



**Instituto Potosino de Investigación  
Científica y Tecnológica A.C.**  
Posgrado en Geociencias Aplicadas  
**Caracterización geoquímica y geofísica de suelos  
agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San  
Luis Potosí**

Tesis que presenta

**Christian Yamir Cordero Vázquez**

Para obtener el grado de

**Maestro en Geociencias Aplicadas**

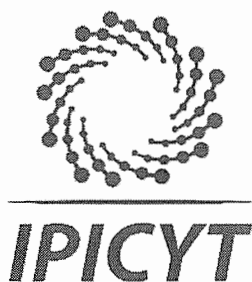
Co-directora de tesis

**Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**

Co-director de tesis

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

San Luis Potosí, S.L.P., julio de 2018



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Christian Yamir Cordero Vázquez** y aprobada el trece de noviembre del dos mil dieciocho por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**  
Codirectora de la tesis

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**  
Codirector de la tesis

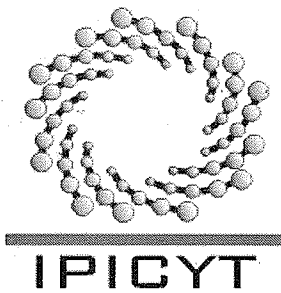
**Dr. Hector José Peinado Guevara**  
Miembro del Comité Tutorial

## Créditos institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Hidrogeoquímica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección de la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas y el Dr. Omar Delgado Rodríguez. Con financiamiento del proyecto Royal Society NA140182.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. de registro: 608848) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

El autor agradece particularmente el apoyo del Dr. Esaú Anybal Araiza Reyna posdoctorante de la división de geociencias aplicadas y de la M. en C. Ana Iris Peña Maldonado del Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN), por las facilidades otorgadas para realizar los análisis experimentales de Difracción de Rayos X. A la Dra. Diana Meza Figueroa, investigadora del departamento de Geología, división de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora por las facilidades para realizar los análisis de Fluorescencia de rayo X.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 037 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 13 días del mes de noviembre del año 2018, se reunió a las 14:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino</b>	<b>Presidenta</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas</b>	<b>Secretaria</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Omar Delgado Rodríguez</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Christian Yamir Cordero Vázquez**

sobre la Tesis intitulada:

*Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**  
**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

El Jurado, después de deliberar, determinó

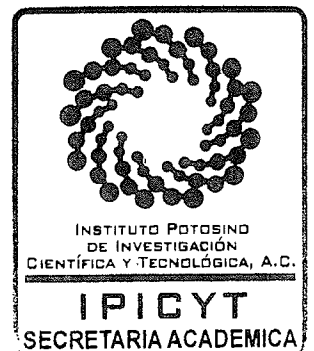
**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 15:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 13 días del mes de noviembre de 2018.

  
**Dr. Horacio Flores Zúñiga**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



*A mis padres Socorro  
y Facundo*

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, Socorro y Facundo; a mis hermanos, Adrián y Gabriel, porque son los seres humanos que más quiero, admiro y que me llenan siempre de amor, paz y fortaleza. Que han confiado y creído siempre en mí.

A Anayeli por creer en mí, apoyarme y estar en este camino siempre junto a mí y a Amitza por acompañarme siempre y estar a mi lado en clases y experimentos (por fin llego mi coronación).

Agradezco a la Dra. Nadia Martínez y al Dr. Omar Delgado, por todo el aprendizaje, la confianza y el apoyo incondicional que me han brindado desde siempre para mi desarrollo profesional.

Al Dr. Héctor Peinado y a la Dra. Ana Elizabeth Marín por su valiosa contribución al desarrollo de este trabajo, por sus observaciones y recomendaciones que aportaron en la mejora y calidad de la discusión y análisis de los resultados.

Al Ing. Osvaldo Contreras Hernández por apoyarme y tener la disposición en todas las campañas de campo.

A la MIPA. Elsa Emilia Uicab Córdova que siempre ha creído en mí y me brindó su apoyo cuando más lo necesite, gracias por todo ese apoyo en este gran camino.

A mis amigos del laboratorio de Hidrogeoquímica Yadira, Rodrigo, Martín, Elena, Esaú, Esther Salazar, Andrea del Pilar y Gerardo por su dedicación y valiosa aportación para el desarrollo de este trabajo.

A Gaby Pérez por brindarme todas las facilidades para llevar a cabo las tareas y por gran compromiso durante mi estancia en IPICYT.

A Sandra Torres por apoyarme en la gestión de recursos, material y equipos necesarios para la realización de experimentos.

## Contenido

Constancia de aprobación de tesis .....	ii
Créditos institucionales .....	iii
Copia del examen .....	iv
Dedicatoria .....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice de Tablas .....	xii
Índice de Figuras.....	xiii
Resumen .....	xvi
Abstrac.....	xviii
Antecedentes .....	1
Hipótesis.....	2
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO I. Suelo, factores de formación del suelo y propiedades de los suelos. ....	4
1.1 El Suelo.....	4
1.1.1 Suelo agrícola.....	4
1.1.2 Perfil del suelo.....	5
1.1.3 Suelo contaminado.....	6
1.1.4 Arsénico.....	7
1.2 Factores de formación del suelo.....	8
1.2.1 Material parental.....	9
1.2.2 Clima.....	10
1.2.3 Comunidad biótica.....	10
1.2.4 Topografía.....	12



1.2.5	<i>Tiempo</i> .....	13
1.3	Características del sitio de estudio.....	14
1.3.1	<i>El suelo en Matehuala, San Luis Potosí</i> .....	15
1.4	Propiedades de los suelos.....	16
1.4.1	<i>Textura</i> .....	16
1.4.2	<i>Porosidad y densidad</i> .....	17
1.4.3	<i>Conductividad Hidráulica</i> .....	20
1.4.4	<i>Color</i> .....	21
1.4.5	<i>Salinidad</i> .....	22
1.4.6	<i>Resistividad</i> .....	23
1.4.7	<i>Intercambio iónico</i> .....	24
1.4.8	<i>Capacidad de intercambio catiónico</i> .....	24
CAPÍTULO II. Materiales y métodos.....		26
Plan de muestreo.....		26
<i>Muestras anexas</i> .....		36
2.1	Determinación de Fertilidad del suelo.....	36
2.1.1	<i>Fósforo aprovechable P-Olsen</i> .....	36
2.1.2	<i>Carbonatos totales</i> .....	37
2.1.3	<i>Materia orgánica</i> .....	38
2.1.4	<i>Cationes intercambiales</i> .....	39
2.1.5	<i>Micronutrientes</i> .....	40
2.1.6	<i>Nitrógeno disponible</i> .....	41
2.1.7	<i>pH del suelo</i> .....	42
2.1.8	<i>Salinidad</i> .....	43
2.1.9	<i>Densidad aparente</i> .....	44

2.1.10	<i>Conductividad hidráulica de muestra de suelo</i> .....	45
2.1.11	<i>Distribución textural</i> .....	45
2.2	Determinación de Índice de Calidad de los Suelos .....	47
2.3	Determinación de fases mayoritarias .....	49
2.4	Determinación de arsénico .....	49
2.4.1	<i>Determinación de arsénico total</i> .....	49
2.4.2	<i>Determinación de arsénico soluble</i> .....	51
2.4.3	<i>Determinación analítica de arsénico por ICP-OES</i> .....	52
2.4.4	<i>Fluorescencia de rayos X</i> .....	52
2.5	Análisis estadístico multivariante .....	53
2.6	Estimación de conductividad hidráulica .....	55
2.6.1	<i>Resistividad eléctrica de muestra de suelo en laboratorio</i> .....	55
2.6.2	<i>Resistividad eléctrica de los suelos en campo</i> .....	58
2.6.3	<i>Humedad de los suelos en campo</i> .....	60
2.6.4	<i>Estimación de porcentaje de finos</i> .....	61
2.6.5	<i>Estimación de conductividad hidráulica a partir de porcentaje de finos</i> .	64
CAPÍTULO III. Resultados y discusión .....		66
Caracterización geoquímica .....		66
3.1	Clasificación del suelo y análisis de su calidad .....	66
3.2	Identificación de fases minerales mayoritarias en las muestras de suelo .....	74
3.3	Concentración de arsénico total en muestras de suelo superficial .....	76
3.4	Análisis estadístico multivariante .....	77
Caracterización geofísica .....		83
3.5	Salinidad de muestras de suelo agrícola .....	83
3.6	Porcentaje de Humedad .....	85

3.7	Resistividad eléctrica .....	86
3.8	Estimación de porcentaje de finos mediante el algoritmo de Ryjov.....	87
3.9	Distribución de la conductividad hidráulica de la zona agrícola .....	88
	Transporte de arsénico .....	89
	<i>Concentración de arsénico total en muestras verticales de suelo.....</i>	89
	<i>Concentración de arsénico soluble en muestras de suelo superficial .....</i>	92
	<i>Modelo de conceptual del mecanismo físico del transporte de arsénico a lo largo del perfil del suelo.....</i>	93
	Conclusiones .....	96
	Fuentes citadas .....	98
	Anexo 1: Predios, área y uso de suelo de los predios de la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco .....	104
	Anexo 2: Cadenas de Custodias de muestreo de suelos en el ejido de Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P.....	106
	COC #43.....	106
	COC #54.....	112
	COC #62.....	114
	Anexo 3: Modelo teórico de Ryjov para el cálculo del contenido de finos .....	117
	Anexo 4: Concentraciones de arsénico total y arsénico soluble en suelos superficial y columnas .....	122

## Índice de Tablas

Tabla 1. Indicadores utilizados para la evaluación de calidad de suelos (ICS).....	48
Tabla 2. Escala y clases de calidad de suelo según Cantú (2009). .....	49
Tabla 3. Parámetro de pH, materia orgánica, carbonatos totales, salinidad, densidad aparente, conductividad hidráulica, textura, macronutrientes, micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico, promedio, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo de muestras de suelo agrícola.....	70
Tabla 4. Indicadores e índices de calidad del suelo (ICS) por muestras. ....	72
Tabla 5. Características de las muestras de suelo. ....	78
Tabla 6. Matriz de correlación de características de las muestras de suelo mediante Pearson. ....	79
Tabla 8. Coordenadas UTM, As total y As soluble de muestras de suelo superficial (0-30 cm) de campos agrícolas.....	122
Tabla 9. Arsénico total de columnas de suelo. ....	123
Tabla 10. Arsénico soluble de muestras de columnas de suelo. ....	123

## Índice de Figuras

Figura 1. Perfil del suelo y sus horizontes. ....	5
Figura 2 Localización de zona agrícola en el ejido Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P. .....	14
Figura 3. Distribución de suelos en el Municipio de Matehuala, San Luis Potosí, México. .....	15
Figura 4. Distribución de partículas (arcilla, limo y arena) de suelo sin materia orgánica. .....	16
Figura 5. Clasificación de suelos mediante triangulo textural que define al suelo de acuerdo al aporte de arcilla, limo y arena. ....	17
Figura 6. Porosidad de un suelo arenoso contra un suelo arcilloso, comparación de porosidad.....	18
Figura 7. Porosidad general de arcilla, arena y materiales gravosos. ....	19
Figura 8. Conductividad hidráulica de algunos materiales, de acuerdo a García et al., (2010).....	20
Figura 9. Clasificación de los suelos de acuerdo a su conductividad hidráulica (Jaramillo, 2002). ....	21
Figura 10. Clasificación del suelo de acuerdo a lo valores de salinidad (DOF, 2003). .....	22
Figura 11. Dispositivo wenner para determinar la resistividad del suelo. ....	24
Figura 12. Distribución de parcelas en el ejido Cerrito Blanco. ....	27
Figura 13. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 1. ....	30
Figura 14. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 2. ....	31
Figura 15. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 3. ....	32
Figura 16. Distribución de puntos de muestreo de suelo superficial y columnas. ....	33

Figura 17. Muestreo de suelo, a la izquierda se muestra la excavación para recolectar muestra superficial de 0-30 cm y, a la derecha se muestra el pozo realizado para el muestreo en columna de 0-60 cm.....	35
Figura 18. Selección de concentración de salinidades de las soluciones.....	56
Figura 19. Resistivímetro de suelo soil-box.....	57
Figura 20. Configuraciones Wenner (A1MNB1) y Schlumberger (A2MNB2) utilizadas en el presente estudio para la determinación de la resistividad eléctrica del suelo agrícola. ....	60
Figura 21. Modelo que representa las curvas teóricas de resistividad contra salinidad de agua contenida en los poros para diferente contenido de arcilla en suelos arenos-arcillosos.....	62
Figura 22. Curva que representa la relación entre la porosidad del suelo y el contenido de arcilla para la Figura 23. ....	64
Figura 23. Valores de suficiencia de muestras de suelo agrícola. a) Materia orgánica, macronutrientes y micronutrientes. b) Capacidad de Intercambio Catiónico.....	71
Figura 24. Distribución espacial de la calidad de los suelos de acuerdo a los ICS calculados. ....	73
Figura 25. Semi-cuantificación de difracción de rayos X. ....	75
Figura 26. Relación entre textura y mineralogía. ....	76
Figura 27. Concentración de arsénico y distribución espacial de valores de arsénico en campos de cultivo perteneciente a Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P. ....	77
Figura 28. Análisis estadístico multivariante, en a) se muestra el análisis de componentes principales y en b) se muestra el análisis clúster. ....	81
Figura 29. Distribución espacial del agrupamiento de las muestras de acuerdo al análisis estadístico.....	82
Figura 30. Salinidad de suelos agrícolas, valores de acuerdo a las especificaciones de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003).....	83
Figura 31. Presencia superficial de sales en suelos agrícolas.....	84
Figura 32. Humedad presente en la zona de estudio, en contraste a la zona se encuentra la presencia de los canales de irrigación. ....	86

Figura 33. Resistividad aparente de la zona de estudio, el gráfico a) WENNER corresponde a 30 cm de profundidad y b) SCHLUMBERGER corresponde 60 cm de profundidad. ....	86
Figura 34. Distribución de porcentaje de finos en zona agrícola. a) corresponde a una profundidad de 30 cm y b) a una profundidad de 60 cm. ....	88
Figura 35. Conductividad hidráulica de la zona agrícola, ejido Cerrito Banco, Matehuala, S.L.P. a) conductividad hidráulica a 30 cm de profundidad y b) conductividad hidráulica a 60 cm de profundidad. ....	89
Figura 36. Distribución de arsénico en columnas de suelo agrícola. ....	90
Figura 37. Gráfica de correlación entre porcentaje de arsénico que llega desde la superficie hasta los 60 cm de profundidad y la conductividad hidráulica determinada para todo el horizonte de suelo. ....	91
Figura 38. Relación entre concentración de arsénico total y arsénico soluble. ....	92
Figura 39. Representación del perfil del suelo y el mecanismo físico de movilidad del arsénico. ....	95

## Resumen

El ejido de Cerrito Blanco, perteneciente al municipio de Matehuala, S.L.P., cuenta con una zona agrícola de 70 hectáreas, las cuales, de acuerdo a estudios previos, reportan que han sido irrigadas por largo tiempo con agua contaminada con arsénico, con valores de hasta  $17.78 \text{ mg Kg}^{-1}$ . El cual excede 148 veces lo máximo permisible de acuerdo a la norma mexicana. Como consecuencia de una constante irrigación, en la zona agrícola se han reportado concentraciones en suelo de hasta  $172.00 \text{ mg Kg}^{-1}$ . La falta de información y la carencia de otras fuentes de agua libre de arsénico han permitido que la población local se encuentre expuesta a este tipo de contaminación. Tomando en cuenta estos antecedentes, se planteó como objetivo general de este estudio determinar la distribución espacial de arsénico total en la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco y analizar la calidad de los suelos en el sitio de estudio a partir de análisis en muestras de suelo colectadas; así como estimar la conductividad hidráulica de los suelos agrícolas y su relación con la migración de los contaminantes a lo largo de la columna de suelo.

Para llevar a cabo este estudio se analizaron 14 muestras de suelo superficial y 11 columnas, a las cuales se les determinó de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000; fósforo aprovechable, carbonatos totales, materia orgánica, cationes intercambiables, micro y macronutrientes, nitrógeno disponible, pH, salinidad, conductividad hidráulica, textura. Además, se determinó arsénico total mediante digestión ácida de elementos totales y arsénico soluble mediante agua de equilibrio el cual fue cuantificado mediante ICP-OES y Fluorescencia de rayos X. La mineralogía fue determinada mediante difracción de rayos X. La resistividad eléctrica del suelo y su humedad fueron medidas *in situ* de manera simultánea utilizando el método de perfilaje eléctrico y un medidor de humedad relativa del suelo, respectivamente. A los datos obtenidos se les realizó un análisis estadístico multivariante, el cual constó de una matriz de correlación de Pearson, análisis de componentes principales (PCA), análisis clúster e índice de calidad de suelo (ICS).

Los resultados obtenidos evidencian que los suelos presentan condiciones favorables para el desarrollo de las plantas de acuerdo al ICS, en el cual se clasifica el suelo con una calidad media. De acuerdo a la correlación estadísticas de las muestras se logró



identificar dos grupos, el primero con predominancia en calcita y con tamaños de partículas arcillosa ( $< 2.0 \mu\text{m}$ ) y el segundo grupo con presencia de yeso y con tamaño de partículas de limos ( $< 60.0 \mu\text{m}$ ).

Lo que respecta al arsénico, los resultados permiten determinar que toda la zona agrícola se encuentra enriquecida de arsénico, con valores de hasta  $185 \text{ mg Kg}^{-1}$  el cual excede 8 veces lo permitido. A pesar de la baja conductividad hidráulica del suelo agrícola (predominantemente muy baja), el arsénico es transportado a lo largo del perfil del suelo, presentando concentraciones de hasta  $94.29 \text{ mg Kg}^{-1}$  a 60 cm de profundidad. Esta migración vertical del arsénico es debido a la alta solubilidad que presenta llegando a ser en la zona del orden del 10 % del arsénico total, siendo que la textura fina presente permite que el agua contaminada llegue a tener mayor interacción con el suelo, permitiendo la lixiviación del arsénico.

Palabras clave: arsénico, soluble, lixiviación, movilidad

## **Abstrac**

The common Cerrito Blanco, belonging to the municipality of Matehuala, SLP, has an agricultural area of 70 hectares, which, according to previous studies, report that they have been irrigated for a long time with water contaminated with arsenic, with values up to 17.78 mg Kg<sup>-1</sup>. Which exceeds 148 times the maximum allowable according to the Mexican norm. As a result of constant irrigation, soil concentrations of up to 172.00 mg Kg<sup>-1</sup> have been reported in the agricultural zone. The lack of information and the lack of other sources of arsenic-free water have allowed the local population to be exposed to this type of contamination. Taking this background into account, the general objective of this study was to determine the spatial distribution of total arsenic in the agricultural area of the common Cerrito Blanco and to analyze the quality of the soils at the study site based on analyzes of soil samples collected; as well as estimating the hydraulic conductivity of agricultural soils and their relation to the migration of pollutants along the soil column.

To carry out this study, 14 surface soil samples and 11 columns were analyzed, which were determined according to NOM-021-SEMARNAT-2000; usable phosphorus, total carbonates, organic matter, interchangeable cations, micro and macronutrients, available nitrogen, pH, salinity, hydraulic conductivity, texture. In addition, total arsenic was determined by acid digestion of total elements and soluble arsenic by equilibrium water, which was quantified by ICP-OES and X-ray fluorescence. The mineralogy was determined by X-ray diffraction. The electrical resistivity of the soil and its moisture were measured in situ simultaneously using the electrical logging method and a relative humidity meter of the soil, respectively. The data obtained were subjected to a multivariate statistical analysis, which consisted of a Pearson correlation matrix, principal component analysis (PCA), cluster analysis and soil quality index (SCI).

The results obtained show that the soils have favorable conditions for the development of the plants according to the ICS, in which the soil with an average quality is classified. According to the statistical correlation of the samples, it was possible to identify two groups, the first with predominance in calcite and with clay particle sizes (<2.0 µm) and the second group with presence of gypsum and with particle size of limes (<60.0 µm).

Regarding arsenic, the results allow to determine that the entire agricultural area is enriched with arsenic, with values of up to  $185 \text{ mg Kg}^{-1}$  which exceeds 8 times what is allowed. Despite the low hydraulic conductivity of agricultural soil (predominantly very low), arsenic is transported along the soil profile, presenting concentrations of up to  $94.29 \text{ mg Kg}^{-1}$  at 60 cm depth. This vertical migration of arsenic is due to the high solubility that it has been reaching in the area of the order of 10% of the total arsenic, being that the fine texture present allows the contaminated water to have greater interaction with the soil, allowing the leaching of arsenic.

Key words: arsenic, soluble, leaching, mobility

## Antecedentes

La zona agrícola perteneciente al ejido de Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P. ha sido irrigada con agua contaminada con arsénico (As) con concentraciones de hasta 17.78 mg L<sup>-1</sup> (Martínez-Villegas et al., 2013; Mendoza-Chávez, 2016) que exceden hasta 178 veces la norma mexicana de As en agua de irrigación (0.1-0.4 mgL<sup>-1</sup>) (DOF, 2007; SEMARNAT, 1996).

Un estudio realizado por Ruíz-Huerta et al., (2017) en la región de Matehuala muestra que la contaminación de arsénico en suelos agrícolas para cultivo de maíz (*Zea mays*) alcanza hasta 172.00 mg Kg<sup>-1</sup> y que éste se bioacumula en raíces, hojas y tallo con concentraciones de hasta 217.67 mg Kg<sup>-1</sup>, 28.43 mg Kg<sup>-1</sup> y 13.36 mg Kg<sup>-1</sup>, respectivamente, lo que revela un riesgo a la población.

De hecho, estudios previos realizados por Lara-Del Río (2015) han demostrado la presencia de As en muestras de cabello de la población, lo que sugiere que dentro de las rutas de exposición a la contaminación podría estar la ingesta de arsénico a través del consumo de cultivos contaminados y/o animales alimentados con cultivos contaminados. La contaminación ambiental del ejido Cerrito Blanco con arsénico no sólo representa un riesgo, también podría estar afectando el bienestar de la población y la dimensión económica del ejido.

Según datos reportados por Ruíz-Huerta et al., (2017), en Cerrito Blanco la presencia de arsénico en suelos de cultivo y plantas de maíz (*Zea Mays*) de la variedad H-430 ocasiona una reducción de crecimiento de la planta de maíz (*Zea Mays*), una baja producción de biomasa y frutos, así como clorosis, lo que afecta la producción de maíz (*Zea Mays*). En suelos calcáreos sin intervención de fertilizantes químicos y sin algún sistema de riego se estima que la producción podría oscilar entre 1 a 1.5 toneladas por hectárea (Agroder, 2012). No obstante, en Cerrito Blanco la producción de maíz es, a la fecha, casi nula.

En el área, la toxicidad del As a los cultivos es evidente para los especialistas, pero no para la gente expuesta a la contaminación, donde la falta de conocimiento de la problemática y la pobreza parecen combinarse para exacerbar el problema de exposición de arsénico.

Por lo anterior, se requiere investigación para determinar la concentración de arsénico en suelos agrícolas semiáridos, los parámetros que controlan la movilidad del mismo, la permeabilidad de los suelos y la lixiviación del arsénico. Más importante aún, esclarecer los parámetros geoquímicos y geofísicos que controlan la movilidad del contaminante para comprender cabalmente el comportamiento del arsénico en los suelos calcáreos y yesosos de Matehuala y, posteriormente, desarrollar estrategias adecuadas y efectivas de remediación de dichos suelos, así como conocimiento que permita estimar el riesgo de infiltración del contaminante hacia capas inferiores del subsuelo y el acuífero.

## **Hipótesis**

Los suelos de la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco presentan concentraciones anómalas de arsénico causado por la irrigación frecuente de cultivos con agua contaminada proveniente del acuífero somero del municipio de Matehuala, siendo que, en algunas porciones del área de estudio, las características físicas de los suelos agrícolas faciliten la migración vertical de los contaminantes al subsuelo.

## **Objetivo general**

Determinar la distribución espacial de arsénico total y analizar la calidad de los suelos en el sitio de estudio a partir de análisis en muestras de suelo colectadas; así como estimar la conductividad hidráulica de los suelos agrícolas del ejido Cerrito Blanco.

## **Objetivos específicos**

1. Determinar la concentración de arsénico total en suelos superficiales mediante digestión ácida y cuantificación por ICP y fluorescencia de rayos X con análisis estadístico SIG. Configuración de mapa de distribución de arsénico total para el ejido Cerrito Blanco.
2. Determinar la concentración de arsénico total en columnas de suelos en el intervalo 0-60 cm.
3. Determinar los parámetros de fertilidad y obtener índices de calidad del suelo.
4. Identificar las fases mayoritarias de muestras de suelo mediante difracción de rayos X.

5. Determinar textura y salinidad de las muestras de suelo.
6. Construir mapas de resistividad eléctrica y de humedad del suelo del ejido Cerrito Blanco.
7. Construir mapas de distribución de contenido de finos utilizando el algoritmo de Ryjov y de conductividad hidráulica mediante relaciones empíricas establecidas.
8. Evaluar la factibilidad de infiltración de arsénico a estratos inferiores a partir del análisis conjunto de los mapas de conductividad hidráulica y concentración de arsénico, así como de los resultados obtenidos de la distribución de arsénico en columnas de suelo.

# **CAPÍTULO I. Suelo, factores de formación del suelo y propiedades de los suelos.**

## **1.1 El Suelo**

Se entiende por suelo al cuerpo natural, activo, el cual no presenta consolidación como una roca, compuesto por factores sólidos minerales y orgánicos, gases, líquidos y organismos vivos que realizan importantes actividades que favorecen el crecimiento de plantas (Cordero-Vázquez et al., 2016), el suelo sirve como sostén de las plantas y es quien proporciona los nutrientes necesarios para su crecimiento (Sánchez and Gándara, 2011).

El suelo proporciona nutrientes, agua y minerales, lo que le otorga la capacidad de desempeñar funciones naturales como el crecimiento de plantas, transformación de la materia orgánica y a su vez almacén de carbono, hábitad biológico, es el hogar de millones de insectos, pequeños animales, bacterias y muchos otros microorganismos (FAO, 2015), y uso de intereses humanos como el asentamiento de edificaciones, agricultura, sistema de transporte entre muchas actividades. Es por ello que la mayor parte de las actividades humanas se realizan sobre el mismo (Sabroso and Pastor, 2004). El suelo es el resultado de la interacción de una serie de factores, como el clima y organismos, que actúan sobre factores como roca madre y relieve, sin importar el tiempo que haya pasado (INEGI, 2014).

### **1.1.1 Suelo agrícola**

Se denomina suelo agrícola a todo aquel suelo en el que se desarrollan actividades de siembra de cultivos. Para dicho uso debe ser fértil y permitir el crecimiento y desarrollo de los cultivos de forma natural. El suelo agrícola debe contar con macro-nutrientes como los nitratos, amonio, fósforo, potasio, sulfato, magnesio, calcio, sodio y cloruro, en menor proporción (micro-nutrientes) se encuentran el hierro, el cobre y el manganeso. El suelo agrícola debe contar con una composición importante de humus (parte orgánica del suelo). Es decir, si el suelo cuenta con las características antes mencionadas, se puede considerar entonces apto para el desarrollo de la agricultura (Blaya and García, 2003).

### 1.1.2 Perfil del suelo

Es considerado como la exposición de una fracción superficial de la corteza terrestre, en donde se muestra todas las capas o también llamadas horizontes que han sufrido alteraciones durante el tiempo de su formación, incluyendo las más profundas que forman parte de la génesis del suelo (Blaya and García, 2003). Los horizontes se diferencian uno de otro debido a su variación de granulometría, color, estructura, materia orgánica o pedregosidad, entre otras características. Con regularidad se utilizan las letras O, A, E, B, C, etc. (Figura1) (Volke et al., 2005), para referirse a un horizonte en específico con características conocidas, pero esto puede variar de acuerdo a las nomenclaturas (Hodgson, 1987).

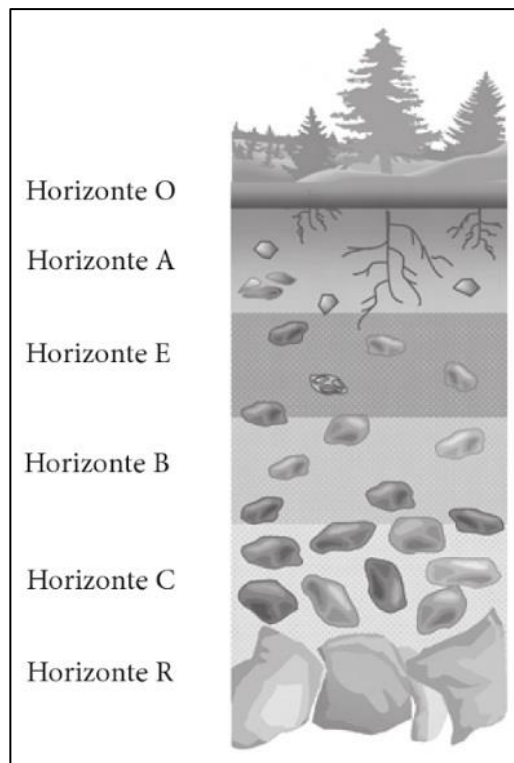


Figura 1. Perfil del suelo y sus horizontes.

Como se observa en la Figura 1, la distribución del perfil del suelo es comúnmente simbolizada como; O) Estrato superficial: restos orgánicos, hojas, materia orgánica semi-descompuesta. A) Suelo superficial: materia orgánica descompuesta (humus), raíces, organismos vivos y minerales. E) Zona de lavado (infiltración): capa rica en minerales, arcillas y cationes, presenta acumulación de arena y limo. B) Subsuelo: Zona de acumulación: capa mineral donde se acumulan arcillas, óxidos de hierro y



aluminio, compuestos húmicos y los cationes lixiviados del horizonte A. C) Material parental parcialmente descompuestos: no presenta afectación, compuesta por sedimentos y fragmentos de roca. Acumulación de sílice, carbonatos y yeso. R) Material parental: capa compuesta por rocas, difícil de penetrar, excepto por fracturas (Volke et al., 2005).

### 1.1.3 Suelo contaminado

El aprovechamiento de minas, extracción de minerales y/o metales son unas de las causas de daños ambientales que pueden provocar la destrucción de un ecosistema. Como daños a suelos de cultivo y cuerpos de agua con sales solubles y elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S (Volke et al., 2005). Bajo condiciones normales, la mayoría de los EPT se encuentran en cantidades fijas debido a las características geológicas y de forma poco solubles de forma química, por tanto no presentan riesgo a la biota, pero, al alterarse las fracciones del suelo por actividades humanas como lo es la minería, industria petrolera o la sustracción de recursos naturales del sub-suelo ocurre un cambio radical en los suelos y/o cuerpos de agua, presentando acumulación de EPT en suelos rompiendo el equilibrio natural y causando el impacto medio ambiental de los suelos y acuíferos (Bautista, 1999; Sabroso and Pastor, 2004).

El estado de San Luis Potosí ha sido desde el año de 1561 un estado minero, en donde se ha beneficiado de metales como oro (Au), plata (Ag), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Antimonio (Sb), Estaño (Sn) y Magnesio (Mn) (Servicio Geológico Mexicano, 2014). Esta explotación ha traído consigo que se modifiquen las condiciones ambientales de la región, provocando alteraciones al ecosistema y provocando daños a los cuerpos de agua. Como es el caso del municipio de Matehuala en donde se han reportados concentraciones que exceden las normas mexicanas y los estándares internacionales (Martínez-Villegas et al., 2013). El agua contaminada proveniente de Matehuala es usada para la irrigación de suelos agrícolas en el ejido de Cerrito Blanco, por lo cual el suelo es contaminado alterando sus características químicas provocando efectos negativos debido a la presencia o a la concentración de agentes externos al sistema.

#### 1.1.4 Arsénico

Es uno de los elementos más tóxicos y se puede encontrar en diferentes medios como suelo, aire y agua. Generalmente en literatura se conoce la forma reducida  $As^{3+}$  y la forma oxidada  $As^{5+}$  dos estados de oxidación de arsénico en forma inorgánica (Flanagan et al., 2012; Mendoza-Chávez, 2016). El arsénico contenido en cuerpos de agua representa una gran amenaza para la salud pública, ya que, si el agua contiene elevados niveles de arsénico, es muy probable que los suelos presenten concentraciones de arsénico ya que el suelo es el medio en el cual termina gran parte del agua. Y al hablar de suelos contaminados con arsénico es hablar de riesgo a la salud pública, debido a que son sostén de las plantas las cuales absorben el arsénico a través de sus raíces, tallos, hojas y frutos (Ravenscroft et al., 2009). El As, en forma inorgánica, es más tóxico que su forma orgánica y, a menudeo, se encuentra en aguas subterráneas y superficiales (en suelos, aire y alimentos) como se mencionó anteriormente. Debido a que el As posee propiedades intermedias entre los metales y los no metales, se considera químicamente, un metaloide. La presencia de As en agua potable y en alimentos es casi imposible de detectar a través de los sentidos, porque carece de sabor, olor y color. Por lo que, para su cuantificación es necesario el uso de metodologías y equipos analíticos (Fernández-Luqueño et al., 2014).

El arsénico se encuentra principalmente en depósitos sedimentarios, enlazado fuertemente por enlaces iónicos a los minerales del suelo, también, asociados a los oxi-hidróxidos de hierro, especialmente en condiciones moderadamente reductoras o ácidas, condiciones a las que se considera inmóvil. Sin embargo, al aumentar el pH o las condiciones oxidantes, la movilidad del arsénico aumenta (Salazar, 2017; Volke et al., 2005).

Las actividades mineras pueden aumentar la velocidad de liberación de As a partir de sus sulfuros, debido a que son expuestos al medio ambiente en el proceso de excavación. Se conoce como drenaje ácido de minas o drenaje ácido de rocas al mecanismo mediante el cual los minerales pueden liberar arsénico y otros metales pesados a los cuerpos de agua, el cual consiste en, si los minerales sulfurosos por ejemplo, la pirita ( $FeS_2$ ) están expuestos al aire y al agua, éstos pueden oxidarse químicamente por el oxígeno del aire, produciendo iones de sulfato, iones de hierro y

ácido ( $H^+$ ):  $2FeS_{2(\text{mineral})} + 2H_2O + 7O_{2(\text{del aire})} = 4SO_4^{2-} + 2Fe^{2+} + 4H^+$  (Nava-Alonso, 2014).

La presencia en el agua de iones de hierro no pone en riesgo alguno; sin embargo, la acidez (presencia de iones  $H^+$ ) provoca que esta agua ácida sea capaz de disolver metales, lo que naturalmente no sería posible. Otros sulfuros como la galena ( $PbS$ ) y la arsenopirita ( $FeAsS$ ) reaccionan de la misma manera, si están en contacto con agua y oxígeno de la atmósfera, para producir plomo y arsénico solubles, además de ácido. De este modo, el arsénico resultante de estos procesos o de deposiciones se infiltra a través de los suelos contaminando los mantos acuíferos y en su paso por el suelo, la interacción con éste provoca la acumulación de arsénico en el suelo. Por lo cual, la disponibilidad de oxígeno y el pH (acidez del agua) son las variables que controlan la solubilidad o reactividad de los compuestos que integran el arsénico (Nava-Alonso, 2014).

Las normativas ambientales vigentes obligan a las compañías mineras a responsabilizarse de la generación de sus residuos, ya sea neutralizando la acidez producida o bien impidiendo que el oxígeno o el aire entren en contacto con los residuos sulfurosos, lo que puede lograrse mediante el recubrimiento de los residuos con un tratamiento químico. Los valores máximos permisibles de acuerdo al uso de suelo varía. Siendo  $22 \text{ mg Kg}^{-1}$  para suelos de uso agrícola, residencial o comercial, y para suelos de uso industrial el valor máximo permisible es  $260 \text{ mg Kg}^{-1}$  de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (DOF, 2007; Nava-Alonso, 2014).

## 1.2 Factores de formación del suelo

El origen del suelo es principalmente debido a la meteorización de las rocas, principalmente de las rocas ígneas y sedimentarias situadas en la superficie terrestre, las cuales han sufrido alteraciones debido a los agentes de la naturaleza, tanto química, física y biológica (Blaya and García, 2003).

La meteorización física es debido a tensiones en el interior de la roca, lo cual provoca roturas en sus líneas débiles sin que se sufran cambios apreciables en la mineralogía de sus componentes. Las tensiones pueden ser provocadas por diferentes factores, entre los que destacan los diferentes cambios de temperatura, la variación de

humedad y sequedad, la congelación por el hielo, la cristalización de sales por hidratación y el efecto mecánico de animales y plantas (Blaya and García, 2003).

Existen diferentes factores que influyen en la formación de suelo, y que determinan el carácter eventual de un suelo característico, a continuación, se mencionan 5 factores principales; material parental, clima, comunidad biótica, topografía y el tiempo (Hillel, 2007).

### **1.2.1 Material parental**

Es el sustrato a partir del cual se formó el suelo, una vez meteorizado se constituye la formación del suelo (Port-Casanellas et al., 2014), el cual tiene características heredadas de la roca parental, es decir, el material parental será quien le de las propiedades de textura y mineralogía (Núñez-Solís, 2000).

Los suelos que se forman directamente sobre la roca madre in situ son llamados suelos residuales. Se reconocen tres tipos principales de rocas: ígneas, que son enfriadas a partir de magma fundido; sedimentarias, sedimentos consolidados y a menudo cementados; y metamórficas, las cuales pueden ser rocas ígneas o sedimentarias que se pueden desarrollar a partir de material no consolidado, como aluvial, eólico, o depósitos glaciales. Cada uno de los tipos de material parental tiene sus propias características físico-químicas congénitas que influyen en la formación del suelo desde el inicio (Hillel, 2007). En general, los suelos agrícolas han sido transportados de las áreas con pendiente más pronunciada.

La mayor parte de los suelos en San Luis Potosí han derivado de rocas sedimentarias, como lo son caliza, lutita y areniscas. Materiales residuales de origen ígneo se localizan en el sur y suroeste, en la sierra San Miguelito y en el cordón de la Mesa Larga, donde predominan los tipos de roca riolita y toba ácida, localizándose también pequeños afloramientos de este tipo de roca dispersos (INEGI, 2002).

Dentro de la región de Matehuala se han detectado suelos con horizontes calciyesíferos, suelos carbonatados medianamente profundos, con horizonte superficial yesífero, suelos con yeso en los horizontes profundos y suelos cementados con carbonato a poca profundidad (SNPC, 2018).

### 1.2.2 Clima

Los procesos que ocurren en los suelos están influenciados por el clima, principalmente por la precipitación y la temperatura (Núñez-Solís, 2000). La temperatura y la humedad afectan las velocidades de disolución, lixiviación, o deposición de los componentes del suelo. En las regiones cálidas y húmedas, los componentes fácilmente solubles (tales como los cationes básicos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) pueden ser lavados casi totalmente fuera de los suelos, quedando solamente los minerales poco solubles como óxidos de hierro. Estos suelos tienden a ser menos fértiles, debido a la pérdida excesiva de nutrientes solubles (Hillel, 2007).

Tal es el caso de estudio el cual pertenece a una zona árida o semiárida, en donde los suelos presentan características propias definidas por el efecto de los procesos que en ellos causan, algunos de ellos son la carbonatación, salinización y gipsificación. La acumulación de esto llega a formar una capa endurecida cementada a cierta profundidad en el suelo. En las regiones más secas aún, incluso las sales altamente solubles como el cloruro de sodio pueden ser retenidos en el suelo. Materia orgánica del residuo parcialmente descompuesto de plantas y animales, tiende a acumularse en climas relativamente fríos, pero a descomponerse rápidamente en los más cálidos (Hillel, 2007; Núñez-Solís, 2000).

Los tipos de clima que predominan en San Luis Potosí son: secos, semisecos, semicálidos y cálidos. El clima predominante en el municipio de Matehuala es seco semicálido con una temperatura media anual de  $19.3^{\circ}\text{C}$ , donde la precipitación pluvial es escasa de 450 mm y los procesos de intemperismo bioquímico son muy reducidos, esto ha traído consigo la formación de suelos jóvenes de textura media y que presentan la acumulación de carbonatos de calcio y sodio en las regiones aluviales (INEGI, 2017, 2002; SNPC, 2018).

### 1.2.3 Comunidad biótica

Un tercer factor de formación del suelo es debido a la naturaleza y actividad de la comunidad biótica que habita en el suelo, la cual, está recíprocamente condicionada por el clima y la naturaleza de los sustratos.

La vegetación tiene una influencia fuerte en la génesis del suelo, como organismos o comunidad biótica se engloba a la vegetación y los animales que habitan el suelo (tanto meso, macro y microscópicos). Los vegetales son uno de los factores más importante en la formación del suelo debido al aporte de material orgánico modificando el pH, color, retención de humedad, actividad biológica, entre otros factores del suelo (Hillel, 2007; Núñez-Solís, 2000).

Algunos organismos que afectan el suelo son diferentes animales que habitan en la tierra, como las lombrices, termitas y roedores que excavan en el suelo y se mezclan a profundidad. De este modo, ayudan a cavar materia orgánica a una mayor profundidad y para crear canales que facilitan el movimiento de agua y aire, así como la migración de partículas y solutos.

Los microorganismos tales como hongos, protozoos y bacterias, que procesan la materia orgánica, ya sea aeróbicamente o anaeróbicamente, presentan una mayor influencia sobre el desarrollo del suelo. Dependiendo del contenido de humedad del suelo y la tasa de aireación, oxidan o reducen químicamente la materia orgánica y los minerales (Hillel, 2007).

En la provincia Llanura Costera del Golfo Norte y en la parte oriental de la provincia Sierra Madre Oriental, los suelos se encuentran enriquecidos en materia orgánica debido a que presentan exuberante vegetación, destacando las comunidades vegetales de selvas, bosque de encino y pino, pastizales y matorral submontano. En el resto de la provincia Sierra Madre Oriental en donde se ubica el municipio de Matehuala, S.L.P., se distribuyen suelos más pobres en materia orgánica, debido a que presentan otro tipo de vegetación que aportan menor cantidad de residuos como los matorrales desérticos micrófilos y rosetófilos, matorral crasicaule y pequeñas áreas con pastizal natural y vegetación halófila, nopalera e izotal (INEGI, 2017).

La vegetación que ayuda a la formación de los suelos en la provincia Mesa del Centro, pertenece a matorral desértico micrófilo en la parte occidental del estado, matorral crasicaule en el sur y pequeñas zonas con matorral desértico rosetófilo, pastizal natural y bosque de pino y encino. La fauna se caracteriza por las especies dominantes como: liebres, víboras y aves silvestres, como cuitolas y codornices (SNPC, 2018).

Se encuentran en zona media en materia orgánica, ya que la vegetación de esta zona aporta una moderada cantidad de residuos y el clima favorece la descomposición de ellos y su incorporación al suelo (INEGI, 2017).

#### **1.2.4 Topografía**

Un cuarto factor de formación del suelo es la topografía de las áreas en el cual el suelo se desarrolla.

La topografía afecta a la formación del suelo de varias maneras. La pendiente modifica algunas condiciones de suelo como el drenaje, la profundidad, la susceptibilidad a la erosión, etc., afectando su grado de utilidad agrícola (Núñez-Solís, 2000). El suelo en pendiente contiene más humedad que los depósitos de sedimentos adicionales en los valles, o tierras bajas. Los valles de suelos pueden incluso acumular aguas subterráneas a pocas profundas debido al drenaje impedido.

Los suelos que se forman en secciones secuenciales del paisaje tienden a diferir en condiciones micro climáticas, aunque se encuentran en la misma zona macro climática (Hillel, 2007).

Los suelos presentes en el municipio de Matehuala, San Luis Potosí son de origen aluvial. Se formaron en las grandes llanuras con aporte de sedimentos provenientes de rocas caliza y lutita en su mayor parte; de origen residual y coluvial en las partes altas y bajadas de las sierras constituidas por el mismo tipo de roca, como también de afloramientos dispersos de rocas ígneas. En su mayoría presentan una textura media no siendo así para los que se encuentran en las regiones más húmedas que presentan una textura más fina; presentan limitantes físicas como las fases petrogípsica (sulfato de calcio) y lítica (roca), y limitantes químicas por altos contenidos de sales solubles y sodio. Son superficiales en sierras y lomeríos, y dependiendo del clima y de la vegetación que se encuentre presente, pueden ser ricos en materia orgánica y nutrientes.

Los suelos superficiales de origen residual y coluvial tienen su formación sobre sierras de rocas caliza, lutita, riolita y toba ácida, así como sobre pequeñas mesetas de rocas ígneas y afloramientos dispersos de basalto. Las limitantes físicas que se presentan son las fases petrocálcica (caliche), lítica (roca) y en menor proporción, pedregosa y

gravosa; además, pequeñas áreas presentan limitantes por sales solubles y sodio. En general son suelos de textura fina (INEGI, 2002).

### 1.2.5 Tiempo

El tiempo es un factor de formación del suelo gradual, y su influencia es muy importante debido a los diversos procesos que finalmente determinan las características en la formación del suelo, esto puede culminar en el establecimiento de un suelo maduro después de algunos siglos y milenios.

El suelo como todo cuerpo natural, al paso del tiempo sufre constantes cambios en relación con la dinámica de los factores y de procesos que intervienen durante su formación (Cordero-Vázquez et al., 2016). Cuando estos procesos han permanecido durante un período prolongado, los suelos derivados pueden llegar a tener un carácter prácticamente estable (Hillel, 2007).

Al pasar el tiempo el material parental que formó el suelo se vuelve menos importante, ya que al paso del tiempo el suelo se ve más influenciado por el clima, cambios físicos y químicos, así como biológicos. Por otro lado, como resultado del tiempo en suelos provenientes de regiones húmedas, pierden todas las sales fácilmente solubles, no siendo así para los suelos en regiones áridas que tienden a acumular sales que no están deslavadas, y debido a la acción capilar ascienden hacia la superficie del suelo, ahí el agua se evapora y las sales tienden a acumularse (Hillel, 2007).

El tiempo requerido para que los suelos se hayan desarrollado en la entidad ha dependido de las interrelaciones de todos los factores formadores, en general por la temperatura y precipitación, siendo en los climas semicálidos y cálidos la formación más acelerada que en el resto y en la que han colaborado los procesos físicos y bioquímicos.

Debido a la acción de los factores mencionados con anterioridad, se han originado diferentes tipos de suelo en el estado de San Luis Potosí, entre los que figuran, de acuerdo con su mayor extensión: Calcisol, Gipsisol, Litosol, Vertisol, Feozem y Rendzina; y en menor proporción, Castañozem, Regosol, Luvisol, Solonchak, Fluvisol y Chernozem, algunos muy localizados como Cambisol, Yermosol y Planosol. Presentándose los tipos Calcisol y Gipsisol en Matehuala. La zona oeste de Matehuala



presenta grandes aportaciones de yeso en su fase mineralógica perteneciendo al grupo gipsisoles y hacia el Este los suelos pertenecen al grupo de calcisoles con presencia de abundantes carbonatos de calcio (INEGI, 1972). En su mayoría presentan espesores de menos de 100 cm y una mínima parte (9 %) tienen restricciones químicas (fase salina, sódica y salina-sódica) y sólo 13.5 % son profundos (mayores de 100 cm) y sin limitantes para su uso (INEGI, 2009).

### 1.3 Características del sitio de estudio

El poblado de Cerrito Blanco pertenece al municipio Matehuala, S.L.P., se encuentra localizado en la parte Norte del estado, en la zona del altiplano, 338449.40 m Este y 2618496.25 m Norte a 1520 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) (Figura 2). Con una temperatura media anual de 19.3 °C y precipitación pluvial de 450 mm anuales, dándole un clima seco semicálido (INEGI, 2009). El ejido Cerrito Blanco cuenta con una población aproximada de 200 habitantes, con una relación mujeres/hombre igual a 0.905, siendo su primera actividad de ingreso económico el comercio y los servicios, como segunda actividad la industria y, en tercer lugar, la actividad agrícola (INEGI, 1993).

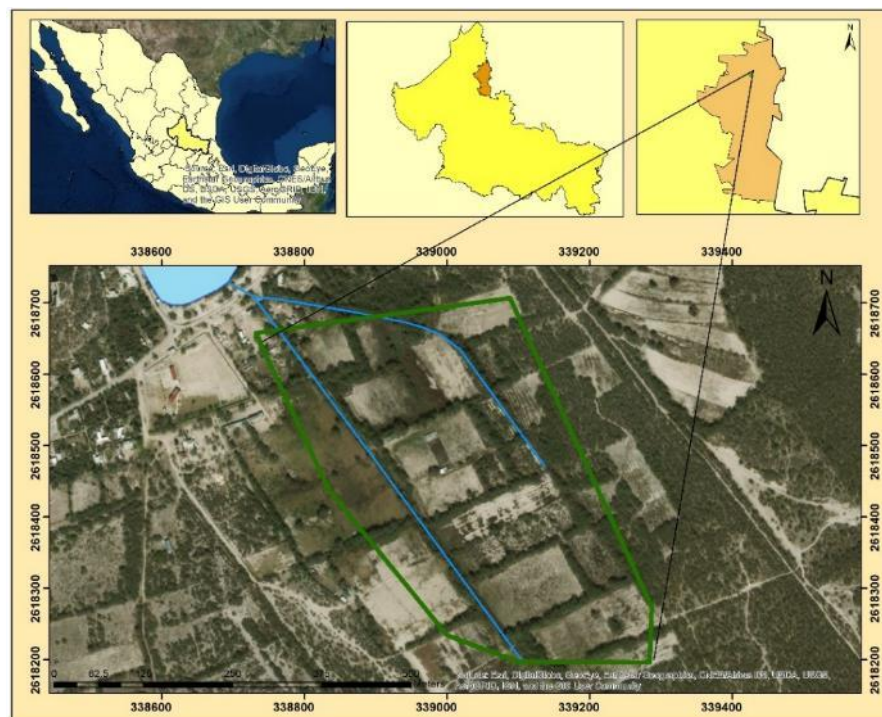


Figura 2 Localización de zona agrícola en el ejido Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P.

### 1.3.1 El suelo en Matehuala, San Luis Potosí

Matehuala presenta suelos con horizontes calci-yesíferos, más o menos arcillosos, pobres en materia orgánica (ócricos). Las unidades de suelo presentan suelos de tipo calcisoles y gipsisoles en la mayor parte del municipio (Figura 3), así como una textura media (Periódico Oficial del Estado Libre y Soberano, 2013). De origen desértico-lacustre, los Gipsisoles y Calcisoles se caracterizan por la pobreza de materia orgánica, en su mayoría tienen un horizonte superficial de 10 cm o menos, de color pardo o parduzco sobre un horizonte subsuperficial ligeramente oscuro y/o un subsuelo pardo amarillento con moteado blanco de calcita o sulfato de calcio (INEGI, 2009, 1972). El contenido de materia orgánica de la superficie es bajo (ócrico) (INEGI, 1972), debido a la escasa vegetación y la rápida descomposición de los restos vegetales. Los Calcisoles suelen tener una textura media con tendencia a fina, que ayudan a la retención de humedad. El reblandecimiento y endurecimiento continuos pueden impedir la infiltración de agua de lluvia y/o del riego, particularmente donde la superficie de los suelos es limosa (IUSS, 2007).

En la agricultura el riego por surcos es mejor en Calcisoles inestables porque reduce el encostramiento superficial y mortalidad de plántulas. Por otra parte, la agricultura bajo riego en Gipsisoles trae consigo conflictos ya que la rápida disolución del yeso

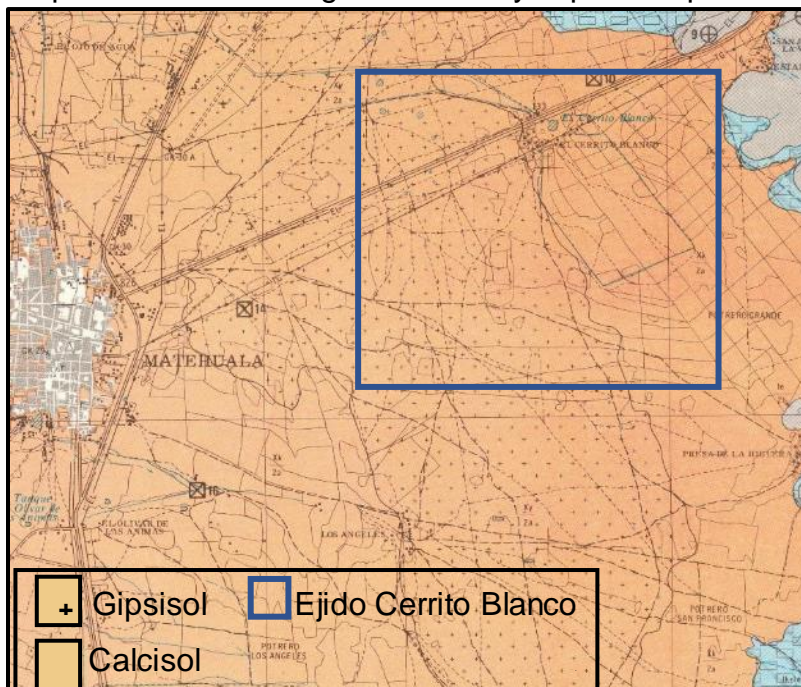


Figura 3. Distribución de suelos en el Municipio de Matehuala, San Luis Potosí, México.

del suelo resulta en subsidencia irregular de la superficie de la tierra, formación de cuevas en las paredes de los canales, corrosión de estructuras de concreto y la salinización de los suelos (IUSS, 2007).

## 1.4 Propiedades de los suelos

### 1.4.1 Textura

La textura del suelo se refiere a la distribución del tamaño de las partículas elementales que lo componen, las partículas menores a 2 mm se clasifican de acuerdo a su tamaño: arcilla, limo y arena (Figura 4) (Cordero-Vázquez et al., 2016). La textura es una de las características más intactas del suelo y ésta es dependiente del material parental y los procesos de formación que sobre este han actuado.

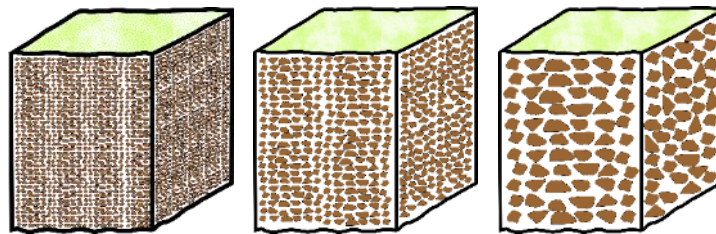


Figura 4. Distribución de partículas (arcilla, limo y arena) de suelo sin materia orgánica.

La distribución textural se reporta en porcentaje (%) y hace referencia a la cantidad de materia, ya sea arcilla, limo o arena que contenga, el cual la suma de los 3 materiales tiene que completar el 100 % (Figura 5).

En general y basándose en el contenido de arcilla, el suelo se puede clasificar en:

arenoso: < 10 %

franco: 10–30 %

arcilloso: > 30 %

Para la determinación de la textura de un suelo, se implementa el método AS-09 de la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003) usando el hidrómetro de Bouyoucos. El cual se fundamenta en la precipitación de las partículas de suelo suspendidas en agua, eliminando agregados de materia orgánica (MO) y la floculación debido a los cationes de calcio y magnesio. Se toman 2 lecturas, la primera a los 40 segundos que ayuda a determinar la separación de las partículas de tamaños mayores a 50  $\mu\text{m}$  los cuales pertenecen a arena y la última lectura es tomada a las 2 horas para

partículas mayores a 2  $\mu\text{m}$  que pertenecen a limo y arena, en donde finalmente se realizan los cálculos establecidos en la norma para obtener la distribución porcentual de las partículas y graficarlos en el triángulo textural (Figura 5) en donde de acuerdo a la distribución se puede clasificar un suelo en arenoso, limoso, arcilloso, franco, franco arenoso, franco limoso, franco arcilloso, etc. (DOF, 2003).

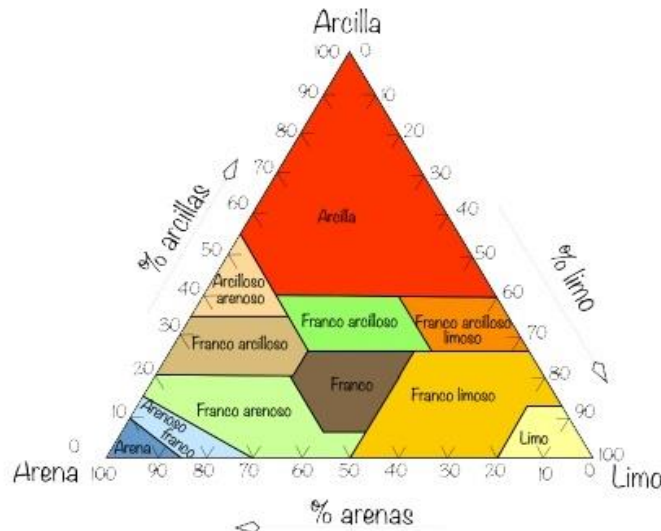


Figura 5. Clasificación de suelos mediante triángulo textural que define al suelo de acuerdo al aporte de arcilla, limo y arena.

La textura influye decisivamente en el comportamiento del suelo respecto de su capacidad de retención de agua y nutrientes, su permeabilidad y su capacidad para descomponer la materia orgánica (MO) (Suquilanda, 2017).

La textura es de gran importancia en los suelos ya que es la textura la que aporta la propiedad de porosidad al suelo, al igual que permite el paso al crecimiento de las raíces, esto tiene influencia en la probabilidad de pérdida por erosión hídrica y eólica, por otro lado la textura del suelo también forma un papel importante en la infiltración del agua, la cual a su vez influye en la cantidad de escorrentía superficial, entre mayor sea el tamaño de partícula habrá mayor infiltración de agua (Stocking and Murnaghan, 2003).

#### 1.4.2 Porosidad y densidad

La porosidad se refiere al porcentaje del volumen de suelo que se encuentra vacío (espacio ocupado por poros), con respecto al volumen total. Esta propiedad está



directamente relacionada con la textura, ya que el tamaño es quien otorga los espacios vacíos entre partícula y partícula (Figura 6).

La porosidad afecta directamente al movimiento interno del agua en el suelo (permeabilidad), a la penetración del agua (infiltración), el contenido de aire que pueda tener un suelo (aireación) y la capacidad de retener agua (Valverde-Conejo, 2007).

La porosidad de la arena se encuentra en un rango de 20 % a 35 % y lo que respecta a las arcillas varía entre 40 % hasta 65 % (Sanders, 1998) (Figura 7), esto dependerá de la procedencia del material.

La importancia de la porosidad radica en el movimiento del agua, por ejemplo, un suelo arenoso no es capaz de retener el agua por mucho tiempo, sin embargo, el agua es más accesible para la planta ya que su permeabilidad es muy alta, pero esto hará que pierda el agua con facilidad. No siendo así para un suelo arcilloso, el cual tiene la capacidad de retener por más tiempo el agua debido a que tiene una alta porosidad pero, sin embargo no tiene la capacidad de transmitirla con facilidad ya que es poco permeable, o dicho de otra manera, tiende a ser impermeable (Valverde-Conejo, 2007).

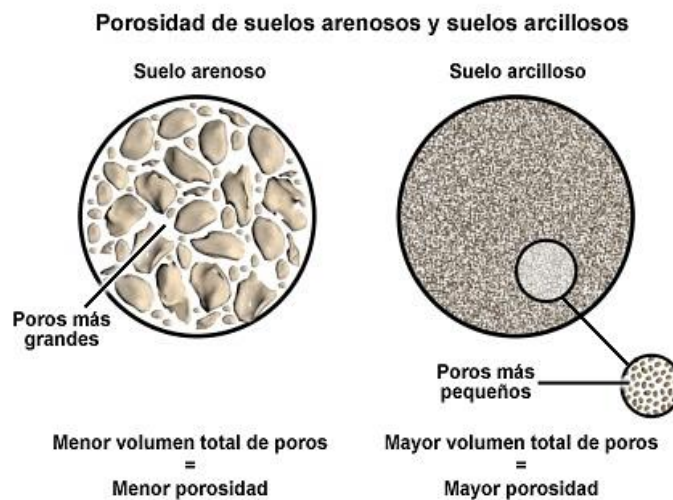


Figura 6. Porosidad de un suelo arenoso contra un suelo arcilloso, comparación de porosidad.

La determinación de la porosidad es el resultado de la división del volumen de poros, entre el volumen total;

$$\Phi = \frac{\text{volumen de poros (m}^3\text{)}}{\text{volumen total (m}^3\text{)}} * 100 \%$$

Y es reportado en por ciento (%) de acuerdo al volumen total. La determinación práctica de la porosidad se efectúa de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003) a través de los métodos AS-03 utilizando parafina (densidad aparente) y el método AS-04 utilizando picnómetro (densidad real).

El método AS-03 se basa en 2 parámetros, masa y volumen. Con ayuda de un terrón de suelo parafinado y una probeta con agua a un volumen determinado se mide el desplazamiento de volumen que provoca el terrón parafinado y de acuerdo a su masa y su volumen desplazado se determina la densidad aparente.

Material	Porosidad (%)	Rendimiento Específico (%)	Permeabilidad m <sup>3</sup> /dia/m <sup>2</sup>
Arcilla	45	3	0,0004
Arena	35	25	41
Grava	25	22	4100
Grava y arena	20	16	410
Arenisca	15	8	4,1
Cuarcito y granito	1	0,5	0,0004

Figura 7. Porosidad general de arcilla, arena y materiales gravosos.

El método AS-04 al igual que el método anterior se basa en la masa y volumen, pero ahora con ayuda de un picnómetro y un desecador al vacío se extrae el aire de los poros del suelo y se sustituye por un fluido, en su mayoría por agua destilada. Se afora el picnómetro y se realizan los cálculos necesarios con el peso del picnómetro con la muestra de suelo saturada, la diferencia es que los poros se encuentran ahora saturados con agua. La densidad real tiene que ser mayor a la densidad aparente ya que los poros se encuentran saturados.

Posterior a esto se realizan los cálculos para determinar la porosidad del suelo, el cual consta de la división de densidad aparente entre la densidad real;

$$\Phi = \frac{\text{densidad aparente (g/ml)}}{\text{densidad real (g/ml)}} * 100 \%$$

La densidad real, de las partículas densas del suelo, puede variar con la proporción de elementos que constituyeron el suelo y por lo general se encuentra alrededor de 2.65 g/ml. Con respecto a la densidad aparente se puede decir que una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena y una densidad aparente baja indica que la porosidad del suelo puede ser alta debido al espacio entre las partículas, esto no indica necesariamente que favorece o forma un ambiente para el crecimiento de las plantas. Suelos con densidad aparente inferiores a 1 g/ml se clasifican como suelo orgánicos o volcánicos (Brady and Weil, 2002; DOF, 2003).

### 1.4.3 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica es una propiedad que depende de la porosidad del suelo, y a su vez de la textura, ya que la textura es quien le otorga la distribución de partículas necesarias para que fluya o no un líquido entre los poros, un suelo con gran porcentaje de arena tendrá una conductividad alta a diferencia de un suelo altamente arcilloso (García et al., 2010) (Figura 8), el cual contendrá el agua evitando que el agua fluya. Se puede establecer una relación entre la conductividad hidráulica y el diámetro de las partículas de arena, debido a su efecto en el sistema capilar de poros. Bajo condiciones de igualdad en el diámetro de partículas, la conductividad hidráulica es mayor cuando la porosidad de la arena es más alta (Leitón, 1985).

Clases Texturales	Porosidad efectiva ( $\theta_e$ )	Conductividad Hidráulica (K) (cm/h)
A. Arcilla	0.385	0.06
B. Arcilla limosa	0.423	0.09
C. Arcilla arenosa	0.321	0.12
D. Migajón arcillo limoso	0.423	0.15
E. Migajón arcilloso	0.309	0.23
F. Migajón arcillo arenoso	0.330	0.43
G. Limo	0.460	0.25
H. Migajón limoso	0.486	0.68
I. Migajón	0.434	1.32
J. Migajón arenoso	0.412	2.59
K. Arena migajonosa	0.401	6.11
L. Arena	0.417	22.1

Figura 8. Conductividad hidráulica de algunos materiales, de acuerdo a García et al., (2010).

El flujo subterráneo o conductividad hidráulica se representa matemáticamente a través de la ecuación de Darcy, la cual relaciona la velocidad media del agua en un medio poroso saturado ( $v$ ), con el cambio de la carga hidráulica ( $h$ ), a lo largo de una dirección determinada del espacio ( $x$ ), también denominado gradiente hidráulico,  $i = \partial h / \partial x$ . La proporción de esta relación está dada por el coeficiente de conductividad hidráulica a saturación ( $k$ ) la cual se usa para determinar la velocidad de movimiento en casi todas las condiciones de drenaje (Breña and Jacobo, 2006; Juárez and Rico, 1982).

La ecuación de Darcy se representa de la siguiente manera:

$$v = -k i$$

En donde

$v$  = Velocidad de flujo ( $\text{cm h}^{-1}$ )

$i$  = Gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales (adimensional)

$k$  = Coeficiente de permeabilidad ( $\text{cm h}^{-1}$ )

La conductividad hidráulica de un suelo puede clasificarse desde muy baja hasta muy alta, de acuerdo a la velocidad de flujo (Figura 9), un suelo promedio tiene una velocidad de flujo de 2 a 2.6  $\text{cm/h}$  (Jaramillo, 2002).

CLASE	RANGO DE VALORES DE $K_{sat}$		
	$\text{m s}^{-1}$	$\text{cm h}^{-1}$	$\text{m día}^{-1}$
Muy alta	> 100	> 36	> 864
Alta	10 – 100	3.6 – 36	86.4 – 864
Moderadamente alta	1 – 10	0.36 – 3.6	8.64 – 86.4
Moderadamente baja	0.1 – 1	0.036 – 0.36	0.864 – 8.64
Baja	0.01 – 0.1	0.0036 – 0.036	0.0864 – 0.864
Muy baja	< 0.01	< 0.0036	< 0.0864

Figura 9. Clasificación de los suelos de acuerdo a su conductividad hidráulica (Jaramillo, 2002).

#### 1.4.4 Color

Es un indicador más perceptible del suelo que ayuda a determinar los componentes del suelo. Ya que está relacionado con el contenido de materia orgánica (MO), el clima, mineralogía y el drenaje (Thompson and Troeh, 1988). Los colores blancuzcos indican la presencia de arena, caliza o yeso y los suelos más oscuros indican la presencia de MO y óxidos de hierro. Los grises con tonalidad verdosa indican la ausencia de



drenaje, por otro lado los pardo rojizos muestran una adecuada permeabilidad (Suquilanda, 2017). La tonalidad que puede dar el humus o materia orgánica es tan alta que solo basta con un contenido de 5 % para dar una tonalidad negra o casi negra (Thompson and Troeh, 1988). Para homogeneizar la nomenclatura debido a la gran variedad de tonos y chroma, se creó el sistema de descripción de color a nivel internacional denominado Munsell (Domínguez et al., 2012), el cual se basa en 3 variables para poder describir el color del suelo; *matiz, pureza o CHROMA y luminosidad o VALUE*. La combinación de las 3 variables dan un color característico a cada suelo que representa en su generalidad una composición mineral (Casanova, 2005).

#### 1.4.5 Salinidad

La salinidad es la concentración excesiva de disposición de sales que se encuentran en un suelo, las cuales alteran las propiedades físicas y químicas del suelo y esto, conlleva a que se vea alterada la fertilidad del mismo. A todos los compuestos químicos inorgánicos que sean más solubles que el yeso (0.241g/100ml a 0°C), se les denomina sales solubles. Mayormente las sales solubles están compuestas por cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y por aniones  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ . Al tener niveles significantes de sales en un suelo como resultado se obtiene una disminución de su productividad (López, 2002). La salinidad de un suelo es reportado en  $\text{dS m}^{-1}$  a 25°C y de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003) un suelo se puede clasificarse con efectos despreciables de salinidad hasta muy fuertemente salino (Figura 10).

Para estudios geofísicos orientados a caracterizar el suelo es muy importante conocer el valor de la salinidad, ya que la respuesta eléctrica puede ser influenciada por los

CE $\text{dS m}^{-1}$ a 25°C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Suelo salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

Figura 10. Clasificación del suelo de acuerdo a lo valores de salinidad (DOF, 2003).

valores de salinidad. Es por ello que al conocer los valores de salinidad es posible realizar la corrección de la respuesta eléctrica.

La determinación de la salinidad se realiza mediante un extracto saturado. Primeramente, se realiza una pasta, la cual se toma una parte de suelo seco y tamizado y es saturado con agua destilada hasta formar una pasta, posteriormente la pasta es sometida a vacío con ayuda de un matraz y embudo Buhner del cual se obtiene un extracto del agua de poro. Con ayuda de un conductímetro o multiparámetro se determina la conductividad eléctrica y se realiza la corrección por temperatura (DOF, 2003).

#### **1.4.6 Resistividad**

La resistividad de un suelo es la capacidad que tiene un suelo de conducir la electricidad en él mismo, la resistividad depende de varios factores que, en conjunto otorgan una respuesta propia de cada suelo, entre los que destacan se puede mencionar las sales solubles, temperatura, humedad y textura (Sanz, 1975).

La resistividad ha sido un valor fundamental para la determinación de contaminación de suelos por hidrocarburos, en estudios para determinar las condiciones de frontera que determinen entre suelos contaminados y suelos libre de contaminación (Delgado-Rodríguez et al., 2014). Para determinar la resistividad de un suelo puede efectuarse directamente en campo. Para realizar la medición existen diferentes dispositivos o arreglos, entre los más conocidos se encuentran; schlumberger, wenner, polo-dipolo, polo-polo y dipolo-dipolo, pero para el caso de los estudios de suelo el más conveniente es el dispositivo wenner en la modalidad perfilaje eléctrico o calicata eléctrica. Este consta de un arreglo tetra-electrónico lineal en donde 2 electrodos (extremos AB) son utilizados para la inyección de corriente y 2 electrodos (internos MN) son los encargados de medir el diferencial de voltaje (Figura 11) (Orellana, 1982).

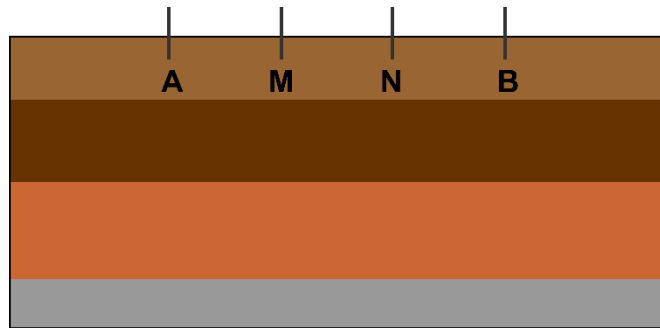


Figura 11. Dispositivo wenner para determinar la resistividad del suelo.

Los cálculos necesarios para determinar la resistividad son;

$$\rho = \Delta U / I * k \quad \text{ó} \quad \rho = R * k$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica ( $\Omega$  m)

$\Delta U$  = Diferencial de potencial (mV)

I = Corriente (mA)

k = Constante geométrica del dispositivo (m)

R = Resistencia ( $\Omega$ )

#### 1.4.7 Intercambio iónico

Proceso mediante el cual se realiza una interacción entre una fase sólida y la solución del suelo, en el cual la fase sólida puede retirar y retener los iones que contenga el suelo y a su vez la fase sólida entrega iones equivalentes (*intercambio*) para así, llegar a un equilibrio entre ambas fases (Jaramillo, 2002). Este proceso se desarrolla en la superficie de las partículas y es un proceso dinámico, reversible y rápido, como los iones quedan dispuestos componen la reserva de los nutrientes utilizados por las plantas.

#### 1.4.8 Capacidad de intercambio catiónico

Los componentes sólidos que conforman el suelo poseen carga electrostática en la superficie, estas superficies pueden ser de gran tamaño, como son las arcillas y la materia orgánica. El limo puede aportar un bajo porcentaje a intercambio catiónico. Dicha propiedad es expresada en mili-equivalente por gramo de arcilla, o por 100

gramos de suelo ( $\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$ ) (Fassbender and Bornemisza, 1987). Actualmente la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003), utiliza el centimole por cada kilogramo de suelo ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). La causa de la CIC de las arcillas se debe a la existencia de bordes, es decir, superficies descompensadas. De igual manera la disociación de los  $\text{OH}^-$  de las capas basales. El tamaño de partícula es un factor que hace que un suelo tenga mayor o menor CIC, mientras más pequeña sea la partícula, mayor será su CIC.

La CIC es capaz de controlar la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas;  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , entre otros. Al igual que interviene en los procesos de floculación-dispersión de arcilla y como resultante, en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados. Por lo cual la CIC determina a un suelo como un depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al él (UNICA, 2011).

## **CAPÍTULO II. Materiales y métodos**

El análisis del suelo en laboratorio es una práctica muy usual y es aceptado como informativo, tal que los resultados de su análisis deberían tener exactitud y repetibilidad comparable con diferentes métodos e instrumentos de medición. Sin embargo, los estudios de suelo en laboratorio no es una ciencia exacta, sino una estimación de sus propiedades contemplando la homogeneidad de la muestra y de que la misma, aunque pequeña, representa una considerable porción de la zona estudiada (Oliveira-Prendes et al., 2006).

El análisis de suelo que a continuación se presenta comprende las siguientes operaciones: Toma de muestra de suelo, pretratamiento de las muestras, estudio físico-químico y análisis e interpretación de los resultados.

### **Plan de muestreo**

Se llevó a cabo un plan de muestreo en los campos de cultivo del ejido Cerrito Blanco, en el municipio de Matehuala, S.L.P., México, a los cinco días del mes de agosto del año 2016, con el propósito de recolectar muestras de suelo superficial y de columna (vertical). El muestreo que se llevó a cabo fue de tipo exploratorio sistemático (DOF, 2006). El suelo superficial fue recolectado en la superficie arable (0-30 cm) mientras para las columnas se tomaron muestras cada 10 cm de profundidad hasta profundizar a 60 cm.

Para esta campaña se diseñó un plan de muestreo que a continuación, se describe cómo plan de muestreo #43. El propósito del muestreo fue conocer las concentraciones de arsénico total, arsénico soluble, textura, conductividad eléctrica, pH del suelo e índice de salinidad. Del mismo modo se desarrolló un muestreo vertical de suelo de tipo exploratorio sistemático, embebido en el muestreo superficial de suelos. El propósito de este muestreo fue conocer las concentraciones de arsénico total y arsénico soluble en perfiles de suelo de 0 y hasta 60 cm para determinar la lixiviación del contaminante.

El área de estudio comprende parcelas agrícolas (campos agrícolas) que han sido irrigados con agua contaminada con arsénico proveniente de la laguna de Cerrito Blanco. La zona de estudio agrícola comprende 39 predios; 21, 22, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75 y 76 (Figura 12) la suma de cada uno de los predios asciende a un total de 72 ha (Anexo 1).

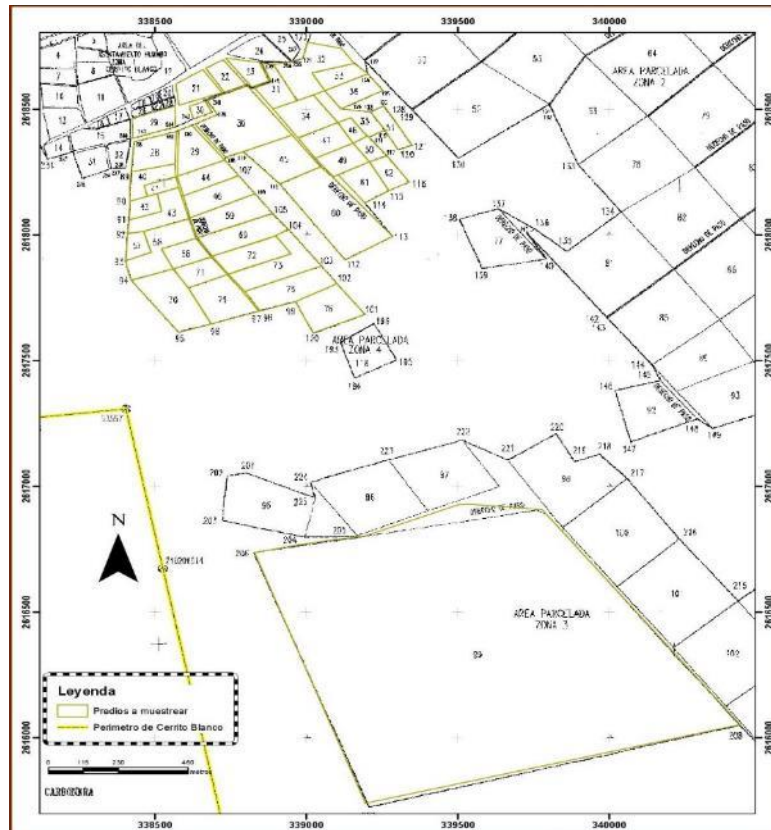


Figura 12. Distribución de parcelas en el ejido Cerrito Blanco.

La zona agrícola ha recibido irrigación por gravedad por medio de canales de irrigación, por lo cual se espera que se encuentren en presencia de arsénico los suelos de la zona agrícolas del ejido Cerrito Blanco, municipio de Matehuala, en el Estado de San Luis Potosí, México los cuales comprenden un área de 72 ha aproximadamente.

Debido a que en la literatura no existían datos de concentraciones totales de arsénico en suelos de esta área, el diseño del muestreo fue de tipo exploratorio. Para la realización del diseño se utilizó un GIS con el que se generaron las mallas de muestreo en el área de estudio.

---

El número de muestras superficiales a recolectar se determinó de acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006 (DOF, 2006), que establece el número de muestras de acuerdo al área. Debido a que la extensión es mayor a 30 ha, se realizó el cálculo para determinar el número mínimo de puntos de muestreo.

$$Y = (X^{0.3}) * 11.71$$

Donde:

Y= número mínimo de muestras

X= superficie del suelo de la zona de estudio (expresada en ha)

Por lo cual, sustituyendo los valores de acuerdo a la zona de estudio;

$$Y = [(72 \text{ ha})^{0.3}] * 11.71$$

$$Y = 42 \text{ muestras}$$

Una vez determinado el número de puntos de muestreo, se determinó la localización de los mismos a través de la división en 3 zonas de estudio: zona irrigada (zona 1) (Figura 13) zona irrigada cercana a un canal histórico que no conduce más el agua (zona 2) (Figura 14) y zona irrigada cercana a unos canales de agua activos que a la fecha siguen conduciendo el agua (zona 3) (Figura 15).

El número de muestras a obtener en cada zona se calculó de acuerdo al Apéndice Informativo B de la NMX-AA-132-SCFI-2006, con la siguiente fórmula:

$$\# \text{ mz} = \text{IR} * \# \text{ m}$$

Donde:

#mz= Número de muestras por zona

IR= Valor de importancia relativa

#m= Número de muestras totales

El valor de importancia relativa es la proporción de importancia en cuanto a número de muestras en escala 0 a 1, según la magnitud de contaminación esperada de acuerdo a la revisión de información documental y de campo específica. Por lo cual los valores se distribuyeron de la siguiente forma:

Zona 1.....IR=0.1  
 Zona 2.....IR=0.3  
Zona 3.....IR=0.6  
 Total.....IR=1.0

Por lo tanto, el número de muestras para las zonas 1, 2 y 3 se calculó como sigue:  
 #  $mz1 = 0.1 * 42 = 4$       #  $mz2 = 0.3 * 42 = 13$       #  $mz3 = 0.6 * 42 = 25$

Una vez calculado el número de muestras a recolectar en cada zona se procedió a determinar la localización y distribución de los puntos de muestreo y determinar el tamaño de la cuadrícula para la red de muestreo, se calculó de acuerdo al apéndice informativo C de la NMX-AA-132-SCFI-2006 (DOF, 2006).

$$C = (A/n)^{(1/2)}$$

Donde:

C= Longitud de los lados de cada cuadro

A= Superficie

n= número de puntos de muestreo

En cada una de estas zonas, la localización de los puntos (Figuras 15, 16 y 17), se determinó de manera sistemática, a través de mallas de acuerdo a los siguientes parámetros:

Zona 1 A= 299300 m <sup>2</sup> n= 4	Zona 2 A= 233595 m <sup>2</sup> n= 13	Zona 3 A= 213268 m <sup>2</sup> n= 25
--	---	---



C= 274 m

C= 134 m

C= 92 m

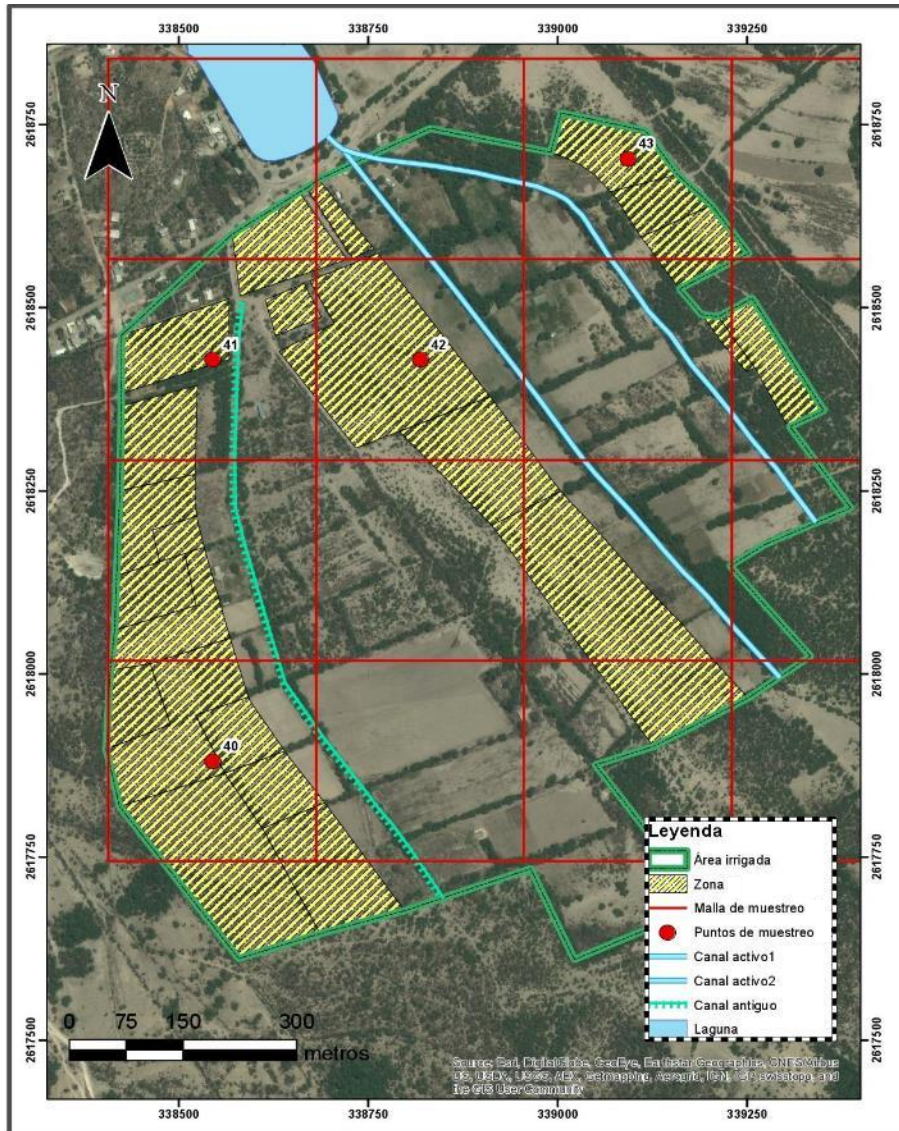


Figura 13. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 1.

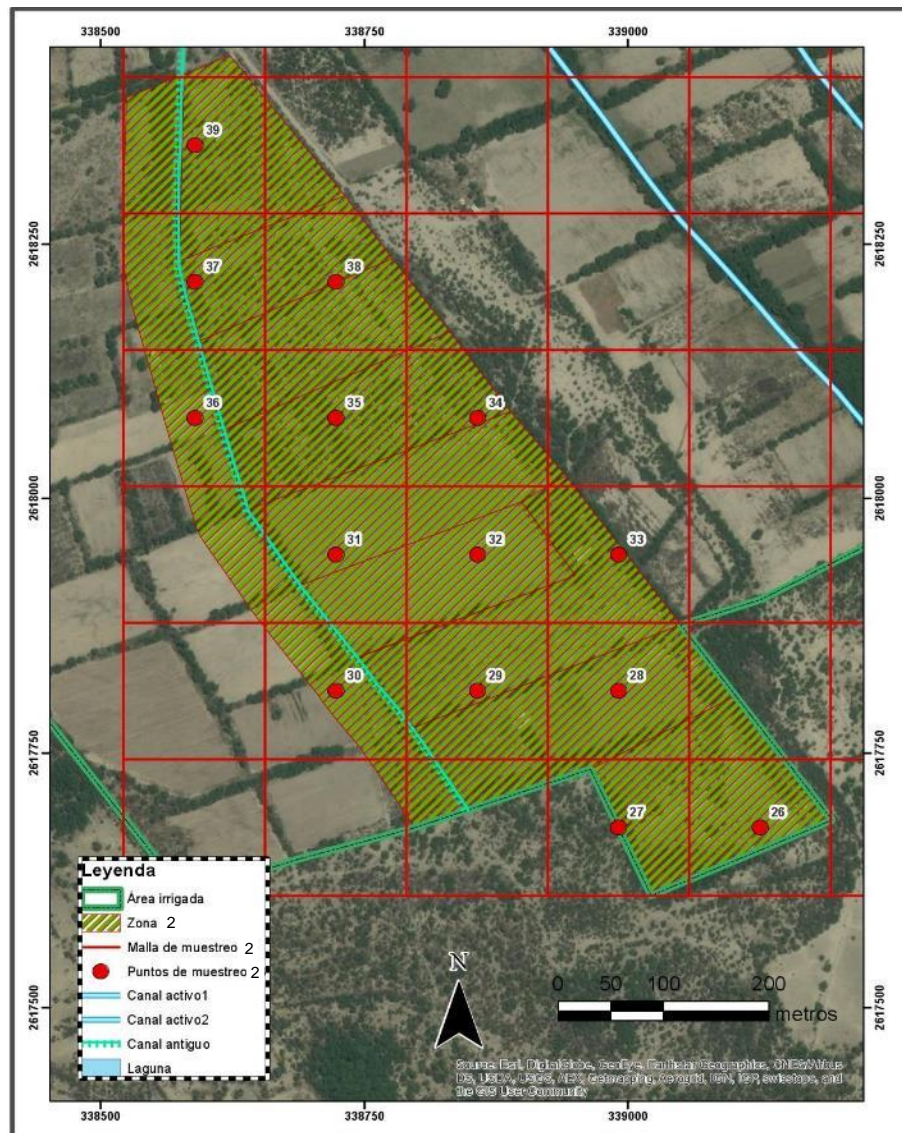


Figura 14. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 2.



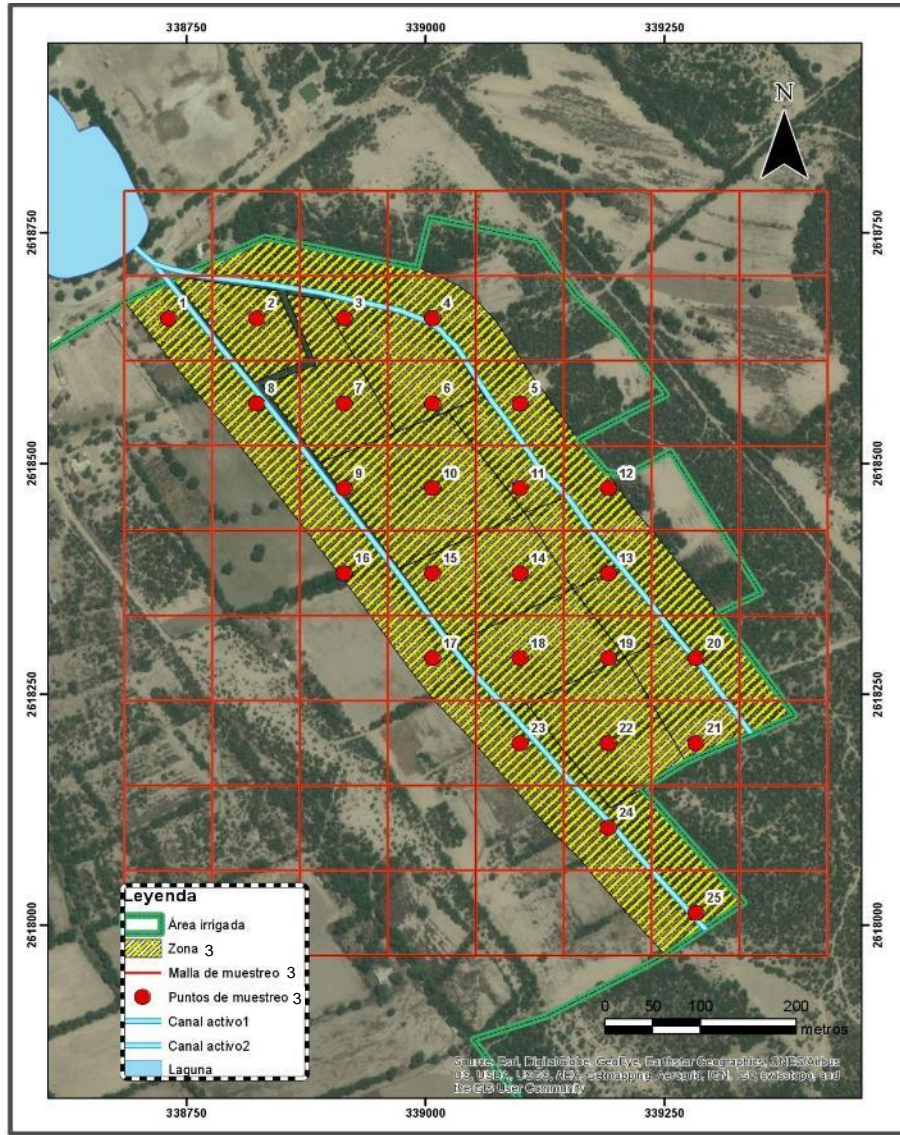


Figura 15. Diseño de la malla de muestreo de suelo superficial en los campos de cultivo para la zona 3.

Como se mencionó anteriormente embebido en este muestreo de la zona agrícola, se recolectaron 5 columnas de suelo para determinar concentraciones totales de arsénico en suelo de 0 a 60 cm de profundidad en zonas agrícolas, tanto cercanas al canal activo como no cercanas, formando una cruz que garantizara las condiciones mencionadas (Figura 16).

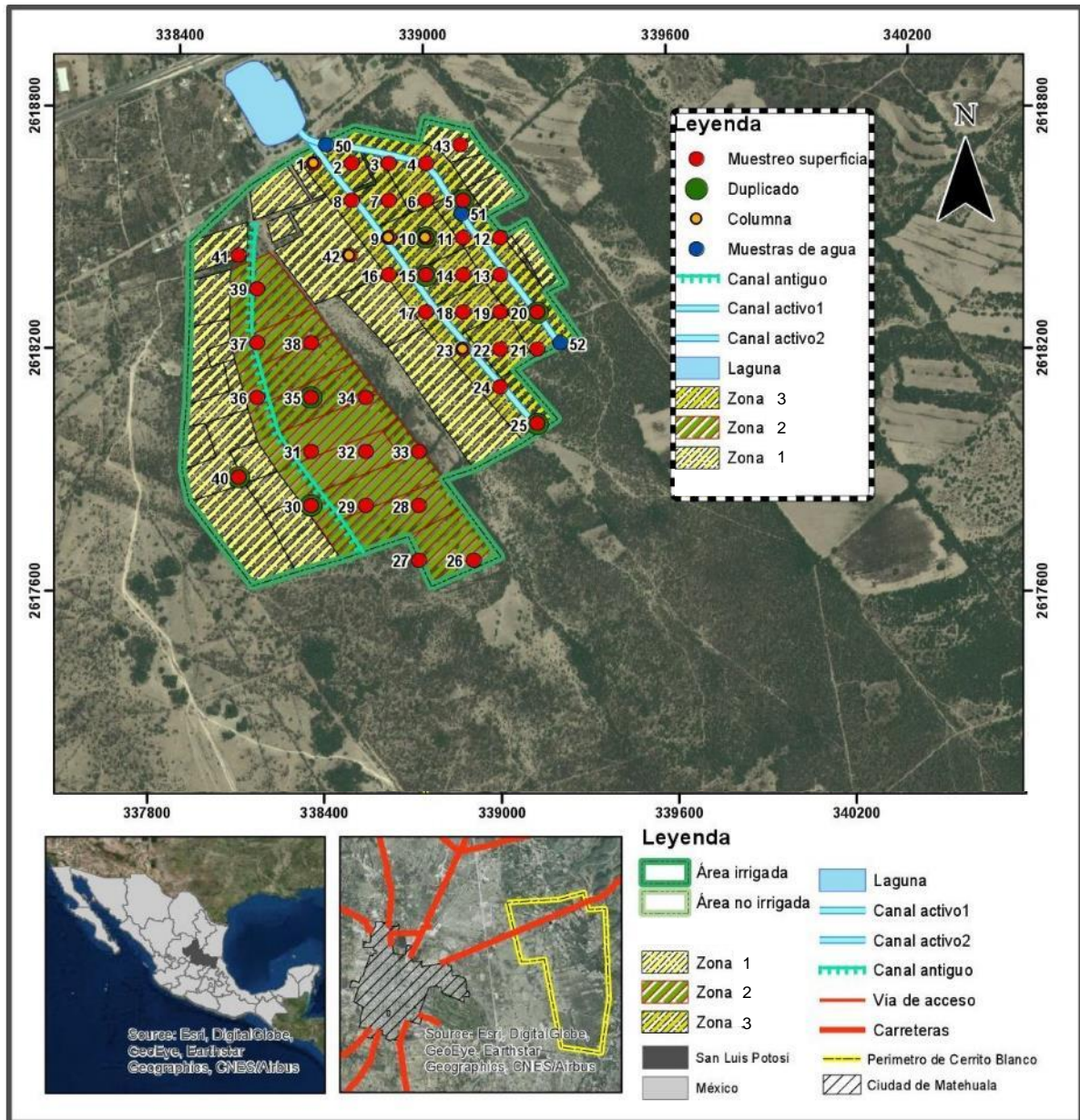


Figura 16. Distribución de puntos de muestreo de suelo superficial y columnas.

Se seleccionó un sistema de muestreo de tipo exploratorio y sistemático, para obtener una recopilación de datos de las concentraciones superficiales de arsénico presentes en el área de estudio. Este tipo de muestreo no requiere de conocimiento previo del sitio o población de muestras, fue el ideal para obtener volúmenes de material contaminado y es fácil de interpolar y configuración entre muestras. Además, garantizó que la población de muestras estuviera representada en forma total y uniforme. Dicho muestreo nos permitió determinar las concentraciones de arsénico en parcelas irrigadas con agua contaminada con arsénico, con diferente potencial de

contaminación, además nos permitió observar el comportamiento de estas concentraciones a lo largo del perfil del suelo y determinar, la lixiviación vertical y difusión horizontal del contaminante.

El número de muestras a recolectar ascendió a 88 muestras simples de las cuales fueron 52 de suelos superficiales, 36 de suelo vertical (columna).

#### *Muestras superficiales*

Se recolectaron 44 muestras de suelo superficial (0-30 cm) con duplicados cada cinco muestras para garantizar la calidad de muestreo y veracidad de los resultados. Por lo cual en total se recolectaron 52 muestras de suelo superficial.

#### *Muestras verticales*

Con la finalidad de probar la posible existencia de lixiviación vertical de arsénico y difusión horizontal del mismo se recolectaron 5 muestras verticales de suelo en cruz. Tres de ellas a lo largo de uno de los canales de irrigación activos (zona 3) y las otras dos en un transecto perpendicular que las intercepta y corre de la zona 2 a la zona 3. De esta manera se recolectaron 5 muestras verticales (columnas) de suelo de 0-60 cm, cada 10 cm, con un duplicado de una columna. En total se recolectarán 36 muestras de suelo superficial.

Para el levantamiento de la muestra superficial se utilizó una pala tipo jardinero para realizar una excavación de dimensiones de 20 cm x 20 cm aproximadamente a una profundidad de 30 cm. Para el caso de las columnas se realizó un procedimiento similar, controlando con la ayuda de un flexómetro la recolección de 6 muestras para los intervalos 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm y 50-60 cm (Figura 17).





Figura 17. Muestreo de suelo, a la izquierda se muestra la excavación para recolectar muestra superficial de 0-30 cm y, a la derecha se muestra el pozo realizado para el muestreo en columna de 0-60 cm.

Dentro de cada pozo, con ayuda de la pala, previo a la recolección de cada muestra se realizaba una primera etapa de homogenización del suelo mezclándolo constantemente desde el fondo a la superficie. Cada muestra tuvo un peso aproximado de 3 Kg, las cuales fueron almacenadas y etiquetadas con su cadena de custodia en bolsas HDPE.

La custodia de las muestras se llevó a cabo por medio de Cadena de Custodia (COC) con número 43, documento donde los responsables y participante en el muestreo registraron la obtención de muestras, su transporte y entrega de éstas al laboratorio para la realización de pruebas y/o de análisis. Al obtener las muestras de suelo y columnas se registraron directa e inmediatamente toda la información perteneciente a la muestra en la COC #43 (Anexo 2).

A continuación, se enlista el contenido de la COC #43:

1. Nombre de la institución y responsable del muestreo.
2. Datos de identificación del sitio.
3. Fecha del muestreo.
4. Claves de las muestras.
5. Nombre del laboratorio que recibe las muestras.
6. Análisis o la determinación requerida.

7. Número de envases.
8. Observaciones.
9. Los registros de campo.
10. La identificación de los muestreadores que participaron en la campaña de muestreo y sus funciones, así como los nombres de las personas que entregaron y recibieron las muestras en cada una de las etapas de transporte, incluyendo fecha, hora y entrega en el laboratorio.

Para el aseguramiento y control de calidad del muestreo se realizaron duplicados de las muestras de suelo superficial cada 5 puntos, en donde la muestra se dividió en dos partes iguales. Se tomó solo un duplicado de muestra de columna.

### **Muestras anexas**

Adicionalmente al plan de muestreo # 43 se realizaron 2 planes de muestreo posteriores, con muestreo a juicio de experto, los cuales se enumeraron como plan de muestreo # 54 y # 62. El plan de muestreo # 54 que tuvo de interés el recolectar 6 muestras adicionales para conocer la salinidad de los suelos, las cuales fueron nombradas S1, S2, S3, S4, S5 y S6. El plan de muestreo # 62 se llevó a cabo para la obtención de muestras verticales (columnas) con el fin de conocer si la concentración de arsénico se infiltra a lo largo del perfil o permanece en superficie, para lo cual se recolectaron 6 columnas adicionales a plan de muestreo # 43, con muestreo cada 10 cm a una profundidad máxima de 60 cm. Las nuevas muestras de columnas se denominaron 6C, 7C, 8C, 9C, 10C y 11C. (Ver cadenas de custodias en Anexo 2).

## **2.1 Determinación de Fertilidad del suelo**

Para determinar los parámetros de fertilidad y salinidad de los suelos se usaron métodos descritos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003) el cual se describen cada uno de ellos a continuación.

### **2.1.1 Fósforo aprovechable P-Olsen**

*Reactivos*

Hidróxido de sodio (NaOH) 1 M

Bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) 0.5 M ajustado a pH 8.5 con NaOH 1 M

Solución de tartrato de antimonio y potasio K(SbO) C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>.1/2 H<sub>2</sub>O al 0.5%

Solución de molibdato de amonio [(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>. 4H<sub>2</sub>O]

Solución reductora con ácido ascórbico

Solución patrón de fósforo (200 mg L<sup>-1</sup>)

### *Material y equipo*

Tubo de polietileno de 100 ml

Papel Whatman No. 42

Agitador mecánico recíproco

Balanza analítica

Matraz volumétrico de 50 ml

Bureta de 10 ml

Espectrofotómetro para leer a 880 nm

Celda de vidrio

### *Procedimiento*

Se pesó 2.5 g de suelo seco y pasado por malla de 2 mm y fue colocado en el tubo de polietileno, se adicionó 50 ml de solución extractora y se llevó a agitación constante reciproca durante 30 min a 180 rpm. Seguidamente se filtró la solución a través del filtro Whatman No. 42. De la solución filtrada se tomo una alícuota de 5 ml y fue colocada dentro del matraz volumétrico de 50 ml y se adicionaron 5 ml de la solución reductora, se agitó manualmente y se aforó a 50 ml. Después de 30 min fue medida con ayuda del Espectrofotómetro a 882 nm y una curva de calibración con patrones de 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mg L<sup>-1</sup> de P.

## **2.1.2 Carbonatos totales**

### *Reactivos*

HCl 1 N

NaOH 1 N



Indicador azul de bromotimol

*Material y equipo*

Matraz Erlenmeyer de 125 ml

Embudo

Bureta de 50 ml

Vaso de precipitado

Pipeta de 25 ml

Papel filtro Whatman #42

Parrilla con agitación magnética y pílora magnética

*Procedimiento*

Se pesó 2.5 g de suelo seco y pasado por malla 2 mm. La muestra de suelo fue colocada dentro del matraz Erlenmeyer de 125 ml y se agregó 50 ml de la solución de HCl. Se procedió a agitación durante 15 min aproximadamente con ayuda de la parrilla magnética. Se dejó reposar por 4 horas y posterior se tomaron 20 ml de solución sobrenadante de la muestra en reposo y se añadieron de 4 gotas de indicador azul bromotimol. Se procedió a la titulación con la solución valorada de NaOH, titulando gota a gota en la solución problema hasta el vire (aparición de coloración azul).

Finalmente se realizaron los cálculos para la obtención del porcentaje de carbonatos totales.

### **2.1.3 Materia orgánica**

*Reactivos*

Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 1 N

Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )

Ácido fosfórico concentrado ( $H_3PO_4$ )

Indicador de difenilamina

Sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 1 M

*Material y equipos*

Matraz Erlenmeyer de 500 ml

Bureta de 50 ml

Pipeta volumétrica de 10 ml

Probeta de vidrio de 25 ml

Lámina de asbesto

### *Procedimiento*

Se pesó 0.5 g de muestra de suelo seca y pasada por malla de 0.5 mm de abertura, se colocó dentro del matraz Erlenmeyer y se adicionaron 10 ml de dicromato de potasio y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado a la suspensión, mezclando de forma manual por un minuto y se dejó reposar la suspensión durante 30 minutos sobre la lámina de asbesto. Transcurrido el tiempo fueron añadidos 200 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico concentrado y se agregaron 5 gotas de indicador difenilamina.

Se procedió a la titulación con la solución valorada de sulfato ferroso hasta obtener el cambio de coloración a verde claro. Se realizaron los cálculos necesarios y se reportó el porcentaje de  $C_{orgánico}$ .

### **2.1.4 Cationes intercambiales**

#### *Reactivos*

Solución de acetato de amonio 1 N a pH ajustado a 7.0

Alcohol etílico

Solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10 %

Solución de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) 1 N a pH ajustado a 7.0

Solución de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) 0.25 N a pH ajustado a 7.0

Indicador mixto. Rojo de metilo y verde de bromocresol

Solución de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) al 2 %

Solución de ácido Clorhídrico (HCl) 0.01 N

Hidróxido de sodio (NaOH) al 40 %

Solución de nitrato de plata ( $AgNO_3$ ) 0.1 N

Solución de lantano ( $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ) acidificada con  $HNO_3$

Solución diluida de lantano acidificada 1:10

Solución de cloruro de cesio (CsCl) acidificada con HNO<sub>3</sub>

Solución de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) 2 M

#### *Material y equipo*

Tubo de centrifuga de 50 ml

Tubo de ensayo

Agitador mecánico

Centrifuga

Matraz Erlenmeyer 125 ml

Matraz volumétrico de 100 ml

Aparato de destilación microkjeldahl

#### *Procedimiento*

Se pesó 5 g de muestra de suelo seca y se pasó por malla de 2 mm, el cual se colocó dentro del tubo de centrífuga y se agregó 33 ml de solución de acetato de amonio. Se tapó y se procedió a agitación durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo de agitación se llevó a centrifugación a 2500 rpm hasta que el sobrenadante presente transparencia. El sobrenadante se decantó en un matraz de 100 ml y se repitió este proceso 2 veces y se aforó con acetato de amonio a 100 ml.

Para la determinación de Ca y Mg intercambiables se pipeteó 0.5 ml de la solución aforada y se añadió 9.5 ml de solución diluida de lantano en un tubo de ensayo y se mezcló de forma manual.

Para la determinación de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> intercambiables se pipeteó 1 ml de la solución aforada, se añadió 1 ml de la solución de cloruro de cesio acidificada y 8 ml de agua desionizada en un tubo de ensayo y se mezcló manualmente.

Finalmente se realizó la medición mediante espectrofotometría de absorción atómica a una longitud de onda de 422.7 nm y 285.2 nm, usando una flama de aire-acetileno.

### **2.1.5 Micronutrientes**

Reactivos

DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaacético), ácido clorhídrico HCl 1:1, trietanolamina, cloruro de calcio dihidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), 1:1 ácido clorhídrico (HCl) 1:1.

Solución patrón de cobre.

Solución estándar de zinc.

Solución estándar de cadmio.

Solución estándar de níquel.

Solución estándar de plomo.

Solución estándar de hierro.

Solución estándar de manganeso.

Acetileno.

### *Material y equipo*

Tamiz de 2 mm de diámetro de apertura y malla de nylon.

Agitador eléctrico de acción recíproca.

Balanza analítica y granataria.

Medidor de pH.

Espectrofotómetro de absorción atómica.

Lámparas de cátodo hueco para cada elemento a determinar.

Filtro Whatman No. 42.

### *Procedimiento*

Se colocó 10 g de suelo seco y se pasó por malla de 2 mm de abertura en un matraz Erlenmeyer de 125 ml y posteriormente se adicionó 20 ml de solución DTPA. Seguidamente se llevó a agitación horizontal durante 2 horas a 120 rpm y con ayuda de un filtro Whatman No. 42 se realizó un filtrado de la solución del suelo.

El extracto obtenido se le realizó la cuantificación por medio de espectrofotómetro de absorción atómica con cada una de las soluciones estándares.

## **2.1.6 Nitrógeno disponible**

### *Reactivos*

Oxido de magnesio

Solución de ácido bórico a pH 5.0

Mezcla de indicadores. Verde de bromocresol y rojo de metilo

Aleación de Devarda (Al:Zn:Cu 10:9:1)

Ácido sulfúrico 0.005 N

Solución patrón de 50 ppm de N-NH<sub>4</sub> y N-NO<sub>3</sub>

Solución de cloruro de potasio 2 N

### *Material y equipo*

Balanza analítica

Matraz de destilación

Destilador con arrastre de vapor

Microbureta de 5 ml

Matraz Erlenmeyer de 125 ml

Agitador de vaivén regulado a 180 rpm

### *Procedimiento*

Se pesó 5 g de muestra de suelo y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 125 ml, seguidamente se adicionó 50 ml de solución de KCl 2 N y se agitó por 60 minutos en el agitador de acción recíproca regulado a 180 rpm y se centrifugó 5 minutos. Se decantó y se filtró con filtro Whatman 42. Posteriormente se agregó 10 ml de solución H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> con indicador en un matraz Erlenmeyer de 125 ml, se pipeteó una alícuota de 10 ml del extracto de suelo y se colocó en un matraz de destilación y se agregó 0.2 g de MgO calcinado y 0.2 g de aleación de Devarda. El aparato de destilación se conectó y se destiló hasta completar 30 ml la muestra se tituló con ácido sulfúrico 0.005 N al igual que los blancos. Finalmente se detuvo la titulación hasta que presentara un color rosa tenue. Se determinó la cantidad de nitrógeno de acuerdo al titulante gastado durante la titulación.

## **2.1.7 pH del suelo**

### *Reactivos*

Agua desionizada

*Material y equipo*

Vaso de precipitado de 50 ml

Medidor de pH

Balanza analítica

Pipeta volumétrica de 20 ml

Varillas de agitación de vidrio

*Procedimiento*

Se pesaron 10 g de suelo seco y pasado por malla de 2 mm y se colocó dentro del vaso de precipitado, seguidamente se adicionó 20 ml de agua desionizada, agitando cada 5 minutos durante 30 minutos la relación suelo:agua, y se dejó reposar por 15 minutos. Finalmente se agitó nuevamente la solución y con ayuda del medidor de pH se realizó la lectura.

### **2.1.8 Salinidad**

*Reactivos*

- Agua destilada
- Solución de hexametáfosfato de sodio al 0.1 % (P/V)

*Material y equipo*

- Embudo Buchner
- Línea de vacío
- Bomba de succión
- Tapón de hule mono-horadado
- Papel filtro Whatman No. 42 o su equivalente
- Matraz kitazato
- Vaso de precipitado de 50 ml
- Tamiz de 2mm

Para la determinación de la salinidad primeramente se realizó la pasta de suelo saturado, tomando 150 g de suelo pretratado y pasado por malla de 2 mm. A la muestra se le adicionó agua destilada hasta saturar al 100 % mezclando contantemente con ayuda de una espátula, hasta que la luz se reflejara en ella y tendiera a unirse la mezcla al ser cortada con una espátula.

Una vez obtenida la pasta saturada se procedió a obtener el extracto, para el cual se usó un filtro Whatman No. 42. Colocándolo en el fondo de un embudo Buhner. Posteriormente, se ajustó el tapón de hule mono-horadado al embudo Buhner y se colocó en un matraz kitazato. Finalmente se sometió a vacío durante 15 minutos para obtener el extracto, el cual fue recolectado con ayuda de un vaso de precipitado de 50 ml para la realización de la lectura de su salinidad con ayuda de un multiparametros de mesa.

### **2.1.9 Densidad aparente**

#### *Material y equipo*

Hilo de algodón

Parafina a punto de fusión (56-60 °C)

Probeta de 10 ml

Termómetro

Balanza analítica

Horno

#### *Procedimiento*

De las muestras de suelo se tomaron de 2 a 3 terrones de 1 cm de diámetro aproximadamente y se llevó a sequedad con ayuda del horno hasta peso constante. Posteriormente se amarró el hilo de algodón al terrón formando una lanzada y fue pesado el terrón junto al hilo de algodón y se anotó como peso del terrón al aire. Seguidamente se sumergió el terrón en la parafina y se retiró rápidamente, este paso se repitió 2 veces verificando que el terrón quedara totalmente cubierto de parafina. El terrón ahora parafinado fue pesado y reportado como el peso del terrón parafinado. Finalmente se agregó 5 ml de agua desionizada a la probeta y se colocó sobre la

---

balanza aforada, el terrón parafinado fue pesado dentro del agua y se reportó el volumen desplazado y el peso del terrón parafinado sumergido.

### **2.1.10 Conductividad hidráulica de muestra de suelo**

#### *Material y equipo*

Permeámetro

Cronometro

Tamiz de 2 mm de abertura

#### *Procedimiento*

El suelo previamente secado se tamizó para obtener agregados de 0.5 a 2 mm de diámetro, los cuales se depositan en permeámetros de 3.8 cm de diámetro por 18 cm de largo con una columna de suelo de 10 cm y se agregó agua a una carga constante.

Por lo tanto, para calcular la conductividad hidráulica se usó la ecuación:

$$CH = QL / TAH$$

Dónde:

CH= Conductividad Hidráulica en cm/hr

Q= Volumen en cm<sup>3</sup> de percolado colectados en un periodo de tiempo

T= Tiempo de percolado (1 hora)

L = Longitud del suelo en la columna o permeámetro en cm

A= Área de la columna de suelo en cm<sup>2</sup>

H= Longitud de la columna de agua desde la superficie de agua por encima del suelo hasta la base del mismo, en cm

### **2.1.11 Distribución textural**

#### *Reactivos*

Peróxido de hidrógeno al 30%

Metasilicato de sodio ajustado a una lectura de 36 g L<sup>-1</sup> de lectura con el hidrómetro

Hexametáfosfato de sodio (calgón)

Alcohol etílico



### *Material y equipo*

Hidrómetro de Bouyoucos con escala de 0-60.

Probetas de 1000 ml.

Agitador con motor para dispersión.

Termómetro de -10 a 110°C.

Horno.

### *Procedimiento*

Para la determinación de la clasificación textural a cada una de las muestras, se les realizó un pretratamiento para la remoción de materia orgánica. Para ello se tomaron 60 g de cada muestra tamizada por malla de 2 mm mencionada en el pretratamiento de la muestra y se sometieron a dos ataques con 40 ml de peróxido de hidrógeno de cada uno. Posterior al primer ataque, se llevó a evaporación total (sequedad) durante 5 horas aproximadamente dentro del horno a una temperatura de 60°C para continuar con el segundo ataque de peróxido de hidrógeno.

Para realizar el ajuste del hidrómetro de Bouyoucos, se preparó una solución de metasilicato de sodio pesando 50 g de metasilicato de sodio y se aforó en 1000 ml de agua destilada. Posteriormente se realizó la lectura con el hidrómetro de Bouyoucos, la cual se ajustaba a 36 mediante la adición de metasilicato de sodio de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003). De igual manera se preparó la solución de hexametáfosfato de sodio usando 50 g de hexametáfosfato de sodio para una solución de 1000 ml.

De cada muestra de suelo libre de materia orgánica se tomaron 50 g y se colocaron en un vaso de precipitado de 1000 ml adicionando agua des-ionizada hasta cubrir la superficie de la muestra a 2 cm por encima de la misma. Posteriormente se adicionaron 5 ml de metasilicato de sodio y 5 ml de hexametáfosfato de sodio, dejándose reposar por un tiempo de 15 minutos. Transcurrido este tiempo y con ayuda de una piceta, la mezcla se sometió a una agitación constante durante 5 minutos. Adicionando agua des-ionizada para cubrir el mínimo requerido para la agitación. Concluida la agitación de cada una de las muestras fue transferida a una probeta de 1000 ml en donde se

recuperó toda la muestra retenida en el vaso del agitador finalmente se aforó la probeta con agua des-ionizada a 1000 ml con el hidrómetro de Bouyoucos dentro.

Este procedimiento se realizó de manera simultánea a 10 muestras por día. Teniendo todas las muestras dispersadas se realizó agitación manual de vertical y horizontal por un tiempo de dos minutos aproximadamente, al término de ese tiempo se inició el conteo de dos horas, tomando la lectura del hidrómetro y de temperatura a los 40 segundos. Las muestras se dejaron reposar por un tiempo de dos horas para realizar nuevamente la lectura del hidrómetro y temperatura.

Finalmente, al paso de 2 h se realizó la lectura del hidrómetro y de la temperatura de las muestras. Los resultados fueron registrados en la bitácora para posteriormente realizar los cálculos que determinan el porcentaje de arcillas, limos y arenas.

Durante la agitación, algunas muestras formaron espuma en la superficie y fue necesario agregar de una a cinco gotas de alcohol etílico para dispersar la espuma para facilitar la lectura del hidrómetro.

## 2.2 Determinación de Índice de Calidad de los Suelos

Para la obtención del índice de calidad de suelo, se realizó un promedio ponderado de acuerdo a la proporción de aportación de cada indicador o parámetro. Posteriormente se normalizaron los indicadores con respecto a valores mínimos y máximos de cada parámetro, utilizando una escala 0-1, los cuales representan la peor y mejor condición de calidad siendo 0 la peor y 1 la mejor.

Los valores de los indicadores o parámetros medidos ( $I_m$ ) se normalizaron de acuerdo a las expresiones matemáticas 1 y 2 en función de si el valor máximo corresponde a un valor beneficioso o perjudicial a la calidad del suelo, respectivamente (Cantú et al., 2009; Prieto-Méndez et al., 2013);

$$V_n = \frac{I_m - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (1)$$

$$V_n = 1 - \left( \frac{I_m - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \right) \quad (2)$$

Donde:

$V_n$ = Valor normalizado

$I_m$ = Medida del indicador

$I_{max}$ = Valor máximo del indicador

$I_{min}$ = Valor mínimo del indicador

Los valores máximos y mínimos (Tabla 1) corresponden al conjunto de las muestras, exceptuando los indicadores o parámetros de pH y salinidad, los cuales se utilizaron criterios teóricos reportados para suelos dedicados al cultivo de maíz (*Zea mays*) (Castellanos et al., 2000). El valor mínimo de pH fue establecido considerando el punto de toxicidad para el desarrollo del cultivo de maíz (*Zea mays*) (pH de 6.0) y el máximo de calidad correspondió al pH que en mayores cuantías puede considerarse como apto (pH de 7.4) para el cultivo de maíz (*Zea mays*) (Castellanos et al., 2000). Para la salinidad se consideró un valor mínimo de acuerdo al promedio medido en muestras de la zona de estudio ( $2.2 \text{ dS m}^{-1}$ ) y el valor máximo utilizado se consideró el valor altamente salino para el cultivo de maíz (*Zea mays*) ( $16 \text{ dS m}^{-1}$ ) de acuerdo a Castellanos (2000).

Tabla 1. Indicadores utilizados para la evaluación de calidad de suelos (ICS).

Indicador	Unidades			
		$I_{min}$	$I_{max}$	Fuente
<b>pH</b>		6	7.4	(Castellanos et al., 2000)
<b>Materia Orgánica</b>	%	2.06	7.98	(Este estudio)
<b>Carbonatos Totales</b>	%	23	36.3	(Este estudio)
<b>Salinidad</b>	dS/m	2.24	16	(Castellanos et al., 2000)
<b>Densidad Aparente</b>	g/cc	0.86	1.02	(Este estudio)
Arena	%	6.92	48.92	(Este estudio)
Arcilla	%	1.08	51.08	(Este estudio)
Limo	%	10	88	(Este estudio)
<b>Conductividad Hidráulica</b>	cm/h	1.3	3.2	(Este estudio)
<b>P-Olsen</b>	ppm	5.01	54.9	(Este estudio)
<b>N-NO3</b>	ppm	5.05	489	(Este estudio)
<b>CIC Total</b>	meq/100g	30.2	87.2	(Este estudio)

Finalmente, para determinar el índice de calidad de cada muestra de suelo se realizó el cálculo del promedio de todos los valores normalizados de los parámetros, determinando un único valor para cada muestra (ICS). El valor final se denominó índice

de calidad del suelo (ICS) y fue clasificado de acuerdo la tabla de clasificación reportada por Cantú et al., (2009) (Tabla 2).

*Tabla 2. Escala y clases de calidad de suelo según Cantú (2009).*

Índice de calidad de suelos (ICS)	Escala	Clase
Muy alta calidad	0.80 - 1.00	1
Alta calidad	0.60 - 0.79	2
Moderada calidad	0.40 - 0.59	3
Baja calidad	0.20 - 0.39	4
Muy baja calidad	0.00 - 0.19	5

## 2.3 Determinación de fases mayoritarias

La mineralogía de muestras de suelo se determinó mediante difracción de rayos X (DRX) utilizando un difractómetro de rayos X SmartLAB Rigaku, el cual cuenta con un generador de rayos X de Cobre (35kV, 25mA), un detector de alta velocidad “D/teX Ultra”. Además, cuenta con accesorios para la realización de SAXS (Small Angle X-ray Scattering), así como también se usó el software para la interpretación de datos: X’pert. Las muestras fueron medidas en escaneos con pasos de  $0.02^\circ$  2theta y una velocidad de escaneo de  $1.00^\circ$  por minuto en una ventana de 5 a 90 grados 2theta, con un límite de detección de 5 % del total de muestra.

Del total de muestras recolectadas y secadas a temperatura ambiente, se tomó una alícuota de 1 g pasada por malla de 2 mm y se pulverizó con mortero de ágata, posteriormente se procedió a colocar la muestra de suelo en la base porta muestra y se procedió a emitir la radiación de rayos X. Los valores obtenidos (Difractogramas) fueron procesados en el software X’pert (PANalytical, 2004) empatando los resultados con la base de datos PDF-2 (2003).

## 2.4 Determinación de arsénico

### 2.4.1 Determinación de arsénico total

Para la determinación de metales es común el uso de digestiones ácidas. La digestión ácida es un método de extracción que ayuda a la disgregación de las estructuras cristalinas del suelo, hecho que permite la determinación de la cantidad total de los

elementos presentes en una muestra. Para este tipo de técnica se usan diferentes ácidos que ayudan a la disgregación, como es el ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y fluorhídrico (HF) (Montolio et al., 2005; Salazar, 2017).

#### *Reactivos*

ácido fluorhídrico (HF)

Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>)

Ácido clorhídrico (HCl)

Agua desionizada

#### *Material y equipo*

Matraz volumétrico de 25 ml

Viales de teflón

Micropipeta 100-1000 µl

Filtro Whatman 40

Placa de calentamiento

#### *Procedimiento*

##### *Digestión ácida de elementos totales en placa*

Para la estimación de arsénico se aplicó una digestión ácida de elementos totales en placa con el propósito de obtener un sobrenadante para analizar mediante la técnica de espectrofotometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES). El procedimiento es el siguiente: se pesó 0.1 g de suelo seco al ambiente y fue pasado por malla de 2 mm, se sometió en mortero de ágata y se colocó en viales de teflón, posteriormente se añadió 1 ml de ácido fluorhídrico (HF) y 1 ml de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), dejando en reflujo por 8 h a una temperatura de 100°C. Transcurrido el tiempo se llevó a evaporación a 100°C hasta alcanzar sequedad total. A continuación, se añadió 1 ml de ácido clorhídrico (HCl) para re-disolver y nuevamente se llevó a evaporación a 100°C hasta alcanzar sequedad total. Tras finalizar el secado de la muestra se añadió nuevamente 1 ml de HNO<sub>3</sub> y 1 ml de agua desionizada para re-disolver y dejar en reflujo por 6 h a 100°C. Transcurrido el tiempo, se dejó enfriar a

temperatura ambiente filtrando la solución con filtro Whatman 40 y finalmente se aforó en matraz volumétrico de 25 ml (Salazar, 2017).

#### **2.4.2 Determinación de arsénico soluble**

Para la determinación de arsénico soluble, se realizó la extracción de solubles con agua de equilibrio de acuerdo a lo descrito en la NOM-147-SEMARNAT\_SSA1-2004 (DOF, 2007).

##### *Reactivos*

Agua desionizada

CO<sub>2</sub>

HNO<sub>3</sub>

##### *Material y equipo*

Desecador con sílica gel

Unidad de filtración de acero inoxidable con membrana de 0.45 µm

Vaso de precipitado de 1000 ml

Medidor de pH

Agitador orbital

Centrifuga

##### *Procedimiento*

###### *Obtención de solubles*

Para la obtención de elementos solubles del suelo se tomó 1 g de muestra de suelo previamente secada a temperatura ambiente y pasada por malla 2 mm. Se preparó agua meteórica burbujeando agua desionizada con CO<sub>2</sub> hasta obtener un pH de  $\leq 5.5$ , posteriormente se adiciono 40 ml de agua meteórica a la muestra de suelo y se llevó a agitación durante 16 h a temperatura ambiente con ayuda del agitador orbital a 300 rpm. Concluido el tiempo la suspensión se centrifugó durante 20 min 3000 rpm. El sobrenadante se filtró a través de una membrana de 0.45 µm, se acidificó a un pH  $\leq 2$  con HNO<sub>3</sub> y se almacenaron a 4 °C para posteriormente realizar análisis de ICP-OES.

En esta prueba se espera que la extracción química extraiga la fracción de As que se encuentra asociada a yeso y a la calcita que se disuelven a pH de 5.5 (Ruíz-Huerta et al., 2017).

### **2.4.3 Determinación analítica de arsénico por ICP-OES**

Para la determinación de arsénico, el sobrenadante que se obtuvo posterior de la digestión ácida y de la extracción de solubles con agua meteórica, fueron llevados al Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LAMBAMA). En donde se realizó análisis elemental, teniendo como interés principal el arsénico (As) mediante espectrofotometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) (EPA, 1994). La curva de calibración ronda en el rango de 0.05-20 mg Kg<sup>-1</sup> en donde se mostró buena linealidad ( $r = 0.999$ ,  $n = 6$ ). El límite de detección fue de 0.10 mg kg<sup>-1</sup>. La validación de la determinación de arsénico total se verificó utilizando materiales de referencia certificados (NIST SRM 2711). No hubo diferencias significativas ( $P = 0.05$ ) entre los valores medidos y los certificados para el contenido As total en los materiales analizados. Los resultados del análisis se discutirán más adelante.

### **2.4.4 Fluorescencia de rayos X**

El análisis elemental de columnas de suelo se realizó mediante el método 6200 USEPA "Espectrometría de fluorescencia de rayos X portátil de campo para la determinación de concentraciones elementales en el suelo y los sedimentos" usando el equipo de Fluorescencia de rayos X con tubos miniaturizados ThermoScientific Niton XLt3 (Gutiérrez et al., 2010; USEPA-6200, 2007).

Se analizaron los estándares NIST 2711, 2710 y 2709 para la determinación de exactitud, precisión y límite de cuantificación del método, se reportan los elementos con recuperación del 90 +/- 10%. El límite de detección se realizó en base al análisis de un blanco de polvo de sílica certificado. Para la cuantificación de elementos fue necesario secar las muestras a temperatura ambiente y fueron pasadas por malla de 2 mm, posteriormente se tomó 1 g de muestra y fue pulverizada con mortero de ágata. Finalmente se sometieron a la cuantificación por Fluorescencia de rayos X.

## 2.5 Análisis estadístico multivariante

Para el análisis estadístico se llevó a cabo primeramente estadísticos básicos (descriptivos), determinando valores máximos, mínimos, promedios y desviación estándar. Posteriormente se realizó una matriz de correlación determinada mediante Pearson. La matriz de correlación de Pearson se calculó para medir y establecer la relación entre dos variables o parámetros. Este coeficiente de correlación es muy utilizado en el análisis multivariante, simplificando el cálculo de las matrices de varianzas y covarianzas (Hair Jr et al., 1990). Para realizar el análisis de correlación se realizó las variables correspondientes a fertilidad, arsénico total, y mineralogía.

El análisis de componentes principales es una técnica muy usada para describir un conjunto de datos de muestras en términos de nuevas variables denominadas componentes, los cuales se ordenan por la cantidad de varianza que describen. Esta técnica es muy útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos.

Lo que respecta al análisis de componentes principales (PCA), se utilizaron los mismos parámetros antes mencionados, los cuales fueron normalizados de acuerdo a log 10 determinando de acuerdo a distancias euclidianas y se contemplaron los vectores más largos que representaran una contribución a la variación de las muestras, para describir el conjunto de parámetros en términos de componentes no correlacionados. Los componentes se ordenaron por la cantidad de varianza original que describen, por lo cual esta técnica estadística fue útil para reducir el número de variables originales que aportan variación en el conjunto de muestras (Tuya et al., 2007).

Finalmente, para el análisis clúster, el cual, si bien es útil cuando la cantidad de muestreo es mayor y ayuda a realizar la agrupación de estas de acuerdo características similares que poseen las muestras (Pedroza and Dicovskyi, 2007), el uso del análisis de dendograma permitió realizar una buena agrupación, en el cual se realizó un buen empate con el análisis de componentes principales. Por lo cual el análisis clúster en este estudio fungió como un análisis que corroboró la agrupación obtenido mediante el análisis PCA, el cual permitió clasificar las muestras en conglomerados que mostraron homogeneidad entre ellos.



Para este análisis de componentes principales y análisis clúster se usó el software MVSP (2013) versión 3.22, lo que respecta al análisis básico descriptivo y correlación de Pearson se determinaron mediante el software OriginPro, (2015).

Cabe señalar que para el análisis de la matriz de correlación por Pearson el criterio utilizado fue de un índice mayor de 0.5, por lo cual, los valores iguales o mayores a 0.5 fueron determinados como correlacionados, dicho valor de índice fue considerado para el análisis de PCA, los cuales representaban una contribución a cada componente estudiado.

## 2.6 Estimación de conductividad hidráulica

### 2.6.1 Resistividad eléctrica de muestra de suelo en laboratorio

La metodología consiste en tomar una muestra de suelo y dividirla en pequeñas sub-muestras, las cuales son saturadas con soluciones de NaCl a diferentes concentraciones, entre 0.6 a 70 g L<sup>-1</sup> en resistivímetros similares y calibrados. El resultado final del proceso de medición es una curva de resistividad eléctrica en función de la salinidad del agua de poro  $\rho(C)$ , que será posteriormente utilizada en un proceso de interpretación iterativa para la obtención de parámetros petrofísicos del suelo, entre ellos, contenido de finos (Delgado et al., 2012).

A continuación, se explica en detalle este procedimiento.

#### *Reactivos*

Solución de cloruro de sodio NaCl a 5 g L<sup>-1</sup>

Solución de cloruro de sodio NaCl a 10 g L<sup>-1</sup>

Solución de cloruro de sodio NaCl a 20 g L<sup>-1</sup>

Solución de cloruro de sodio NaCl a 30 g L<sup>-1</sup>

Solución de cloruro de sodio NaCl a 60 g L<sup>-1</sup>

#### *Material y equipo*

Medidor de puesta a tierra o terrimeter Saturn Geo LEM

Termómetro

Juego (5) de resistivímetros (soil-box) para mediciones eléctricas de suelo

Espátula

Vaso de precipitado 50 ml

#### *Procedimiento*

##### *Preparación de las muestras de suelo, soluciones y resistivímetros.*

Se prepararon soluciones de diferentes concentraciones de NaCl con el objetivo de saturar los diferentes resistivímetros debido al antecedente sobre el sitio en lo que respecta a la alta salinización de suelo y agua, se prepararon soluciones de alta o muy alta concentración de NaCl (entre 5 y 60 g L<sup>-1</sup>), ya que la aportación de sales del suelo al agua impide obtener mediciones de resistividad del suelo para baja salinidad del

agua de poro (Figura 18). Los valores de salinidad de las soluciones se ubicaron en escala logarítmica lo más cercano a equidistantes, garantizando una apropiada modelación de la curva de  $\rho(C)$ . Estas soluciones fueron preparadas con ayuda de un multiparámetro de mesa, cloruro de sodio (NaCl) y agua desionizada.

De acuerdo al origen de los suelos se realizó la selección de salmueras de alta concentración de NaCl. Como se muestra en la Figura 18, los rectángulos negros representan el comportamiento de las salmueras, que serían las ideales si el suelo no aportara una fracción significativa de sal. Debido al origen de las muestras, tomando de referencia un suelo que aporta  $5 \text{ g L}^{-1}$  el comportamiento sería como se muestra en los triángulos rojos, es por ello que se decidió utilizar aguas altas en sales para que no representara mucho cambio el aporte del suelo, como se muestra en las estrellas azules.

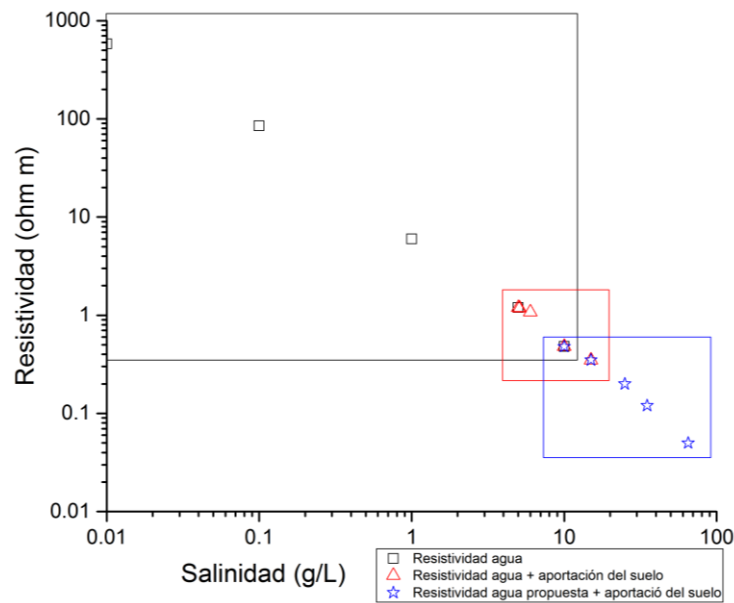


Figura 18. Selección de concentración de salinidades de las soluciones

Para obtener mediciones de resistividad de la muestra es necesario utilizar un dispositivo llamado resistímetro (Figura 19), el cual consiste en un recipiente plástico compuesto por 3 pares de electrodos de los cuales, un par (A y B) sirve para la inyección de corriente eléctrica y los otros dos (M1, N1, M2, N2) para obtener dos mediciones de potencial; y con esto, obtener un valor promedio de la resistividad eléctrica de la muestra.

Cada resistivímetro fue previamente calibrado a un nivel de llenado, utilizando diferentes soluciones de resistividad eléctrica conocida, por lo que a cada resistivímetro le corresponde dos valores de calibración K (constante geométrica del arreglo), uno para el par de electrodos de medición  $M_1N_1$  y otro para el par  $M_2N_2$ , dando como resultados dos valores de resistividad eléctrica del suelo, de los cuales su valor promedio estará menos afectado por errores instrumentales o de homogenización de la muestra.

#### *Realización de mediciones eléctricas*

Para hacer las mediciones se colocaron cinco porciones iguales de la muestra de suelo pasadas por tamiz de  $\frac{1}{4}$ " en el interior de cinco resistivímetros llenándolos hasta su nivel de calibración, lo que corresponde aproximadamente a 250 g de suelo. Una vez que se llenaron los resistivímetros con las sub-muestras de suelo, se saturaron al 110% con las soluciones de NaCl previamente preparadas. Es importante mencionar que para obtener valores representativos de la muestra con diferentes salinidades; fue necesario esperar a que los procesos físico-químicos que ocurren en el fluido incorporado y la formación se estabilicen. El tiempo promedio en que ocurren dichos procesos es de 1 hora. Seguidamente a esto se recolectó el 10% de la solución sobrante en el vaso de precipitado. La solución colectada por cada contenedor fue determinada nuevamente su salinidad con ayuda de un multiparámetro de mesa y fueron tomados esos valores de salinidad (aportación de sal del suelo + salinidad de la salmuera) como los reales.

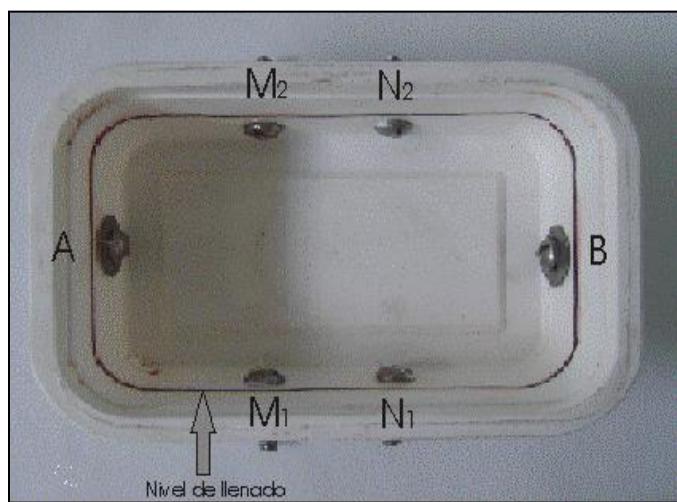


Figura 19. Resistivímetro de suelo soil-box.

Posteriormente, con ayuda de un equipo de resistividad o terrímetro, se inyectó una corriente ( $I$ ) a través de los electrodos A y B y se midió el potencial ( $\Delta U$ ) entre los electrodos M y N. En el presente trabajo se utilizó un terrímetro Saturn Geo LEM (Fluke), en posición cuatro polos (AMNB), dando directamente el valor de resistencia eléctrica ( $R$ , Ohm) como el cociente  $\Delta U/I$ . Por lo que, de acuerdo al diseño del resistivímetro explicado anteriormente, se obtuvo un valor de  $R$  y un valor de  $\rho(C)$  para cada par de electrodos MN. Los valores de resistividad fueron corregidos a una temperatura de referencia. Por ejemplo, para el par de electrodos  $M_1N_1$  del resistivímetro 1, el valor de resistividad corregido a 20 °C se calculó mediante la expresión:

$$\rho_{M_1N_1} = K_{M_1N_1} * R_{M_1N_1} * (1 + 0.0177 \cdot (T - T_0)) \quad (1)$$

Donde:

$\rho_{M_1N_1}$ =resistividad eléctrica entre los electrodos  $M_1$  y  $N_1$

$K_{M_1N_1}$ = coeficiente geométrico del resistivímetro para los electrodos  $M_1$  y  $N_1$

$R_{M_1N_1}$ = diferencia de potencial registrada en los electrodos  $M_1$  y  $N_1$

$I$ = corriente inyectada a través de los electrodos A y B

$T$ = temperatura de la muestra.

$T_0$ = temperatura de referencia igual a 20°C.

De igual manera, se obtuvo para ese mismo resistivímetro un valor  $\rho_{M_2N_2}$  para el par de electrodos  $M_2N_2$ , los cuales promediados dieron el valor  $\rho_1(c_1)$ . Este proceso se repitió para cada resistivímetro dando como resultados un juego de cinco valores de  $\rho_{1-5}(c_{1-5})$ , mismo que será utilizado en el proceso de modelación petrofísica (Delgado et al., 2012).

## 2.6.2 Resistividad eléctrica de los suelos en campo

Para medir la resistividad eléctrica del suelo directamente en campo, se utilizó un equipo de resistividad eléctrica “Terrímetro de 4 puntas” y un dispositivo conformado por cuatro electrodos AMNB, donde se inyectó corriente ( $I$ , mA) al suelo por los

electrodos A y B y se midió la diferencia de potencial ( $\Delta U$ , mV) por los electrodos MN. La distancia mutua entre los electrodos en contacto con el suelo definió un factor de corrección geométrica que convierte los valores de resistencia (Ohm) dado por el cociente  $\Delta U/I$  en valores de resistividad aparente  $\rho_a$ , (Ohm m), siendo utilizado este parámetro para caracterizar al suelo (Orellana, 1982). La resistividad determinada fue la resistividad aparente debido a que es característica no necesariamente de un tipo litológico o capa geoelectrica, sino del todo el paquete del medio geológico por donde circula la corriente inyectada.

La resistividad aparente es calculada mediante la ecuación:

$$\rho_a = R \cdot k \quad (2)$$

Donde:

$\rho_a$  = Resistividad aparente (Ohm. m)

k= Constante geométrica del dispositivo (m)

R= Resistencia (Ohm.) =  $\Delta U/I$

$\Delta U$  = Diferencial de potencial (mV)

I= Corriente (mA)

Los dispositivos electródicos utilizados para realizar calicatas eléctricas fueron Schlumberger y Wenner. Con la ecuación (2) se determina la resistividad aparente  $\rho_a$  y no la resistividad verdadera  $\rho$  que caracteriza a un estrato u horizonte geoelectrico. Sin embargo, estudios de columnas de suelo en el sitio indican la existencia de un espesor máximo del suelo en el ejido entre 60 y 70 cm, por lo que, si el dispositivo eléctrico utilizado garantiza una profundidad de estudio máxima igual o inferior a estos espesores, los valores de  $\rho_a$  del suelo serán iguales o muy similares a los valores de  $\rho$  del suelo. En el presente trabajo, se realizaron dos mediciones de resistividad aparente: una utilizando un arreglo Wenner  $A_1MNB_1$  (Figura 20), garantizando una profundidad de estudio de 30 cm y una segunda medición para una profundidad de estudio de 60 m, utilizando el arreglo Schlumberger  $A_2MNB_2$  (Figura 20), siendo que los valores de  $\rho_a$  obtenidos con el arreglo Wenner mostrarían las variaciones laterales de la resistividad real del suelo para el horizonte superior, más alterado por la actividad agrícola, mientras que los valores de  $\rho_a$  obtenidos con el arreglo Schlumberger estaría

influenciado por todo el espesor del suelo, incluyendo el horizonte inferior más compacto y menos alterado. Por lo anterior y en lo subsecuente, se denominará los valores de  $\rho_a$  como valores de  $\rho$  del suelo.

Los valores de  $\rho_a \approx \rho$  serán utilizados para construir mapas que permitan visualizar las variaciones laterales de este parámetro del suelo en el área de estudio para dos profundidades o espesores del suelo agrícola, el primero 30 cm, lo que corresponde al horizonte más alterado por la actividad de arado ligado al uso del suelo, la segunda 60 cm, donde se incluye la parte de suelo menos alterada y cercana a su sustrato rocoso. La zona de estudio fue dividida en dos porciones, zona norte y zona sur, realizando las mediciones en una red de 25 x 25 m para cada parcela agrícola del ejido en ambas porciones. Una zona central no fue estudiada por falta de acceso debido a la existencia de cultivos sensible a daño; de igual manera en esta porción central no existen muestreos de suelo. Para realizar las mediciones de perfilaje eléctrico se utilizó el equipo terrimeter Saturn Geo LEM, con configuración de 4 polos.

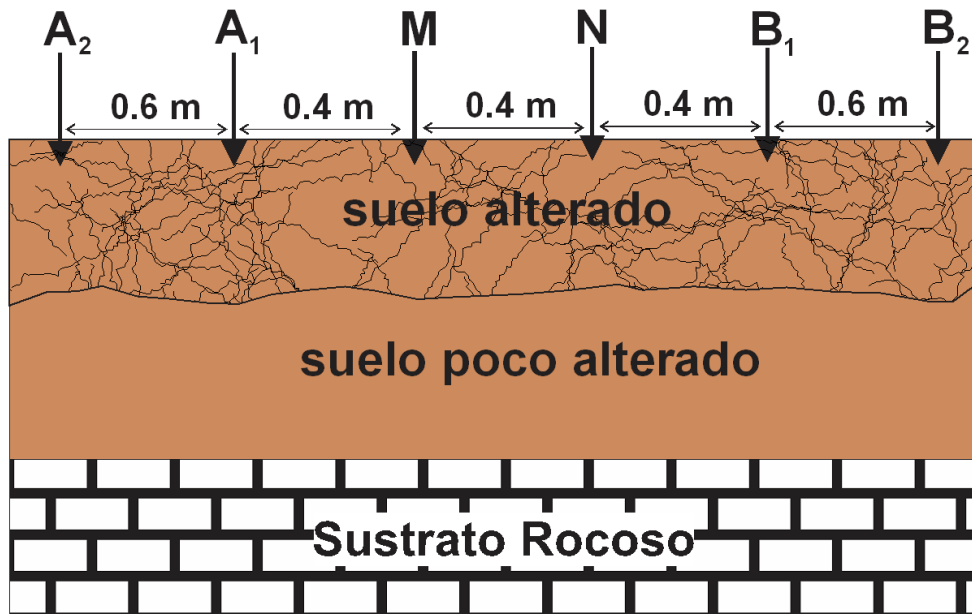


Figura 20. Configuraciones Wenner (A1MNB1) y Schlumberger (A2MNB2) utilizadas en el presente estudio para la determinación de la resistividad eléctrica del suelo agrícola.

### 2.6.3 Humedad de los suelos en campo

#### *Material y equipos*

Medidor de humedad de suelo

### *Procedimiento*

Para la medición de humedad en campo se realizó junto con las mediciones de campo de resistividad eléctrica por lo cual, se realizaron las mediciones en una red de 25 x 25 m para cada parcela agrícola del ejido. Para realizar la medición fue necesario colocar el electrodo a una profundidad de 30 cm y se procedió a leer el porcentaje de saturación de humedad.

#### **2.6.4 Estimación de porcentaje de finos**

A lo largo del tiempo, se han desarrollado numerosos modelos petrofísicos para la industria petrolera (Archie, 1941; Clavier et al., 1984; Waxman and Smits L., 1968) y para suelos areno-arcillosos (Rhoades et al., 1976; Ryjov, 1987; Ryjov and Sudoplatov, 1990; Tabbagh et al., 2002). Sin embargo, el fundamento teórico que se mostrará a continuación corresponde al modelo petrofísico de suelo areno-arcilloso desarrollado por A. Ryjov en el periodo 1984-1990 (Ryjov, 1987; Ryjov and Shevnin, 2002; Ryjov and Sudoplatov, 1990). El modelo desarrollado consiste en un medio poroso heterogéneo compuesto por granos de arena y partículas de arcilla. Los poros de la arena están conformados por un sistema de canales cilíndricos mejor conocidos como “poros anchos” con un radio de  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  m, de mayor tamaño que el espesor de la Doble Capa Eléctrica (DCE), cuyo espesor depende de la salinidad del agua contenida en los poros, aumentando dicho espesor con la disminución de la concentración de sal.

El rango de espesor de la DCE es de  $0.3^{-3} \times 10^{-8}$  m cuando la concentración de sal varía entre 0.02 y 2 (g L<sup>-1</sup>). Por otro lado, los microporos de la arcilla, con radios entre  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  m, son más pequeños que el espesor de la DCE. En el modelo, las paredes de ambos capilares (arenas y arcillas) son considerados como no conductoras y son caracterizadas por parámetros electroquímicos como la DCE y la CIC. Los poros pueden estar o no saturados. Las propiedades eléctricas de la mezcla de arena-arcilla son definidas por la conductividad efectiva de ambos sistemas capilares y las interconexiones entre estas redes de poros (Anexo 3).



Una vez definida las características del modelo teórico es posible calcular una gráfica con las curvas teóricas del comportamiento de la resistividad de los diferentes suelos, según la mezcla entre finos y arenas, con respecto a la salinidad del agua de poro. Como ejemplo, en la Figura 21 se muestra el juego de curvas teóricas del comportamiento de los suelos para un modelo teórico definido por muchos factores, entre ellos, radio de poro de arena =  $10^{-4}$  m; radio de poro de arcilla =  $10^{-8}$  m, CIC de la componente arcilla igual a  $3 \text{ g L}^{-1}$ , una porosidad de las componentes arcilla y arena de 55 y 25 %, respectivamente, una saturación total del suelo y una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Podemos observar que en la parte superior de la Figura 21 existe la curva representativa de la arena pura; es decir, 100% arena, 0% arcilla; en la parte baja de la figura encontramos la curva que representa a la arcilla (100 % arcilla, 0 % arena). Otra observación en la Figura 21 es para la curva que representa 0 % arcilla (curva de arena pura), la cual es casi recta y es paralela a la curva que representa la resistividad del agua contenida en los poros, mostrando que la arena no tiene efecto de DCE ni de CIC, siendo su resistividad de tipo electrolítica, es decir, muy dependiente de la

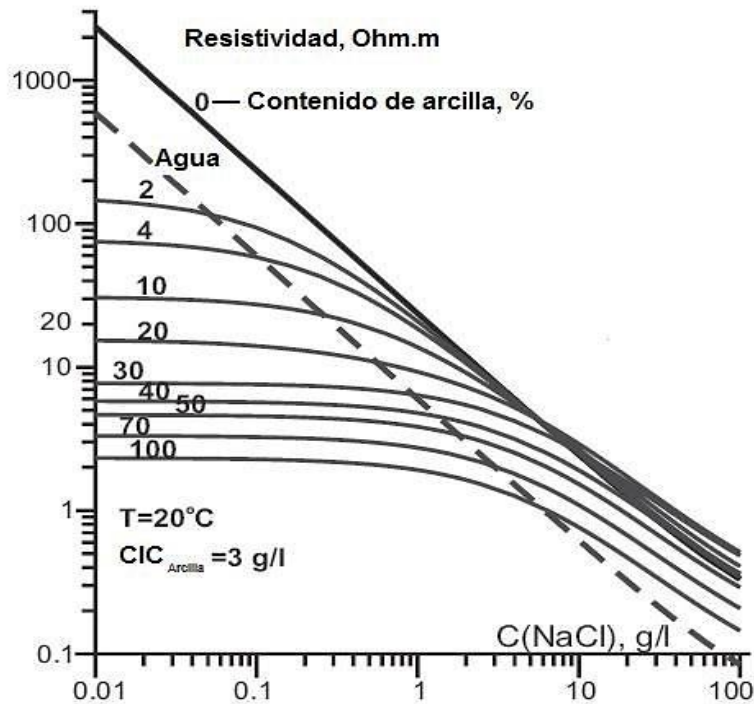


Figura 21. Modelo que representa las curvas teóricas de resistividad contra salinidad de agua contenida en los poros para diferente contenido de arcilla en suelos areno-arcillosos.

resistividad del agua. El comportamiento no lineal de las curvas de suelos con arcilla es debido a la influencia de la DCE y la CIC, existiendo en este caso una componente de resistividad superficial que es cada vez más predominante mientras mayor sea el contenido de arcilla.

La Figura 22 muestra la dependencia teórica entre la porosidad y el contenido de arcilla para el modelo de la Figura 21. Observamos que la curva comienza con una porosidad equivalente al 25 %, (porosidad de la arena) y es mínima cuando el contenido de arcilla es igual a la porosidad de la arena; es decir, la arcilla ha cubierto los poros de la arena; posteriormente se incrementa hasta el valor que representa la porosidad de la arcilla (55 %); por lo que la parte izquierda de la Figura 22 es influenciada por la porosidad de la arena y la parte derecha por el contenido de arcilla y la porosidad de la misma. Después de obtener los valores de resistividad, se realizó un proceso de ajuste entre los datos teóricos y los datos obtenidos en laboratorio. Para este proceso se recurrió al programa PetroWin (Rylov and Sudoplatov, 1990). El proceso consistió en modificar los parámetros petrofísicos tales como: radios capilares, porosidades y CIC para cada uno de los componentes de la muestra; es decir, para arcilla y arena, hasta obtener el ajuste deseado entre datos teóricos y experimentales. Se asumió una humedad de 100 % en las mediciones de laboratorio puesto que la muestra fue saturada con salmueras conocidas. Del mismo modo, los valores estimados de finos fueron validados con resultados de textura obtenidos en el apartado 3.1, para realizar un mejor ajuste entre muestras.

Finalmente, el modelo de resistividad presentó la relación existente entre los valores de resistividad y el grado de mineralización del agua contenida en los poros de la muestra. Con ayuda de este procedimiento fue posible calcular parámetros petrofísicos como: contenido de arcilla, porosidad y CIC.

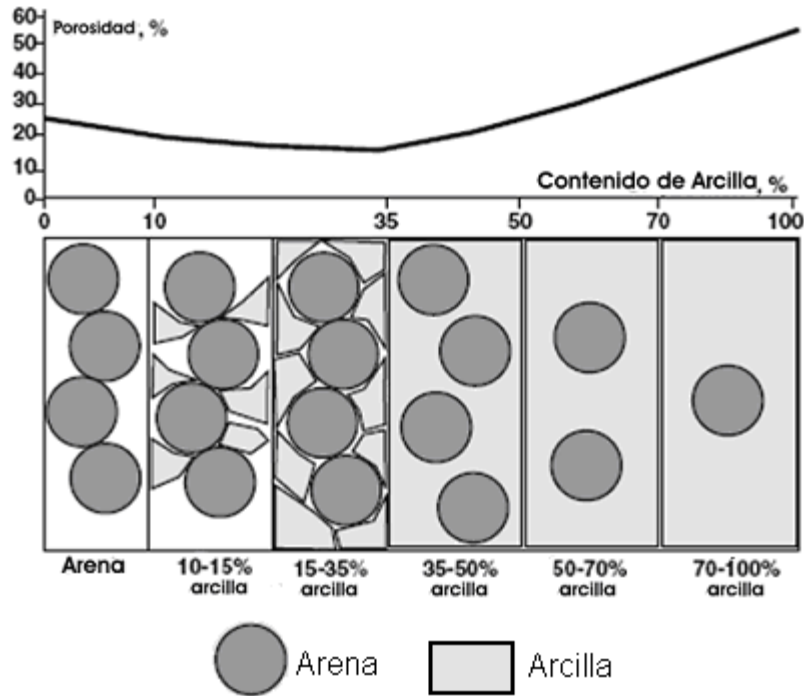


Figura 22. Curva que representa la relación entre la porosidad del suelo y el contenido de arcilla para la Figura 23.

### 2.6.5 Estimación de conductividad hidráulica a partir de porcentaje de finos

Para estimar la conductividad hidráulica se han desarrollado expresiones matemáticas que permiten calcular matemáticamente la velocidad de infiltración de agua de un suelo con respecto al porcentaje de material fino que lo constituye. Existen para dos diferentes casos, una para suelos que su porcentaje de arcilla es mayor al porcentaje de limos y otra para suelos que presentan mayor porcentaje de limos que de arcillas. De acuerdo a la literatura la expresión matemática utilizada cuando se presentan suelos con valores de arcilla >35% se aplica la expresión siguiente (Shevvin et al., 2006);

$$K_f = C^{-2.7} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \quad (A)$$

Para el caso en donde se presenta mayor aportación de limos se utilizará la expresión desarrollada por Delgado-Rodríguez et al., (2011) la cual expresa;

$$K_f = (C^{-1.62}) \cdot 0.101176 \quad (B)$$

Donde

$K_f$  = Conductividad hidráulica ( $m \text{ día}^{-1}$ )

C= Contenido de finos (%)

De acuerdo a lo sugerido se consideró que, si el contenido de limo es  $\geq 30\%$  y el contenido de arcilla  $<35\%$ , el uso de la ecuación (B) para estimar la conductividad hidráulica del suelo ( $K_f$ ) y en caso de cumplir esta condición se hizo uso de la ecuación (A).

# CAPÍTULO III. Resultados y discusión

## Caracterización geoquímica

### 3.1 Clasificación del suelo y análisis de su calidad

La Tabla 3 presenta los valores obtenidos de los análisis químicos realizados a las muestras de suelo. Podemos observar que los valores de pH se encuentran entre 7.6 y 7.95 con un valor promedio de 7.86, de este modo, los suelos pueden clasificarse como suelos medianamente alcalinos (DOF, 2003).

La zona de estudio se encuentra clasificada como suelo ócrico (<2 % de materia orgánica). Sin embargo, los valores de materia orgánica correspondientes a las muestras de suelo se encuentran entre 2 % y 7.98 %, teniendo como un valor promedio de la zona de 4.53 % de materia orgánica la cual le otorga una clasificación muy cercana de suelo orgánico ( $\geq 5$  %) (DOF, 2003). Este resultado es confirmado en los valores de densidad aparente determinados en el rango  $0.86 \text{ g cc}^{-1}$  y  $1.02 \text{ g cc}^{-1}$ , con un valor promedio de  $0.96 \text{ g cc}^{-1}$ , por debajo del valor de  $1 \text{ g cc}^{-1}$ , siendo nuevamente clasificado de acuerdo a la normativa mexicana como un suelo orgánico.

De acuerdo al material parental del cual se originaron los suelos era de esperarse presencia de carbonatos. La Tabla 3 muestra valores de carbonatos totales entre 23 % y 36.3 %, con un valor promedio de 29.19 %, siendo este alto de acuerdo a la normativa mexicana (DOF, 2003).

La presencia de sales solubles en los suelos áridos es muy común, debido a la evaporación del agua contenida en los suelos; tal es el caso en la zona de estudio, en donde se midieron valores desde 6.98 dS/m hasta 26.8 dS/m, con un valor promedio de 6.98 dS/m que, clasificándose, de acuerdo a la normativa mexicana, como suelos salinos (DOF, 2003).

La determinación de textura se realizó mediante el método del tacto y mediante el método de Bouyoucos, en donde cualitativamente se pueden clasificar como suelos francos con tendencia limosa. Cuantitativamente, los valores de arena que varían entre 6.92 % y 48.92 % con un promedio de 18.99 %, los valores de las arcillas varían entre 1.08 % y 51.08 % con un promedio de 2.84 % y finalmente con valores de limo varían entre 10 % y 88 % con promedio de 58.17 %. En respuesta a los porcentajes elevados

de material fino se puede observar una conductividad hidráulica baja, con valores de  $1.3 \text{ cm h}^{-1}$  hasta  $3.2 \text{ cm h}^{-1}$ , con un valor promedio de  $2.31 \text{ cm h}^{-1}$  que, de acuerdo a la clasificación de Cisneros (2010), representa una conductividad hidráulica relativamente lenta. Cabe mencionar que esta textura se determinó en muestras de suelo, que sirvieron para ajustar los valores de modelación petrofísica para la determinación de modelos teóricos que más adelante serán analizados.

La Figura 23a presenta los resultados correspondientes a macronutrientes y micronutrientes. Los valores de materia orgánica se encuentran entre 7.6 % y 7.95 % con un valor promedio de 7.86 %. Para los macronutrientes se puede observar que el fósforo extraíble se encuentra entre valores 5.01 ppm y 54.9 ppm con un valor promedio de 22.76 ppm, clasificándose como fósforo medio (Fertilab®, 2016); el potasio ( $\text{K}^+$ ) con valores entre 435 ppm y 998 ppm, con un promedio de 769.14 ppm, es clasificado como alto; para el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), los valores varían entre 5, 308 ppm y 14, 259 ppm, con un valor promedio de 8, 212.64 ppm, y es clasificado como muy alto; el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), con valores entre 218 ppm y 902 ppm, con un valor promedio de 382.5 ppm, se clasifica en suficiencia media; el sodio ( $\text{Na}^+$ ), con valores en el rango de 24.5 ppm a 2, 328 ppm y un valor promedio de 342.9 ppm, se considera como suficiencia moderadamente baja; para el azufre (S), los valores varían entre 112 ppm y 11, 069 ppm, con un promedio de 2, 658.79 ppm, clasificándose con suficiencia muy alta; y por último, los valores de nitratos se encuentran entre 5.05 ppm y 489 ppm alcanzando un valor promedio de 97.39 ppm, mostrando una suficiencia alta (Fertilab®, 2016).

En lo que se refiere a los micronutrientes, la concentración de hierro (Fe) varía entre 0.87 ppm y 5.71 ppm, con un promedio de 2.41 ppm, siendo clasificado con una suficiencia muy baja; para el zinc (Zn) los valores se encuentran entre 0.16 ppm y 2.69 ppm, con valor promedio de 1.02 ppm, siendo clasificado con suficiencia moderadamente baja; los valores de manganeso se encuentran entre 1.14 ppm y 6.8 ppm, con un valor promedio de 3.2 ppm, lo que lo clasifica con una eficiencia baja; el cobre (Cu) se encuentra entre 0.77 ppm y 1.2 ppm con un valor promedio de 0.97 ppm, clasificándolo en una suficiencia media; y por último, los valores de boro (B) varían

---

entre 0.72 ppm y 1.79 ppm, con valor promedio de 1.4 ppm, teniendo una suficiencia media de acuerdo a la clasificación de Fertilab® (2016).

Figura 23b presenta los valores de capacidad de intercambio catiónico total, así como los porcentajes de saturación de cada catión. La primera barra (morada) muestra el porcentaje de saturación de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que varía entre 77.41 % y 92.6 %, con un valor promedio de 86.08 %, lo que, de acuerdo a la clasificación de Fertilab® (2016), presenta una suficiencia muy alta con respecto al total de las muestras (Figura 23 inciso b). Los valores de porcentaje de saturación de magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) varían entre 4.67 % y 8.51 %, con un valor promedio de 6.61 %, clasificándose con una suficiencia moderadamente baja (primera barra amarilla). Los valores correspondientes a potasio ( $\text{K}^+$ ) se encuentran entre valores de 1.71 % y 7.8 %, con un valor promedio de 4.13 %, el cual se clasifica con una suficiencia moderadamente alta (barra roja). Para los valores de sodio ( $\text{Na}^+$ ), estos se encuentran entre 0.34 % y 11.58 %, con un promedio de 3.2 %, y se clasifica en una suficiencia moderadamente baja (segunda barra amarilla). Finalmente, los valores de CIC total oscilan entre 30.2 meq/100g y 87.2 meq/100g, con un promedio de 47.61 meq/100g, y se clasifican con una suficiencia alta de CIC (Fertilab®, 2016).

Con base a los resultados obtenidos de fertilidad, se puede decir que los suelos de la región se encuentran en rangos de suficiencia adecuados, exceptuando el Fe y Mn que se encuentran en valores muy bajos y bajos, respectivamente (Figura 25a). De acuerdo a la CIC, la materia orgánica y el fósforo, los suelos tiene condiciones adecuadas para el desarrollo de cultivos y cuentan con los nutrientes necesarios para una agricultura eficiente, aunado a esto, la textura de los suelos se encuentra en valores adecuados, ya que, como se mencionó anteriormente, se definen como suelos francos con tendencia a limosos; dicha textura permite el desarrollo y extensión de las raíces y por lo tanto del desarrollo del cultivo. De acuerdo a Venegas (1993), el pH de los suelos es significativamente distinto a los valores óptimos deseables para el cultivo de maíz (*Zea mays*) de 5.6 y 7.1.

Lo que respecta a la densidad aparente se presentan valores entre  $0.86 \text{ g cc}^{-1}$  y  $1.02 \text{ g cc}^{-1}$  con un valor promedio de  $0.95 \text{ g cc}^{-1}$  los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003) como suelos orgánicos.

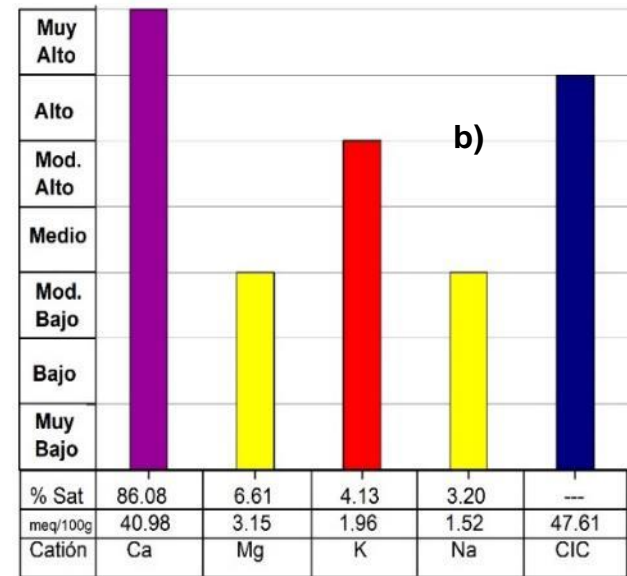


Tabla 3. Parámetro de pH, materia orgánica, carbonatos totales, salinidad, densidad aparente, conductividad hidráulica, textura, macronutrientes, micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico, promedio, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo de muestras de suelo agrícola.

	Muestra														Prom	D.Estandar	Min	Max
	1	2	4	6	7	8	10	11	13	14	16	17	23	42				
<b>pH</b>	7.8	7.83	7.95	7.87	7.92	7.93	7.87	7.92	7.87	7.87	7.81	7.89	7.6	7.85	7.86	0.09	7.6	7.95
<b>M. orgánica (%)</b>	2.06	6.71	7.98	5.01	5.37	4.67	4.65	2.92	3.68	3.85	4.41	3.85	3.53	4.79	4.53	1.49	2.06	7.98
<b>C. Totales (%)</b>	36.3	27.8	31.4	30.2	31.4	23	30.2	35.1	29	24.2	26.6	24.2	29	30.2	29.2	3.87	23	36.3
<b>Salinidad (dS/m)</b>	13.1	5.2	2.24	4.68	4.87	5.44	5.69	3.53	4.63	4.72	5.2	5.69	26.8	5.94	6.98	6.19	2.24	26.8
<b>D. Aparente (g/cc)</b>	1.02	0.94	0.86	0.93	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.91	0.97	0.92	0.96	0.96	0.95	0.04	0.86	1.02
<b>Textura</b>	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
<b>Arena (%)</b>	11	18	15	7	9	7	14	12	13	14	49	38	17	7	19	13.08	6.92	48.9
<b>Arcilla (%)</b>	4	6	46	54	35	6	24	47	43	41	1	2	7	5	22.8	19.99	1.08	51.0
<b>Limo (%)</b>	84	75	38	38	55	86	61	41	44	45	50	60	76	88	58.1	22.31	10	88
<b>C. Hidráulica (cm/h)</b>	1.3	1.3	1.3	2.2	2.8	2.8	3.2	2.5	2.9	2.5	2.8	2.6	1.3	2.8	2.31	0.70	1.3	3.2
<b>P-Olsen (ppm)</b>	5.01	54.9	32.6	22.5	18.7	19.6	23	14.7	12.2	18.7	23.4	19.6	37.6	16.1	22.7	12.21	5.01	54.9
<b>N-NO3 (ppm)</b>	489	68.3	105	55	6.54	19.1	118	10.8	5.11	93.8	20.7	222	145	5.05	97.3	129	5.05	489
<b>K (ppm)</b>	737	873	998	778	837	435	864	684	628	723	886	922	848	555	769	153	435	998
<b>Ca (ppm)</b>	14259	5668	5543	5918	7779	12043	6879	5308	6781	6141	7469	6482	13530	11177	8212	3131	5308	14259
<b>Mg (ppm)</b>	612	252	287	300	387	368	367	218	308	300	355	293	902	406	382	176	218	902
<b>Na (ppm)</b>	1136	68.7	24.5	85.4	126	140	178	24.7	144	77.3	136	101	2328	231	342	635	24.5	2328
<b>Fe (ppm)</b>	1.77	4.12	3.11	1.69	1.82	5.71	2.34	1.81	2.2	2	1.82	1.8	0.87	2.7	2.41	1.22	0.87	5.71
<b>Zn (ppm)</b>	0.16	2.69	2.32	0.7	0.77	0.6	1.15	0.56	0.4	0.83	1.15	0.89	1.56	0.52	1.02	0.72	0.16	2.69
<b>Mn (ppm)</b>	1.14	3.52	6.8	2.82	3.65	3.11	5.17	2.51	2.28	2.35	3.23	3.61	1.72	2.86	3.20	1.42	1.14	6.8
<b>Cu (ppm)</b>	1.09	1.19	0.98	0.77	0.87	1.2	1.19	0.84	0.78	0.94	0.98	1	0.83	0.98	0.97	0.15	0.77	1.2
<b>B (ppm)</b>	0.72	1.6	1.77	1.79	1.57	1.36	1.26	1.19	1.08	1.6	1.17	1.62	1.72	1.16	1.40	0.31	0.72	1.79
<b>S (ppm)</b>	4956	756	112	683	1275	11069	1018	430	1269	715	2055	593	8327	3965	2658	3325	112	11069
<b>CIC Total (meq/100g)</b>	83.1	32.9	32.7	34.4	44.7	64.9	40.3	30.2	38.6	35.3	43.1	37.5	87.2	61.6	47.6	18.92	30.2	87.2
<b>Ca (%)</b>	85.68	86.02	84.71	85.76	86.80	92.60	85.11	87.75	87.56	86.69	86.54	86.13	77.41	90.58	86.0	3.35	77.41	92.60
<b>Mg (%)</b>	6.06	6.29	7.22	7.18	7.11	4.67	7.49	5.93	6.58	7.00	6.77	6.43	8.51	5.42	6.61	0.94	4.67	8.51
<b>K (%)</b>	2.27	6.78	7.80	5.78	4.79	1.71	5.48	5.79	4.17	5.24	5.27	6.29	2.49	2.31	4.13	1.88	1.71	7.80
<b>Na (%)</b>	5.94	0.91	0.34	1.08	1.23	0.94	1.91	0.36	1.63	0.96	1.37	1.17	11.58	1.62	3.2	3.02	0.34	11.5

Det.	Result	Unid	Muy Bajo	Bajo	Mod. Bajo	Medio	Mod. Alto	Alto	Muy Alto
MO	4.53	%	[Barra púrpura que cubre todos los niveles de suficiencia]						
P-Olsen	22.76	ppm	[Barra verde que cubre hasta Medio]						
K	769	ppm	[Barra azul que cubre hasta Alto]						
Ca	8213	ppm	[Barra púrpura que cubre todos los niveles de suficiencia]						
Mg	382	ppm	[Barra verde que cubre hasta Medio]						
Na	343	ppm	[Barra amarilla que cubre hasta Mod. Bajo]						
Fe	2.41	ppm	[Barra roja que cubre hasta Muy Bajo]						
Zn	1.02	ppm	[Barra amarilla que cubre hasta Mod. Bajo]						
Mn	3.2	ppm	[Barra naranja que cubre hasta Bajo]						
Cu	0.97	ppm	[Barra verde que cubre hasta Medio]						
B	1.4	ppm	[Barra verde que cubre hasta Medio]						
S	2659	ppm	[Barra púrpura que cubre todos los niveles de suficiencia]						
N-NO3	97.39	ppm	[Barra azul que cubre hasta Alto]						

a)



b)

Figura 23. Valores de suficiencia de muestras de suelo agr3cola. a) Materia org3nica, macronutrientes y micronutrientes. b) Capacidad de Intercambio Cati3nico.

De la evaluación de los índices de calidad de los suelos y de acuerdo al número de indicadores mínimos que se sugieren (Cantú et al., 2009) y los valores normalizados; el indicador que presentó el menor valor para las muestras fue la arena (0.29) mientras que el mayor correspondió a la salinidad (0.70), seguido del limo (0.62), densidad aparente (0.57) y la conductividad hidráulica (0.53) (Tabla 4).

Tabla 4. Indicadores e índices de calidad del suelo (ICS) por muestras.

Indicador	Valores de ICS por determinaciones														ICS
	1	2	4	5	7	8	10	11	13	14	16	17	23	42	Promedio parámetro
<b>pH</b>	0.29	0.31	0.39	0.34	0.37	0.38	0.34	0.37	0.34	0.34	0.29	0.35	0.14	0.32	<b>0.33</b>
<b>Materia Orgánica</b>	0.00	0.79	1.00	0.50	0.56	0.44	0.44	0.15	0.27	0.30	0.40	0.30	0.25	0.46	<b>0.42</b>
<b>Carbonatos Totales</b>	1.00	0.36	0.63	0.54	0.63	0.00	0.54	0.91	0.45	0.09	0.27	0.09	0.45	0.54	<b>0.47</b>
<b>Salinidad</b>	0.15	0.77	1.00	0.81	0.79	0.75	0.73	0.90	0.81	0.81	0.77	0.73	0.00	0.85	<b>0.70</b>
<b>Densidad Aparente</b>	1.00	0.50	0.00	0.44	0.75	0.75	0.69	0.63	0.63	0.31	0.69	0.38	0.63	0.63	<b>0.57</b>
Arena	0.11	0.27	0.20	0.76	0.06	0.01	0.18	0.13	0.14	0.17	1.00	0.74	0.24	0.00	<b>0.29</b>
Arcilla	0.06	0.10	0.90	1.00	0.68	0.10	0.46	0.92	0.84	0.80	0.00	0.02	0.12	0.08	<b>0.44</b>
Limo	0.95	0.84	0.36	0.00	0.58	0.98	0.66	0.39	0.44	0.45	0.51	0.64	0.85	1.00	<b>0.62</b>
<b>Conductividad Hidráulica</b>	0.00	0.00	0.00	0.47	0.79	0.79	1.00	0.63	0.84	0.63	0.79	0.68	0.00	0.79	<b>0.53</b>
<b>P-Olsen</b>	0.00	1.00	0.55	0.35	0.27	0.29	0.36	0.19	0.14	0.27	0.37	0.29	0.65	0.22	<b>0.36</b>
<b>N-NO3</b>	0.00	0.87	0.79	0.90	0.06	0.56	0.77	0.23	0.00	0.82	0.63	0.55	0.71	0.00	<b>0.49</b>
<b>CIC Total</b>	0.93	0.05	0.04	0.07	0.25	0.61	0.18	0.00	0.15	0.09	0.23	0.13	1.00	0.55	<b>0.31</b>
<b>ICS Promedio muestra</b>	<b>0.37</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.51</b>	<b>0.48</b>	<b>0.47</b>	<b>0.53</b>	<b>0.45</b>	<b>0.42</b>	<b>0.42</b>	<b>0.50</b>	<b>0.41</b>	<b>0.42</b>	<b>0.45</b>	<b>0.46</b>

Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en 5 clases de calidad del suelo (Tabla 2) que va de 1 a 5, siendo 5 la ponderación de muy baja calidad y 1 muy alta calidad, de acuerdo a lo propuesto por Cantú et al., (2009).

De acuerdo a la clasificación que propone Cantú et al., (2009) el promedio del indicador de arena presenta un valor de 0.29, la CIC se encuentra en un valor promedio de 0.31, el pH, en promedio, presenta un valor de 0.33 y el fósforo aprovechable (P-Olsen) de 0.36, clasificándose estos indicadores como de baja calidad (clase 4). Para el caso de la MO presenta valor promedio de 0.42, seguido de la arcilla con un valor de 0.44, el valor de los carbonatos totales presenta un promedio de 0.47, los nitratos de 0.49, la conductividad hidráulica se encuentra en un valor de 0.53, densidad aparente con 0.57,

el promedio del limo en 0.62 y finalmente el valor promedio de salinidad de 0.70, los cuales se clasifica en la clase 3 de moderada calidad.

La Figura 24 presenta de manera espacial la distribución de los promedios de los índices de calidad de cada uno de los suelos de acuerdo a sus indicadores, clasificando 13 muestras en moderada calidad y una muestra en baja calidad. La muestra 1 que corresponde a baja calidad se justifica debido a que la zona donde se realizó el levantamiento pertenece a un predio domestico en el cual no se realizan actividades agrícolas, por lo cual presenta baja calidad a diferencia del resto de las muestras analizadas.

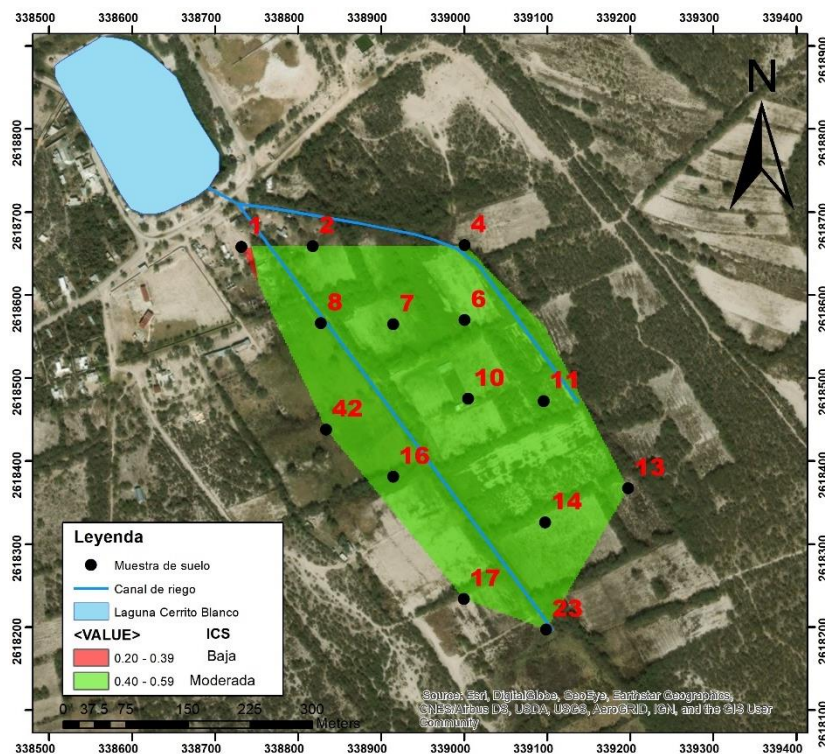


Figura 24. Distribución espacial de la calidad de los suelos de acuerdo a los ICS calculados.

De acuerdo a estos resultados, los suelos provenientes de la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco presentan una moderada calidad, por lo cual pueden ser capaces de sostener el crecimiento de cultivos de maíz (*Zea mays*), de acuerdo a los indicadores contemplados para el ICS. No obstante, la presencia de arsénico presenta toxicidad en las plantas lo que produce baja germinación de semillas, reducción en el crecimiento de las raíces, y deficiencias nutricionales en las plantas que no permiten

sobrevivir a altas concentraciones, como efecto de ello pueden mostrar clorosis y reducciones en crecimiento (Mascher et al., 2002; Ruíz-Huerta et al., 2017).

### **3.2 Identificación de fases minerales mayoritarias en las muestras de suelo**

El análisis de DRX dio como resultado que todas las muestras de suelo superficial están compuestas mayormente por calcita, cuarzo y albita rica en calcio. En general, las muestras de suelos presentan gran correspondencia a los estándares de cuarzo calcita, algunas muestras presentan alguna similitud entre ellas como se observa en la Figura 26. Este predominio se fundamenta en el material parental de los suelos como se mencionó en el Capítulo I, ya que los suelos derivan de rocas sedimentarias, como lo son caliza, lutita y areniscas. De este modo, la predominancia de calcita y cuarzo eran lo esperado en este estudio.

De acuerdo a lo reportado en la carta edafológica F-14-A-25 (INEGI, 1972). la clasificación de los suelos en el área de estudio pertenece a calcisoles, dicha información pudo corroborarse de acuerdo a los resultados observados en las Figura 25, en donde los suelos provenientes del ejido Cerrito Blanco presentan una predominancia en calcita. Esta característica es habitual en ambientes áridos y semiáridos, ya que con frecuencia son asociados con materiales parentales altamente calcáreos (FAO, 2007).

Como se puede apreciar en la Figura 25, en las muestras 1, 2, 8, 10, 16, 17, 23 y 42 se encuentra presencia de yeso, las cuales se les denominó grupo A, y las muestras restantes conforman el grupo B. Como se ha mencionado anteriormente, en el ejido Cerrito Blanco se ha reportado presencia de suelos gípsicos (INEGI, 1972).

Casi todos los minerales procedentes de las rocas, de las que procede el suelo de estudio (material parental sedimentario), se presentan en el suelo en las fracciones arena y limo. Del cual, la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) son los más abundantes. De acuerdo a la serie de estabilidad mineral de Goldich (Buol et al., 2003), la albita se encuentra en una estabilidad baja y presenta un grado alto de meteorización. El grupo mineral de los feldespatos, al cual pertenece la albita se encuentra asociado a un

tamaño de partícula de limo, mientras que el yeso se encuentra asociado a un tamaño de partícula entre limo y arcilla, y finalmente la calcita se asocia a un tamaño de partícula arcillosa.

De esta forma, en la Figura 26 se presenta la distribución textural y la distribución espacial de las muestras en donde, los círculos rosas representan las muestras que muestran mayor porcentaje de tamaño de partícula arcillosa, la cual está asociada a la calcita, y los círculos azules presentan mayor porcentaje de tamaño de partícula limosa la cual se encuentra asociada a los yesos.

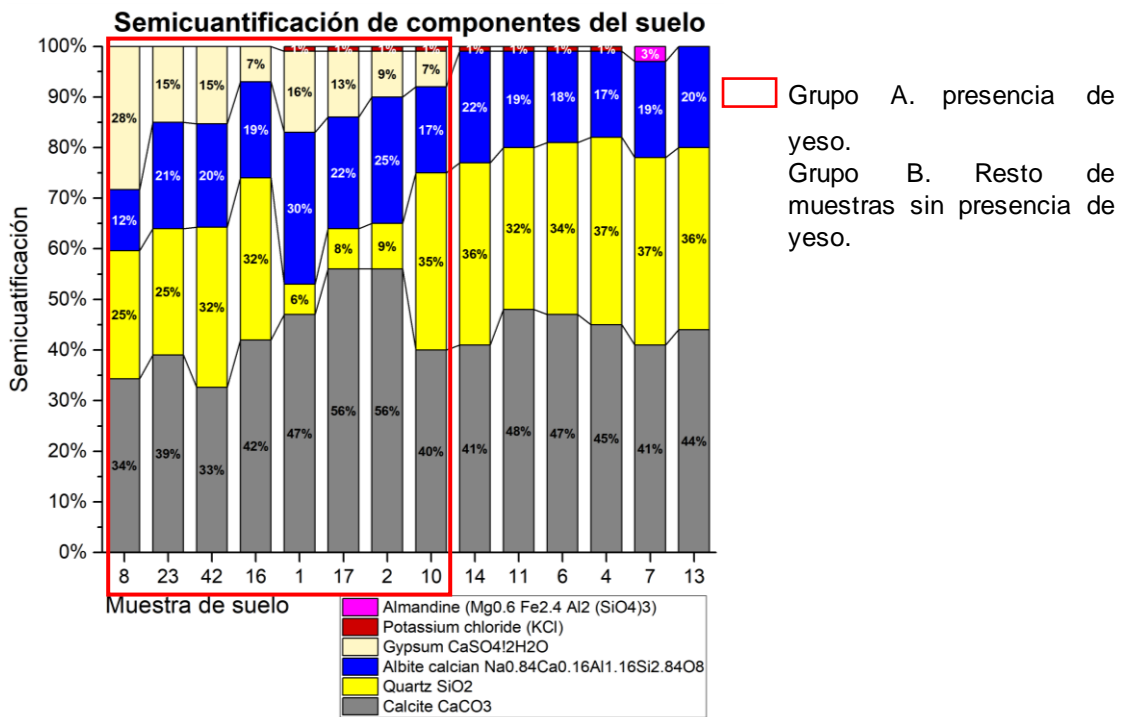


Figura 25. Semi-cuantificación de difracción de rayos X.



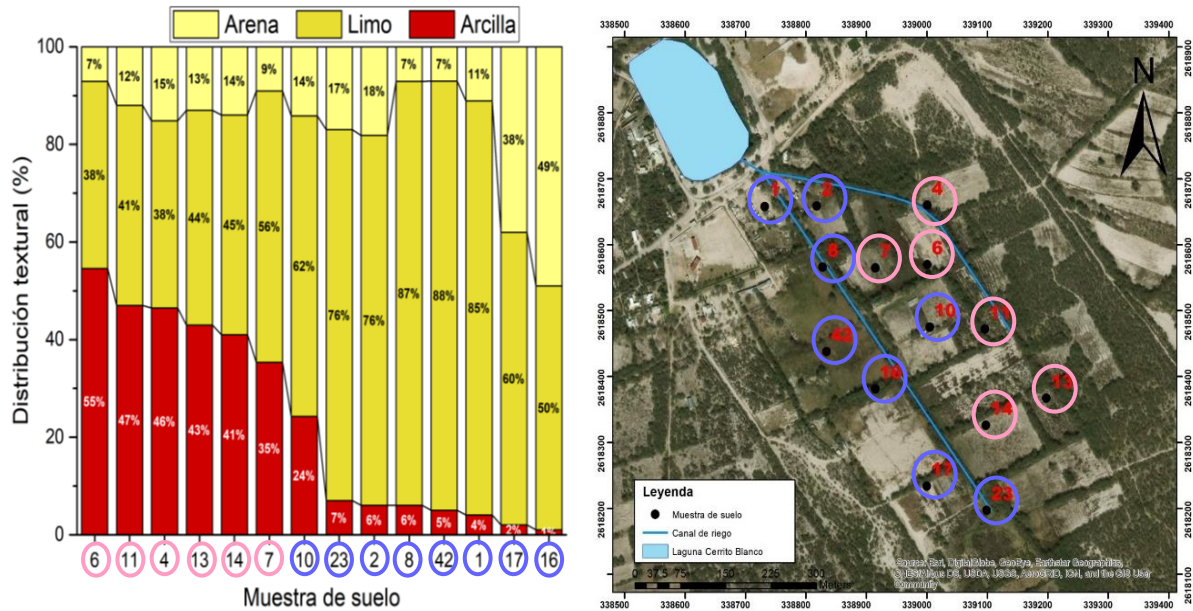


Figura 26. Relación entre textura y mineralogía.

### 3.3 Concentración de arsénico total en muestras de suelo superficial

La Figura 27 muestra las concentraciones de arsénico total en suelo superficial. Los valores de las concentraciones varían entre 8.03 mg Kg<sup>-1</sup> y 185.37 mg Kg<sup>-1</sup> (Anexo 4). El 94 % de las muestras exceden el valor máximo permitido por la NOM-147-SEMARNAT\_SSA1-2004 (DOF, 2007) y rebasan el valor de fondo (Chiprés et al., 2008) demostrando el enriquecimiento de los suelos con arsénico. Se presentaron dos muestras dentro del valor de fondo reportado por Chiprés et al., (2008), las muestras de suelo 12 y 43 presentan las concentraciones más bajas, 8.1 mg Kg<sup>-1</sup> y 12 mg Kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Sólo estas dos muestras, representando un 6 % del total de muestras analizadas, se encuentran por debajo del valor máximo establecido por la normativa mexicana, considerándose, por lo tanto, como no contaminadas. Muy probablemente debido a que las parcelas en el extremo noreste del área de estudio no han sido irrigadas con agua proveniente de la laguna de Cerrito Blanco. Las concentraciones que se encuentran por encima de los valores de fondo se catalogaron como contaminadas y/o enriquecidas con arsénico.

En la Figura 27 se presentan la distribución espacial de las concentraciones de arsénico total, en donde se observa mayor concentración de arsénico (zonas rojas,

Figura 27) en dos zonas ubicadas en la porción norte del área de estudio y una zona ubicada en la porción sur. Si se toma en cuenta que la fuente de contaminación es el agua de riego con altos niveles de As, entonces, el régimen de riego y las características del suelo en cada parcela deberían ser factores fundamentales en la distribución y concentración del contaminante. Aparte de los dos canales principales de irrigación (líneas azules, Figura 27), una red de canales secundarios es utilizados para conducir el agua a cada una de las parcelas del sitio. Como se aprecia en la Figura 27, las muestras 12 y 43 no presentan valores que exceden la normativa (zona azul).

Por lo cual, de acuerdo a los valores obtenidos, se considera que la zona agrícola en general se encuentra contaminada por arsénico, teniendo concentraciones de hasta  $185 \text{ mg Kg}^{-1}$ , excediendo 7 veces más el valor máximo permisible de acuerdo a la normativa mexicana y 4 veces más que los valores de fondo del sitio.

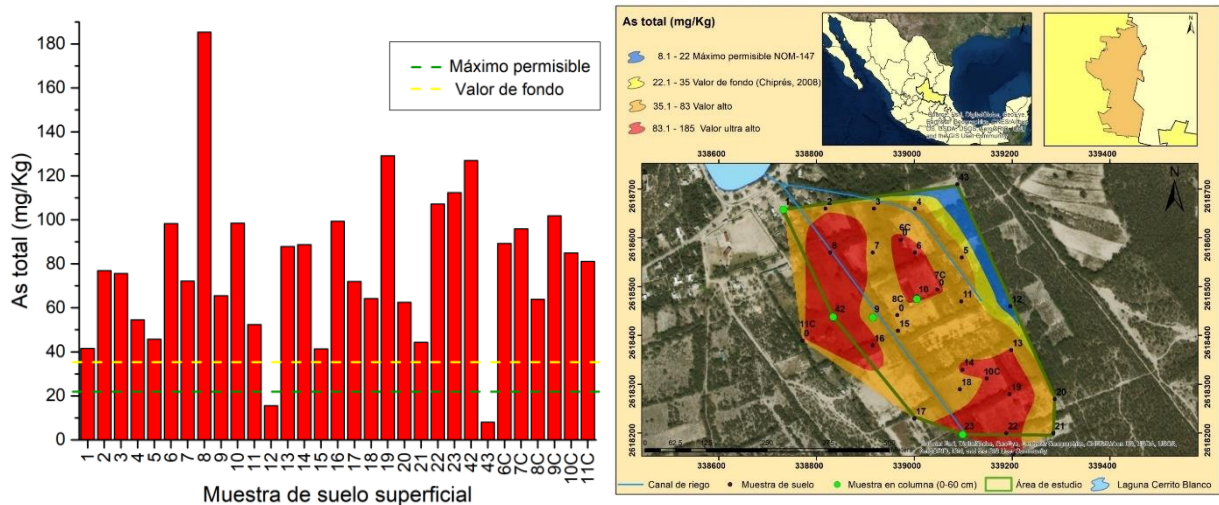


Figura 27. Concentración de arsénico y distribución espacial de valores de arsénico en campos de cultivo perteneciente a Cerrito Blanco, Matehuala, S.L.P.

### 3.4 Análisis estadístico multivariante

La homogeneidad y/o heterogeneidad del sitio de muestreo se investigó a través de un análisis clúster y de componentes principales con los resultados de pH, fósforo aprovechable, concentración de sales, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, porcentaje de arena, limo y arcillas, concentración de arsénico total, concentración de nitratos, porcentaje de calcita, cuarzo, albita cálcica y yeso.



En la Tabla 5, se muestran los parámetros utilizados en el análisis clúster y de componentes principales, en los cuales se presentan las características propias de las muestras suelo del ejido Cerrito Blanco.

Tabla 5. Características de las muestras de suelo.

Determinación	Muestra de suelo													
	1	2	4	6	7	8	10	11	13	14	16	17	23	42
<b>pH</b>	7.8	7.8	8.0	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.8	7.9	7.6	7.9
<b>P-Olsen</b> (ppm)	5	55	33	23	19	20	23	15	12	19	23	20	38	16
<b>Salinidad</b> (dS/m)	13.1	5.2	2.2	4.7	4.9	5.4	5.7	3.5	4.6	4.7	5.2	5.7	26.8	5.9
<b>CIC</b> meq/100g)	83	33	33	34	45	65	40	30	39	35	43	38	87	62
<b>MO</b> (%)	2	7	8	5	5	5	5	3	4	4	4	4	4	5
<b>ARENA</b> (%)	11	18	15	7	9	7	14	12	13	14	49	38	17	7
<b>LIMO</b> (%)	84	75	38	38	55	86	61	41	44	45	50	60	76	88
<b>ARCILLA</b> (%)	4	6	46	54	35	6	24	47	43	41	1	2	7	5
<b>As total</b> (%)	42	77	55	98	72	185	99	52	88	89	99	72	112	127
<b>N-NO3</b> (ppm)	489	68	105	55	7	19	118	11	5	94	21	222	145	5
<b>Calcite</b> (%)	47	56	45	47	41	34	40	48	44	41	42	56	39	33
<b>Quartz</b> (%)	6	9	45	34	37	25	35	32	36	36	32	8	25	32
<b>Albite calcian</b> (%)	30	25	17	18	19	12	17	19	20	22	19	22	21	20
<b>Gypsum</b> (%)	16	9	0	0	0	28	7	0	0	0	7	13	15	15

La Tabla 6 muestra la matriz de correlación donde los valores más cercanos a 1 ( $>0.8$ ) representan los parámetros más positivamente correlacionados, mientras que los valores  $\geq 0.5$  y  $<0.8$  son moderadamente correlacionados y valores  $< 0.5$  los que mostraban baja correlación.

Del análisis de correlación se observa que existe una correlación entre la capacidad de intercambio catiónica y la salinidad (0.81), así como una relación inversa entre la salinidad y el pH (-0.92). Los yesos presentan una correlación alta con el tamaño de partícula de limo (0.71) y con el arsénico total (0.79).

Tabla 6. Matriz de correlación de características de las muestras de suelo mediante Pearson.

	pH	P-Olsen	Salinidad	CIC	MO	ARENA	LIMO	ARCILLA	As total	N-NO3	Calcite	Quartz	Albite calcian	Gypsum
<b>pH</b>	<b>1.00</b>													
<b>P-Olsen</b>	-0.30	<b>1.00</b>												
<b>Salinidad</b>	<b>-0.92</b>	0.17	<b>1.00</b>											
<b>CIC</b>	<b>-0.66</b>	-0.16	<b>0.81</b>	<b>1.00</b>										
<b>MO</b>	0.35	<b>0.65</b>	-0.40	-0.44	<b>1.00</b>									
<b>ARENA</b>	-0.14	0.02	-0.01	-0.15	-0.11	<b>1.00</b>								
<b>LIMO</b>	-0.38	0.07	0.46	<b>0.75</b>	-0.19	-0.20	<b>1.00</b>							
<b>ARCILLA</b>	0.48	-0.17	-0.43	<b>-0.62</b>	0.18	-0.34	-	<b>1.00</b>						
<b>As total</b>	-0.09	0.06	0.10	0.31	0.05	-0.13	0.45	-0.35	<b>1.00</b>					
<b>N-NO3</b>	-0.30	-0.22	0.41	0.49	-0.41	0.10	0.33	-0.32	-0.44	<b>1.00</b>				
<b>Calcite</b>	0.11	<b>0.57</b>	-0.23	<b>-0.58</b>	0.38	0.23	-0.36	0.18	-0.33	-0.25	<b>1.00</b>			
<b>Quartz</b>	0.32	<b>-0.51</b>	-0.26	-0.20	0.03	-0.07	<b>-0.55</b>	<b>0.59</b>	-0.03	-0.36	-0.26	<b>1.00</b>		
<b>Albite calcian</b>	-0.48	0.34	0.28	0.11	-0.03	-0.27	0.10	-0.07	-0.34	0.03	0.14	-0.25	<b>1.00</b>	
<b>Gypsum</b>	0.12	-0.16	0.13	<b>0.53</b>	-0.04	<b>-0.55</b>	<b>0.71</b>	-0.28	<b>0.79</b>	-0.22	<b>-0.51</b>	0.00	-0.32	<b>1.00</b>

---

La correlación entre variables se determinó mediante PCA (análisis de componente principales). Para ello se consideraron los parámetros de las propiedades químicas del suelo, el arsénico total y la mineralogía de los suelos. El PCA dio como resultado 3 principales componentes que juntos suman un total del 88 % de la varianza total de las muestras. El criterio para la selección de variables correlacionadas fue aquellas que tuvieran un valor  $\geq 0.5$ .

El componente principal 1 (PC1) explica un 53 % de la variabilidad, de las cuales las variables que presentan mayor correlación son; yeso (0.647), arcilla (-0.551), nitratos (0.435), salinidad (0.175), limos (0.126), capacidad de intercambio catiónico (0.116), arena (0.109) y cuarzo (-0.102). El orden de los parámetros es de mayor contribución a menor contribución.

Para el componente principal 2 (PC2), explican un 27 % de la variabilidad, explicado por la contribución de nitratos (0.874), yeso (-0.337), arcilla (0.276) y arsénico total (-0.169). Mientras que para el componente principal 3 (PC3) el cual explica un 8 % de la variabilidad de las muestras cuenta con una contribución mayor de arena (-0.617), arcilla (0.464), yeso (0.297), salinidad (0.287), P-Olsen (-0.275), capacidad de intercambio catiónico (0.270), limo (0.157), calcita (-0.147) y materia orgánica (-0.119). El gráfico combinado de PC1 y PC2 que se muestra en la Figura 28a dentro del primer grupo, se incluyen las muestras 4, 6, 7, 11, 13, y 14. Sus características comunes se refieren a los altos niveles de arcilla. Estas muestras pueden encontrarse al Este de la zona agrícola como se presenta en la Figura 29 en donde de acuerdo a la carta edafológica F-14-A-25 (INEGI, 1972) se presentan suelos de tipo calcisoles los cuales son ricos en carbonatos de calcio. El segundo grupo está compuesto por las muestras 1, 2, 8, 10, 16, 17, 23 y 42. Las cuales presentan presencia de yesos, nitratos, salinidad y mayor cantidad de arsénico total, dichas características son las principales variables del grupo.

Por otro lado, el análisis de clúster sirvió para agrupar el conjunto de muestras, los resultados de este análisis exploratorio se muestran en un dendograma (Figura 28b) en donde se definieron dos grupos. En donde el grupo 1 (cuadro rosa) con un alto contenido de calcita, baja salinidad y alto contenido de arcilla. Esta agrupación está

conformada por la muestra 4, 6, 7, 11, 13 y 14. Del mismo modo se presenta una segunda agrupación (cuadro azul), en donde las muestras presentan como característica el contenido de yeso, alta salinidad y alto contenido de nitratos. El segundo grupo se encuentra conformado por las muestras, 1, 2, 8, 10, 17, 23 y 42. Este grupo puede distinguirse espacialmente en la Figura 29, el cual se encuentra ubicado al Oeste de la zona de estudio y que de acuerdo a la carta edafológica F-14-A-25 (INEGI, 1972) en esta zona se ha reportado la presencia suelos tipo gipsisoles que se encuentran en presencia de yesos. Y finalmente del mismo modo que el análisis de componentes principales (PCA).

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis clúster y proyectados espacialmente, se puede observar la separación de las muestras en dos zonas (Figura 29). De acuerdo a la carta edafológica, en la cual se presenta al Oeste gipsisoles y a Este calcisoles, aunque los suelos de la zona no son clasificados como gipsisoles (círculos azules), estas muestras de suelo muestran presencia de yeso, de este modo, los círculos rosas denotan muestras de suelo que se clasifican como calcisoles.

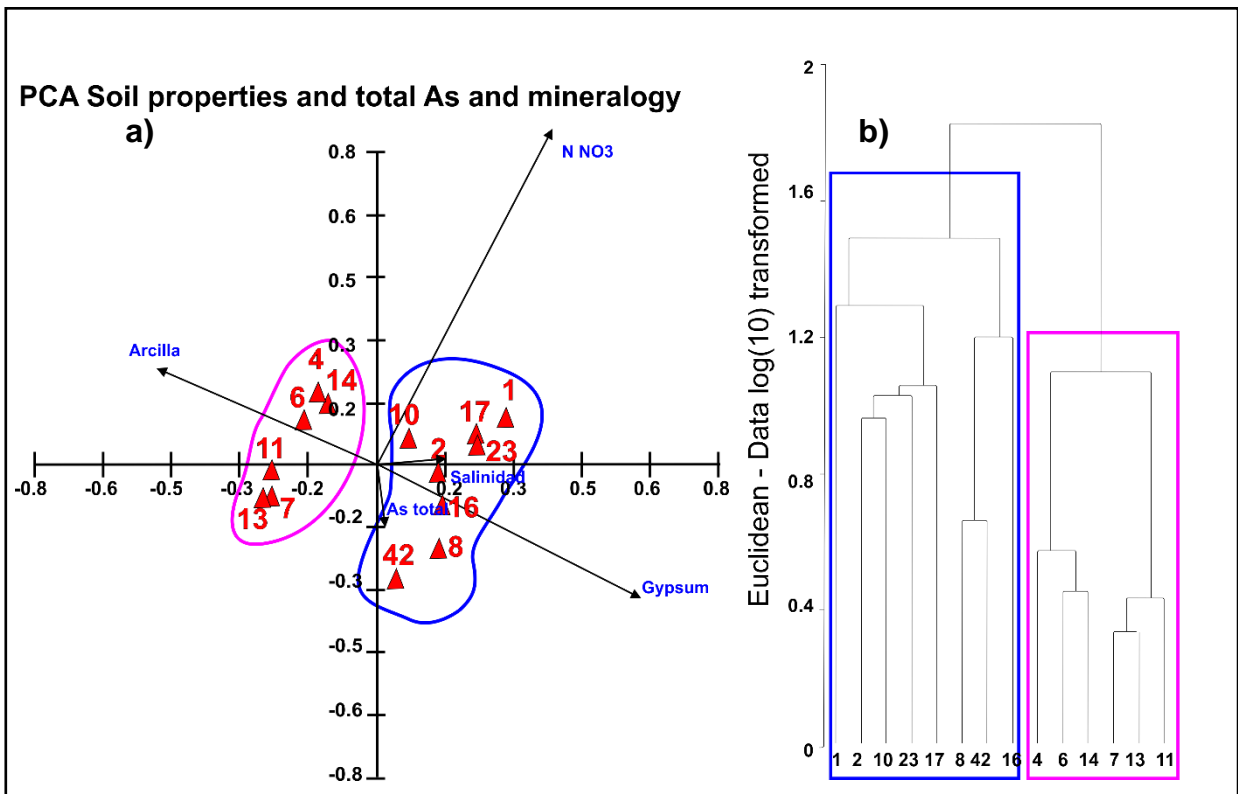


Figura 28. Análisis estadístico multivariante, en a) se muestra el análisis de componentes principales y en b) se muestra el análisis clúster.

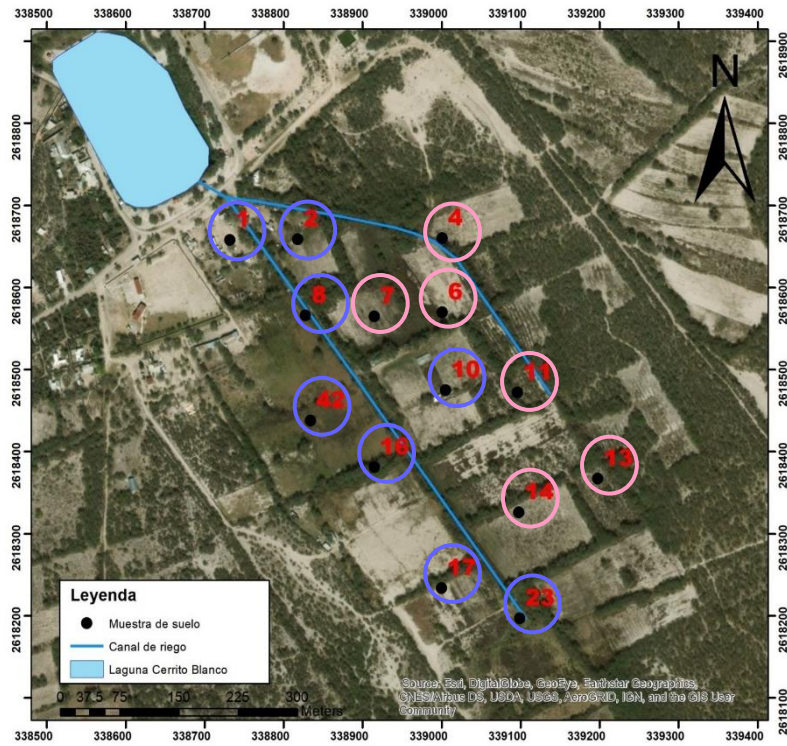


Figura 29. Distribución espacial del agrupamiento de las muestras de acuerdo al análisis estadístico.

## Caracterización geofísica

### 3.5 Salinidad de muestras de suelo agrícola

El conocimiento de la salinidad del suelo es de gran importancia por dos razones fundamentales: como parámetro de calidad de suelo para uso agrícola y como variable importante en el proceso de modelación petrofísica a partir de mediciones geoelectricas, utilizando el algoritmo de Ryjov (Ryjov and Shevvin, 2002) para la determinación del contenido de finos, lo que, a su vez, permitirá la determinación de la conductividad hidráulica.

La salinidad de suelo fue determinada en 31 muestras superficiales siguiendo el procedimiento de extracto saturado explicado en el apartado 2.1.8, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003).

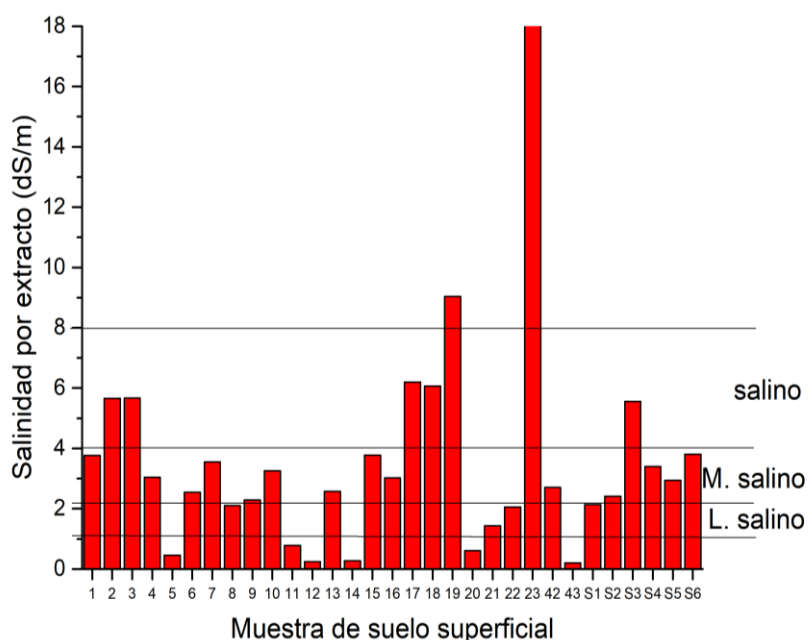


Figura 30. Salinidad de suelos agrícolas, valores de acuerdo a las especificaciones de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2003).

En la Figura 30 se muestra a manera de histograma los valores de salinidad determinados en las 31 muestras superficiales, 7 muestras se encuentran en la clasificación de salino y una muestra en muy salino, para el resto se consideran valores por debajo de moderadamente salino.

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos de la zona de estudio se clasifican en suelos ligeramente salinos, moderadamente salinos y salinos (DOF,

2003), no siendo así para las muestras 5, 11, 12, 14, 20 y 43 las cuales enmarcan una zona en la zona de baja salinidad en el este del área de estudio. Las muestras 19 y 23 son las muestras que presentan mayor concentración de sales, considerándolas fuertemente salinas.

De manera general se puede observar que la zona agrícola presenta alta salinidad principalmente debido a la evaporación del agua de irrigación salinizada y a las sales que acompañan al tipo de suelo de la región (calcisoles y gipsisoles), los cuales se encuentra desarrollado sobre un sustrato de yeso. En las zonas de mayor salinidad del suelo, puede observarse la acumulación de sales en la superficie del suelo en forma de manchas blancuzcas tal y como se muestra en la Figura 31 capturada en el punto de muestreo 23 (Figura 29), como punto donde existe mayor acumulación de sales (Figura 30), siendo que la zona donde se encuentra el punto 23 funge como resumidero del agua proveniente de los canales de irrigación, exponiéndolo a una alta humedad permanente con el agua contaminada y salinizada proveniente de la laguna de Cerrito Blanco.

Los valores medidos de humedad y salinidad en conjunto con los valores de resistividad del suelo, constituyen los datos de entrada fundamentales para la realización de la modelación petrofísica utilizando el algoritmo de Ryjov, permitiendo



*Figura 31. Presencia superficial de sales en suelos agrícolas.*



determinar el contenido de finos del suelo para cada punto de medición de resistividad del suelo.

### **3.6 Porcentaje de Humedad**

Los valores de humedad fueron medidos con el propósito de controlar las mediciones de resistividad eléctrica, debido a que la respuesta eléctrica está directamente influenciada, entre otros factores como la salinidad, por el contenido de fluidos que pueda tener el suelo.

La zona agrícola cuenta con dos canales principales de irrigación, los cuales se encuentran en constante flujo de agua, por lo cual se esperaba que la presencia de humedad en las zonas cercanas a los canales fuera alta debido al proceso de infiltración de agua.

En la Figura 32 se presenta la distribución de humedad relativa medida en campo en donde se puede apreciar el efecto de los canales en el aumento de humedad a valores superiores a 60%. Sin embargo, las mediciones de humedad tomadas cercanas al canal de irrigación ubicado al NE no presentaba valores máximos de humedad, siendo que estos canales son operados de manera intermitente.

Fuera de las zonas afectadas por los canales de irrigación, la zona agrícola en general presenta baja humedad con valores inferiores a 20 %.



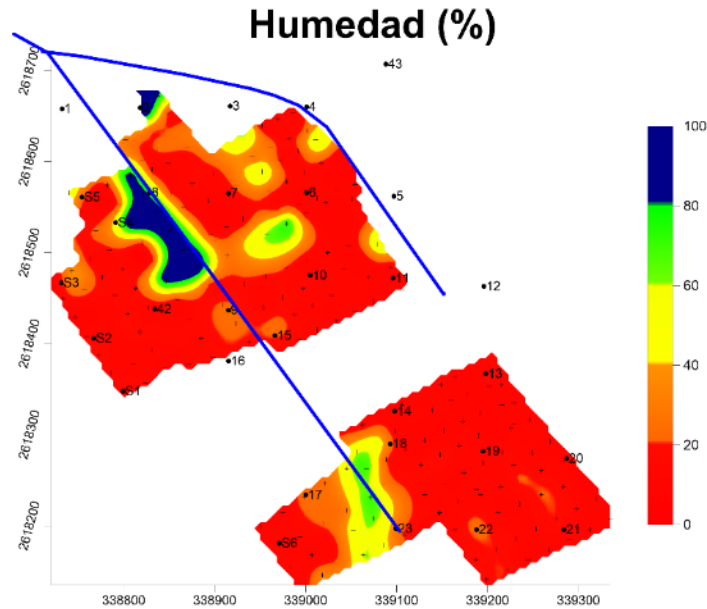


Figura 32. Humedad presente en la zona de estudio, en contraste a la zona se encuentra la presencia de los canales de irrigación.

### 3.7 Resistividad eléctrica

Las mediciones de resistividad eléctrica se realizaron para dos profundidades de estudio, 30 cm y 60 cm, utilizando el equipo Saturn Geo LEM (Fluke) y el dispositivo electródico, lo que fue explicado en detalle en el apartado 2.6.2. En la Figura 33 se muestran los mapas de los valores de resistividad para ambas profundidades de estudio, observándose un predominio de suelos resistivos ( $\rho > 50$  Ohm m). La

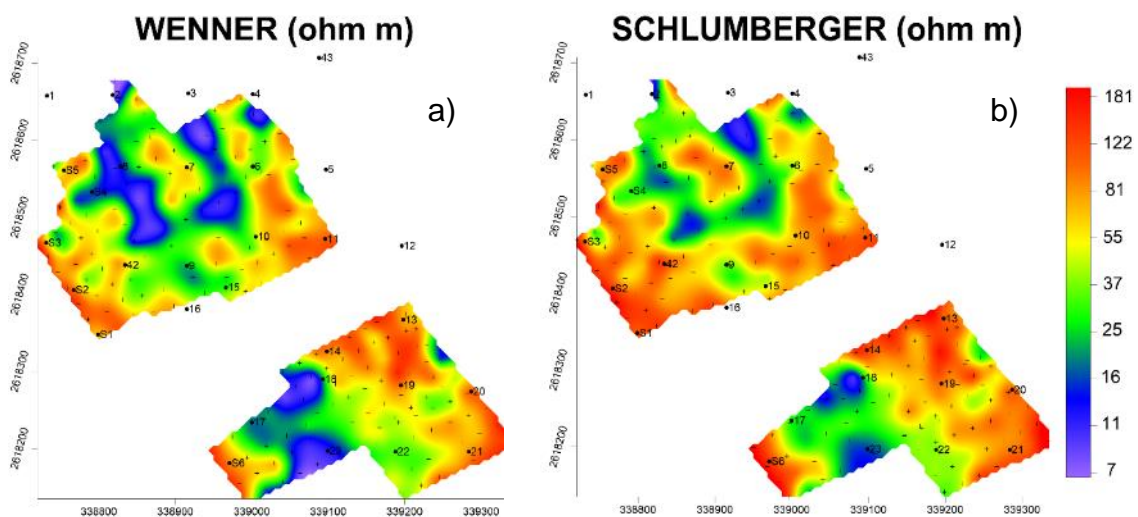


Figura 33. Resistividad aparente de la zona de estudio, el gráfico a) WENNER corresponde a 30 cm de profundidad y b) SCHLUMBERGER corresponde a 60 cm de profundidad.

respuesta resistiva de los suelos era de esperarse ya que se tratan de suelos calcáreos, los cuales presentan baja conductividad eléctrica. En la parte central de ambas zonas se presentan anomalías de baja resistividad (Figura 33), las cuales están influenciadas por el incremento de la humedad del suelo debido a su cercanía a los canales de irrigación, siendo que el agua de riego presenta altos niveles de salinidad (Mendoza-Chávez, 2016).

El mapa de resistividad para 30 cm de profundidad de estudio (Figura 33a) muestra valores ligeramente menos resistividad que el mapa para la profundidad de estudio 60 cm (Figura 33b). Es de esperar el mapa de resistividad del suelo para 30 cm de profundidad de estudio (Figura 33a) muestre el efecto de la alteración superficial del suelo por las actividades de arado en algunas parcelas y por el incremento en el contenido de materia orgánica, mientras que para una profundidad máxima de estudio de 60 cm (Figura 33b) el suelo es más compacto, cercano al sustrato yesífero y con menor contenido de materia orgánica, dando como consecuencia un aumento ligero de los valores de resistividad eléctrica.

### **3.8 Estimación de porcentaje de finos mediante el algoritmo de Ryjov**

Con ayuda de las mediciones de salinidad, humedad y resistividad eléctrica en sitio, se procedió a realizar la estimación de porcentaje de finos con ayuda del software PetroWin (Ryjov and Shevnin, 2002) en donde se estimó el porcentaje de finos de acuerdo a modelos teóricos. La zona de estudio se caracteriza por tener una textura media con tendencia a fina, de acuerdo a la carta edafológica F-14-A-25 (INEGI, 1972). Esta textura es debido al material parental del cual se han formado estos suelos, ya que su formación deriva de material calcáreo (INEGI, 2002).

En la Figura 34 se observan los mapas de los porcentajes de contenido de finos para ambas profundidades máximas de estudio. En general, la zona de estudio presenta un porcentaje de material fino alto, el cual corresponde a la suma de limo + arcilla, en correlación con los antecedentes dados por la información edafológica del sitio. No obstante, existen zonas que presentan bajo porcentaje de material fino, por lo cual podría tratarse de material con tamaño de partícula  $>0.06$  mm (Gee and Bauder, 1986) el cual corresponde a material arenoso y/o gravas.

De manera general la zona Norte agrícola presenta un porcentaje de material fino que ronda en 20 y 60 % alcanzando porcentajes altos de hasta 99 % de finos, en donde se presenta un área muy definida en ambas profundidades (30 y 60 cm). Lo que respecta a la zona Sur, predomina de la misma forma que la zona Norte, un porcentaje de finos que ronda entre 20 y 60 %, mostrando dos zonas que presentan porcentaje de hasta 90 % de finos en las dos profundidades.

Como se aprecia en la Figura 34, la presencia de finos es más extensa a 30 cm de profundidad que a 60 cm. Por lo cual la parte superficial del suelo podría presentar mayor retención de agua provenientes de los canales de irrigación.

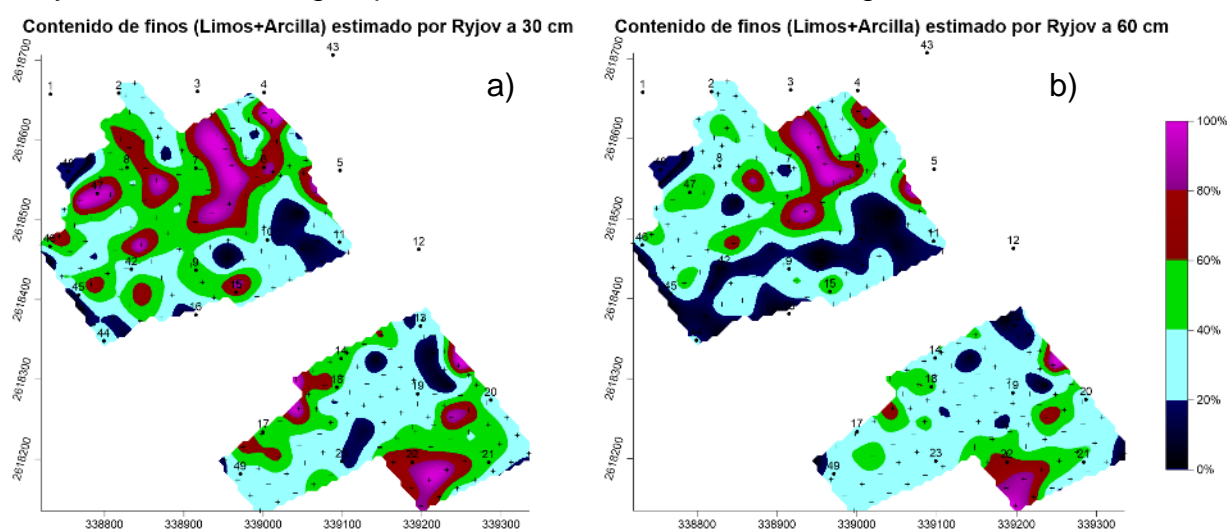


Figura 34. Distribución de porcentaje de finos en zona agrícola. a) corresponde a una profundidad de 30 cm y b) a una profundidad de 60 cm.

### 3.9 Distribución de la conductividad hidráulica de la zona agrícola

Basados en las relaciones existente entre contenido de finos de un suelo y su conductividad hidráulica (Delgado-Rodríguez et al., 2011; Shevvin et al., 2006) se determinaron los valores y con esto, el mapa de conductividad hidráulica (K) para los suelos agrícolas objeto de estudio. La Figura 35 muestra en general valores muy bajo de K, entre  $0.002 \text{ cm h}^{-1}$  y  $1.84 \text{ cm h}^{-1}$ , lo cual es consistente con la información edafológica (Cisneros, 2010) y los resultados obtenidos de la estimación del contenido de finos (Figura 35), lo que lleva a clasificar a la mayor parte del sitio con permeabilidad entre muy lenta y lenta. Este resultado permite estimar que el arsénico sea acumulado en el suelo, mayormente en la parte superior, no filtrándose con facilidad al sustrato

yesífero. De acuerdo a este comportamiento se espera que los suelos de la zona agrícola presenten mayor concentración de arsénico total en superficie (profundidad

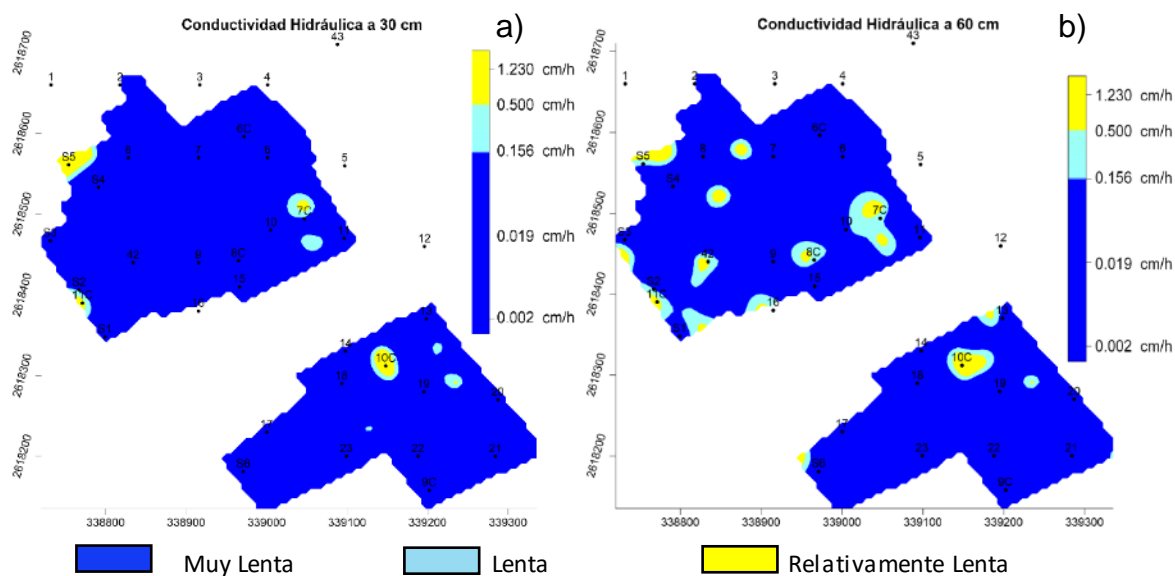


Figura 35. Conductividad hidráulica de la zona agrícola, ejido Cerrito Banco, Matehuala, S.L.P. a) conductividad hidráulica a 30 cm de profundidad y b) conductividad hidráulica a 60 cm de profundidad.

máxima de estudio 30 cm, Figura 35a y a profundidad máxima de estudio 60 cm, Figura 35b) la concentración de arsénico total sea menor. Sin embargo, algunas zonas, para ambas profundidades de estudio, donde la permeabilidad es relativamente lenta ( $K > 0.5 \text{ cm h}^{-1}$ , zonas amarillas), deben considerarse como zonas del suelo donde la concentración de arsénico en la parte inferior del suelo sea similar o incluso mayor a la reportada en la superficie, aumentando el riesgo de contaminación del sustrato del suelo y estratos inferiores.

## Transporte de arsénico

### Concentración de arsénico total en muestras verticales de suelo

La Figura 36 muestra las concentraciones de arsénico total a lo largo del perfil del suelo. En donde los valores encontrados están entre  $0.54 \text{ mg Kg}^{-1}$  y  $127 \text{ mg Kg}^{-1}$ , de los cuales todas las muestras presentan en la primera fracción (0-10 cm de profundidad) valores que rebasan el valor máximo permisible ( $22 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT\_SSA1-2004 (DOF, 2007) y el valor de fondo ( $35 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) reportado por Chiprés et al., (2008). No obstante, a mayor profundidad (10-60) el 82 %

de columnas exceden los valores permisibles presentando concentraciones de hasta  $127 \text{ mg Kg}^{-1}$ . La columna 1 presenta valores que se encuentran por debajo del valor máximo permisible de la norma mexicana a profundidades mayores de 10 cm y la columna 9 presenta concentraciones por debajo del valor de fondo a profundidades mayores a 40 cm.

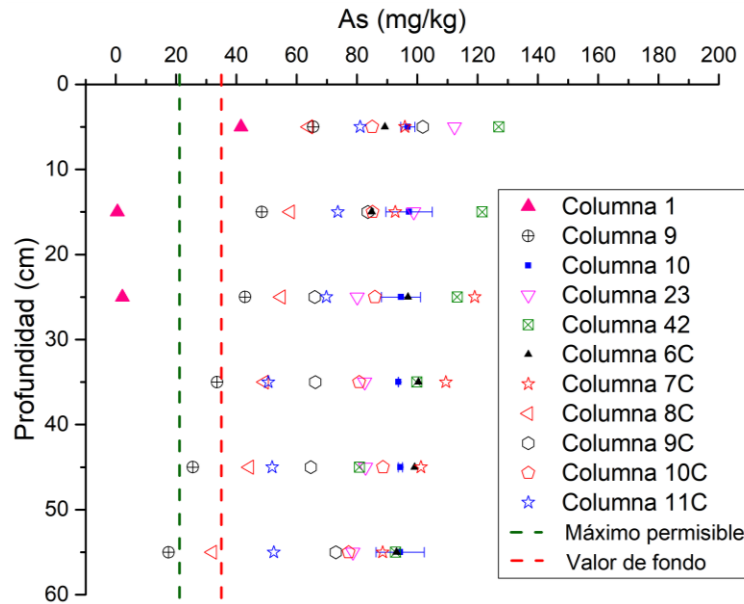


Figura 36. Distribución de arsénico en columnas de suelo agrícola.

Como se presentó en el apartado 3.9, de acuerdo con la baja conductividad hidráulica de los suelos superficiales, se cumple que para la mayoría de las columnas (1, 9, 10, 42, 7C, 8C, 10C y 11C), la concentración de arsénico total es mayor en la parte más superficial, es decir, disminuye con la profundidad, demostrando que el origen de la contaminación no es natural, sino que, el arsénico ha sido depositado debido a un proceso de irrigación con agua contaminada. No obstante, este resultado de altas concentraciones de arsénico total encontradas para la profundidad 60 cm en todas las columnas indican que el arsénico se infiltra a lo largo de todo el perfil del suelo.

La Figura 37 muestra el porcentaje de arsénico total a 60 cm, con respecto al arsénico total determinado en la superficie del suelo, y la conductividad hidráulica para los primeros 60 cm ( $K_{60 \text{ cm}}$ ) del suelo. Se puede observar que para las columnas 9, 42, 7C, 8C, 10C y 11C el porcentaje de arsénico a 60 cm se incrementa con el incremento de  $K$ , en una relación tipo logarítmica entre ambos parámetros. Sin embargo, en cuatro

columnas (10, 23, 6C y 9C) no cumplen con esta relación donde a valores de K extremadamente bajos, se observan altas concentraciones de arsénico a 60 cm. Para el caso de la columna 23 se entiende que al encontrarse en la zona que funge como resumidero del agua proveniente de los canales de irrigación, no solo provoca un incremento de la salinidad, sino que también de los niveles de humedad alta permanente que podrían incrementar los niveles de concentración de arsénico en toda la columna de suelo. Para el caso de las columnas 10, 6C y 9C, estas podrían encontrarse próxima a canales secundarios cuyo efecto en la distribución de los contaminantes podría ser similar, aun cuando en el momento del levantamiento de humedad, estos no estaban operando por encontrarse fuera de temporada de siembra.

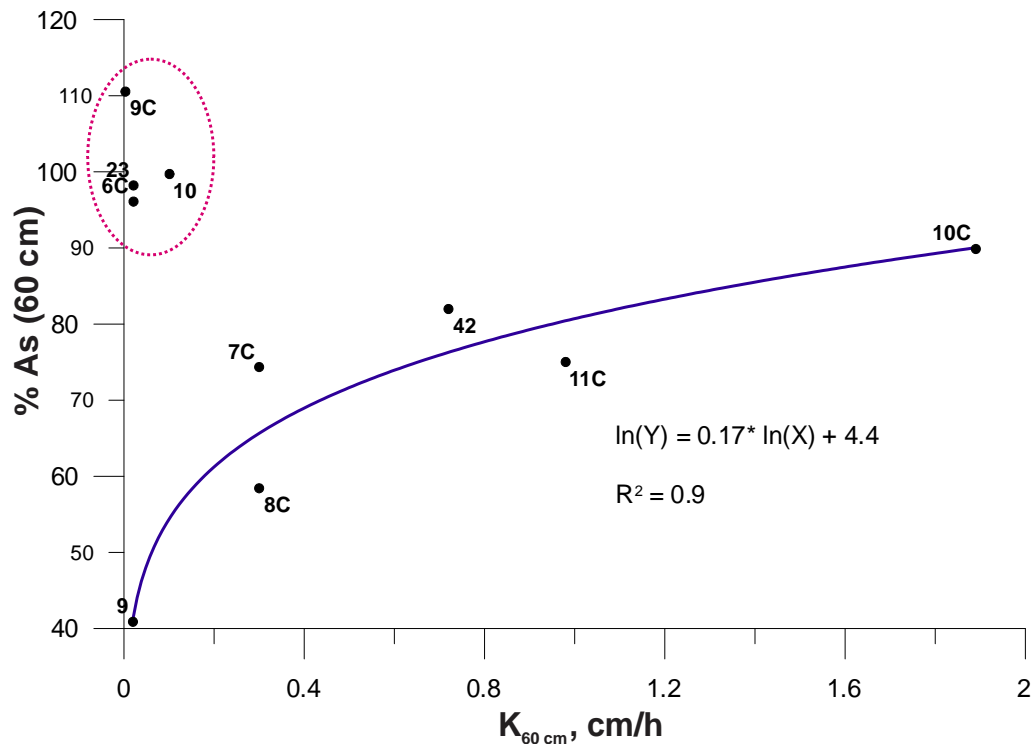


Figura 37. Gráfica de correlación entre porcentaje de arsénico que llega desde la superficie hasta los 60 cm de profundidad y la conductividad hidráulica determinada para todo el horizonte de suelo.

### Concentración de arsénico soluble en muestras de suelo superficial

La Figura 38 muestra la relación que existe entre arsénico soluble con respecto a arsénico total, en donde se puede observar que el arsénico soluble se encuentra en función de arsénico total.

Como se observó en la sección 3.3, las muestras 12 y 43 no se encuentran contaminadas por arsénico y en respuesta a esto, la concentración de arsénico es baja o al menos se encuentra por debajo de los límites de medición de la técnica. De acuerdo a la Figura 38 existe una relación lineal positiva ( $R^2= 0.90551$ ) entre As soluble con respecto a As total.

Un 71 % del total de las muestras presentan solubilidad de arsénico, finalmente un 17 % del total de las muestras presentan solubilidad y se encuentra por encima del valor permisible de la NOM-147-SEMARNAT\_SSA1-2004 (DOF, 2007).

De este modo se puede observar que el arsénico presente en la zona de estudio es muy soluble, el cual permite la lixiviación del mismo a lo largo del perfil y es debido a esto que en la Figura 37 se observa este comportamiento del arsénico.

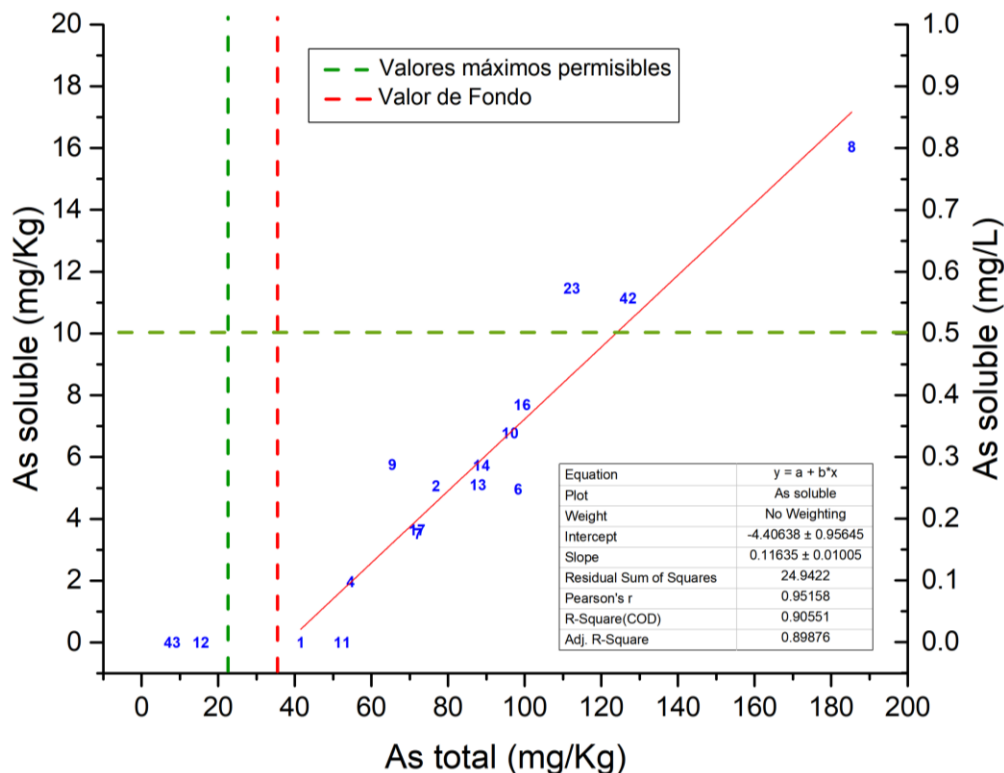


Figura 38. Relación entre concentración de arsénico total y arsénico soluble.

Como se mencionó en el apartado 3.9, la conductividad hidráulica es baja en la zona agrícola, por lo cual la mayor concentración de arsénico total era de esperarse en la superficie. En este caso de estudio se ve reflejado este comportamiento, pero, no se cumple a profundidad. Esto se explica de acuerdo a la gran solubilidad que presenta el arsénico, es por ello que se presenta concentraciones altas de igual forma a profundidad.

Por lo cual se considera que el comportamiento observado en la Figura 36 pueda estar sucediendo a mayor profundidad.

### **Modelo de conceptual del mecanismo físico del transporte de arsénico a lo largo del perfil del suelo**

De acuerdo los resultados de la conductividad hidráulica, arsénico total tanto en superficie como vertical, difracción de rayos X y el análisis estadístico multivariado, en este estudio se propone el siguiente mecanismo de transporte del arsénico a lo largo del perfil del suelo. La Figura 39a muestra el inicio hipotético del perfil del suelo de la zona agrícola, en el cual se representa de manera superficial (30 cm) un suelo alterado debido a la actividad agrícola, y, a profundidad (60 cm) un suelo poco alterado. Como parte inicial se presenta un suelo limpio, seco y con los espacios de poro sin agua (espacios llenos de aire y/o gases), y en la superficie de una partícula de suelo la presencia de algunas sales solubles. La Figura 39b representa la situación cuando el agua de superficie proveniente de los canales de irrigación con presencia de arsénico que entra en contacto con el suelo, el cual, de acuerdo a la conductividad hidráulica tan baja de la zona la infiltración es muy lenta, desplazando a su paso el aire en los poros por agua con presencia de arsénico, debido a que la textura de los suelos es fina, se puede decir que la porosidad es alta (>30 %), por lo cual el agua es retenida en los poros del suelo lo cual permite que el agua y el suelo tengan interacción prolongada, debido a esto, el arsénico presente en el agua pasa de la solución a la fase sólida del suelo como se aprecia en la Figura 39b.

Posteriormente, durante la temporada de sequía y bajo flujo de agua, la infiltración puede disminuir o ser nula y el agua presente en los poros se evapora dejando vacíos estos espacios (Figura 39c). El proceso de evaporación trae como consecuencia la



concentración o enriquecimiento de arsénico en el suelo en dónde el arsénico se acumula quedando ahora en una fase sólida.

Finalmente, la Figura 39d representa la situación cuando el suelo se satura con agua de los canales de irrigación y/o agua de lluvia, la cual nuevamente se infiltra (de forma lenta), permitiendo tener contacto el agua con el suelo por un tiempo prolongado, esto permite que los solubles del suelo se liberen y pasen a ser parte del agua de poro la cual se infiltra tal vez de forma lenta, pero debido a que sucede de manera prolongada es suficiente para que el agua se infiltre a profundidad. Esto trae consigo que el arsénico que se encuentra en el agua forme parte ahora del suelo como sucedió en la Figura 39a.

Ahora bien, si se piensa que este proceso puede ser lento, solo basta pensar que este sistema de transporte ha estado sucediendo durante un tiempo de más de 50 años, tiempo que puede considerarse suficiente para que al menos el perfil del suelo de 60 cm de profundidad pueda estar presentando concentraciones altas.

Por lo cual, es de esperarse que la concentración de arsénico siga en aumento con respecto al tiempo y, del mismo modo se considera que este mismo mecanismo pueda estar sucediendo a mayor profundidad.

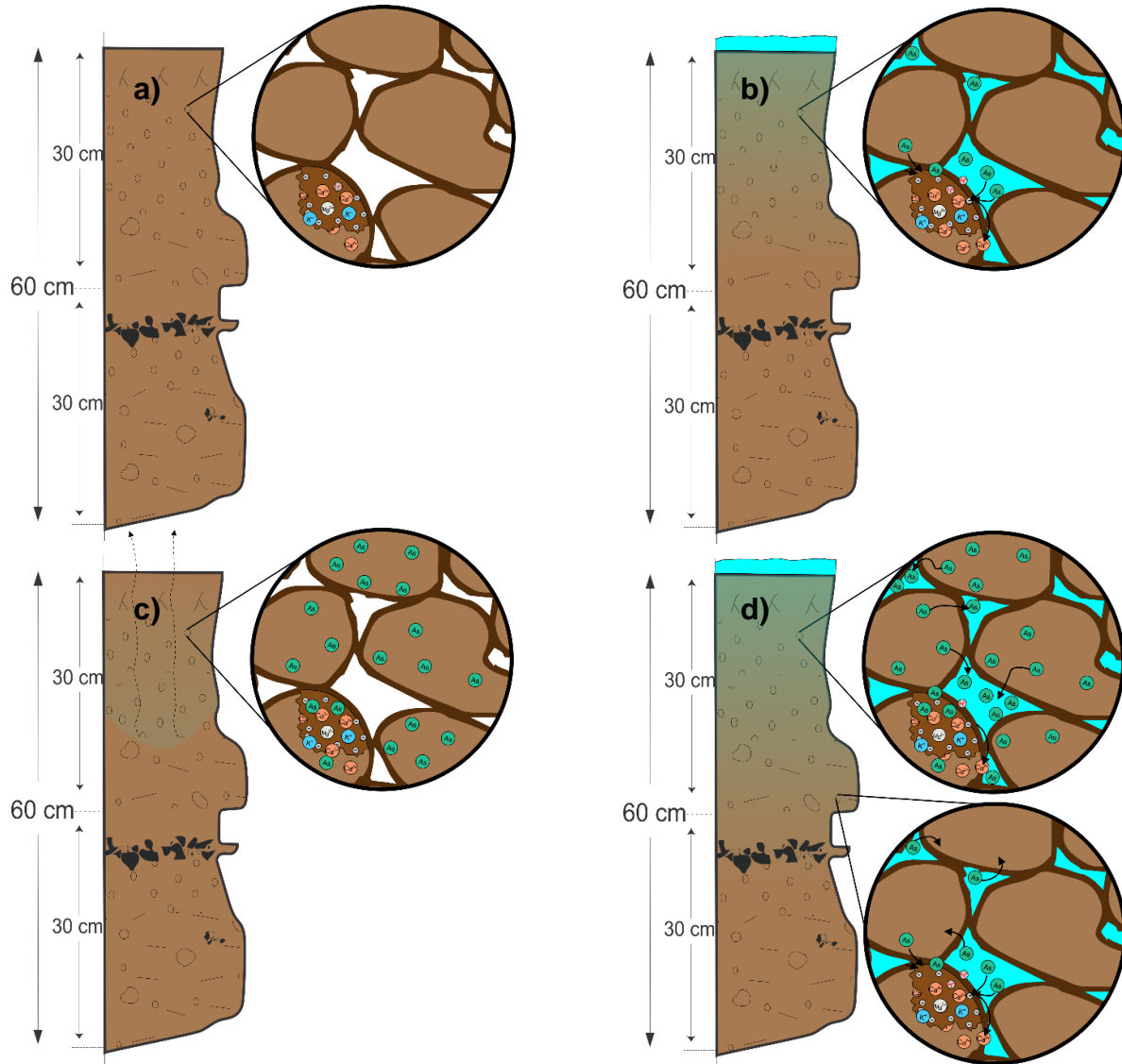


Figura 39. Representación del perfil del suelo y el mecanismo físico de movilidad del arsénico.

## Conclusiones

La calidad de los suelos de la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco es media de acuerdo a su índice de calidad de suelo, la cual nos indica que podría ser capaz de sostener cultivos sobre él. Pero, debido a que la zona agrícola se encuentra en presencia de contaminación por arsénico y los valores rebasan por mucho los valores máximos permisibles de concentración, se considera que la zona agrícola está contaminada con arsénico. El análisis de muestras superficiales de suelo, presentaron gran impacto de arsénico como resultado de la constante irrigación del campo agrícola con agua contaminada con arsénico.

La zona de estudio presenta muy baja conductividad hidráulica debido a que la textura de los suelos es principalmente fina. No obstante, el arsénico se ha infiltrado en el subsuelo hasta, al menos, 60 cm de profundidad debido a una alta solubilidad del mismo al contacto con el agua. Adicionalmente, existen áreas dentro de la zona agrícola que podrían facilitar la migración vertical con mayor velocidad debido a una conductividad hidráulica ligeramente más alta.

Las muestras con mayor proporción de yeso presentan la mayor cantidad de As total. Como es bien sabido, el yeso es altamente soluble, y al estar asociado el arsénico con el yeso y, al estar en contacto con agua, ya sea por agua de lluvia o de los canales de irrigación, solubilizan el yeso en el cual se encuentra el arsénico y trae consigo que nuevamente el arsénico pase a una fase líquida y debido a la infiltración del agua, el arsénico se transporte a mayor profundidad.

Por lo cual, se considera necesario evitar el contacto de los suelos con los pobladores y el traslado de los cultivos a otra zona libre de arsénico. Del mismo modo evitar la irrigación de los suelos con agua proveniente de la laguna desviando el flujo del agua a una zona segura para realizar posteriormente un tratamiento y realizar la disposición final del agua.

Dicho esto, se recomienda la intervención de autoridades gubernamentales a fines que proporcionen una alternativa del traslado de cultivo a una zona segura y así mantener la zona agrícola inactiva sin irrigación, debido a que el agua contaminada que se infiltra por medio del perfil del suelo de la zona agrícola, podría continuar aumentando la concentración de arsénico tanto en superficie como a lo largo del perfil, y ya que el arsénico puede infiltrarse a mayores profundidades podría hasta alcanzar cuerpos de agua subterráneos por consiguiente la movilización del arsénico a otras zonas.

Por lo cual se sugiere la pronta atención de las autoridades competentes que brinden una alternativa de agua que garantice la calidad de vida de los pobladores y de los cultivos. Para dicho propósito se sugiere que se realicen estudios de prospección geoelectrica a profundidad que proporcione una fuente alternativa libre de contaminación de arsénico que sea concesionado a los pobladores del ejido Cerrito Blanco.

De este modo se recomienda realizar estudios geofísicos, específicamente geoelectricos, y geoquímicos a mayor profundidad, los cuales permitan caracterizar el sub-suelo, permitiendo de esta manera definir zonas de mayor permeabilidad y su vínculo con la migración vertical de los fluidos desde el suelo a estratos inferiores, tal que incrementen la vulnerabilidad del acuífero somero del sitio a la contaminación por arsénico.

---

## Fuentes citadas

- Agroder, 2012. Producción de maíz México: Comparativo Estatal Modalidad de temporal y riego. AGRODER 6.
- Archie, G.E., 1941. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Pet. Technol.*
- Bautista Zúñiga, F., 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Blaya, S.N., García, G.N., 2003. Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Mundi-Prensa.
- Brady, N.C., Weil, R.R., 2002. *The Nature and Properties of Soils*, 13th ed. Pearson Education.
- Breña Puyol, A.F., Jacobo Villa, M.A., 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniel, P.A., 2003. *Soil Genesis and Classification*. Wiley.
- Cantú, M.P., Becker, A.R., Bedano, J.C., Schiavo, H.F., Parra, B.J., 2009. Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Córdoba, Argentina. *Cad. Lab. Xeol. Laxe* 34, 203–214.
- Casanova Olivo, E.F., 2005. Introducción a la ciencia del suelo, 2da ed. Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Venezuela.
- Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X., Aguilar-Santelises, A., 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas, 2da ed. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Chiprés, J.A., Salinas, J.C., Castro-Larragoitia, J., Monroy, M.G., 2008. Geochemical mapping of major and trace elements in soils from the Altiplano Potosino, Mexico: a multi-scale comparison. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 8, 279–290. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-181>
- Cisneros Almazan, R., 2010. Apuntes de la materia de riego y drenaje. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- Clavier, C., Coates, G., Dumanoir, J., 1984. The Theoretical and Experimental Bases for the “Dual Water” Model for the Interpretation of Shaly Sands. *Soc. Pet. Eng.* 24, 153–168. <https://doi.org/10.2118/6859-PA>
- Cordero-Vázquez, C.Y., Gómez-Rivera, P., Martínez-Villegas, N.V., 2016. Determinación de Granulometría y Textura de Suelos de Matehuala, San Luis Potosí Contaminados con Arsénico (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica de Tabasco, Tabasco, México.
- Delgado Rodríguez, O., Ladrón de Guevara Torres, M., Shevvin, V., Ryjov, A., 2012. Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. *Geofísica Int.* 51, 5–15.
- Delgado-Rodríguez, O., Flores-Hernández, D., Amezcua-Allieri, M.A., Rosas-Molina, A., Marín-Córdova, S., Shevvin, V., 2014. Joint interpretation of geoelectrical and volatile organic compounds data: a case study in a hydrocarbons

- contaminated urban site. *Geofísica Int.* 53, 183–198. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)71499-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)71499-0)
- Delgado-Rodríguez, O., Peinado-Guevara, H.J., Green-Ruíz, C.R., Herrera-Barrientos, J., Shevlin, V., 2011. Determination of hydraulic conductivity and fines content in soils near an unlined irrigation canal in Guasave, Sinaloa, Mexico. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 11, 13–31.
- DOF, 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación, México.
- DOF, 2006. NMX-AA-132-SCFI-2006. Diario Oficial de la Federación, México.
- DOF, 2003. NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México.
- Domínguez Soto, J.M., Román Gutiérrez, A.D., Prieto García, F., Acevedo Sandoval, O., 2012. Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3, 141–155.
- EPA, 1994. Method 200.7: Revision 4.4, Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- FAO, 2015. 5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. WRB, Roma.
- Fassbender, H.W., Bornemisza, E., 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina, 2da ed, Colección de libros y materiales educativos. IICA, Costa Rica.
- Fernández-Luqueño, F., Valerio-Rodríguez, M.F., López-Valdez, F., 2014. ¿Es posible limpiar sitios contaminados con arsénico? *Cienc. Desarro.*
- Fertilab®, 2016. Diagnóstico de la fertilidad del suelo (Diagnostico de fertilidad No. SU-55764, SU-55761, SU-55756, SU-55755, SU-55767, SU-55760, SU-55758, SU-55763, SU-55754, SU-55753, SU-55762, SU-55759, SU-55751 y SU-55752). Fertilidad de suelos S. de R.L., México.
- Flanagan, S.V., Johnston, R.B., Zheng, Y., 2012. El arsénico en el agua procedente de pozos entubados en Bangladesh: El impacto sobre la salud y la economía y las implicaciones en la mitigación de los efectos del arsénico. *Bol. Organ. Mund. Salud* 90, 793–868.
- Fluke, n.d. Model Saturn Geo LEM. Fluke Corporation, EE.UU.
- García, I., Rodríguez, J.G., López, F., Tenorio, Y.M., 2010. Transporte de Contaminantes en Aguas Subterráneas mediante Redes Neuronales Artificiales. *Inf. Tecnológica* 21, 79–86.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size Analysis1, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, SSSA Book Series. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI.

- 
- Gutiérrez Ginés, M., Jesús, Ranz, I., 2010. Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos. Univ. Alcalá Hen. 109–120.
- Hair Jr, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C., 1990. Análisis multivariante, quinta. ed. Prentice Hall Iberia, Madrid.
- Hans-Jürgen, B., Karlheinz, G., Michael, K., 2004. Physics and Chemistry of Interfaces.
- Hillel, D., 2007. Soil in the Environment: Crucible of Terrestrial Life. Academic Press, EEUU.
- Hodgson, J., 1987. Muestreo y descripción de suelos. Reverté, España.
- INEGI, 2017. Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI, 2014. Guía para la interpretación de cartografía edafología (No. III). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI, 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Matehuala SLP.
- INEGI, 2002. Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí. México.
- INEGI, 1993. Cuaderno estadístico anual 1993. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Mexico.
- INEGI, 1972. Carta edafológica Matehuala 1:50000 F-14-A-25. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- IUSS, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jaramillo Jaramillo, D.F., 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Colombia.
- Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A., 1982. Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos Tomo 1, 3ra ed. Limusa, México.
- Lara-Del Río, A. de J., 2015. Evaluación de acumulación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas a este contaminante en el complejo hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco (Tesis de Maestría). IPICyT, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Leitón Soubannier, J.S., 1985. Riego Y Drenaje. EUNED, Costa Rica.
- López Facón, R., 2002. Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación, 2da ed. CIDIAT, Venezuela.
- Marion, D., Nur, A., Yin, H., Han, D., 1992. Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures. Geophysics 57, 554–563. <https://doi.org/10.1190/1.1443269>
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J.A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A.D., Razo-Flores, E., Villalobos, M., 2013. Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. Environ. Pollut. 176, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.025>
- Mascher, R., Lippmann, B., Holzinger, S., Bergmann, H., 2002. Arsenate toxicity: effects on oxidative stress response molecules and enzymes in red clover plants. Plant Sci. 163, 961–969. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00245-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00245-5)

- 
- McGeary, R.K., 1961. Mechanical Packing of Spherical Particles. *J. Am. Ceram. Soc.* 44, 513–522. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1961.tb13716.x>
- Mendoza-Chávez, Y.J., 2016. Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México (Tesis de Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Montolio Sanfeliu, T., Jordán Vidal, M.M., Boix Sanfeliu, A., 2005. Contaminación y medio ambiente: Santiago (Chile)-Castellón (España), 1998-2002. Pujol & Amado S L L, Santiago de Chile.
- MVSP, 2013. Multi-Variate Statistical Package v. 3.22. Kovach Comput. Serv.
- Nava-Alonso, F., 2014. ¿Arsénico en agua potable? *Cienc. Desarro.*
- Núñez-Solís, J., 2000. Fundamentos de edafología. Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
- Oliveira-Prendes, J.A., Afif-Khoury, E., Mayor-López, M., 2006. Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Orellana, E., 1982. Prospección geoelectrica en corriente continua, 2da. ed. Ediciones Paraninfo S.A.
- OriginPro, 2015. Origin Pro v. 9.3.226. Orig. Corp.
- PANalytical, 2004. X'pert HighScore. Tianjing University School of Chem. Eng., England.
- Pedroza, H., Dicovalskyi, L., 2007. Sistema de análisis estadístico con SPSS. IICA,INTA.
- Periódico Oficial del Estado Libre y Soberano, S.L.P., 2013. Plan municipal de desarrollo 2012-2015. H. Ayuntamiento de Matehuala S.L.P., San Luis Potosí.
- Port-Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., Poch, R.M., 2014. Edafología: uso y protección de suelos, 3ra ed. Mundi-Prensa, España.
- Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O.A., Méndez-Marzo, M.A., 2013. Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agron. Mesoam.* 24, 83–91.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., Richards, K., 2009. Arsenic Pollution: A Global Synthesis, 1a ed. ed. John Wiley & Sons, Singapur.
- Rhoades, J.D., Raats P., A.C., Prather, R.J., 1976. Effects of liquidphase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am.* 40, 651–655. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x>
- Ruíz-Huerta, E.A., de la Garza Varela, A., Gómez-Bernal, J.M., Castillo, F., Avalos-Borja, M., SenGupta, B., Martínez-Villegas, N., 2017. Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico. *J. Hazard. Mater.* 339, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.041>
- Ryjov, A., 1987. Application of IP method for mineral deposits. *Research* 5–23.
- Ryjov, A., Shevvin, V., 2002. Theoretic Calculation of Rocks Electrical Resistivity and Some Examples of Algorithm's Application. *Conf. Symp. Appl. Geophys. Eng Ineering Environ. Probl.* <https://doi.org/10.4133/1.2927161>
- Ryjov, A., Sudoplatov, A.D., 1990. The calculation of specific electrical conductivity for sandy - clayed rocks and the usage of functional cross-plots for the decision of
-



- hydro-geological problems. *Sci. Tech. Achiev. Adv. Exp. Field Geol. Miner. Depos. Res.* 27–41.
- Sabroso González, M. del C., Pastor Eixarch, A., 2004. Guía sobre suelos contaminados. CEPYME, Gobierno de Aragón, ENTECSA, España.
- Salazar Amador, M.E., 2017. Fraccionamiento de arsénico en suelos contaminados con arseniatos en Matehuala, San Luis Potosí, México. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Sánchez, A., Gándara, 2011. Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Asociación para el Desarrollo Integral de la Región de Misantla, A.C., México.
- Sanders, L.L., 1998. *A manual of field hydrogeology, Illustrated.* ed. Prentice-Hall, EE. UU.
- Sanz Llano, J.J., 1975. *Mecánica de suelos.* Editores Técnicos Asociados, España.
- SEMARNAT, 1996. NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación, Mexico.*
- Servicio Geológico Mexicano, 2014. *Panorama Minero del Estado de San Luis Potosí.* Secretaría de economía, San Luis Potosí.
- Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Ryjov, A., 2006. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Int.* 45, 195–207.
- SNPC, 2018. *Mapa de riesgos municipal.* Dirección General de Protección Civil, México.
- Stocking, M., Murnaghan, N., 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra.* Mundi-Prensa.
- Suquilanda V, M.B., 2017. *Manejo agroecológico de suelos.* Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca, Ecuador.
- Tabbagh, A., Benderitter, Y., Michot, D., Panissod, C., 2002. Measurement of variations in soil electrical resistivity for assessing the volume affected by plant water uptake. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 7, 229–237.
- Thompson, L.M., Troeh, F.R., 1988. *Los suelos y su fertilidad.* Reverté.
- Tuya, J., Román, I.R., Cosín, J.J.D., 2007. *Técnicas cuantitativas para la gestión en la ingeniería del software.* Netbiblo, España.
- UNICA, 2011. *Edafología I.* UNICA, Colombia.
- USEPA-6200, 2007. Method 6200. Field portable X-Ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment. *U. S. Environ. Prot. Agency* 32.
- Valverde-Conejo, J.C., 2007. *Riego Y Drenaje.* EUNED, Costa Rica.
- Venegas, A., Hevia, F., Lanuza, P., Wilckens, R., Tapia, M., Araya, F., 1993. Mutilla (*Ugni molinae* T.) II. Algunas características físicas y químicas del fruto. *Agrociencia* 9, 11–15.
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J.A., de la Rosa Pérez, D.A., 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Waxman, M.H., Smits L., J.M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. Soc. Pet. Eng. 8. <https://doi.org/10.2118/1863-A>

**Anexo 1: Predios, área y uso de suelo de los predios de la zona agrícola del ejido Cerrito Blanco**

Predio No	Área (ha)	Uso de suelo
1	3.18605	Parcela
2	2.995974	Parcela
3	2.776509	Parcela
4	2.652783	Parcela
5	4.084166	Parcela
6	2.382215	Parcela
7	4.879058	Parcela
8	4.103882	Parcela
9	1.612028	Parcela
10	9.841181	Parcela
11	4.438932	Parcela
12	4.482508	Parcela
13	1.123053	Parcela
14	1.959224	Parcela
15	0.999739	Parcela
16	0.319012	Parcela
17	0.510173	Parcela
18	0.680456	Parcela
19	0.447468	Parcela
20	0.383817	Parcela
21	2.178571	Parcela
22	0.320099	Parcela
23	3.985344	Parcela
24	3.250454	Parcela

25	9.624767	Parcela
26	4.399112	Parcela
27	8.076384	Parcela
28	1.729267	Parcela
29	1.821891	Parcela
30	4.98361	Parcela
31	1.186696	Parcela
32	2.794906	Parcela
33	1.026758	Parcela
34	1.958833	Parcela
35	1.290575	Parcela
36	1.322233	Parcela
37	7.539007	Parcela
38	7.360646	Parcela
39	7.760361	Parcela
40	1.144854	Parcela
41	0.477508	Parcela
42	0.738621	Parcela
43	1.688632	Parcela
44	1.426537	Parcela
45	2.584652	Parcela
46	1.914212	Parcela
47	1.367143	Parcela
48	0.470756	Parcela
49	1.238554	Parcela
50	0.565681	Parcela
51	0.864277	Parcela
52	8.58341	Parcela
53	6.294408	Parcela
54	7.333093	Parcela
55	6.762307	Parcela
56	5.193247	Parcela

57	0.676651	Parcela
58	2.469343	Parcela
59	2.199934	Parcela
60	6.123129	Parcela
61	1.414881	Parcela
62	0.883393	Parcela
63	6.971674	Parcela
64	8.832513	Parcela
65	8.055207	Parcela
66	7.230423	Parcela
67	2.150168	Parcela
68	1.113294	Parcela
69	2.309299	Parcela
70	3.260333	Parcela
71	1.183902	Parcela
72	1.894029	Parcela
73	2.743612	Parcela
74	2.558918	Parcela
75	2.576576	Parcela
76	2.442526	Parcela
77	3.833307	Parcela
78	7.41921	Parcela
79	7.692611	Parcela
80	8.094485	Parcela
81	8.950516	Parcela
82	7.96763	Parcela
83	7.746509	Parcela
84	7.242224	Parcela
85	7.093519	Parcela
86	7.560068	Parcela
87	8.017505	Parcela
88	3.809057	Parcela

89	4.62075	Parcela
90	11.218957	Parcela
91	8.103763	Parcela
92	3.909542	Parcela
93	5.506187	Parcela
94	5.427541	Parcela
95	5.343716	Parcela
96	6.429429	Parcela
97	5.721904	Parcela
98	7.02523	Parcela
99	114.49136	Parcela
100	8.316101	Parcela
101	8.667925	Parcela
102	8.266005	Parcela
103	10.282891	Parcela
104	5.353799	Parcela
105	8.2988	Parcela
106	9.826559	Parcela
107	3.958173	Parcela
108	7.5492	Parcela
109	12.157235	Parcela
110	1.943219	Parcela
111	0.853342	Parcela
112	1.019939	Parcela
113	1.147726	Parcela
114	5.234441	Parcela
115	5.022972	Parcela
116	1.626064	Parcela
117	1.407642	Parcela
118	2.258543	Parcela
119	0.760768	Parcela



Reference number	X (planeadas y medidas)	Y (planeadas y medidas)	X (medidas en campo)	Y (medidas en campo)	
0					
1	338731	2618657	338732	2618658	10:00
2	338823	2618657	338818	2618659	10:20
3	338915	2618657	338917	2618661	10:33
4	339007	2618657	339001	2618660	10:50
5	339099	2618565	<del>339058</del>	<del>2618707</del>	<del>11:00</del> 11:24
6	339007	2618565	339001	2618566	11:57
7	338915	2618565	338917	2618569	12:14
8	338823	2618565	338828	2618566	13:00
9	338915	2618473	338915	2618437	
10	339007	2618473	339005	2618475	
11	339099	2618473	339096	2618472	13:25
12	339191	2618473	339196	2618463	
13	339191	2618381	339190	2618367	
14	339099	2618381	339098	2618326	
15	339007	2618381	338966	2618409	
16	338915	2618381	338938	2618354	
17	339007	2618289	339000	2618234	
18	339099	2618289	339093	2618290	
19	339191	2618289	339195	2618282	
20	339283	2618289	339287	2618279	
21	339283	2618197	339284	2618196	
22	339191	2618197	339188	2618196	
23	339099	2618197			

X  
339099/2618562

338915/2618438



24	339191	2618105		
25	339283	2618013		
26	339125	2617677		
27	338991	2617677		
28	338991	2617811		
29	338857	2617811		
30	338723	2617811		
31	338723	2617945		
32	338857	2617945		
33	338991	2617945		
34	338857	2618079		
35	338723	2618079		
36	338589	2618079		
37	338589	2618213		
38	338723	2618213		
39	338589	2618347		
40	338544	2617881		
41	338544	2618429		
42	<sup>338815</sup> 338818	<sup>2618429</sup> 2618429	<del>338815</del> 2618429	
43	339092	2618703	339088	2618707 11:00
44	339488	2616837		
45	339049	2616398		
46	339488	2616398		
47	339927	2616398		
48	339927	2615959		
49	339488	2615959		

50	338759	2618703	338757	2618660
51	339094	2618533	338936	2618423
52	339339	2618212		
53				



FORM 43

**Field Observation Form: Comments**

Project: \_\_\_\_\_ Instrument: + \_\_\_\_\_ Sponsors: RR, EV y NH \_\_\_\_\_  
Americ distribution in agricultural soils Taken by: \_\_\_\_\_ INALTE, ME, EV, CC

Reference Number	Comment
11	En suelo no agrícola con vegetación de matorrales, disminuidos
12	De plano estrecho vegetación sin alteración y posiblemente con valores de fondo
13	EN SUELO no agrícola, disminuida pero mal mantenida.
14	Suelo agrícola
54	X 339052 Y 2618272 Capa de "metrica" orgánica sobre suelo rojo.
15	Suelo agrícola cercano al canal con orada paralela al canal, parece parcel de fringed
17	Suelo agrícola
18	Suelo agrícola
16	Suelo agrícola cercano al canal desviado
19	Suelo agrícola cercano a un canal seco.
20	Suelo agrícola histórica.
21	Suelo agrícola
22	Suelo agrícola con mucha vegetación

General comments: \_\_\_\_\_

Page 8/10

**Grupo de Hidrogeoquímica**  
**Emergency numbers and samplers's contact information**

Nombre	Teléfono Celular	Teléfono particular	En caso de accidente, avisar a:	Parentesco	Teléfono
1	Nadia Martínez Villegas 4444236782		Oscar Ivan Martínez	Hermano	4442029097
2	Elena Vázquez Vázquez 4444475648		Angel Vázquez Vázquez	Hermano	4448438210
3	Rodrigo Rodríguez 6622750608		Noheny Rodríguez Hernández	Madre	6622073790
4	Christian Cordero 9931993076		Socorro Vázquez Blanco	Madre	9141087320
5	Yadira Mendoza 4442081435		Dalce Mendoza Cordero	Hermana	4444436911
6					
7					
8					
9					
10					

Emergencias	066
Cruz Roja	065
Bomberos	068
Denuncia anónima	089
CFE	071
Policía Federal de Caminos	062

COC #54

Chain of Custody Record										Sample analysis (sample may contain hazardous substances)																	
COC# <u>54</u>										Is there a Sampling and Analysis Plan? Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>																	
Send samples to:					Laboratory Quote Number					Collection Agency:		Volume (ml)		1		2		3		4		5		6		7	
Payment code:					Spatial pattern:					Filtered		Type*															
Send electronic results to:					Sampling frequency:					Type		Porosity		Preserved		Temp.											
Address correspondence to:					Names of Samplers:					Storage		Temp.															
Laboratory Use Only					Lab Batch Code:					Lab. To filter **																	
Sampling program										Sample details verified by: 1) _____ 2) _____																	
Lab remarks:										Remarks																	
Laboratory Sample Number	Sample Number	Matrix	Matrix Quality	Collection Method	Time 24 (or (initials))	Date (DDMMYYYY)	Site Reference Number	Site Name	Depth Ref. Point	Depth (m)	Number of containers/ filter papers																
	51																										
	52																										
	53																										
	54																										
	55																										
	56																										
Total number of sample containers/filter papers																											
Distribution: While and risk copies accompany samples to lab. LAB confirm condition and number of samples received; fax annotated copy to Department of Environmental Health 24 hrs; return while copy to DEEM with final report; Field fax yellow copy to RB.																											
Relinquished by (print name)	Signature	Date:	Actual Sample QA	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>	8 <input type="checkbox"/>	Required turnaround time 15 or ( )															
Relinquished by (print name)	Signature	Date:	Use data quality guidelines to complete									COC	Lab Analysis	Field QA	Lab QA	At samples stored as described above?	Workload days										
Relinquished by (print name)	Signature	Date:	by (print name)									Signature	Date:	At samples stored as described above?	Workload days												
Relinquished by (print name)	Signature	Date:	by (print name)									Signature	Date:	At samples stored as described above?	Workload days												

\*P=Plastic, e.g. high density polyethylene; AW= acid washed; DKGJ= Dark Glass.  
 Matrix: 1 = Water, 2 = Soil, 3 = Sediment, 4 = Sludge, 5 = Air, 6 = Rock, 16 = Animal tissue, 17 = Plant tissue, 21 = Regolith, 26 = Periphyton tissue, 27 = Pure water, 28 = Macro invertebrate tissue  
 Matrix Quality: F= Fresh, B= Backlash, S= Saline  
 Matrix Quality: In situ (direct) reading or observation, OT = Over Time, ID = Integrated over Depth, CI = Composite sample of discrete sites integrated over depth, CS = Composite Sites, CTM= Composite over time, DA = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP = Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL = Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B = Baller  
 C.M. = Collection Method: Grab, JH or DH = In situ (direct) reading or observation, OT = Over Time, ID = Integrated over Depth, CI = Composite sample of discrete sites integrated over depth, CS = Composite Sites, CTM= Composite over time, DA = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP = Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL = Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B = Baller  
 \*\* Indicates the laboratory is required to filter samples prior to analysis  
 Modified from DOW 2009 Page 1/7



COC #62

Chain of Custody Record		Sample analysis (sample may contain hazardous substances)						
COC # 62		<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7						
	Send samples to: Laboratory: IPICYT Payment code:	Is there a Sampling and Analysis Plan? <input checked="" type="checkbox"/> No Collection Agency: IPICYT	Container: Type: P Filtered: NO	Volume (ml): 2kg				
Instructions: Provide laboratory O&C report with analysis results Address correspondence to: Send electronic results to: IPICYT	Sampling frequency: Single (weekly, etc)	Spatial pattern:	Treatment: Porosity: Preserved					
Laboratory Use: Lab batch code:	Sampling program: COC 43	Names of Samplers: Christian Comdeiro Amanda Zamora Andrea Gomez	Storage: Temp:					
Lab remarks:		Sample details verified by: 1) 2)						

Laboratory Sample Number	Sample Number	Matrix	Matrix Quality	Collection method	Time 24 (DDMMYY)	Date (DDMMYY)	Site Reference Number	Site Name	Depth Ref. Point	Depth (m)	Number of containers/filter papers
1	201803441045	2	5	1045	14032018	18	1045	MADRIGALITOS		0.21	1
2	201803441050	2	5	1050	14032018	18	1050	MADRIGALITOS		0.21	1
3	201803441052	2	5	1052	14032018	18	1052	MADRIGALITOS		0.21	1
4	201803441055	2	5	1055	14032018	18	1055	MADRIGALITOS		0.21	1
5	201803441058	2	5	1058	14032018	18	1058	MADRIGALITOS		0.21	1
6	201803441101	2	5	1101	14032018	18	1101	MADRIGALITOS		0.21	1
7	201803441118	2	5	1118	14032018	18	1118	MADRIGALITOS		0.21	1
8	201803441120	2	5	1120	14032018	18	1120	MADRIGALITOS		0.21	1
9	201803441125	2	5	1125	14032018	18	1125	MADRIGALITOS		0.21	1
10	201803441126	2	5	1126	14032018	18	1126	MADRIGALITOS		0.21	1
11	201803441128	2	5	1128	14032018	18	1128	MADRIGALITOS		0.21	1
12	201803441130	2	5	1130	14032018	18	1130	MADRIGALITOS		0.21	1
13	201803441130	2	5	1130	14032018	18	1130	MADRIGALITOS		0.21	1
14	201803441150	2	5	1150	14032018	18	1150	MADRIGALITOS		0.21	1
15	201803441155	2	5	1155	14032018	18	1155	MADRIGALITOS		0.21	1
16	201803441158	2	5	1158	14032018	18	1158	MADRIGALITOS		0.21	1
17	201803441200	2	5	1200	14032018	18	1200	MADRIGALITOS		0.21	1
18	201803441202	2	5	1202	14032018	18	1202	MADRIGALITOS		0.21	1
19	201803441204	2	5	1204	14032018	18	1204	MADRIGALITOS		0.21	1

**Total number of sample containers/filter papers** 18

**Actual Sample QA**  1  2  3  4  5  6  7  8

**Use data quality guidelines to calculate**

Received by (print name)	Signature	Date:	Time:	Received by (print name)	Signature	Date:	Time:

**\*\*Indicates the laboratory is required to filter samples prior to analysis**

**Matrix:** 1 = Water, 2 = Soil, 3 = Sediment, 4 = Sludge, 5 = Air, 6 = Rock, 16 = Animal Tissue, 17 = Plant tissue, 21 = Reagent, 26 = Periphyton tissue, 27 = Porewater, 28 = Macro (vertebrate tissue)

**Matrix Quality:** F = Fresh, B = Barckish, S = Saline

**Collection Method:** G = Grab, I = In-situ (direct reading or observation), O = Over Time, D = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP = Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL = Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B = Bottom, CS = Composite Sites, CTM = Composite over time, DA = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP = Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL = Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B = Bottom

**Required turnaround time 15 or ( ) WORKING DAYS**

**All samples stored as described above? Yes/No**

**All samples stored as described above? Yes/No**

**All samples stored as described above? Yes/No**

62

Chain of Custody Record

Send samples to: <i>Christian Colunga</i>		Is there a Sampling and Analysis Plan? <input checked="" type="checkbox"/> No	
Laboratory Quote Number	Collection Agency: <i>PICT</i>	Spatial pattern:	Sampling frequency: <i>single</i> (weekly, etc)
Payment code:	Send electronic results to:	Names of Samplers:	<i>Christian Colunga, Armando Zamora</i>
Provide laboratory analysis results	Provide laboratory QAOQC report with analysis results	Address correspondence to:	<i>Christian Colunga, Armando Zamora</i>
Laboratory Use Only	Lab Batch Code:	Sampling program	<i>COE 43</i>
Lab remarks:		Sample details verified by: 1) _____ 2) _____	Lab. To filter **
Remarks:			

Laboratory Number	Sample Number	Matrix	Matrix Quality	Collection Method	Time 24 hr (HHMM)	Date (DDMMYYYY)	Site Reference Number	Site Name	Depth Ref. Point	Depth (m)	Number of containers/ filter papers	Volume (ml)	Type*	Filtered	Porosity	Preserved	Temp.	Time
1	201803141228	2	0	1218	14022018	QC	Final de Lona		1.1	1								
2	201803141230	2	6	1218	14032018	QC	Final de Lona		2.1	1								
3	201803141230	1	6	1230	14032018	QC	Final de Lona		1.3	1								
4	201803141232	1	6	0352	14032018	QC	Final de Lona		1.9	1								
5	201803141234	1	6	1234	14032018	QC	Final de Lona		2.8	1								
6	201803141235	1	6	1235	14032018	QC	Final de Lona		1.6	1								
1	201803141252	1	6	1252	14032018	QC	Florencia		1.1	1								
2	201803141252	1	6	1252	14032018	QC	Florencia		1.3	1								
3	201803141254	2	6	1254	14032018	QC	Florencia		1.4	1								
4	201803141254	2	6	1254	14032018	QC	Florencia		1.5	1								
5	201803141255	1	6	1255	14032018	QC	Florencia		1.6	1								
6	201803141255	1	6	1255	14032018	QC	Florencia		1.6	1								
1	201803141350	1	6	1335	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.1	1								
2	201803141334	2	6	1334	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.4	1								
3	201803141334	2	6	1334	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.3	1								
4	201803141344	2	6	1344	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.4	1								
5	201803141344	2	6	1344	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.5	1								
6	201803141346	2	6	1346	14032018	QC	Chuvos y Agave		1.6	1								

Total number of sample containers/filter papers

Distribution: White and pink copies accompany samples to lab. LAB confirm condition and number of samples received; fax annotated copy to Department of Environmental within 24 hrs; return white copy to DOE with final report; Field fax yellow copy to RB.

Retinquished by (print name)	Signature	Date:	Received by (print name)	Signature	Date:
Retinquished by (print name)	Signature	Date:	Received by (print name)	Signature	Date:

\*P=Plastic, e.g. high density polyethylene; AW= acid washed; DSGI= Dark Glass.  
 Matrix: 1 = Water, 2 = Soil, 3 = Sediment, 4 = Sludge, 5 = Air, 6 = Rock, 16 = Mineral tissue, 17 = Plant tissue, 21 = Regolith, 26 = Periphyton tissue, 27 = Pure water, 28 = Macro Invertebrate tissue  
 Matrix Quality: F= Fresh, B= Brackish, S= Saline  
 C. M.: Collection Method; G= Grab, IN or DR= In situ (direct) reading or observation, OT = Over Time, ID = Integrated over Depth, CI = Composite sample of discrete sites, integrated over depth, CS = Composite Sites, CTM: Composite over time, DA = Discrete Auto sampler, CA = Composite Auto sampler, PS = Pump Submersible, PP = Pump Peristaltic, PT = Pump Test, AL= Air Lift, VS = Vacuum Sampler, B = Bailor  
 Modified from DOW 2009

Field Observation Form: Hydrodynamic Data

FOF #




Project: \_\_\_\_\_  
 Instrument: \_\_\_\_\_  
 Measured by: \_\_\_\_\_  
 Samplers: \_\_\_\_\_

Reference Number	X	Y	Z	Time Collected HH:MM	Date collected DDMMYY	Well Casing (in)	Discharge Diameter (in)	Total Well Depth (m)	Depth ref Point (m)	Sample Depth (m)	Sample depth not apply to these readings		Water Level Status Code	Sample Comments
											Static Water level (m)	Dynamic water level (m)		
6C			1587		140348									
7C			1504		141038									
8C			1522		140348									
9C			15202		140348									
10C			1525		140348									
11C			1517		140348									
12C			1517		140348									
13C			1517		140348									
14C			1517		140348									
15C			1517		140348									
16C			1517		140348									
17C			1517		140348									
18C			1517		140348									
19C			1517		140348									
20C			1517		140348									
21C			1517		140348									
22C			1517		140348									
23C			1517		140348									
24C			1517		140348									
25C			1517		140348									
26C			1517		140348									
27C			1517		140348									
28C			1517		140348									
29C			1517		140348									
30C			1517		140348									
31C			1517		140348									
32C			1517		140348									
33C			1517		140348									
34C			1517		140348									
35C			1517		140348									
36C			1517		140348									
37C			1517		140348									
38C			1517		140348									
39C			1517		140348									
40C			1517		140348									
41C			1517		140348									
42C			1517		140348									
43C			1517		140348									
44C			1517		140348									
45C			1517		140348									
46C			1517		140348									
47C			1517		140348									
48C			1517		140348									
49C			1517		140348									
50C			1517		140348									

General comments: \_\_\_\_\_

Water Level Status Codes: Decreasing=DD; Increasing=II; Static=ST; Peak=PE; Trough=TR; Dry=DR

Page 5/7  
Modified from DOW 2009

### Anexo 3: Modelo teórico de Ryjov para el cálculo del contenido de finos

La conductividad para la arena ( $\sigma_{ar}$ ) y arcilla ( $\sigma_{arc}$ ), se expresan a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{ar} = \Phi^{m_{ar}} \sigma_{ar cap} \quad (A5.1)$$

$$\sigma_{arc} = \Phi^{m_{arc}} \sigma_{arc cap} \quad (A5.2)$$

Donde:

$$\Phi_{ar} = V_{ar \text{ por}} / V_{ar}$$

$$\Phi_{arc} = V_{arc \text{ por}} / V_{arc}$$

Que, a su vez  $V_{ar \text{ por}}$  y  $V_{arc \text{ por}}$ , son valores de porosidad para componentes de arena y arcilla respectivamente; pero,  $V_{ar}$  y  $V_{arc}$  es el volumen total de arena y arcilla respectivamente;  $\sigma_{ar \text{ cap}}$  y  $\sigma_{arc \text{ cap}}$  es la conductividad de un capilar de arena y arcilla respectivamente;  $m$  es el exponente de cementación.

La conductividad promedio  $\tilde{\sigma}_{cap}$  de un capilar completamente saturado puede ser considerada como una función variable en función del radio  $\sigma(r)$  que, a su vez depende de las propiedades de la DCE, en específico el espesor y la concentración de las sales, según:

$$\tilde{\sigma}_{cap} = \frac{2}{r_c} \int_0^{r_c} r \sigma(r) dr \quad (A5.3)$$

Donde  $r_c$  es el radio capilar.

Para suelos parcialmente saturados, la fase no conductora ocupa la parte central de los poros, debido a que los suelos están generalmente húmedos. Para este caso la ecuación es:



$$\tilde{\sigma}_c = \frac{2}{r_c} \int_{r_w}^{r_c} r \sigma(r) dr, \quad (A5.4)$$

Donde  $r_w = r_c \sqrt{1 - S_w}$  es el radio interno de la película de agua presente en los capilares;  $S_w$  es la saturación de agua y se expresa en fracción del volumen total de poro.

En los poros de la arena, donde los capilares son más grandes, la conductividad promedio de los canales de arena  $\sigma_{ar\ cap}$  no depende del radio capilar y corresponde al valor de la conductividad del agua libre  $\sigma_w$ . Entonces, la conductividad del agua, con o sin influencia de las paredes capilares, depende de la concentración de sal, de las propiedades de los aniones y cationes y de la DCE. La conductividad de la solución acuosa, puede ser aproximada mediante una función que depende de la concentración de cationes y aniones asociada al efecto de hidratación (Rylov, 1987); dicha función se expresa mediante la ecuación:

$$\sigma_w = F \left\{ z_c U_c C_c \exp\left(\frac{C_c}{1000zn}\right) + z_a U_a C_a \exp\left(\frac{C_a}{1000zn}\right) \right\} \quad (A5.5)$$

Donde:

$z_c, z_a$  = cargas o valencias que poseen los iones.

$F$  = es el número de Faraday equivalente a: 96485 Q/mol

$C_c, C_a$  = concentraciones de cationes y aniones en la solución

$U_c, U_a$  = movilidad de los cationes y aniones

$n$  = número de hidratación

Esta aproximación permite hacer una estimación de la conductividad del agua para diferentes tipos de sales como: NaCl, KCl, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>, etc., en un amplio rango de salinidad entre 0.001 y 120 g L<sup>-1</sup>.

Sin embargo, para determinar el valor de la conductividad para los finos capilares que componen las arcillas, es necesario aplicar una ecuación análoga a la ecuación (A5.5); en la cual, la concentración de aniones y cationes están en función del radio capilar y

de la CIC de las arcillas. La distribución radial de la conductividad en los capilares depende de la variación en la concentración de cationes y aniones,  $C_a(r)$  y  $C_c(r)$  respectivamente en los poros. Dicha ecuación es:

$$\sigma(r) = F \left\{ z_c U_c C_c(r) \exp\left(\frac{C_c(r)}{1000zn}\right) + z_a U_a C_a(r) \exp\left(\frac{C_a(r)}{1000zn}\right) \right\} \quad (A5.6)$$

Donde:  $C_c(r)$  y  $C_a(r)$  son las concentraciones de cationes y aniones en mol/m<sup>3</sup> como función de la distancia  $r$  desde la pared del capilar. Dicha concentración también depende de la CIC de la fase sólida; específicamente,  $C_i(r) = C_i^{\text{DCE}}(r) + C_i^{\text{CIC}}(r)$ ; donde el índice  $i$  indica los cationes y aniones específicos.

El fenómeno de la Doble Capa Eléctrica (DCE), depende principalmente de las concentraciones de iones calculadas para cada concentración de sal. CIC depende básicamente de las propiedades de la fase sólida; es decir, cuando hay un cambio en la concentración de iones, existe un cambio en la influencia de la DCE de acuerdo al tipo de solución, pero la CIC no cambia.

Entonces, la concentración  $C_i(x)$  de aniones y cationes con carga  $z_i$  dentro de la DCE está basada en la ecuación de Boltzmann seguido de la teoría desarrollada por Langmuir, Frumkin y Stern (Fridikhsberg, 1984):

$$C_i(x) = C_{0i} \exp\left(\frac{-z_i F \psi(x)}{RT}\right), \quad (A5.7)$$

Donde:  $C_{0i}$  es la concentración de aniones y cationes dentro de una solución eléctricamente neutra.

$x$  es la distancia mínima desde un punto dentro de la fase líquida a la superficie sólida.  $\psi(x)$  es el potencial eléctrico dentro de un fluido a una cierta distancia  $x$  desde la pared capilar.

$R$  es la constante de gas,  $T$  es la temperatura absoluta °K.

El potencial eléctrico está en función de la distancia  $x$  desde la pared capilar; es determinada por medio de la distribución de la carga presente en la doble capa

eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico en la fase sólida. Dicha función se determina a partir de la ecuación de Poisson-Boltzmann (Hans-Jürgen et al., 2004):

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{\rho(x)}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (A5.8)$$

Donde:

$$\rho(x) = \sum_i z_i F C_i(x)$$

es la suma de los iones a una distancia  $x$ ;  $\varepsilon$  es la constante dieléctrica relativa para un fluido;  $\varepsilon_0$  es la permeabilidad del vacío ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m).

Finalmente, la microestructura que componen a los suelos areno-arcillosos puede ser descrita como un empaquetamiento ideal de mezclas binarias de partículas finas con formas semiesférica (McGeary, 1961). Cuando la concentración de arcilla es menor que la porosidad de la arena, las partículas de arcilla se acomodan dentro de los poros de la arena como películas en las paredes de los granos de arena; o bien, como tapones en los capilares de la arena; esto sin modificar la estructura. Sin embargo, cuando la concentración de arcilla es mayor que la porosidad de la arena, los granos de arena se encuentran en la arcilla.

La porosidad total  $\Phi_t$  para suelos areno-arcillosos se calcula mediante las expresiones (Marion et al., 1992; Ryjov and Sudoplatov, 1990):

$$\Phi_t = (\Phi_{\text{arena}} - C_{\text{arcilla}}) + \Phi_{\text{arcilla}} * C_{\text{arcilla}} \quad \text{para } C_{\text{arcilla}} < \Phi_{\text{arena}} \quad (A5.9)$$

$$\Phi_t = C_{\text{arcilla}} * \Phi_{\text{arcilla}} \quad \text{para } C_{\text{arcilla}} \geq \Phi_{\text{arena}} \quad (A5.10)$$

Donde:  $C_{\text{arcilla}}$  es el contenido de arcilla volumétrico de la mezcla.

Por último, cuando  $C_{\text{arcilla}} > \Phi_{\text{arena}}$ , la conductividad total del suelo  $\sigma_\Sigma$  corresponde a la conductividad efectiva; ( $\sigma_{\text{arcilla}}$  la conductividad de la arcilla). Los valores de dichas

---

conductividades dependen del tamaño de los capilares, la porosidad de la arcilla y su concentración. Pero si  $C_{arcilla} < \phi_{arena}$  la conductividad del suelo es definida por los poros de la arena, así como por los de arcilla.

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{arcilla} C_{arcilla} * \phi_{arcilla}^m \quad (A5.11)$$

## Anexo 4: Concentraciones de arsénico total y arsénico soluble en suelos superficial y columnas

A continuación, se presenta los resultados de concentración de arsénico total y arsénico soluble en la Tabla 8, lo cual corresponde a las concentraciones de muestras superficiales (0-30 cm) obtenidas en los campos de cultivo del ejido Cerrito Blanco, San Luis Potosí.

Tabla 7. Coordenadas UTM, As total y As soluble de muestras de suelo superficial (0-30 cm) de campos agrícolas.

Muestra	Coordenadas		As total mg Kg <sup>-1</sup>	Desviación estándar	As soluble mg L <sup>-1</sup>
	x	y			
1	338732	2618658	41.52		
2	338818	2618659	76.91		0.253
3	338917	2618661	75.65		ND
4	339001	2618660	54.54		0.098
5	339097	2618562	43.70	2.05	ND
6	339001	2618566	98.31		0.248
7	338915	2618565	72.18		0.176
8	338828	2618566	185.37		0.802
9	338915	2618437	52.253		
10	339005	2618475	96.23	2.78	
11	339096	2618472	52.39		nd
12	339196	2618463	15.50		nd
13	339198	2618367	87.84		0.255
14	339098	2618326	88.76		0.287
15	338966	2618409	44.24	2.85	ND
16	338915	2618381	99.39		0.385
17	339000	2618234	71.96		0.182
18	339093	2618290	64.19		ND
19	339195	2618282	129.19		ND
20	339287	2618274	59.51	3.02	ND
21	339284	2618196	44.35		ND
22	339188	2618196	107.22		ND
23	339099	2618197	97.050		
42	339088	2618707	120.596		
43	339088	2618707	8.03		nd

nd: No detectado

ND: No determinado

En la Tabla 9 se presenta la concentración de arsénico total correspondiente a las muestras de columnas de acuerdo a cada una de las profundidades, 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, y 50-60 cm.

Del mismo modo se presentan las concentraciones de arsénico soluble de cada una de las muestras de columnas en la Tabla 10.

Tabla 8. Arsénico total de columnas de suelo.

Profundidad (cm)	Arsénico total (mg Kg <sup>-1</sup> )					
	C – 1	C – 9	C – 10	Desviación estándar	C – 23	C – 42
0-10	41.52	65.50	96.85	1.67	112.33	127.04
10-20	0.54	48.40	97.26	5.46	98.79	121.51
20-30	2.21	42.85	94.58	4.55	80.03	113.24
30-40		33.60	93.71	0.05	82.55	99.84
40-50		25.56	94.38	0.53	82.83	80.80
50-60		17.52	94.29	5.65	78.59	92.83

Tabla 9. Arsénico soluble de muestras de columnas de suelo.

Profundidad (cm)	Arsénico soluble (mg L <sup>-1</sup> )				
	C – 1	C – 9	C – 10	C – 23	C – 42
0-10	nd	0.288	0.399	0.573	0.557
10-20	nd	ND	0.277	0.369	0.504
20-30	nd	ND	0.141	0.619	0.350
30-40		ND	0.159	0.537	0.488
40-50		ND	0.208	0.376	0.360
50-60		ND	0.267	0.460	0.618

nd: No detectado

ND: No determinado