perri, M. T. Blaschek, M. Duttmann, R. Meyer, S. Ludwig, R. Soddu, A. Dietrich, P. Werban, U. 2012. "Noninvasive monitoring of soil static characteristics and dynamic states: A case study highlighting vegetation effects on agricultural land" *Vadose Zone Journal*.c11(3).

Ccancapa, A., A. Masiá, V. Andreu, Y. Pico. 2016. Spatio-temporal patterns of pesticide residues in the Turia and Júcar Rivers (Spain). *Science of The Total Environment* 540: 200-210.

Cotler Ávalos Helena. 2010. Cuencas Hidrográficas de México Diagnostico y Priorización. Coordinadora Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología Fundación Gonzalo Río Arronte diciembre de 2010 ISBN 978-607-7655-07-7

De Carlo, L. Perri, M. T. Caputo, M. C. Deiana, R. Vurro, M. Cassiani, G. 2013 Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Journal of Applied Geophysics*. Vol 98

Delgado Rodriguez, Omar; Ladron De Guevara Torres, María; Shevnin, Vladimir y Ryjov, Albert. 2012. Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. *Geofís. Intl* [online]., vol.51, n.1, pp. 5-15.

Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 46, Issues 1–3, March 2005, Pages 45-70

Gassmann, M., O. Olsson, Stamm C., Weiler M., Kümmerer K. 2015. Physico-chemical characteristics affect the spatial distribution of pesticide and transformation product loss to an agricultural brook. *Science of The Total Environment* **532**: 733-743.

Godio, A. and M. Naldi. 2003. Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics* 1(3): 131-137.

Hamdi, W., F. Gamaoun, David E. Pelster, y Mongi Seffen. 2013. Nitrate Sorption in an Agricultural Soil Profile. *Applied and Environmental Soil Science*.

Henríquez, C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un andisol de costa rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. *Agronomía Costarricense*.

Heredia, O.S., Fernández Cirelli, A., 2007. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. *Geoderma* 137, 426–431.

Heredia, O.S., Fernández Cirelli, A., 2007. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. *Geoderma* 137, 426–431.

Humphrey C., M. O'Driscoll, Deal M., Lindho D. 2014. Fate and Transport of Phosphate From an Onsite Wastewater System in Beaufort County, North Carolina. *Journal of Environmental Health* 76: 28-33.

Huang, H., W. Ouyang, G. Bobo, S. Yandam, F.Hao. 2014. "Vertical and horizontal distribution of soil parameters in intensive agricultural zone and effect on diffuse nitrogen pollution." *Soil and Tillage Research* **144**: 32-40.

lital, A., K. Pachel, J. Deelstra. 2008. "Monitoring of diffuse pollution from agriculture to support implementation of the WFD and the Nitrate Directive in Estonia." *Environmental Science & Policy* 11(2): 185-193

Jayasumana C., S. Gunatilake, P. Senanayake. 2014. Glyphosate, Hard Water and Nephrotoxic Metals: Are They the Culprits Behind the Epidemic of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology in Sri Lanka. *Int J Environ Res Public Health*. 11(2): 2125–2147.

Jihoon Kang, Aziz Amoozegar, Dean Hesterberg, Deanna L. Osmond. 2011. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. *Geoderma*. Pages 194–201

Kaufman, A. y P. Hoekstra. 2001. *Electromagnetic soundings*. Elsevier, Amsterdam, pp 548 resistivity

Knödel K., Lange G., Voigt H.-J., *Environmental Geology: handbook of field methods and case studies*. Springer, U.S.A.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental Para La Prevención Y Control De La Contaminación Ambiental*. Libro Vi De La Calidad Ambiental Titulo Iv Reglamento A La Ley De Gestión.

Martínez Gaspar F. J, D. L. Ojeda Barrios, O. A. Hernández Rodríguez, J. J. Martínez Téllez Y G. De La O Quezada. 2011. *El Exceso De Nitratos: Un Problema Actual En La Agricultura*. Synthesis. Universidad Autónoma De Chihuahua. Facultad De Ciencias Agrotecnológicas

Martínez Sánchez A. 2016. Análisis De Vulnerabilidad Hídrica En La Cuenca Del Valle De Ocotlán, Oaxaca. Tesis. Instituto Politecnico Nacional; Centro Interdisciplinario De Investigación Para El Desarrollo Integral Regional

Márquez Molina, J. J., C. M. Sainato, A.S. Urricariet, B.N. Losinno, O.S. Heredia. 2014. "Bulk electrical conductivity as an indicator of spatial distribution of nitrogen and phosphorous at feedlots." *Journal of Applied Geophysics* 111: 156-172.

Márquez Molina, J. J., A. S. Urricariet, C. M. Sainato, B. N. Losinno, O. S. Heredia. 2015. Effects of feedlot manure on soil and groundwater assessed with electrical resistivity tomography. *Environ Earth Science*. 73:1459–1472

McNeill. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Geonics Limited. Technical note 5

Mohamed Metwaly & Mohamed Ahmed Khalil & El-Said Al-Sayed & Abeer El-Kenawy. 2013. Tracing subsurface oil pollution leakage using 2D electrical resistivity tomography. *Arabian Journal Of Geosciences*.

Montes, A., F. González-Farías, Botello AV. 2012. "Pollution by organochlorine pesticides in Navachiste-Macapule, Sinaloa, Mexico." *Environmental Monitoring and Assessment* **184**(3): 1359-1369.

Mullins, G. 2000. "Phosphorus, Agriculture & the Environment." *Nutrient Management*, Department of Crop and Soil Environmental Sciences, Virginia Tech.

"No hay crisis mundial de agua, pero muchos países en vías de desarrollo tendrán que hacer frente a la escasez de recursos hídricos". *Fao*. Consultado el 25 de mayo de 2014.

Orellana E., 1982, *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid

Porta, M., M. Kogevinas, E. Zumeta. J. Sunyer. N. Rivas-Fitó. 2002. "Concentraciones de compuestos tóxicos persistentes en la población española: el rompecabezas sin piezas y la protección de la salud pública." *Gaceta Sanitaria* **16**(3): 257-266.

Prata F.; V. C. do B. Cardinali; A. Lavorenti; V Luiz Tornisielo; J. Borges Regitano. 2003. Glyphosate sorption and desorption in soils with distinct phosphorus levels *Scientia Agricola*, v.60, n.1, p.175-180

Rosales, R. M., Martínez-Pagan, P., Faz, A., Moreno-Cornejo, J. 2012. "Environmental Monitoring Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the Subsoil of Three Former Petrol Stations in SE of Spain." *Water Air and Soil Pollution* 223(7): 3757-3773.

Ruiz-Toledo, J., R. Castro, N., Rivero-Pérez, R., Bello-Mendoza, D., Sánchez. 2014. Occurrence of Glyphosate in Water Bodies Derived from Intensive Agriculture in a Tropical Region of Southern Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 93(3): 289-293.

Sánchez Reynoso, R. 2011. Análisis Comparativo entre Diferentes Arreglos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F. 54 pp.

Sainato, C. M, B N. Losinno and H. J. Malleville. 2010. Electrical resistivity tomography applied to detect contamination on a dairy farm in the Pampean region, Argentina. *Near Surface Geophysic*. 8: 163-172.

Sainato, C. M., V. Hallbauer-Zadorozhnaya, B.N. Losinno, P.K. Nyabeze, J.J. Márquez Molina, A.N. Shabalala. 2015. Evaluation of contamination at a feedlot in San Pedro, Argentina, by means of electromagnetic methods. 13th SAGA Biennial Conference and Exhibition

Sainato, C. M., B. N. Losinno, H.J. Malleville. E.A. Pagano. 2015. "Electrical Resistivity Tomography and Electromagnetic Soundings for Exploration of Glyphosate in Soil and Groundwater." First Conference on Proximal Sensing Supporting Precision Agriculture.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research* 83, 173–193.

Sánchez, F. J. 2011. Fundamentos de prospección eléctrica en corriente continua. Universidad de Salamanca, 12 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)

Sudha K., M. Israil, S. Mittal, J. Rai. 2009. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 67. 74–79

Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils*, 2nd ed. New York, NY: Oxford University Press.

Sposito, G. 2004. *The Surface Chemistry of Natural Particles*. New York, NY: Oxford University Press.

Steven J. Larson, Paul D Capel and Michael S. Majewski, Ann Arbor Press, Inc.. Chelsea, MI, (1997). 390 Pages.

Sudha, K., M. Israil, S. Mittal, J. Rai. 2009. "Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations." *Journal of Applied Geophysics* **67**(1): 74-79.

Thangarajan, M. 2007, *Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management*. Editorial Springer

Vithanage, M., S. Pathmarajah, T. Mikunthan, S. Pathmarajah, S. Arasalingam, H. Manthirithilake. 2014. *Assessment of nitrate-N contamination in the Chunnakam aquifer system, Jaffna Peninsula, Sri Lanka*. SpringerPlus.

Wehrer, M., Lissner, H. Bloem, E., French, H., Totsche, K. U. 2014. Electrical resistivity tomography as monitoring tool for unsaturated zone transport: An example of preferential transport of deicing chemicals. *Environmental Science and Pollution Research* 21(15): 8964-8980

Wissem Hamdi, Faten Gamaoun, David E. Pelster, and Mongi Seffen. 2013 "Nitrate Sorption in an Agricultural Soil Profile," *Applied and Environmental Soil Science*, 7 pages.

Palacky, G. J. 1988. Resistivity characteristics of geologic targets, in *Investigations in Geophysics* vol. 3: Electromagnetic methods in applied geophysics-theory, vol. 1, edited by M. N. Nabighian, Soc. Expl. Geophys., 53–129.