



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA VIDA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN
SUELOS AGRÍCOLAS DEL MUNICIPIO DE IRAPUATO
(GUANAJUATO) MEDIANTE EXTRACCIÓN QUÍMICA SIMPLE**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO LICENCIATURA EN
INGENIERIA AMBIENTAL**

PRESENTA:

KARLA FERNANDA SOLIS REYES

DIRECTORA:

DRA. GABRIELA ANA ZANOR

CODIRECTORA:

DRA. ADRIANA SALDAÑA ROBLES

IRAPUATO, GTO.

MARZO 2021

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo cariño a mi mamá y papá, quienes me han brindado su amor y afecto desinteresado durante toda mi vida. Porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar una de mis más grandes metas, lo cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir para continuar con mi superación. Gracias, mamá por ser mi ejemplo de vida al superar cada obstáculo, porque a pesar de vivir momentos difíciles, te levantas cada día para dar tu mejor esfuerzo y darnos amor incondicional. Gracias, papá por siempre desear y anhelar lo mejor para mí. Tú fuiste quien me enseñó que con trabajo y constancia todo se puede lograr. Los amo.

A papá buelo y mamá cucuca, como un testimonio de eterno agradecimiento por todo su amor tan cálido y por toda una vida de lucha, sacrificio y esfuerzo constante. Sólo quiero que sientan que el objetivo logrado también es suyo y que la fuerza que me ayudó a conseguirlo fue su incondicional apoyo. Los amo muchísimo y para siempre.

A mis hermanitos Fátima, Carlos y Vienna por ser mis compañeros inseparables y por cuidarme siempre aun siendo los menores. Mi mayor anhelo es verlos feliz, triunfando en la vida... incluso siendo mejor que yo.

A Chuy, mi tío favorito porque desde mi infancia ha sido un hombre maravilloso que tiene el corazón en las nubes, pero los pies en la tierra. Agradezco sus consejos que me han guiado y alentado para superar obstáculos. Con amor, admiración y respeto.

A Denisse, Ale, Bobby, Chino, Saúl, Rollo, Ivanovich y Blair por su apoyo incondicional, por compartir conmigo alegrías, tristezas, éxitos y fracasos en esta etapa de vida, pero sobre todo por creer en mí. Gracias por siempre estar ahí y por su sincera amistad.

A Martha, Yunuen, Mony y Yuli, mujeres brillantes y talentosas a quienes admiro.

A Gucci, Patan, Jack, Nala, Kiara, Megara y Cosito, mis mascotas queridas que se desvelaban junto conmigo, dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la orientación que siempre me han otorgado todos los profesores de la licenciatura en Ingeniería Ambiental, con respeto y admiración.

Estoy profundamente agradecida con la Dra. Gabriela Ana Zanor, como catedrática y asesora porque contribuyó muy generosamente con su valioso tiempo, compartiendo sus aptitudes especiales, sus grandes conocimientos y gracias a su paciente conducción y dedicación, mi tesis pudo ser terminada con gran sentido de responsabilidad e interés personal. A usted extendiendo un sincero reconocimiento.

Dra. Adriana Saldaña Robles, le agradezco que haya dedicado sus conocimientos, sabios consejos, confianza y apoyo para la realización de mi tesis y la culminación satisfactoria de mi educación profesional universitaria. Por su interés como asesora gracias por siempre.

A mi familia por fomentar en mí el deseo de superación en la vida y siempre con palabras de aliento para continuar luchando.

Gracias a Ame porque a través de sus consejos, esfuerzos contantes y su dedicación para formarme y educarme, logré forjar un camino. Mil gracias por todo, te quiero.

Mi agradecimiento eterno a mi *alma máter*, la Universidad de Guanajuato, a la cual siempre recordaré con mucho cariño por haberme permitido formarme en sus aulas.

Gracias a Fer por los mensajes de ánimo, por escuchar cuando lo necesito y por ese sentido del humor que me alegra la vida. Te quiero.

Gracias a Alexandra Elbakyan por el acceso gratuito al conocimiento.

Mil gracias a ustedes y a Dios por permitir que vivamos esta difícil pero hermosa realidad.

*“Ya que vivimos
en este mundo,
debemos hacer lo mejor
que podamos por él.”*

Aung San Suu Kyi

RESUMEN

El sistema edáfico es un recurso natural esencial para la vida misma, pero se encuentra en estado crítico. Actualmente se ha constatado que la contaminación del sistema suelo-agua, provocada por metaloides, se relaciona con la pérdida y deterioro de la calidad de los servicios ambientales que se obtienen del edafosistema; siendo, quizá, de mayor interés la producción de alimentos, puesto que también, se pone en riesgo tanto la seguridad alimentaria, como el medio ambiente.

El suelo del municipio de Irapuato, Guanajuato, está caracterizado por ser altamente propicio para la agricultura. De hecho, Irapuato ocupa el primer lugar en exportación de agroalimentos a nivel nacional y, debido a esto, la producción agrícola se considera una actividad productiva de gran importancia en la región. Sin embargo, es conocido y reportado que en Irapuato existe una problemática de contaminación por Arsénico (As) en suelo y agua de uso agrícola.

Los estudios de especiación de los contaminantes nos permiten obtener información más detallada sobre su disponibilidad, a causa de que, la concentración total de los elementos se encuentra repartida en distintas fracciones o asociada a diferentes especies químicas. En particular, la fracción soluble de metales o metaloides del suelo se considera la más disponible, puesto que, podría permitir la transferencia del elemento hacia sistemas acuosos y/o al cultivo y, por ende, su incorporación a la cadena trófica.

Este estudio propone la cuantificación de la fracción soluble de As en suelos agrícolas del municipio de Irapuato. Para ello, seis suelos con impacto por actividad agraria fueron muestreados a una profundidad de 15 cm desde la superficie (S1, S2, S3, S4, S5 y S6). Las muestras correspondieron a suelos con aplicación de agroquímicos cuyos cultivos son destinados al consumo humano y animal. Además, las muestras S1, S2, S3 y S6 fueron colectadas en suelo agrícola de riego anual y bajo la influencia de agua de riego procedente de pozos profundos ricos en As, mientras que las muestras S4 y S5 pertenecen a suelo agrícola temporal.

La especiación del As se efectuó a través del método de Extracción Química Simple. Complementariamente, se calculó del Índice de geoacumulación (I_{geo}) con las

concentraciones del As total en el suelo para conocer el grado de contaminación. De igual forma, se determinaron las principales propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo: pH, humedad, carbono orgánico (CO), contenido de arcilla y conductividad eléctrica (CE).

Las características físicas y químicas de los suelos mostraron diferencias entre los distintos sitios de muestreo y condiciones óptimas para el cultivo.

Se observaron contenidos de arcilla, humedad y CO más altos en los suelos Vertisoles que en los Entisoles. En general, el contenido de humedad en ambos suelos aumentó conforme incrementó el contenido de arcilla, aludiendo que la estructura expandible de la arcilla permite una mayor retención de agua. Asimismo, el contenido de humedad fue afectado positivamente por el contenido de CO, resaltando la influencia de la MO en la disponibilidad de agua.

Los resultados de pH categorizaron a los suelos como alcalinos y los valores de CE indicaron efectos despreciables de salinidad. No obstante, los suelos con agricultura de riego presentaron valores más altos de CE en comparación con los suelos de agricultura temporal. Este hecho se puede relacionar con la fuente del agua de riego, puesto que, procede de pozos, del acuífero Irapuato-Valle, con agua de media y alta salinidad.

Aun cuando las concentraciones de As total de los suelos estudiados se encuentran por debajo del límite de referencia reportado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso agrícola (22 mg/Kg), hay que tener en cuenta que el contenido de As en los suelos Entisoles supera el valor de fondo, lo que indica que la influencia antrópica está repercutiendo en la acumulación de As en estos suelos. Se debe agregar que, no hay normas equivalentes en diferentes países u organización para la comparación del límite permisible del As en suelo agrícola establecido por la legislación.

Los resultados del I_{geo} revelaron que no existe contaminación por As en las muestras S1, S3, S5 y S6. Por el contrario, el I_{geo} de las muestras aledañas al Río Guanajuato (S2 y S4) indica suelo no contaminado a moderadamente contaminado por As. Además, el contenido de As total en los suelos se ve favorecido con la cercanía al Río

Guanajuato, debido a que es el principal medio de transporte en que migran los desechos industriales, urbanos, agrícolas e incluso jales del distrito minero de Guanajuato. Por lo tanto, el río Guanajuato actúa como principal fuente de contaminación por As en los suelos.

A pesar de que los suelos Entisoles mostraron mayor contenido de As total en comparación con los suelos Vertisoles, la fracción soluble del As fue menor en los suelos Entisoles (>25%) que en los suelos Vertisoles (<50%), probablemente porque las partículas minerales (óxidos e hidróxidos de Fe), aumentan el contenido de As total en los suelos Entisoles, pero disminuyen la fracción soluble del As mediante la retención del metaloide en procesos de adsorción o precipitación.

El alto %As soluble en los suelos Vertisoles, indica que gran parte del contenido de As en estos suelos se encuentra disponible en su forma soluble. Además, la disminución de la fracción soluble del As en los suelos Vertisoles puede estar determinada por los procesos de sorción en carbonato de calcio.

Los resultados de la fracción soluble del As en los suelos no fueron uniformes, por lo que, la solubilidad de este elemento se atribuye a las diferentes características edáficas. Se presentó una correlación positiva entre el aumento de la fracción soluble del As y el incremento del contenido de humedad, arcilla y CO, evidenciando la liberación del As en partículas de arcilla conforme se eleva el contenido humedad y CO en el suelo.

Palabras clave

Suelo agrícola, Irapuato, fracción soluble, arsénico

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 El suelo	4
2.2 Composición del suelo	4
2.3 Perfil del suelo	6
2.4 Formación del suelo	7
2.5 Factores ecológicos de formación del suelo	9
2.5.1 Material parental	9
2.5.2 Biota	10
2.5.3 Clima	11
2.5.4 Topografía	12
2.5.5 Tiempo	12
2.6 Propiedades físicas del suelo	13
2.6.1 Porosidad y densidad	13
2.6.1.1 Contenido de humedad	13
2.6.2 Conductividad eléctrica	15
2.6.3 Textura	16
2.7 Propiedades químicas del suelo	18
2.7.1 Reacción del suelo (pH)	18
2.7.2 Carbono Orgánico	19
2.8 Funciones del suelo	20
2.9 Sistema suelo-agua	21
2.10 Arsénico	21
2.10.1 Ciclo biogeoquímico del Arsénico	24
2.10.2 Fuentes de origen natural (fondo geoquímico) del Arsénico	25
2.10.3 Fuentes antropogénicas de Arsénico	26
2.10.4 Toxicidad del Arsénico	27
2.11 Presencia del Arsénico en el edafosistema	27
2.11.1 Adsorción del Arsénico en el suelo	29
2.12 Arsénico como contaminante	30
2.1.1 Normatividades	31

2.1.2	Problemática del Arsénico en Irapuato (Guanajuato)	32
2.13	Características y uso de suelo en Irapuato (Guanajuato)	33
2.14	Calidad del agua en irapuato (Guanajuato)	34
2.15	Extracción Química	35
3.	JUSTIFICACIÓN	37
4.	OBJETIVOS	38
4.1	Objetivo general	38
4.2	Objetivos particulares	38
5.	HIPÓTESIS	39
6.	ÁREA DE ESTUDIO	40
6.1	Uso del suelo y vegetación	41
6.1.1	Agricultura de riego	43
6.1.2	Agricultura de temporal	43
6.2	Características físicas y geográficas	44
6.2.1	Fisiografía y topografía	44
6.2.2	Geología	45
6.2.3	Edafología	47
6.2.4	Orografía	48
6.3	Hidrología superficial	49
6.4	Hidrología subterránea	52
6.4.1	Acuífero Silao–Romita	52
6.4.2	Acuífero Irapuato-Valle	53
6.5	Climatología	55
6.5.1	Temperatura	57
6.5.2	Precipitación	57
7.	MATERIALES Y MÉTODOS	59
7.1	Muestreo de suelos	59
7.2	Preparación de las muestras	59
7.3	Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo	60
7.3.1	Medición de pH	60
7.3.2	Conductividad Eléctrica	61
7.3.3	Humedad	61
7.3.4	Pérdida de Peso por Ignición	62

7.4	Cuantificación del Arsénico total.....	63
7.5	Extracción Química Simple.....	63
7.6	Colorimetría de azul de molibdeno	64
7.6.1	Curva de calibración.....	65
7.7	Índice de Geoacumulación	66
7.8	Análisis estadístico de los datos.....	67
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
8.1	Resultados de las propiedades químicas y físicas de los suelos	68
8.2	Índice de geoacumulación.....	71
8.3	Concentración total y soluble en agua del Arsénico	71
8.4	Correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo con la fracción soluble del Arsénico.....	74
9.	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	78
10.	LITERATURA CITADA.....	81
11.	ANEXOS	92
	Anexo 1.....	93
	Anexo 2.....	98
	Anexo 3.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición en volumen de un suelo superficial. Fuente: Henríquez (2011).	5
Figura 2: Esquema de las fases del suelo. Fuente: Tapia (2012).	6
Figura 3: Esquema generalizado del perfil de suelo en profundidad. Se muestran los distintos horizontes y sus características principales. Fuente: Gliessman (2002).	7
Figura 4: Procesos de transformación, adición, traslocación y pérdida. Fuente: Krzic <i>et al.</i> (2013).	9
Figura 5: Características de las texturas del suelo frente al agua. Fuente: Angella <i>et al.</i> (2016).	17
Figura 6: Triángulo de Texturas. Fuente: Eash <i>et al.</i> (2008).	17
Figura 7: Diagrama del ciclo biogeoquímico del As. Fuente: García (2013). V=Volátiles; AM=Actividad microbiana; LL=Lluvia; DS=Deposición seca; AD=Adsorción- Desorción; PD=Precipitación- Disolución; OR=Oxidación- Reducción; DT=Descarga- Transporte.....	25
Figura 8: A) Especies de As (V) como función de pH. B) Especies de As (III) como función de pH. Fuente: Smedley & Kinniburgh (2002).	29
Figura 9: Distribución de cargas de algunos coloides del suelo (Sadiq, 1997).....	30
Figura 10: Ubicación del área de estudio. Fuente: INEGI (2016). Elaboración propia.	40
Figura 11: Ubicación de los sitios de muestreo: S1, S2, S3, S4, S5 y S6. Fuente: IPLANEG (2019). Elaboración propia.....	41
Figura 12: Uso del suelo y vegetación de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: IPLANEG (2015). Elaboración propia.	42
Figura 13: Sistema de topoformas del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2000). Elaboración propia.	44
Figura 14: Geología del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.	45
Figura 15: Caracterización edafológica del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.	47
Figura 16: Orografía de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.....	49
Figura 17: Región Hidrológica y cuenca del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.	50

Figura 18: Cercanía de minas, asentamiento humano y zonas industriales al área de influencia de Río Guanajuato. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.	51
Figura 19: Acuíferos y pozos del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.	52
Figura 20: Clima de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2008). Elaboración propia.	55
Figura 21: Climograma de la estación meteorológica “El Copal” en Irapuato, Gto. Base de datos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).	56
Figura 22: TMAH de Irapuato (periodo 1910-2009). Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: Cuervo-Robayo <i>et al.</i> (2014). Elaboración propia.	57
Figura 23: PMAH de Irapuato (periodo 1910-2009). Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: Cuervo-Robayo <i>et al.</i> (2014). Elaboración propia.	58
Figura 24: Muestreo de los suelos A) S1, B) S2 y C) S3.	59
Figura 25: Medición del pH del suelo con potenciómetro.	60
Figura 26: Medición de la CE en las muestras de suelo.	61
Figura 27: Equipo de ICP-AES. Fuente: Tecnofrom (2009).	63
Figura 28: Agitador de incubación con muestras.	64
Figura 29: Filtración a través de una membrana de 0.45 µm.	64
Figura 30: Realización del método colorimétrico de azul de molibdeno.	65
Figura 31: Curva de calibración de contenido de As.	66
Figura 32: Concentraciones de As total y As soluble en agua de las muestras.	72
Figura 33: Porcentaje de As soluble en agua con respecto a la concentración de As total de cada muestra de suelo.	73
Figura 34: %As soluble en función del contenido de As total de las muestras de suelo.	74
Figura 35: A) %As soluble en función del contenido de humedad de las muestras de suelo B) %As soluble en agua en función de la CE de las muestras de suelo C) %As soluble en agua en función del contenido de CO de las muestras de suelo D) %As soluble en agua en función del pH de las muestras de suelo E) %As soluble en función del contenido de Arcilla obtenido de Zanol <i>et al.</i> (2019) y Medina (2017).	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Interpretación de la determinación de cantidad del agua del suelo (SAGARPA, 2013).....	15
Tabla 2: Clasificación de los suelos con relación a su CE y el efecto sobre los cultivos (Castellanos, 2000).	15
Tabla 3: Clasificaciones de los suelos según el valor del pH (USDA, 1993).	18
Tabla 4: Clasificación del %CO en suelo (IICA, 1979).....	19
Tabla 5: Funciones del suelo (European Commission, 2016).....	20
Tabla 6: Principales compuestos inorgánicos de arsénico de origen natural (Francesconi & Kuehnelt, 2002; IPCS, 2005).....	22
Tabla 7: Principales compuestos orgánicos de arsénico de origen natural (Francesconi & Kuehnelt, 2002; IPCS, 2005).....	22
Tabla 8: Uso comercial de compuestos de As (Sarkar, 2002).....	26
Tabla 9: Límites máximos permisibles para el As y sus compuestos según distintos organismos.....	32
Tabla 10: Coordenada geográficas y fecha de recolección de los puntos de muestreo.	42
Tabla 11: Unidades litológicas del área de estudio (INEGI, 2005).....	46
Tabla 12: Clasificación del I_{geo} y grado de contaminación (Loska <i>et al.</i> , 1996).....	67
Tabla 13: Resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos analizados.	68
Tabla 14: Resultados del I_{geo} de las muestras.	71

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes esferas de la Tierra, Hidrósfera, Atmósfera, Biosfera y Geósfera confluyen en el suelo, formando así nuevos subsistemas que son elementos fundamentales para el desarrollo y manutención de la vida sobre la Tierra. Siendo el enlace establecido, entre suelo y agua, esencial para la vida misma (Boersma *et al.*, 1972; Antolín, 2013).

El sistema edáfico es un ecosistema dinámico en el que se presenta la interacción suelo-agua, también es un medio en continuo cambio y sobre todo bastante complejo debido a las entradas y salidas de materia y energía. Sin embargo, el sistema edáfico también es un recurso natural que constituye uno de los medios receptores de la contaminación más sensible y vulnerable. Por todo ello, cualquier alteración al sistema suelo-agua, ya sea por fuentes naturales o antropogénicas, puede afectar sus funciones en relación con la producción y la conservación de los ecosistemas (Porta *et al.*, 2013; Pedreño, 2017).

La preocupación e importancia por la contaminación del sistema suelo-agua se debe a que, en la actualidad, se ha constatado de su relación con la pérdida y deterioro de la calidad de los servicios ambientales que se obtienen del edafosistema, siendo quizá el más importante la producción de alimentos (SEMARNAT, 2019). De continuar así, se puede interrumpir el equilibrio ecológico y, en consecuencia, provocar la degradación irreversible del suelo. Cabe mencionar que el tiempo necesario para la formación de un suelo es suficientemente largo como para ser considerado un recurso natural no renovable a escala humana (Palacio y Zúñiga, 2005).

Cerca del 95% de los alimentos se produce directa o indirectamente en el suelo, por lo tanto, este recurso es la base de la producción alimentaria (FAO, 2015). No obstante, de acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2017), el sistema edáfico se ha convertido en un recurso natural en estado crítico, debido a que, en las últimas décadas, han ocurrido cambios vertiginosos en la manera de producir alimentos, asociados principalmente al crecimiento poblacional, el desarrollo económico, la disponibilidad de alimentos, la salud y la nutrición, así como a modificaciones en las preferencias de los consumidores.

Por ello, la problemática de la contaminación del edafosistema merece especial atención, en particular, aquella producida por metaloides, ya que la mayoría de estos elementos no tienden a sufrir procesos de degradación naturales o biológicos y en consecuencia sus concentraciones totales tienden a persistir en el tiempo, una vez introducidos en el sistema edáfico; produciendo una alteración en el equilibrio y características de este mismo (Masindi y Muedi, 2018). Además, los metaloides incorporados al suelo pueden bioacumularse, pasar a la atmósfera por volatilización y/o moverse a los sistemas acuosos (Porta *et al.*, 1994).

Uno de los metaloides de mayor interés ambiental es el As por sus efectos potencialmente tóxicos y por su disponibilidad en el sistema edáfico (Álvarez-Benedí *et al.*, 2003). De hecho, la Agencia de Protección del Medio Ambiente (2006) (EPA, por sus siglas en inglés) incluyó al As en la lista de contaminantes prioritarios y es clasificado como cancerígeno para humanos y nocivo para plantas y animales. Adicionalmente, el As se ha asociado con problemas que causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas. Por su parte, en seres humanos, la exposición prolongada al As a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede provocar enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad, diabetes y lesiones cutáneas (OMS, 2018).

Es importante efectuar estudios encaminados no sólo a la determinación analítica de las concentraciones totales de los elementos contaminantes, puesto que pueden no representar el nivel de contaminación, ni tampoco permiten deducir el potencial de movilización de los elementos, lo anterior debido a que esto depende de la distribución de la especie química en las diferentes fases en las que se encuentre asociada (Thomas *et al.*, 1994; Niu *et al.*, 2018). Estas limitantes han contribuido de manera importante a la aparición y posterior desarrollo de las metodologías de Extracción Química, simple o secuencial, que permiten estudiar la especiación de los elementos en sistemas como suelo y sedimentos, con la finalidad de determinar la distribución de los elementos existentes en una muestra sólida entre fracciones de distinta naturaleza fisicoquímica (López y Mandado, 2002). De modo que, los métodos de Extracción Química pueden evaluar las cantidades de las especies químicas móviles o potencialmente móviles, que a su vez pueden correlacionarse con los contenidos

disponibles para las plantas bajo ciertas condiciones ambientales o agrícolas (Rao *et al.*, 2008).

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la contaminación del As en suelos agrícolas dentro del municipio de Irapuato, Guanajuato, a través de la determinación de los valores solubles del As (fracción disponible). La especiación del As se realizó empleando la metodología de Extracción Química Simple propuesta por Ruíz-Huerta *et al.* (2017), en donde además mencionaron que el porcentaje de As soluble representa la fracción del contenido total de As que podría disolverse en el suelo y estar disponible para la absorción por las raíces o transportarse y convertirse en un contaminante potencial de cuerpos de aguas. Los extractos de As en solución (As soluble en agua) se analizaron mediante el método colorimétrico de azul de molibdeno, descrito por Tsang *et al.* (2007) y para conocer la concentración del As soluble en agua se utilizó la espectrofotometría UV-Vis. Complementariamente, siguiendo los lineamientos de las normas mexicanas, se han determinado las principales propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo estudiadas: pH, humedad, Carbono Orgánico (CO) y Conductividad eléctrica (CE). Finalmente, este trabajo propone valorar cuantitativamente la contaminación del suelo por As mediante el uso del I_{geo} propuesto por Müller (1969). Todo ello con la finalidad de contribuir posteriormente al desarrollo de investigaciones que permitan comprender la movilización del As a través del edafosistema y su riesgo ambiental real. Además, este estudio aportará información relevante para la toma de medidas pertinentes que mitiguen la problemática de As en caso de que se pueda ver afectado el sistema suelo-agua y la biodiversidad.

2. ANTECEDENTES

2.1 EL SUELO

El suelo es definido por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (2008), a partir de su origen y de los factores ambientales, como la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos genéticos y los factores ambientales que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso (roca madre) del que se originó.

El suelo es un importante recurso natural al que se le debe reconocer y valorar por su contribución a la seguridad alimentaria y al mantenimiento de servicios ecosistémicos fundamentales. También se debe tener en cuenta que, el suelo es un importante medio de acumulación, transformación y migración de compuestos tóxicos (WHO, 2001).

2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO

El aire, agua, materia mineral y MO son los cuatro componentes principales del suelo y estos se mezclan en patrones complejos. Las proporciones relativas de estos cuatro componentes influyen en gran medida en el comportamiento y la productividad de los suelos. En comparación con las capas superficiales del suelo, el subsuelo tiende a contener menos MO, menos espacio total de poros y una mayor proporción de microporos. La Figura 1 muestra las proporciones aproximadas, en volumen, de los componentes en un suelo superficial considerado ideal para el crecimiento de las plantas. Debe notarse que sólo alrededor de la mitad consiste en material sólido (mineral y orgánico), ya que la otra mitad consiste en espacios porosos llenos de aire o agua (Brady & Weil, 2008).

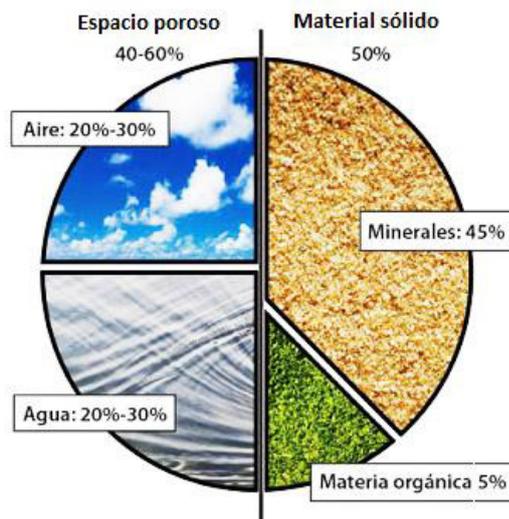


Figura 1: Composición en volumen de un suelo superficial. Fuente: Henríquez (2011).

El comportamiento del suelo está dado por la cantidad relativa de cada una de estas tres fases (Figura 2), las cuales que interactúan entre sí (Porta *et al.*, 2011):

- Fase sólida: Está integrada por los componentes inorgánicos (material mineral procedente de meteorización y de aportaciones; representa generalmente más del 95% de la masa del suelo seco) y los componentes orgánicos (restos de plantas, fauna y microorganismos en distinto grado de descomposición). La organización de estos componentes crea un espacio de huecos (poros, cámaras, galerías, grietas y otros), lo que es de especial relevancia para las funciones del suelo. La fase sólida inorgánica es relativamente estable a escala humana, mientras se mantengan las mismas condiciones ecológicas. La MO, por el contrario, constituye un componente dinámico, muy afectado por el uso y manejo del suelo.
- Fase líquida: Ocupa total o parcialmente el espacio poroso. Está integrada por agua y sustancias en solución o en suspensión (los iones disueltos se hayan a muy baja concentración, excepto en suelos salinos). La cantidad de agua y su composición son muy variables, incluso a lo largo del día. La fase líquida es la que permite que haya reacciones químicas, transformaciones y traslocaciones y la que suministra agua y nutrientes que las plantas pueden absorber.

- Fase gaseosa: Al aumentar la proporción de la fase líquida disminuye la proporción de la fase gaseosa. Se considera que un suelo que contenga entre el 10 y 15% de aire está bien aireado. La composición del aire del suelo varía ligeramente en comparación con el aire atmosférico. Solamente el contenido en CO₂ aumenta debido a los procesos de respiración de las raíces y de los microorganismos en los que se utilizan grandes cantidades de O₂ y se produce CO₂. Además, el contenido de CO₂ aumenta generalmente con la profundidad de los suelos. El contenido en O₂ baja proporcionalmente de 20.96% en la atmósfera a 20.30% en el aire del suelo. Entre el aire del suelo y el atmosférico existe un constante intercambio gaseoso, este es más intenso en presencia de vientos superficiales fuertes y por acción de las lluvias que a través de la percolación del agua desplazan el aire en el suelo.

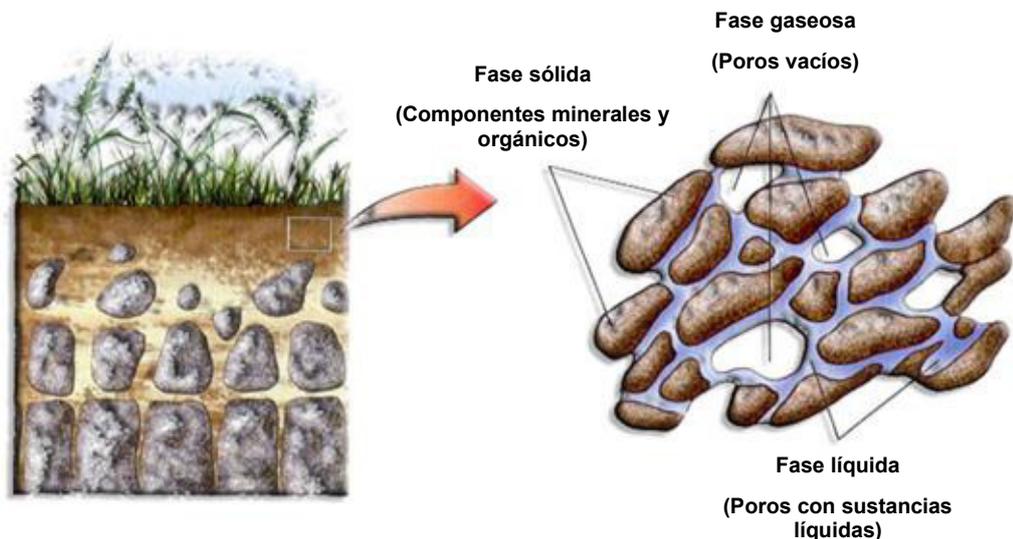


Figura 2: Esquema de las fases del suelo. Fuente: Tapia (2012).

2.3 PERFIL DEL SUELO

En términos generales, un perfil de suelo completo consta de cuatro horizontes principales: el orgánico u horizonte O y 3 horizontes minerales. El horizonte O se encuentra sobre la superficie del suelo; inmediatamente debajo está el horizonte A, donde la MO se acumula. En esta estructura las partículas del suelo pueden ser granular, grumosa o laminar. Debajo del horizonte A está el horizonte B, donde los materiales lixiviados del horizonte A pueden acumularse en forma de silicatos, arcilla, hierro, aluminio o humus y la estructura del suelo puede ser en bloques, prismática o

columnar. Finalmente, se encuentra el horizonte C, compuesto de material parental intemperizado, derivado tanto del material parental local del subsuelo como del material transportado recientemente a ese lugar. Algunos materiales lixiviados o depositados en los horizontes A y B, tales como carbonatos de calcio y magnesio, pueden encontrarse aquí, especialmente en áreas con poca precipitación. Dependiendo de la profundidad de los cuatro horizontes superiores, un horizonte R, formado de roca consolidada que también se conoce como material parental, puede ser incluida como parte del perfil del suelo (Gliessman, 2002; Eash *et al.*, 2008).

Debido a que las separaciones entre cada horizonte son pocas veces diferenciadas, los horizontes descritos anteriormente forman un continuo en el perfil del suelo. En la Figura 3 se presenta un esquema del perfil típico del suelo. La profundidad, características y diferencias de los horizontes en cada perfil del suelo, es el resultado de los efectos combinados de las propiedades del material del suelo (características físicas y químicas), el tipo de cobertura vegetal y el clima (Gliessman, 2002).

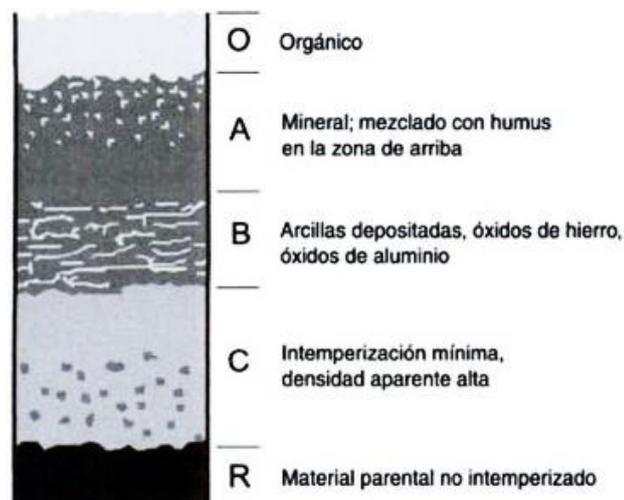


Figura 3: Esquema generalizado del perfil de suelo en profundidad. Se muestran los distintos horizontes y sus características principales. Fuente: Gliessman (2002).

2.4 FORMACIÓN DEL SUELO

Un suelo es el resultado del efecto integrado de diferentes procesos que interactúan entre sí. En una primera etapa predomina la meteorización física y biogeoquímica, que consisten en la transformación total o parcial de las rocas y sus minerales por la acción de los agentes atmosféricos. A medida que el proceso avanza comienza la

edaogénesis, que abarca los procesos de formación y desarrollo que afectan directamente al suelo. Estos procesos formadores son aquellos cambios que ocurren en el sistema y que dan lugar al desarrollo de un suelo en todo tipo de ambiente. Con base en Solís (1981) y Brady & Weil (2008), existen 17 procesos que se pueden agrupar en 4 procesos básicos:

- **Trasformación:** Son las modificaciones o variaciones en tamaño, forma y composición que experimentan los materiales del suelo a consecuencia de procesos físicos, químicos, fisicoquímicos o biológicos *in-situ*.
- **Adición:** Se refiere a la ganancia de materiales que puede sufrir un suelo o un horizonte con respecto a otros. Este proceso consiste en aportes al suelo, que pueden tener lugar en la superficie del suelo, por la base del perfil (a partir de una capa freática) o lateralmente (por movimiento subsuperficial, debido a la continuidad de los flujos de agua en un paisaje).
- **Traslocaciones:** Este proceso corresponde al movimiento de materiales sólidos de una parte a otra dentro del suelo que, si bien puede ser tanto ascendente como descendente, habitualmente domina este último. Según la causa que genere este movimiento distinguimos entre traslocaciones en solución y en suspensión.
- **Pérdida:** Incluye procesos de eliminación de materiales y componentes del perfil edáfico. En este proceso hay materiales que son removidos por agua y desplazados verticalmente hacia abajo en el suelo hasta alcanzar el nivel freático, o que se depositan en horizontes muy profundos. Otro tipo de remoción es la pérdida de los horizontes superficiales por erosión.

Estos procesos pueden actuar simultánea o secuencialmente en un sistema abierto y son los que dan lugar a las distintas clases de suelos. A continuación, se aprecia en la Figura 4 una ilustración esquemática de estos cuatro procesos básicos establecidos que impulsan el desarrollo del perfil del suelo.

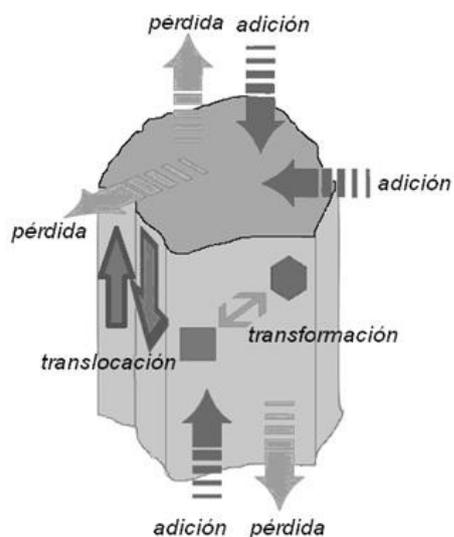


Figura 4: Procesos de transformación, adición, traslocación y pérdida. Fuente: Krzic *et al.* (2013).

2.5 FACTORES ECOLÓGICOS DE FORMACIÓN DEL SUELO

Los factores ecológicos de formación de un suelo son las características o componentes del medio (abiótico y biótico), que influyen en el desarrollo de un suelo al desencadenar, orientar y determinar la intensidad de los procesos que dan lugar a la formación del suelo. De ellos depende el estado de un suelo como sistema en un momento determinado. Dado que la combinación de factores y sus diferentes valores pueden presentar una gran variabilidad, tanto en el espacio, como a lo largo del tiempo (variabilidad espacio- temporal), ello explica la gran diversidad de suelos existentes en la cubierta edáfica mundial. Miles de años han sido requeridos para formar el suelo que hoy tenemos presente y se han identificado cinco factores de formación del suelo, los cuales se describen en los siguientes subíndices, pudiendo existir otros, según el emplazamiento de que se trate (Porta *et al.*, 2011).

2.5.1 Material parental

El material parental consiste en material orgánico o inorgánico como el mineral no consolidado y más o menos intemperizado químicamente. La fuente primaria de materiales inorgánicos lo constituyen las rocas (Krzic *et al.*, 2013).

La composición mecánica, química y mineralógica de los suelos en las primeras etapas de desarrollo de estos mismos, casi se determina por la composición de las rocas formadoras y solamente en etapas de evolución y desarrollo posteriores, cuando se forman los perfiles de suelos maduros, con horizontes bien diferenciados, los suelos adquieren propiedades muy diferentes de la roca inicial. No obstante, la naturaleza de las rocas formadoras del suelo ejerce una fuerte influencia tanto en la textura como en la composición mineral del suelo, en la formación de diferentes regímenes hídricos, térmico y gaseoso del suelo y en la velocidad e incendiada de los procesos que en el mismo tienen lugar (Hernández *et al.*, 2006; Krzic *et al.*, 2013).

La granulometría y la porosidad de las rocas determinan el ritmo de la meteorización y la circulación del agua y aire, condicionados por los procesos biogeoquímicos. Las rocas existentes más comunes en la corteza terrestre son (Gardi *et al.*, 2014):

- Rocas ígneas: granito, dolerita o basalto.
- Rocas sedimentarias: caliza, dolomías, conglomerados, areniscas y lutitas.
- Rocas metamórficas: esquistos, gneis y mármol.

2.5.2 Biota

La influencia de todos los organismos es el factor biótico de la formación del suelo. Dentro de los organismos se incluye a la vegetación, los animales del suelo (meso, macro y microscópicos) y al ser humano.

De mayor importancia resulta la cantidad y composición de sustancias orgánicas en los suelos, ya que constituye la base de la nutrición de los microorganismos; así como los regímenes hídricos y térmicos del suelo, que ejercen una influencia muy fuerte en su actividad vital. En cualquier región climática particular, la cantidad de humus es el resultado directo de la cantidad y el tipo de residuos de plantas que se han incorporado al suelo. Por lo tanto, si la vegetación es escasa, el suelo será bajo en humus y, en consecuencia, menos fértil (Eash *et al.*, 2008).

La composición cualitativa y cuantitativa de los animales (en especial microorganismos) juega un papel importante en la transformación y migración de sustancias en el suelo. Además, la acción de los animales afecta las relaciones de aireación, humedad, mezcla de horizontes, acarreo de materiales del subsuelo a la superficie, etc. Estos organismos varían en número, composición y actividad, de acuerdo con las propiedades del suelo y sus condiciones de formación (Hernández *et al.*, 2006).

2.5.3 Clima

Todo lugar en la Tierra tiene un clima que puede ser descrito con base en sus múltiples componentes. Dentro de los elementos del clima los que más inciden en la formación del suelo son: la radiación solar y los procesos dinámicos en la atmósfera, que trasladan la humedad (precipitación) y el calor (temperatura).

Cada factor de formación del suelo interactúa con los otros y esto es evidente con el clima. La radiación solar es la principal fuente de energía para la actividad biológica y los procesos que ocurren en el suelo; ella se absorbe por la superficie de la tierra y más tarde es irradiada y se reparte de nuevo en el proceso de la dinámica de la atmósfera (Hernández *et al.*, 2006).

El efecto del clima es el que tiene mayor influencia en la meteorización física y química de las rocas ya que controla el suministro de agua, el cual es un elemento muy importante en los procesos de erosión para formación del suelo, a causa de que determina la ruptura de la roca por congelación y descongelación. Además, el agua penetra en las fisuras de las rocas o interrelaciona con los sedimentos y provoca reacciones químicas de hidrólisis y carbonato que dan lugar a transformaciones mineralógicas, que en conjunto con la acción de los residuos vegetales conllevan a la formación del suelo. Sin agua, no puede haber hidrólisis ni hidratación. Hasta la oxidación-reducción (redox) puede depender de la cantidad de oxígeno disuelto.

La temperatura tiene una marcada influencia sobre la tasa de formación del suelo. Quizás el efecto más obvio es el que se produce en las zonas con baja temperatura, donde esencialmente no se produce meteorización química mientras el suelo está

congelado. Con el aumento de las temperaturas incrementa tanto la ionización del agua como la velocidad de las reacciones químicas y biológicas.

La unión de las condiciones de temperatura y humedad determinan la velocidad y carácter de los procesos de formación del suelo. La influencia combinada de estos dos agentes climáticos es probablemente tan importante como cualquiera de ellos individualmente, especialmente debido a que su relación condiciona el tipo de vegetación que se desarrolla en un área, lo que condiciona a su vez la cantidad y tipo de MO aportada al suelo (Hernández *et al.*, 2006; Eash *et al.*, 2008).

2.5.4 Topografía

La disposición del terreno (su nivelación o montañismo) es llamado topografía o relieve. Según Krzic *et al.* (2013), los elementos del relieve más importantes que influyen en la formación del suelo son la inclinación, longitudes de las laderas, la posición fisiográfica y la orientación, dado que, dichos aspectos en conjunto influyen en la temperatura, el contenido de agua y la vegetación del suelo.

2.5.5 Tiempo

Según lo propuesto por Krzic *et al.* (2013), el suelo es un recurso no renovable a corto plazo, debido a que los procesos edafogénicos tienen lugar en una escala de tiempo muy prolongada, en la cual cada uno de ellos se desarrolla con diferente velocidad y por lo general tardan miles de años e incluso mucho más. En consecuencia, las propiedades del suelo se manifiestan también de un modo desigual. Por lo tanto, el factor tiempo es el periodo en que los materiales parentales están sujetos a la formación del suelo. Un suelo más joven reflejará las características del material original mejor que un suelo más viejo, ya que no ha transcurrido suficiente tiempo para permitir un desarrollo significativo.

2.6 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

2.6.1 Porosidad y densidad

El volumen ocupado por los poros en el suelo es llamado porosidad. A medida que el material parental del suelo se degrada, se suelta y se mezcla; desarrollando los poros y proporcionando un lugar para que el aire y el agua sean retenidos. Tanto la cantidad de espacio de poros como el tamaño de los poros son importantes. Los poros pequeños retienen agua muy bien mientras que, en los poros grandes el agua se drena y el aire se mueve hacia adentro (Eash *et al.*, 2008).

La densidad indica soltura o la tensión del suelo. Esta se refiere al peso seco en gramos de materiales sólidos dentro de un volumen definido. Como el suelo está constituido por partículas de diferente tamaño y forma, e incluye espacios porosos entre las partículas, las relaciones de masa por volumen originan dos conceptos: densidad aparente (incluye tanto las partículas del suelo como el espacio poroso entre ellas) y densidad real (peso de suelo seco por unidad de volumen sin incluir el espacio poroso). Ambas se expresan en g/cm³ y tiene un ámbito normal de valores que es influenciado por el tipo de material parental que dio origen al suelo, el contenido de MO, la presencia de ciertos minerales primarios en la muestra, el grado de compactación y parcialmente por la clase de textura. Por lo que la determinación de este parámetro permite estimar su composición mineralógica.

La relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo permite calcular el porcentaje del espacio poroso (adimensional), utilizando la Ecuación 1 (Solís, 1985):

$$\text{Espacio poroso} = \left[1 - \left(\frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \right) \right] 100$$

Ecuación 1

2.6.1.1 Contenido de humedad

El contenido de agua o humedad del suelo presenta un comportamiento dinámico, con variaciones a escala diaria y se refiere a la cantidad de agua que se halla en cada posición de un suelo en un momento determinado (Porta *et al.*, 2003).

De acuerdo con Hernández (2015), la retención de humedad en el suelo es afectada por la textura, la densidad aparente y la concentración de MO. El contenido de agua del suelo se determina de forma cuantitativa y cualitativa. De forma cuantitativa se puede expresar gravimétricamente, con base a la masa, o volumétricamente, con base al volumen. En cuanto a la determinación cualitativa del agua del suelo, la clasificación más utilizada es aquella que expresa los estados hídricos del suelo, presentes a continuación (Rosa de Lima, 2015):

- Punto de saturación: El agua que ocupa todo el espacio poroso y expulsa todo el aire de ellos, por consecuencia, la planta no puede respirar, no puede obtener energía y no puede absorber. Tanto el agua como los nutrientes en ella disueltos se pierden por escurrimiento superficial o en profundidad.
- Capacidad de Campo: Es el estado que alcanza un suelo saturado de agua cuando se deja drenar libremente el agua. Es el estado óptimo del suelo, en el que se dan las condiciones de contenido de agua y aire que hacen posible el aprovechamiento del agua y nutrientes disueltos.
- Punto de marchitamiento: Es la cantidad de agua que retiene un suelo a una tensión de entre 31 y 15 bar, se encuentra almacenada en los microporos del suelo cercanos a 0.2 μm y no está disponible para el crecimiento de las plantas.
- Agua disponible: Es el agua del suelo que se considera como agua utilizable o potencialmente extractable por las plantas en la zona de crecimiento radical. Esta es la fracción del agua del suelo que puede perderse por evaporación o variar por el consumo de las plantas.

Para la interpretación de los resultados del contenido de humedad la Tabla 1 ilustra la relación entre las determinaciones cuantitativas y cualitativas del contenido de humedad del suelo.

Tabla 1: Interpretación de la determinación de cantidad del agua del suelo (SAGARPA, 2013).

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DESCRIPCIÓN	NIVEL DE AGUA	DISPONIBILIDAD DE AGUA
100	Exceso	Punto de saturación	No disponible
95	Óptimo	Capacidad de Campo	Agua disponible
50	Límite	Agua útil	
20	Seco	Punto de marchitez	Agua no disponible
5			

2.6.2 Conductividad eléctrica

La CE es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través de este mismo. Esto significa que, la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato se mide mediante la CE. Barbaro *et al.* (2014) mencionaron que la CE en los sustratos para plantas sea en lo posible menor a 1 dS/m (1+5 v/v) puesto que facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo.

Castellanos (2000) resaltó que los resultados de la CE se pueden clasificar con relación al efecto sobre los cultivos desde suelos no salinos hasta suelos extremadamente salinos (Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación de los suelos con relación a su CE y el efecto sobre los cultivos (Castellanos, 2000).

CE (dS/m)	CLASIFICACIÓN	EFEECTO
< 1	Suelos libres de sales	No existe restricción para ningún cultivo
1-2	Suelos muy bajos en sales	Algunos cultivos muy sensibles pueden ver restringidos sus rendimientos

CE (dS/m)	CLASIFICACIÓN	EFEECTO
2-4	Suelos moderadamente salinos	Los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados en sus rendimientos
4-8	Suelos salinos	El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición de salinidad
8-16	Suelos altamente salinos	Solo los cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos
> 16	Suelos extremadamente salinos	Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos

2.6.3 Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa, en porcentaje de los componentes minerales del suelo con diámetro menores a 2 mm: arena, limo y arcilla. Es una de las características básicas y propiedad permanente del suelo. En general, la textura influencia el abastecimiento potencial de agua y nutrientes para las plantas, la cantidad de humus, el volumen de los poros y la unión de las partículas entre sí. Asimismo, la textura determina parcialmente el grado de aireación del suelo, su habilidad para absorber y retener ciertos químicos, soportar peso y drenar agua (Solís, 1985).

Dependiendo del tipo de textura predominante en el suelo dominan ya sea macroporos (rango de 60 a 100 μ) que percola con facilidad el agua, o los microporos (menores de 60 μ); capaces de retener el agua. La Figura 5 esquematiza las texturas de los suelos y la distribución y proporción de los diferentes espacios porosos, relacionándolos con la percolación profunda de los mismos (Angella *et al.*, 2016).

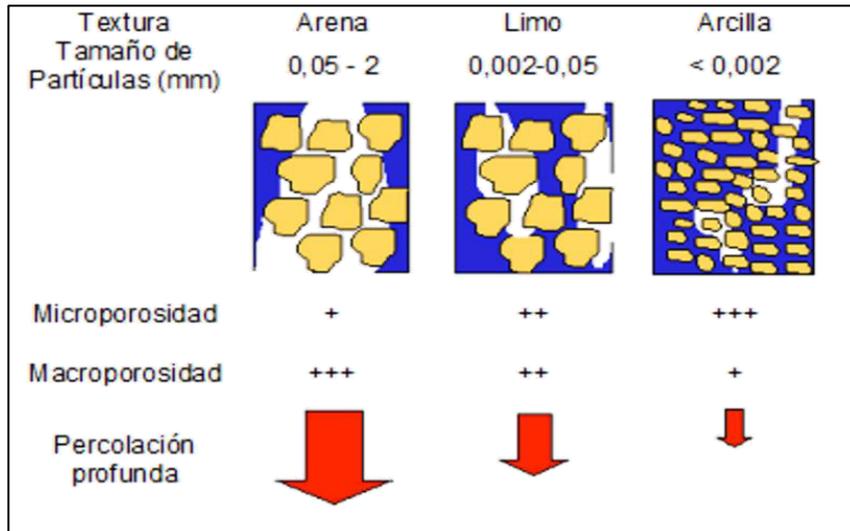


Figura 5: Características de las texturas del suelo frente al agua. Fuente: Angella *et al.* (2016).

Eash *et al.* (2008), declaró que muchas decisiones para el uso del suelo están basadas en la textura de este mismo. Para la identificación de las distintas clases texturales se usa el “diagrama triangular de textura”, donde cada textura es representada en las distintas proporciones relativas (desde 0 al 100%). La Figura 6 muestra el diagrama triangular de textura propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), con las proporciones de cada tipo de textura y en la matriz de este las 12 clases texturales en que pueden ser clasificados los suelos.

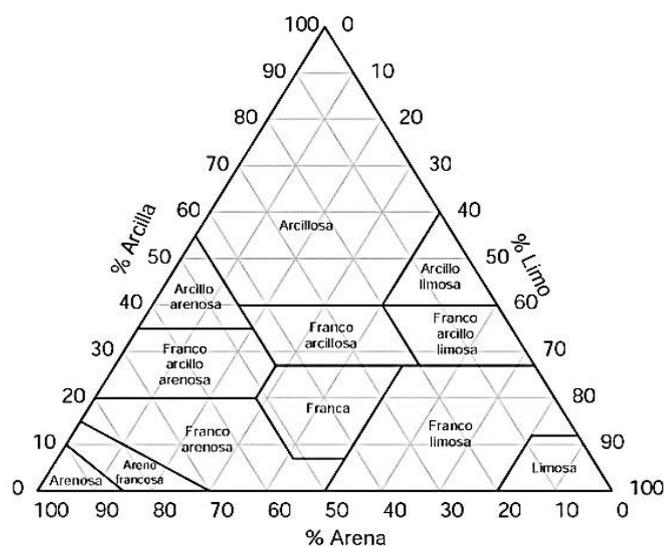


Figura 6: Triángulo de Texturas. Fuente: Eash *et al.* (2008).

2.7 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

2.7.1 Reacción del suelo (pH)

Según lo propuesto por Eash *et al.* (2008), la reacción del suelo se refiere a la concentración de los iones de hidrógeno (H^+) y los iones de hidroxilo (OH^-) en la solución del suelo, la cual es expresada en moles por litro. El término pH es una medida de la concentración y actividad de los H^+ en un sistema. Se define como el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de H^+ , o $-\log ([H^+])$. La escala de pH se extiende de 1 a 14, siendo el pH 7 precisamente neutro.

El valor de pH del suelo hace referencia al grado de acidez o basicidad (Tabla 3). El pH del suelo está determinado por el material original del suelo, por el clima con el que se formó el suelo, por la vegetación que crece en él y por el tiempo que ha pasado para desarrollarse (GLOBE, 2005). En condiciones naturales el pH del suelo varía en rangos desde 4 hasta 11, dependiendo del tipo de iones que predominan en el ambiente de la solución del suelo. Raramente los suelos se encuentren cerca de cualquiera de los límites de la escala de pH, a menos que hayan sido contaminados por actividad humana (Porta *et al.*, 1999).

Tabla 3: Clasificaciones de los suelos según el valor del pH (USDA, 1993).

pH	CLASIFICACIÓN DEL SUELO
4.0 a 4.5	Muy fuertemente ácidos
4.5 a 5.5	Fuertemente ácido
5.5 a 6.5	Ácidos
6.5 a 6.8	Ligeramente ácidos
6.8 a 7.2	Prácticamente neutros
7.2 a 7.5	Ligeramente alcalinos
7.5 a 8.5	Alcalinos
8.5 a 9.0	Fuertemente alcalinos

De acuerdo con Eash *et al.* (2008), el crecimiento de la mayoría de los cultivos es influenciado por el pH del suelo. A pesar de ello, un óptimo pH no parece existir, debido

a la adaptabilidad de cada especie de planta a un rango determinado de pH. Además, el efecto de la acidez o alcalinidad del suelo no afecta directamente la producción del cultivo (con excepción de casos extremos de acidez o alcalinidad), pero, el efecto indirecto puede ser drástico.

El pH del suelo no es fijo, es susceptible de modificarse mediante el empleo de sustancias que pueden aumentar o disminuir su valor. El aumento o disminución del pH del medio depende de varios factores, entre ellos, el pH del sustrato edáfico, la alcalinidad del agua, la actividad de cal, la acidificación por las raíces de la planta, y el uso de un fertilizante de reacción ácida o básica (Perez, 1981).

2.7.2 Carbono Orgánico

El CO del suelo es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. También es el componente principal de la MO del suelo y, como tal, constituye el combustible de cualquier suelo. La MO contribuye a funciones claves del suelo, ya que es fundamental para la estabilización de la estructura del suelo, la retención y liberación de nutrientes de las plantas y permite la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. Por lo tanto, es esencial para garantizar la salud del suelo, la fertilidad y la producción de alimentos (FAO, 2018).

Dependiendo de la geología local, las condiciones climáticas y el uso y gestión del territorio (entre otros factores ambientales), los suelos tienen diferentes cantidades de CO. En la Tabla 4 se muestra los criterios para la interpretación de resultados de CO en suelo.

Tabla 4: Clasificación del %CO en suelo (IICA, 1979).

RANGO DE CO (%)	INTERPRETACIÓN
> 4.6	Muy alto
2.4 – 4.6	Alto
1.2 – 2.3	Medio
0.58 – 1.15	Bajo
< 0.58	Muy bajo

De acuerdo con Martínez *et al.* (2008), el CO del suelo se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el CO aumenta la solubilidad de varios nutrientes y a través de los efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ha resultado ser el principal determinante de su productividad. Asimismo, la pérdida de CO indica un cierto grado de degradación del suelo.

2.8 FUNCIONES DEL SUELO

El suelo, al igual que otros recursos naturales, proporciona funciones o servicios ecosistémicos que permiten la vida en la Tierra (Badía, 2016). Algunas de estas funciones y los beneficios que conlleva cada una, son mencionadas en la Tabla 5 presente a continuación:

Tabla 5: Funciones del suelo (European Commission, 2016).

FUNCIONES	BENEFICIOS
Interacción Ambiental	Producción de alimentos, fibra, biocombustibles, madera, forrajes, etc.
Hábitat biológico y reserva genética	Alberga la cuarta parte de la biodiversidad del planeta Tierra. Almacena, filtra y transforma nutrientes, sustancias y agua. Por ejemplo, almacena el carbono, el agua y los nutrientes disponibles para las plantas y, además, biodegrada o retiene gases, contaminantes, etc.
Soporte físico	Sirve de base para el desarrollo urbano y otras actividades humanas incluidas las lúdicas.
Fuente de materiales y sustancias	Contiene la arena, la grava, arcilla, yeso y otros materiales usados por el hombre.
Archivo patrimonial y cultural	Conserva los restos arqueológicos que sirven para evaluar los modelos de asentamiento humano. Engloba rasgos que evidencian cambios en el paisaje, en el uso del territorio o el clima.

FUNCIONES	BENEFICIOS
Regulador del ciclo hidrológico	Captación de agua, así como infiltración y filtración de agua para la recarga de acuíferos.
Regulador de desastres	Regulador de desastres naturales como inundaciones, deslaves de montañas, entre otros.

2.9 SISTEMA SUELO-AGUA

Según Hernández (2015), el agua es uno de los principales factores que influyen sobre las propiedades edáficas de los suelos. Además, las condiciones de almacenamiento de agua en el suelo y las propiedades hidráulicas de la rizosfera son cruciales para el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos, puesto que, el suelo es el principal abastecedor de agua para el cultivo por su capacidad para almacenarla y controlar su disponibilidad para las plantas. No obstante, el agua disuelve y transporta elementos tanto nutritivos como contaminantes, haciendo posible su absorción a través de las raíces. Por ello, el sistema suelo-agua es uno de los puntos de mayor interés para el uso y manejo agronómico del suelo.

2.10 ARSÉNICO

El As es un elemento químico de la tabla periódica con número atómico 33, masa atómica de 75.9216 g/mol y su nombre se deriva del griego *arsenikos* que significa “potente”. Se clasifica como un elemento de transición o metaloide debido a que sus compuestos tienen conductividad baja; por eso se comporta como metal o como no metal. Puede existir en cuatro estados de oxidación: Arseniato As (V), Arsenito As (III), As elemental (0) y Arseniuro As (-III) (Jolliffe, 1993). Además, el As forma uniones con diversos metales y enlaces covalentes con el carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre. Los compuestos de As pueden clasificarse en tres grandes grupos: gas arsina (-3), orgánicos e inorgánicos, estos últimos dos pueden ser a su vez tri o pentavalentes (ATSDR, 2009).

Existen gran cantidad de compuestos de As naturales, así como de origen antrópico. El As en la naturaleza se encuentra tanto como especie inorgánica (Tabla 6) como

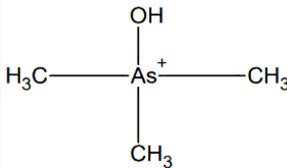
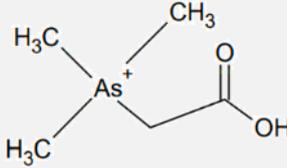
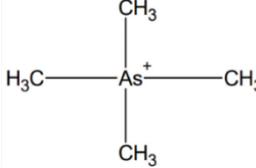
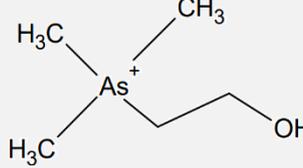
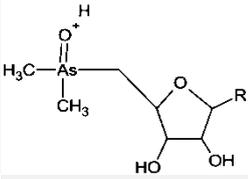
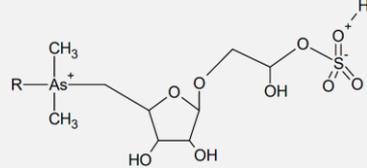
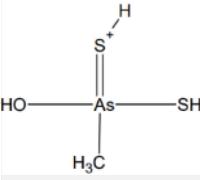
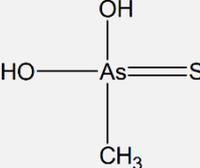
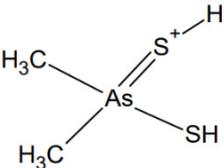
orgánica (Tabla 7). Las especies inorgánicas forman parte del medio ambiente inerte (suelos, aire, agua y sedimentos), mientras que las orgánicas están presentes fundamentalmente en la biota, ya que se origina como consecuencia del metabolismo de los seres vivos (Francesconi & Kuehnelt, 2002; IPCS, 2005).

Tabla 6: Principales compuestos inorgánicos de arsénico de origen natural (Francesconi & Kuehnelt, 2002; IPCS, 2005).

COMPUESTO	SINÓNIMO	FÓRMULA MOLECULAR
Óxido de As (III)	Arsénico blanco	As_2O_3 o As_4O_6
Sulfuro de arsénico (III)	Oropimente, arsénico amarillo	As_2S_3
Ácido arsenioso		$HAsO_2$ o H_3AsO_3
Óxido de As (V)		As_2O_5
Ácido arsénico		H_3AsO_4
Sulfuro de arsénico	Realgar, arsénico rojo	As_2S_2 o As_4S_4

Tabla 7: Principales compuestos orgánicos de arsénico de origen natural (Francesconi & Kuehnelt, 2002; IPCS, 2005).

COMPUESTO	SINÓNIMO	ESTRUCTURA MOLECULAR
Ácido metil arsónico	Ácido monometil arsónico, MMA	
Ácido dimetil arsínico	Ácido cacodílico, DMA	

COMPUESTO	SINÓNIMO	ESTRUCTURA MOLECULAR
Óxido de trimetil arsina	TMAO	
Arsenobetaina	AsB, AB	
	TETRA	
Arsenocolina	AsC, AC	
Dimetil arsenoil ribósidos	Arsenoazúcares	
Trialquil arsonio ribósidos	Arsenoazúcares	
Ácido metilditioarsónico		
Ácido metiltioarsónico		
Ácido dimetilditioarsónico		

COMPUESTO	SINÓNIMO	ESTRUCTURA MOLECULAR
Ácido dimetilarsínico	/	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{S}=\text{As}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} \end{array} $
Ácido dimetilarsenioso		$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{As}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{SH} \end{array} $

2.10.1 Ciclo biogeoquímico del Arsénico

En la naturaleza cada elemento tiene un ciclo biogeoquímico, que puede ser perturbado por la interacción de otros elementos, de forma natural o bien por aportaciones derivadas de actividades antrópicas (Porta *et al.*, 1999). Según lo propuesto por Mínguez (2015), la movilidad del As en la naturaleza es relativamente elevada, pudiendo ser transportado en estado gaseoso, disuelto o sólido a través del suelo, aire y agua. Este transporte es posible debido a las transformaciones biológicas y/o geológicas. El transporte y la distribución del As dependen fundamentalmente de la forma química bajo la que se encuentre. La solubilidad de As inorgánico en su forma química de As (III) y As (V) es relativamente alta, por lo que estas especies se distribuyen fácilmente en medios acuosos (García, 2013).

De acuerdo con Litter *et al.* (2008), los factores que regulan los procesos de movilidad y solubilidad del As en el suelo influirán en la disponibilidad del elemento. Estos factores están determinados por las propiedades del suelo, principalmente por la composición mineral, el contenido de MO, el pH y el potencial redox.

En la Figura 7 se muestra un diagrama simplificado del ciclo biogeoquímico del As, en donde quedan reflejadas las interrelaciones existentes entre fuentes, emisiones, movimientos, distribución y depósitos de As.

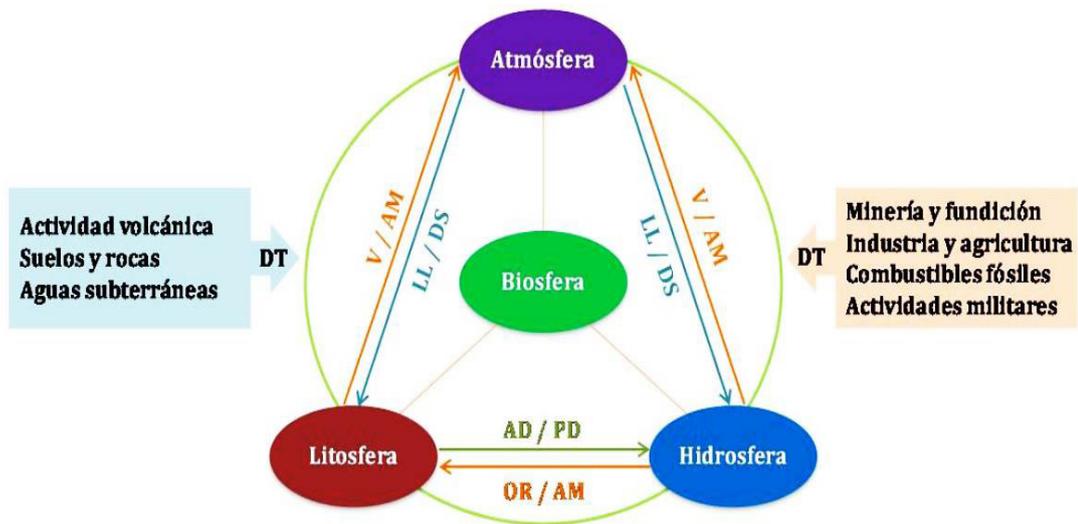


Figura 7: Diagrama del ciclo biogeoquímico del As. Fuente: García (2013). V=Volátiles; AM=Actividad microbiana; LL=Lluvia; DS=Deposición seca; AD=Adsorción- Desorción; PD=Precipitación- Disolución; OR=Oxidación- Reducción; DT=Descarga- Transporte.

2.10.2 Fuentes de origen natural (fondo geoquímico) del Arsénico

La extendida presencia natural del As en el ambiente, tanto en la atmósfera, litósfera, hidrosfera, como en la biosfera se relaciona fundamentalmente con su origen mineral y procesos de meteorización o actividades volcánicas o geotermales (Litter *et al.*, 2008).

Incluso antes de que las actividades humanas tuvieran efectos sobre los ciclos de los elementos, el As ha estado presente en la corteza terrestre, suelos, sedimentos, aguas, aire y organismos. Por lo cual, Mínguez (2015), definió los valores de fondo geoquímico como la concentración de sustancias peligrosas presentes de forma sistemática en un determinado medio natural, en ausencia de cualquier aporte externo específico derivado de la actividad humana. De modo que, estas fuentes engloban aquellas que implican el aporte sin intervención humana significativa y dependen íntimamente de la geoquímica de un emplazamiento (de su litología principalmente y de las vías de dispersión).

De acuerdo con Vaughan (2006), el As no se sustituye fácilmente de la estructura de los minerales primarios presentes en las rocas parentales, pues forman compuestos químicos muy insoluble, por lo tanto, las concentraciones naturales o valores de fondo generalmente no representan un riesgo para el ambiente y la población.

2.10.3 Fuentes antropogénicas de Arsénico

La distribución y contaminación del As en el edafosistema a través de las actividades antropogénicas incluye la minería, la fundición de metales, la combustión de combustibles fósiles, el uso de pesticidas y la industria de semiconductores, (IPCS, 2005; Flores *et al.*, 2009). La Tabla 8 muestra el uso de algunos compuestos con As y el porcentaje total en que éstos son utilizados.

Tabla 8: Uso comercial de compuestos de As (Sarkar, 2002).

USO	PORCENTAJE
PESTICIDAS	65
CONSERVADORES DE MADERA	18
CRISTALES	10
ALEACIONES Y ELECTRÓNICA	3
MICELÁNEA	4

Litter *et al.* (2008), declararon que existe una importante contribución de As al medio ambiente a partir de actividades humanas ligadas a la agricultura. De hecho, históricamente el As ha dejado grandes extensiones de tierra agrícola contaminada debido al uso de productos químicos agrícolas (ATSDR, 2007). A pesar de la prohibición del uso de As en agroquímicos por la Unión Europea (UE) en 1998, su uso en otras zonas del mundo persiste debido a su carácter tóxico como plaguicida (arseniato de plomo y de calcio), herbicidas (ácido cacodílico y sus sales sódicas) y fungicidas (arsenito de plomo).

De igual forma, el agua subterránea con concentraciones de As no sólo se emplea como fuente de consumo humano, sino que también es utilizada para el riego de cultivos y como bebida para el ganado. De tal modo que, la población también podría estar expuesta a la contaminación por As a través de la ingesta de alimentos de origen animal y vegetal (IPCS, 2005; Castillo *et al.*, 2013).

Fernández (2012), indicó que la contaminación por As destaca más en el caso de explotaciones mineras, donde tienen lugar los procesos secundarios de precipitación

de minerales ocreos (como la pirita) y son muy importantes porque en ellos se produce la adsorción y acumulación de As.

2.10.4 Toxicidad del Arsénico

Litter *et al.* (2008) coincidieron en que la toxicidad del As es compleja, gracias a que depende del estado de la valencia, de las tasas de absorción y eliminación, de la especie química y de la concentración, vía y tiempo de exposición. Asimismo, el grado de toxicidad de los compuestos de As están directamente relacionados con su movilidad en el agua y fluidos corporales, la cual depende de su especiación.

Los compuestos de As trivalentes son más tóxicos que los compuestos pentavalentes, mientras que el As elemental (el metaloide) no es tan tóxico en comparación e incluso no es soluble en agua. Además, los compuestos inorgánicos son más tóxicos que los orgánicos. En orden decreciente de toxicidad, la secuencia quedaría del siguiente modo: Arsina > As (III) inorgánico > As (III) orgánico > As (V) inorgánico > As (V) orgánico > As elemental. Mientras que la arsenobataína y la arsenocolina no se consideran tóxicos (Winship, 1984; Hermelo, 2007).

2.11 PRESENCIA DEL ARSÉNICO EN EL EDAFOSISTEMA

El As y sus compuestos están ampliamente distribuidos en el ambiente, ocupando el lugar 20 en abundancia de los elementos en la corteza terrestre (constituye aproximadamente el $5 \times 10^{-4}\%$ de la corteza terrestre) y está presente en la atmósfera, en sistemas acuáticos, suelos, sedimentos y tejidos biológicos, en formas cristalinas, amorfas, vítreas o en polvo. Con base en García (2013), la concentración de As en el suelo varía considerablemente, en general entre aproximadamente 1 y 40 partes por millón (ppm).

Litter *et al.* (2008), postularon que el As presente en el suelo se encuentra generalmente en forma combinada, formando parte de más de 245 minerales, tanto primarios como secundarios, aunque no como componente mayoritario. Aproximadamente el 60% se encuentra como As (V), el 20% como compuestos de azufre, y el 20% restante como As (III), óxidos, silicatos y As elemental. Las concentraciones de As más elevadas están presentes en sulfuros, como componente

estructural sustituyendo al azufre, y cuyo contenido puede superar el 10% en peso del mineral.

Las especies inorgánicas de As se encuentran mayoritariamente en los suelos como A(V) y As (III), donde la forma química de As depende del pH, del potencial redox y de la actividad microbiana. Las especies orgánicas de As también se pueden encontrar en suelos, aunque su concentración suele suponer menos del 5% del As total. Estas especies pueden proceder de procesos de biometilación de las especies inorgánicas, llevados a cabo por los microorganismos presentes en el suelo. Tanto especies orgánicas como inorgánicas de As en el suelo están sujetas a procesos de precipitación-disolución, reacciones redox, adsorción-desorción y metilación bioquímica y orgánica (García, 2013).

En ambientes reductores ($pe + pH < 8$) y ácidos ($pH < 6$), los óxidos de As (III) y sulfuros de As son estables. En cambio, los óxidos de As (V) son demasiado solubles como para ser estables en los suelos. Bajo condiciones oxidantes ($pe + pH > 8$), las especies derivadas del arseniato son las más abundantes. Aun así, tanto arseniatos como arsenitos pueden aparecer conjuntamente, debido a la relativa lentitud de las reacciones redox (Carbonell, 1995).

El ácido arsénico sólo predomina a pH extremadamente bajo (< 2), se encuentra fundamentalmente como $H_2AsO_4^-$ a valores de pH menores que 6.9, mientras que, a pH más alto, la especie dominante es $HAsO_4^{2-}$. En condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} . El ácido arsenioso aparece a bajo pH y condiciones reducidas suaves, pero se transforma en $H_2AsO_3^-$ a medida que aumenta el pH. En condiciones reductoras, en el rango de pH 4-9, el A (III) está principalmente presente como especie neutra $As(OH)_3$. Sólo cuando el pH excede 12 puede estar presente la especie $HAsO_3^{2-}$ (Litter *et al.*, 2009). En la Figura 8 se muestran la especiación de A (V) y As (III), según el pH.

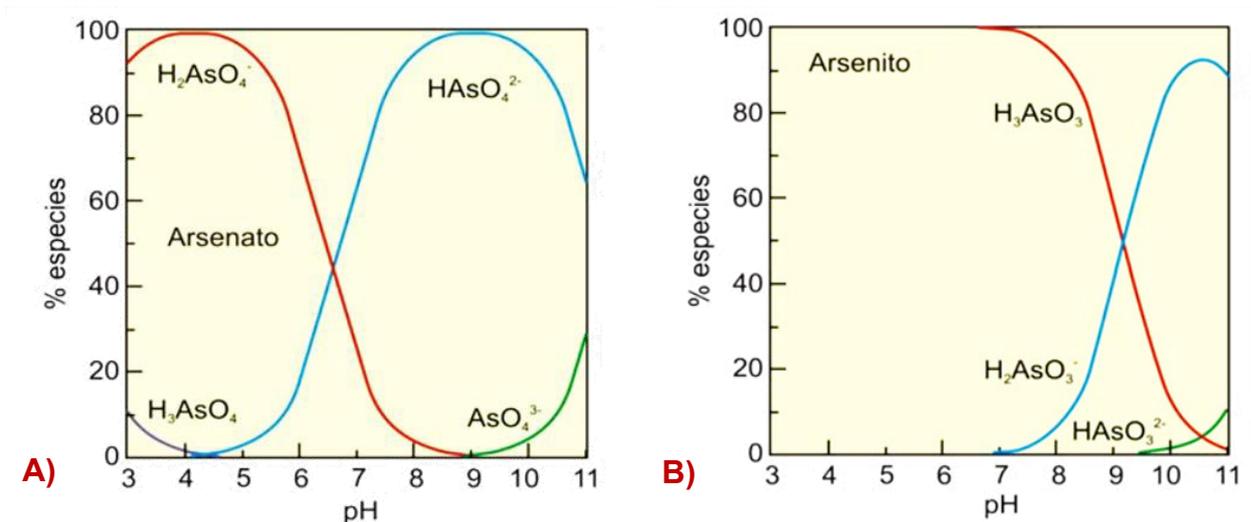


Figura 8: A) Especies de As (V) como función de pH. **B)** Especies de As (III) como función de pH. Fuente: Smedley & Kinniburgh (2002).

2.11.1 Adsorción del Arsénico en el suelo

El As disuelto puede ser retirado o eliminado del suelo debido a la toma por parte de la flora y fauna, por adsorción y por último y de forma menos frecuente, por procesos de precipitación o coprecipitación.

La adsorción es un fenómeno superficial que tiene lugar en la interfase sólido-líquido y mediante la cual las moléculas de adsorbato se fijan sobre la superficie del adsorbente. La adsorción o desorción de As en un suelo está afectada por una serie de parámetros geoedáficos, tales como: textura, MO, potencial redox, pH, presencia y tipo de superficies de adsorción (oxi-hidróxidos de Fe Al y Mn) y minerales de la arcilla. Asimismo, también es conveniente conocer el estado de oxidación del As, ya que de él depende su mayor o menor grado de solubilidad (Carbonell, 1995).

Sadiq (1997), indicó que las reacciones de adsorción ocurren principalmente en la superficie de las partículas coloidales del suelo, como son las arcillas, carbonatos de calcio y óxidos o hidróxidos de Al, Fe y Mn. Dichos coloides del suelo tienen una carga sustancial dependiente del pH del medio, la cual es un importante factor en la determinación de su capacidad de adsorción. La Figura 9 muestra la distribución de cargas que presentan las partículas coloidales mencionadas, en función del pH. La superficie de arcilla y óxido/hidróxido de Mn, Al y Fe desempeñan un papel importante en la adsorción de oxoaniones de As en suelos ácidos, sin embargo, su adsorción es

limitada por encima de pH 4, 3, 5 y 8, respectivamente. Los minerales de carbonato de calcio adsorben oxoaniones de As entre pH 7 y 9. Cabe mencionar que, la cantidad de estos coloides gobierna más su capacidad adsortiva que el efecto del pH sobre ellos (Carbonell, 1995).

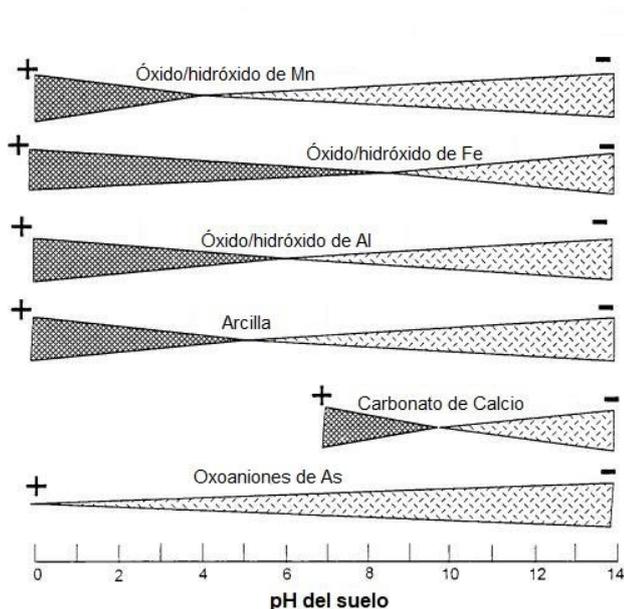


Figura 9: Distribución de cargas de algunos coloides del suelo (Sadiq, 1997).

2.12 ARSÉNICO COMO CONTAMINANTE

Tanto el suelo como el agua de un emplazamiento son una de las principales vías de exposición al As para los seres vivos, ya sea por ingesta, inhalación o contacto dérmico. La exposición al As vía consumo de agua es la mayoritaria a escala global, en especial cuando hay mayor presencia geológica natural de As, dado que, se pueden encontrar altos niveles en aguas subterráneas como en el caso de Bangladesh, India, China, Taiwán, Mongolia, Chile, Argentina, México y numerosos lugares de Estados Unidos de Norteamérica (Smedley & Kinniburgh, 2002). Por tanto, la mayor amenaza del As a la salud pública reside en la utilización de agua contaminada para beber, preparar alimentos y regar cultivos alimentarios (WHO, 2010; Mínguez, 2015).

Otra vía de exposición al As es al ingresar a la cadena trófica en la acumulación de cultivos, vegetales y frutas que crecen en suelos contaminados. Ciertamente, Sadiq (1986) encontró que el As absorbido por plantas estaba positivamente correlacionado

con el As soluble en agua, pero no lo estaba con el As total. Es decir, la fracción soluble en agua del As se asocia a la disponibilidad del elemento en el suelo, dada la naturaleza y la fácil lixiviación de dicha fracción (García, 2013), logrando así la transferencia a cultivos y, por ende, a la cadena alimentaria.

Asimismo, la contaminación por As en suelo agrícola puede interferir con varios procesos metabólicos de las plantas y disminuir la producción de los cultivos. Los principales efectos que se han observado incluyen letalidad, efectos conductuales y la inhibición del crecimiento, fotosíntesis y reproducción de las plantas. Cabe destacar que la absorción y transferencia de este contaminante al cultivo están condicionadas por diferencias genéticas y fisiológicas de las plantas, así como por la concentración del As en el suelo y el tiempo de exposición (FAO, 2019).

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) y la EPA han clasificado al As y sus compuestos como cancerígenos para los seres humanos. Entre los efectos perjudiciales para la salud humana, que se asocian a la ingesta prolongada de As, destacan los siguientes: problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes, enfermedades pulmonares y enfermedades cardiovasculares (OMS, 2018). El As también se asocia a desenlaces adversos del embarazo y mortalidad infantil, repercute en la salud de los niños, puede tener una influencia negativa en el desarrollo cognitivo e incluso los infartos de miocardio inducidos por el As pueden suponer una importante causa de aumento de la mortalidad (Quansah *et al.*, 2015; OMS, 2018).

2.1.1 Normatividades

En la Tabla 9 se muestran los límites máximos permitidos adoptados por distintos organismos internacionales y nacionales para la regulación del contenido de As.

Tabla 9: Límites máximos permisibles para el As y sus compuestos según distintos organismos.

COMPUESTO	ORGANISMO O NORMA	USOS	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMITIDA (PPM)
As	OMS ¹	Agua de bebida para el consumo humano	0.01
	UE		
	EPA	Aguas Naturales	0.05
	SEDUE ²	Riego agrícola	0.1
		Fuente de abastecimiento de agua potable	0.05
		NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Suelo de uso agrícola/residencial/ comercial
		Suelo de uso industrial	260
	FAO ³	Agua de riego	0.1
NOM-127-SSA1-1994	Agua para uso y consumo humano	0.05	
As (inorgánico)	CONAGUA ⁴	Riego agrícola	0.1
	Ley de Gestión Ambiental del Ecuador	Uso de suelo agrícola	12

2.1.2 Problemática del Arsénico en Irapuato (Guanajuato)

La presencia de As en México se puede deber a que éste se ubica dentro de un cinturón volcánico y sus suelos, ricos en minerales arsenicales, se encuentran en contacto con los mantos freáticos y los contaminan (Saldaña, 2008). Así también, el

¹ OMS: Organización Mundial de la Salud.

² SEDUE: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

³ FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés).

⁴ CONAGUA: Comisión Nacional del Agua.

estado de Guanajuato es conocido por su alta actividad minera, la cual tuvo como resultado la generación de residuos mineros que fueron depositados en áreas aledañas a las minas, provocando como consecuencia un incremento en el contenido de As en la región (Salas Megchún, 2014).

Del 2002 al 2004, el Laboratorio Estatal de Salud Pública de Guanajuato, determinó niveles de As por encima de lo que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (>0.05 mg/L), en el agua de consumo y de pozo en poblaciones pertenecientes al estado de Guanajuato: San Agustín (Irapuato) y Cútaró (Acámbaro). En estos lugares no se presentan actividades mineras ni de la industria pero la agricultura y la cría de ganado vacuno es la principal actividad económica local (Monroy-Torres *et al.*, 2009).

Otros estudios también han demostrado que los acuíferos Irapuato-Valle y Silao-Romita tienen problemas de arsenismo dado que, muchos de sus pozos se encuentran de moderadamente contaminados a muy contaminados (25 a más 500 $\mu\text{g/L}$ de As). Estos pozos están siendo utilizados en Irapuato para diferentes actividades, una de las más importantes es para riego agrícola (Saldaña, 2010; CEA, 2019).

De acuerdo con investigaciones previas, el riego con aguas subterráneas ricas en As, bombeadas desde acuíferos someros hasta profundos (mayor a 200 m), produce un aumento notable de las concentraciones de As en los horizontes superiores de los suelos agrícolas, debido a lo cual, esta actividad es potencialmente una amenaza para los suelos y para la seguridad alimentaria (Guerrero, 2017; Zanor *et al.*, 2019).

2.13 CARACTERÍSTICAS Y USO DE SUELO EN IRAPUATO (GUANAJUATO)

Irapuato está ubicado en la región del Bajío, la cual ha sido desde la época Colonial uno de los principales proveedores de alimentos del país debido a que está caracterizada por ser una gran llanura fértil, con obras de irrigación de tal magnitud que han convertido a esta región en la zona agrícola más importante de México. Esto implica que la agricultura es la actividad económica principal en Irapuato y en su estado, desde mediados del siglo pasado, junto con la ganadería, la minería y la

prestación de servicios. Además, su tradición agroindustrial ha sentado las bases para una industria alimentaria y actualmente cuenta con grandes empresas que han desarrollado a lo largo de este territorio un importante corredor industrial. La ciudad de Irapuato a la par de Celaya y Salamanca, forman la zona llamada "Eje industrial del Bajío" (SPP, 2008).

2.14 CALIDAD DEL AGUA EN IRAPUATO (GUANAJUATO)

El municipio de Irapuato pertenece a la cuenca Lerma-Salamanca de la Región Hidrológica Lerma–Santiago–Pacífico (RH–12). La cuenca Lerma-Salamanca representa una región estratégica para el desarrollo de México, al concentrar a más del 10% de la población del país y generando anualmente alrededor del 10% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Pese a ello, dicha cuenca enfrenta severos problemas relacionados con la degradación y el deterioro del medio ambiente, constituyendo el uso y la explotación de sus recursos naturales hoy en día, más que una oportunidad, una limitante para su desarrollo.

Actualmente, la cuenca Lerma-Salamanca se identifica como una cuenca deficitaria y altamente contaminada, que se mantiene bajo una fuerte presión sobre sus recursos hídricos y naturales. La disponibilidad del agua superficial está declarada como nula y gran parte de los acuíferos que se localizan dentro de ella se encuentran sobreexplotados. Los altos niveles de contaminación de origen agrícola, industrial y urbano que se registran en la región están afectando el aprovechamiento y utilidad del agua; representando grandes riesgos para la salud de sus habitantes, así como para la supervivencia de plantas y otros seres vivos característicos de la zona (IMTA, 2009).

La demanda de agua generada por el desarrollo socioeconómico de la cuenca Lerma-Salamanca ha aumentado considerablemente debido a la producción agrícola e industrial, la cual es superior a la media nacional. Cabe destacar que, la fuente hídrica predominante para la agricultura es el agua subterránea. De hecho, el 84% de los pozos activos en el estado de Guanajuato son de uso agrícola. Es decir, la agricultura se sitúa como la actividad prioritaria de la región relacionada con el recurso agua (CEAG, 1994; CEA, 2019).

2.15 EXTRACCIÓN QUÍMICA

El uso de la concentración total como criterio para evaluar los posibles efectos de la contaminación por elementos traza en sistemas naturales, implica que todas las formas de un elemento dado tienen el mismo impacto en el medio ambiente, lo cual, de acuerdo con Tessier *et al.* (1979), es una suposición claramente insostenible porque la concentración total de los contaminantes se encuentra repartida en distintas fracciones o asociada a diferentes especies químicas. Por lo tanto, es necesario realizar estudios de especiación de los elementos químicos para obtener información que permita profundizar en el conocimiento de su potencial capacidad de movilización que a su vez puede correlacionarse los contenidos disponibles para las plantas bajo ciertas condiciones ambientales o agrícolas (Rao *et al.*, 2008).

La especiación de un elemento puede tener un sentido muy amplio, que engloba las distintas formas químicas con las que éste se puede asociar en el medio: en forma soluble en el agua, en forma de compuesto soluble en medio ligeramente ácido, etc. Se debe tener en cuenta que, cuando un elemento se encuentra enlazado débilmente a una especie química, su índice de disponibilidad es alto porque el elemento puede ser solubilizado con ligeros cambios en las condiciones ambientales de los receptores ambientales. Por consiguiente, la importancia del estudio de las fracciones o especies químicas en las cuales se encuentran los elementos traza radica en que se puede establecer su nivel de disponibilidad (Alloway, 1990; Olmos, 2006).

Según Tessier *et al.* (1979), los principales métodos de especiación química de elementos trazas se basan en la Extracción Química Simple y métodos más elaborados que utilizan Extracciones Secuenciales. La finalidad que se persigue al aplicar una metodología de Extracción Química es determinar la distribución de los elementos traza existentes en una muestra sólida entre fracciones de distinta naturaleza fisicoquímica, dando como resultado información acerca de la unión de dicho elemento con la matriz.

La Extracción Química Simple normalmente implica una extracción única (ataques químicos en una sola etapa) que consiste en la aplicación de una solución reactiva a una muestra sólida y cuyo objetivo fundamental es la extracción de elementos traza asociados a la fase específica del sólido que no era resistente a dicho ataque.

Cabe mencionar que en la actualidad existe una amplia variedad de protocolos de Extracción Química, sin haberse impuesto todavía uno de ellos como un método estándar plenamente aceptado. Los distintos protocolos existentes difieren en el número de etapas de ataque, en los reactivos empleados o en las condiciones experimentales bajo las cuales se desarrollan, todo ello dependiendo de los objetivos concretos del estudio a realizar (López y Mandado, 2002).

3. JUSTIFICACIÓN

El municipio de Irapuato, Guanajuato, basa en gran medida su crecimiento económico en el sector agrícola, puesto que, el suelo de esta región se caracteriza por ser altamente propicio para la agricultura. De hecho, la agricultura es una de las actividades productivas de mayor importancia en el municipio, al representar el segundo lugar de las actividades con mayor cantidad de la población ocupada⁵, empleando arriba del 25% de la población ocupada total. Además, actualmente Irapuato ocupa el primer lugar en exportación de agroalimentos a nivel nacional y es líder estatal con aproximadamente el 30% de las exportaciones de agroalimentos (Agroasemex, 2018).

Debido a la problemática en Irapuato de contaminación por As en suelo y agua de uso agrícola, ya plasmada anteriormente en estudios elaborados por investigadores y dependencias gubernamentales (Saldaña, 2010; Zanor *et al.*, 2019), se puede reducir la calidad de los cultivos y poner en riesgo tanto la seguridad alimentaria como al medio ambiente, por lo que se considera, que es crucial evaluar la contaminación por As en los suelos agrícolas del municipio de Irapuato. Para ello, en este trabajo se busca definir, mediante extracción química simple, si los niveles de concentración de As en el suelo están disponibles para los cultivos.

Se espera que a partir de esta investigación se disponga de información que sirva para reducir o prevenir factores que contribuyan a la contaminación por As del suelo y a su vez del cultivo con la finalidad de mejorar y conservar a través del tiempo el suelo agrícola.

⁵ De acuerdo con el INEGI, la población ocupada comprende las personas de 12 y más años de ambos sexos que durante la semana de referencia trabajaron al menos una hora o un día para producir bienes y servicios a cambio de una remuneración monetaria o en especie.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la contaminación por As en suelos agrícolas del municipio de Irapuato (Guanajuato) mediante Extracción Química Simple.

4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Colectar muestras de suelo agrícola superficial.
- Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos.
- Cuantificar el contenido de As en la fracción soluble del suelo.
- Correlacionar las propiedades de los suelos con la fracción soluble en agua del As mediante técnicas estadísticas.
- Calcular el I_{geo} para evaluar el nivel de contaminación de los suelos por As.
- Comparar las concentraciones de As con respecto a los límites permisibles para suelo agrícola a nivel nacional e internacional.

5. HIPÓTESIS

Los valores del As en la fracción soluble determinados en suelos agrícolas del municipio de Irapuato (Guanajuato) indican que el As se encuentra disponible para el cultivo.

6. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en el municipio de Irapuato, el cual se encuentra situado en la parte suroeste del estado de Guanajuato. El mapa general de la República Mexicana indica que, de acuerdo con su extensión territorial, la posición geográfica del municipio de Irapuato se encuentra entre los meridianos -101.13° y -101.55° de longitud oeste, entre los paralelos 20.85° y 20.50° de latitud norte y a una altitud entre 1,600 y 2,400 m.s.n.m. Colinda al norte con los municipios de Romita, Silao de la Victoria y Guanajuato; al este con el municipio de Salamanca; al sur con los municipios de Salamanca, Pueblo Nuevo y Abasolo; al oeste con los municipios de Abasolo y Romita (Figura 10).

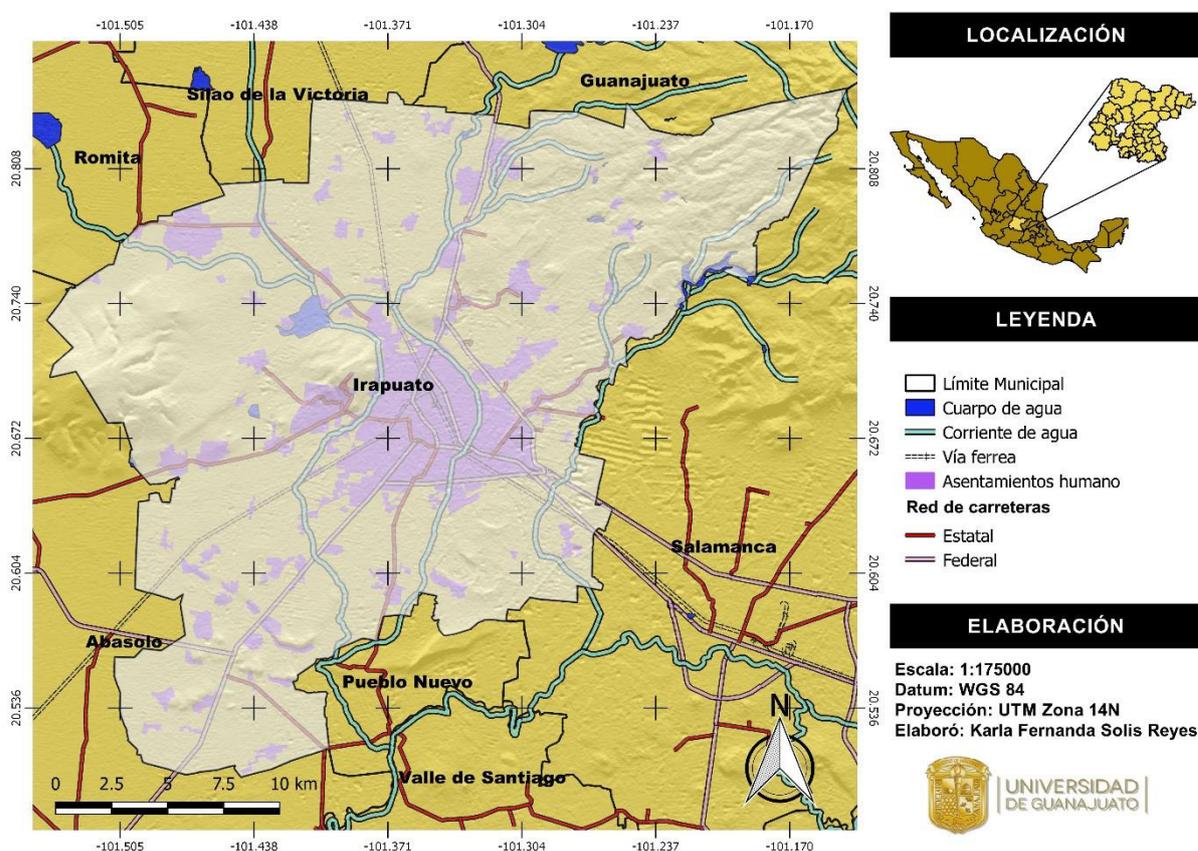


Figura 10: Ubicación del área de estudio. Fuente: INEGI (2016). Elaboración propia.

El municipio de Irapuato tiene una superficie de 807.801 km^2 , que corresponde al 2.8% de la superficie total del estado de Guanajuato, además cuenta con 549 localidades y una población total de 463,103 habitantes (INEGI, 2009).

Los sitios de muestreo están denotados por la clave asignada de S1, S2, S3, S4, S5 y S6. Estos se encuentran al noroeste del municipio de Irapuato como se ilustra en la Figura 11, cercanos a la zona rural y a las orillas de la zona urbana en donde el uso del suelo es mayormente agrícola.

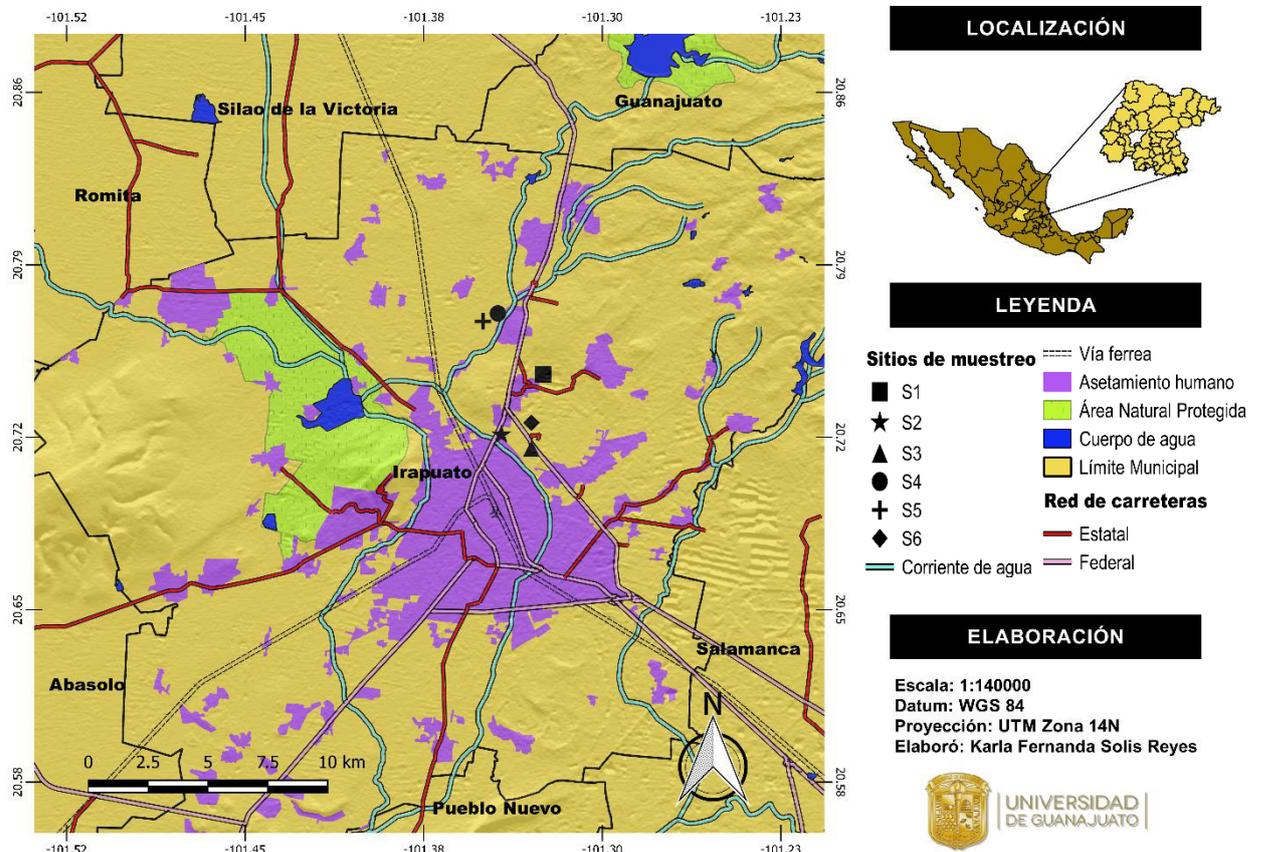


Figura 11: Ubicación de los sitios de muestreo: S1, S2, S3, S4, S5 y S6. Fuente: IPLANEG (2019). Elaboración propia.

6.1 USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN

El suelo de Irapuato está caracterizado por ser altamente propicio para la agricultura, debido a la condición edáfica y al material parental, además del clima y la hidrología. Por ello las actividades agrícolas ocupan el 74.7% de la superficie del municipio de Irapuato (divididas en tres categorías: agricultura de riego, agricultura de temporal y pastizal inducido), mientras que la zona urbana y suburbanas ocupa el 8.1%, la selva el 9.2%, bosque 3.3%, pastizal 2.8% y matorral 1.1 % (IPLANEG, 2015).

En el Estado de Guanajuato, en general, es posible encontrar cinco tipos de vegetación: bosque de *Quercus* (o bosque de encino), bosque de coníferas (o bosque

de pino), bosque tropical caducifolio, matorral xerófilo y pastizal; además se encuentran pequeñas porciones de bosque mesófilo de montaña, humedales, vegetación acuática y bosque de galería (Zamudio, 2012).

El principal criterio para la selección de los sitios de muestreo fue la presencia visible del impacto por actividades agrícolas (Figura 12), con aplicación de agroquímicos y con cultivo de plantaciones para el consumo humano y animal, del tipo anual (ciclo vegetativo no mayor a un año). En la Tabla 10 se puede apreciar la localización de los 6 sitios de muestreo y su fecha de muestreo. Cabe destacar que los meses en que se elaboró el muestreo corresponde al periodo sin cultivo, posterior a la cosecha.

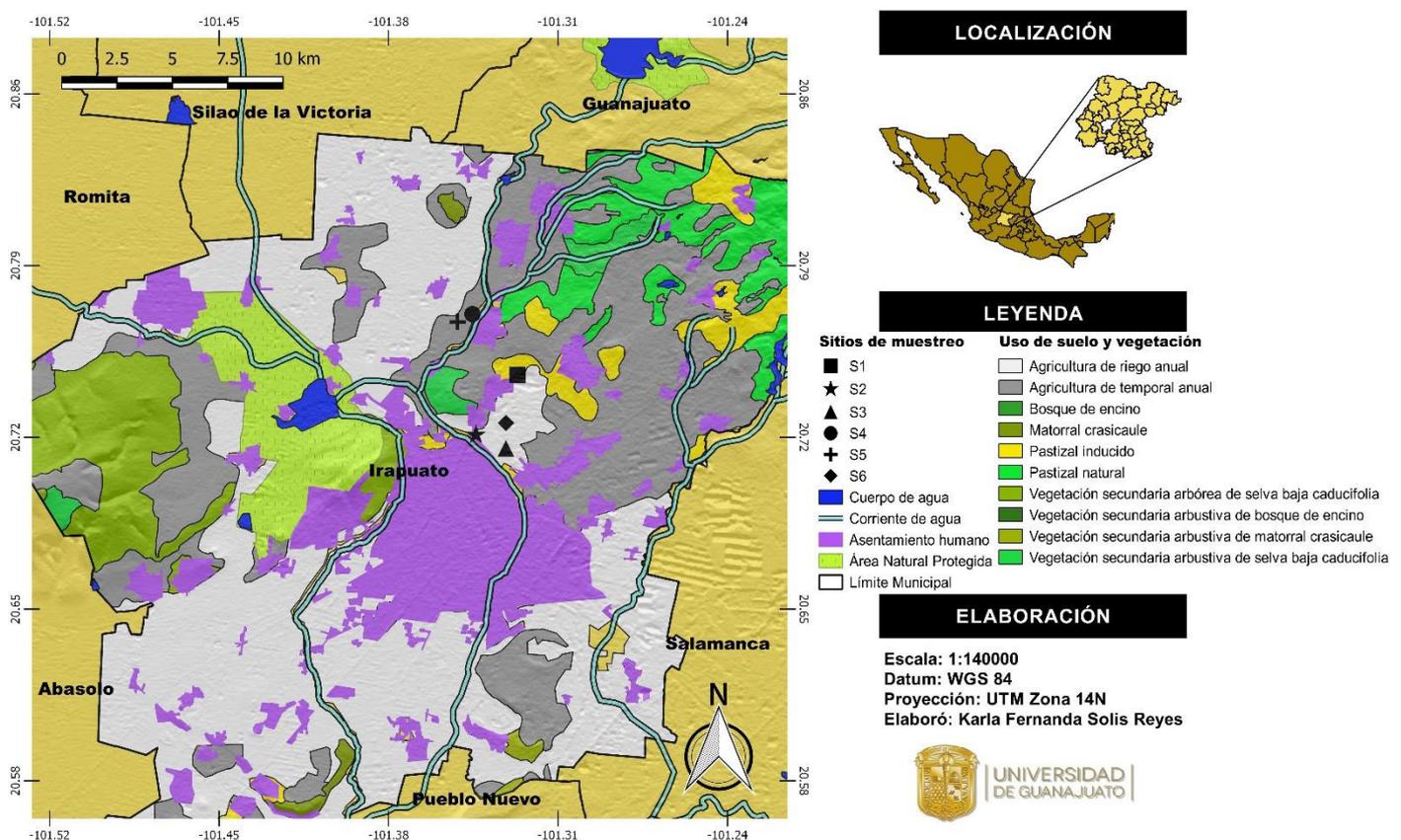


Figura 12: Uso del suelo y vegetación de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: IPLANEG (2015). Elaboración propia.

Tabla 10: Coordenada geográficas y fecha de recolección de los puntos de muestreo.

CLAVE DE LA MUESTRA	LATITUD	LONGITUD	FECHA DE MUESTREO
S1	20.7455°	-101.3279°	31/Enero/2018

CLAVE DE LA MUESTRA	LATITUD	LONGITUD	FECHA DE MUESTREO
S2	20.7210°	-101.3446°	02/Marzo/2018
S3	20.7154°	-101.3446°	06/Marzo/2018
S4	20.7702°	-101.3460°	22/Marzo/2018
S5	20.7671°	-101.3521°	23/Marzo/2018
S6	20.7258°	-101.3325°	13/Abril/2018

6.1.1 Agricultura de riego

La agricultura de riego se caracteriza por la disponibilidad de agua durante gran parte del año mediante algún sistema de abastecimiento de agua. Este tipo de agricultura ocupa casi el 38% total del territorio, lo que corresponde a más de 31,000 ha.

La agricultura de riego se localiza en las zonas de baja pendiente y con disponibilidad de agua, y se da a través de agua de pozo o distribución por canales. El cultivo principal es el sorgo debido al poco trabajo que requiere, otros cultivos importantes son las hortalizas que se dan en invernaderos y en la actualidad existen también en los distritos de riego algunos viveros de plantas de ornato y flores.

Las muestras de suelo S1, S2, S3 y S6 fueron colectadas en un suelo de uso agrícola de riego anual y bajo la influencia de agua de riego procedente de pozos profundos.

6.1.2 Agricultura de temporal

La agricultura de temporal se caracteriza por no contar con un sistema de abastecimiento de agua y los cultivos dependen de la precipitación pluvial. Ocupa más de 19,000 ha que representan el 22.7% de la superficie total de Irapuato. Los cultivos más importantes son el maíz y el frijol.

Las muestras de suelo S4 y S5 fueron colectadas en un suelo de uso agrícola temporal anual.

6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOGRÁFICAS

6.2.1 Fisiografía y topografía

De acuerdo con la clasificación del INEGI (2000), fisiográficamente la zona de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica denominada como Eje Neovolcánico, particularmente dentro de la Subprovincia del Bajío Guanajuatense. Dicha Provincia se considera como una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, de composición andesítica y basáltica, derrames de lava y otras manifestaciones ígneas de la era Cenozoica. Al complejo paisaje de la subprovincia a la que pertenece el área de estudio subyace una litología igualmente constituida por varios tipos de roca volcánica con altos contenidos de sílice, basalto y rocas ígneas ácidas asociadas con aluviones antiguos. Los suelos muestreados se localizaron en 2 tipos de topoformas: S1 y S2 corresponden a la Meseta Basáltica con Lomerío, mientras que S3, S4, S5 y S6 se sitúan en la Llanura Aluvial (Figura 13).

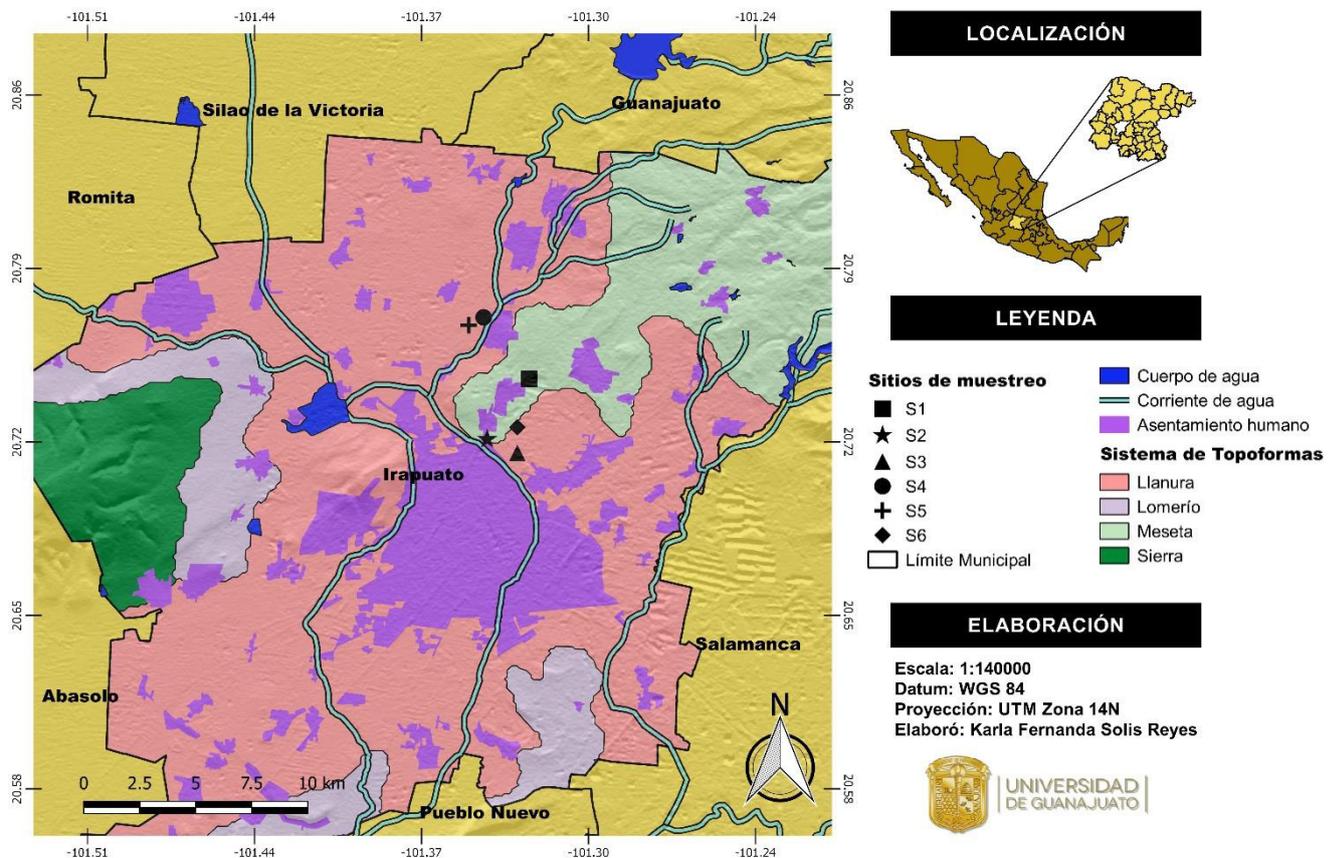


Figura 13: Sistema de topoformas del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2000). Elaboración propia.

6.2.2 Geología

Con forme al mapa elaborado (Figura 14), la zona de estudio está integrado por 10 unidades geológicas, mismas que se señalan en la Tabla 11.

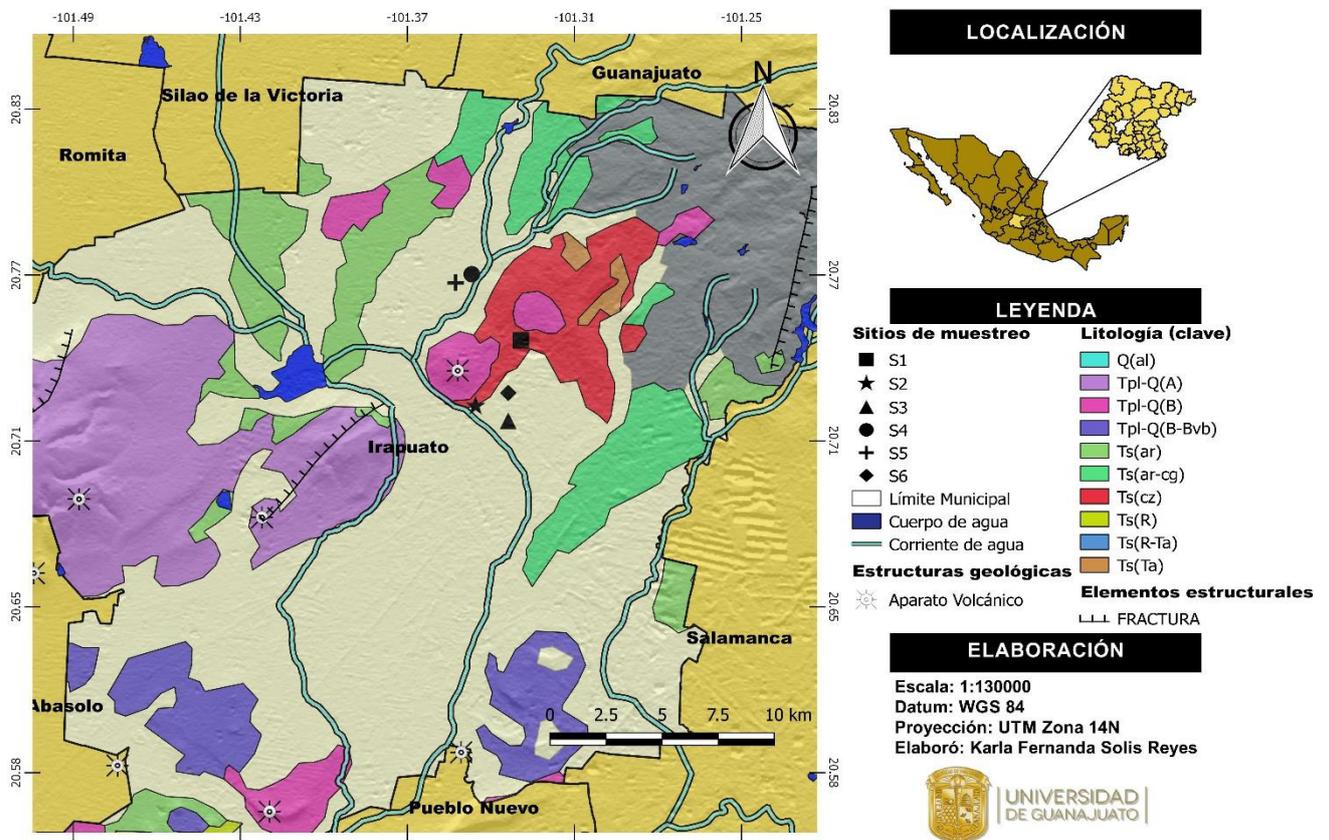


Figura 14: Geología del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

En la zona de estudio se presentan rocas ígneas y sedimentarias formadas durante los periodos del Terciario, así como los aluviones que han llenado valles y llanuras, originando los suelos de esta área. De hecho, García Reynoso (2007) indicó que el municipio de Irapuato esta mayormente asentado sobre un abanico aluvial, formado durante el periodo Cuaternario, por los materiales sedimentarios procedentes de las sierras de Guanajuato y Codornices; acarreados principalmente por los ríos (y sus ancestros) Silao, Guanajuato, el arroyo Santa Rita y Temascalío. Los depósitos que integran este abanico están constituidos por limos, arenas y gravas, parcialmente consolidados.

Tabla 11: Unidades litológicas del área de estudio (INEGI, 2005).

PERIODO		ROCA	
Nombre	Clave	Nombre	Clave
Cuaternario	Q	Aluvial	Q(al)
		Basalto-Brecha volcánica básica	Tpl-Q(B-Bvb)
Plioceno-Cuaternario	Tpl-Q	Andesita	Tpl-Q(A)
		Basalto	Tpl-Q(B)
		Arenisca	Ts(ar)
Terciario superior	Ts	Arenisca-conglomerado	Ts(ar-cg)
		Riolita	Ts(R)
		Riolita-Toba ácida	Ts(R-Ta)
		Toba ácida	Ts(Ta)
		Caliza	Ts(cz)

De acuerdo con la información geológica presente en la zona de estudio (Figura 14), se puede observar que los sitios de muestreo S2, S3, S4, S5 y S6 se localizan sobre planicies aluviales. Únicamente S1 se ubica sobre roca caliza. Las características generales de estos dos tipos de material litológico son descritas a continuación (SCT, 2010):

- **Q(al):** Los materiales aluviales ocupan el primer lugar en cuanto a superficie dentro de la zona de estudio con el 55.03% de la superficie total. Corresponde a una unidad detrítica no consolidada constituida por grava, arena, limo y arcillas, los detritos presentan diversa composición y grado de redondez. Morfológicamente se presenta como planicies aluviales, rellenando valles fluviales y en abanicos, por lo que se encuentra ampliamente distribuido en el área de estudio.
- **Ts(cz):** Corresponde a una unidad calcárea depositada en ambiente continental de facies lacustre, es caliza impura de textura microcristalina con estructura oolítica, de color crema con tonos cafés y verdes. La expresión morfológica es de pequeñas mesas y lomas de pendiente moderada.

6.2.3 Edafología

Como se observa en la Figura 15, la superficie del área de estudio está formada por un suelo primario de tipo Vertisol (V). Por el contrario, Zanor *et al.* (2019), clasificaron a los suelos S2, S3, S4 y S5 dentro del orden de los Entisoles, asociados con los antecedentes de inundaciones periódicas y fluctuaciones de la carga de sedimentos del río Guanajuato. Esta diferencia en las clasificaciones del suelo se debe, en parte, a que los muestreos del INEGI (2017) se realizan a una mayor escala que los del estudio de Zanor *et al.* (2019).

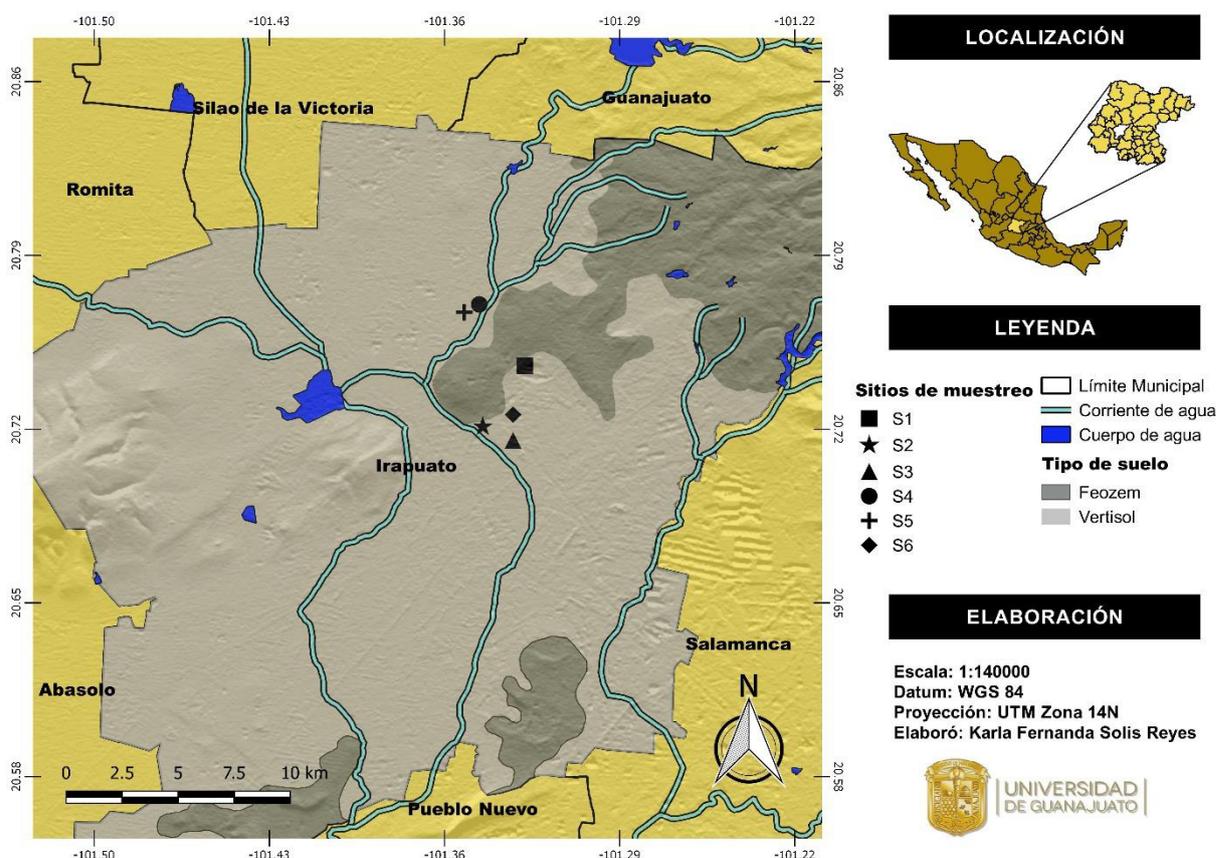


Figura 15: Caracterización edafológica del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

La palabra Vertisol proviene del latín *verteré*: que significa invertir. Son suelos de climas semiáridos a subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias. Estos suelos se caracterizan por ser muy arcillosos en cualquier capa a menos de 50 cm de profundidad, además, se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas muy visibles a menos de 50 cm de profundidad en esta última temporada, siempre y cuando no haya riego artificial.

Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización (INEGI, 2015).

Zanor *et al.* (2019) mencionaron que, de acuerdo con la distribución en profundidad del As en los perfiles de Vertisol, las concentraciones de As más altas se encuentran en los horizontes superiores (10 cm) y tienden a disminuir con la profundidad. Galán y Romero (2008) coincidieron en que la acumulación del As se da en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviado a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Por ello la presencia de altas concentraciones en los horizontes superiores decrece drásticamente en profundidad cuando la contaminación es antrópica.

Los Entisoles son los suelos más jóvenes, formados típicamente tras aluviones. En general, los Entisoles son pobres en MO y presentan poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes pedogenéticos. Sus propiedades están por ello fuertemente determinadas (heredadas) por el material original (INEGI, 2015).

6.2.4 Orografía

En municipio de Irapuato se presentan pendientes que van desde las abruptas hasta las suaves, pasando por pendientes moderadas. Es posible clasificar las formas de relieve del territorio municipal en dos (INEGI, 2009):

- 1) Región Plana: Con altura sobre el nivel del mar desde 1,716 a 1,724 m y comprende el 85% del área total, con una pendiente no mayor del 20%.
- 2) Terrenos accidentados: Abarca aproximadamente el 15% de la superficie del municipio, ubicados en la periferia de la zona compuesta por lomas y cerros entre los cuales están el Cerro de Arandas, Bernalejo, Blanco y Loma Pelada.

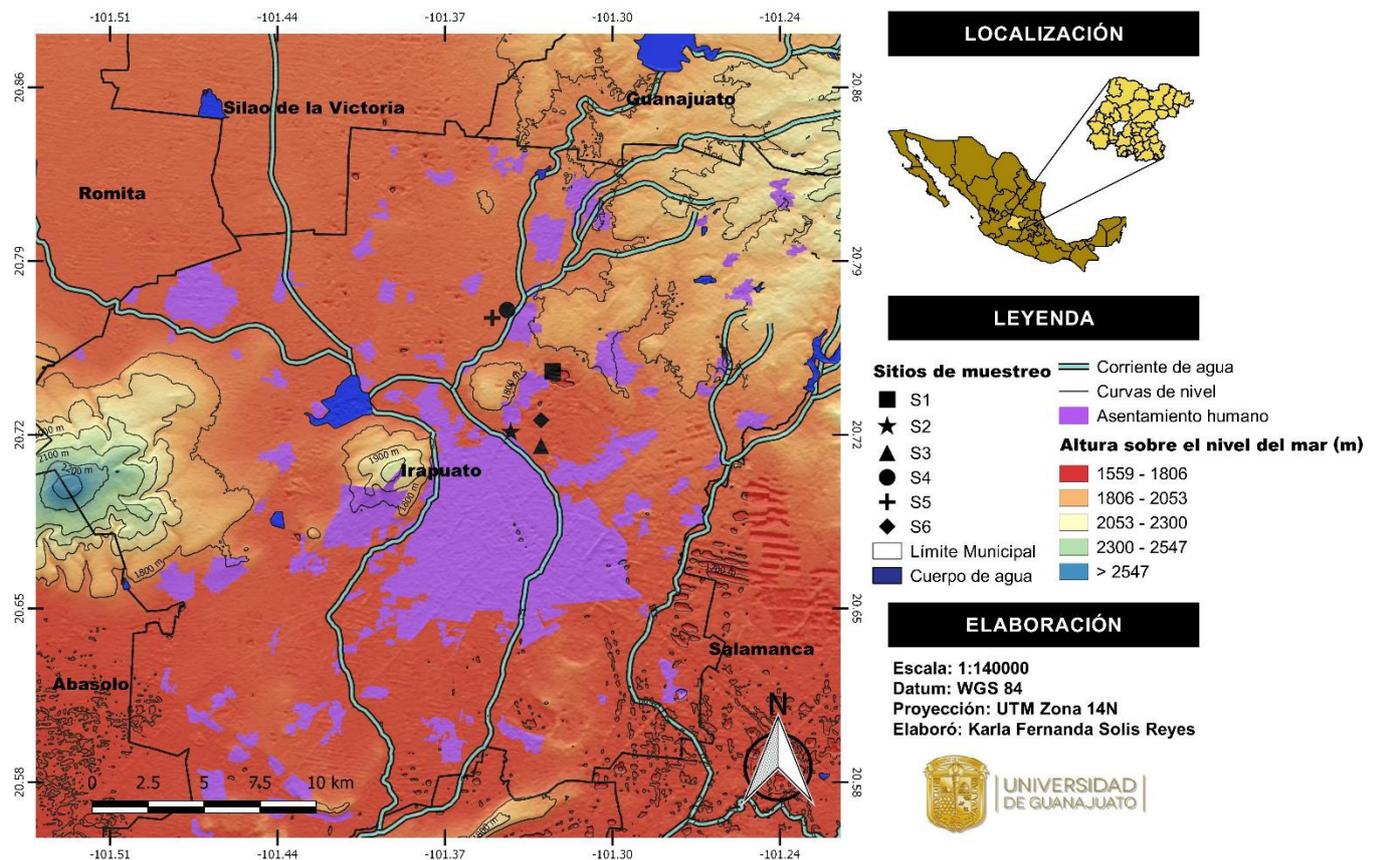


Figura 16: Orografía de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

El área de estudio está asentada en su mayor parte en una planicie y cuenta con una altura promedio de 1,724 m s.n.m. Los puntos de muestreo están localizados en la región plana, entre las curvas de nivel de 1,700 y 1,800 m s.n.m. (Figura 16), caracterizada por una topografía baja con respecto a sus alrededores, pero con una pendiente no mayor a 8%.

6.3 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

La zona de estudio se encuentra en la cuenca Río Lerma-Salamanca, dentro de la Región Hidrológica Lerma-Santiago (RH-12) (Figura 17), cuyas aguas fluyen hacia el Océano Pacífico y tiene su origen en la presa Solís.

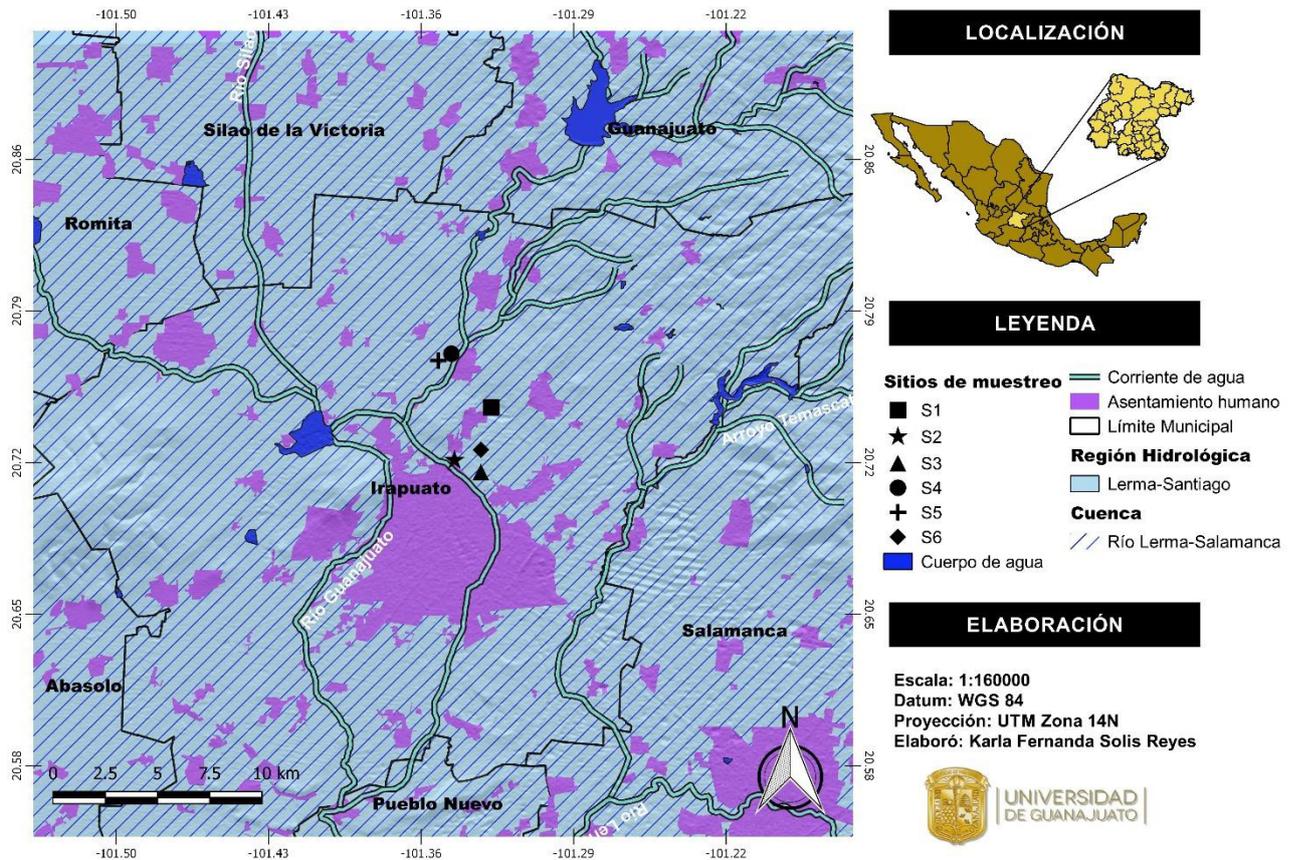


Figura 17: Región Hidrológica y cuenca del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

Acorde al INEGI (1998), el uso principal que se le da a dicha cuenca es para proveer necesidades derivadas de las actividades agrícolas, pecuarias y domésticas. En general el agua de la cuenca presenta una tendencia a contener una salinidad media y una sodicidad baja, por lo que debe usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. Atendiendo al diseño del drenaje, se define un patrón tipo dendrítico en la zona montañosa de la parte norte, en tanto que en el sur y sureste es muy característico el drenaje radial originado por los aparatos volcánicos existentes.

El río Lerma es el colector principal y drena la porción sur de la cuenca. Tiene su origen en el Estado de México, cerca del poblado Atizapán de Zaragoza y en las partes altas de los volcanes Nevado de Toluca y Ajusco. Sus afluentes principales por margen derecha son los ríos Laja y Guanajuato, constituyendo las corrientes perennes de la cuenca. El resto de las corrientes son arroyos de régimen intermitente, de avenidas turbulentas en época de lluvias (INEGI, 1998).

De acuerdo con la información proporcionada por la CONAGUA (2015), en la cuenca existe un gran número de obras hidráulicas con problemas de contaminación, entre las que destacan el arroyo Temascatío, así como los ríos: Guanajuato, Silao y Turbio, los cuales se utilizan para regar los valles de Irapuato, Silao y León.

Esparza (2011) señaló que el grado de contaminación, en el caso del río Guanajuato, se debe a que este afluente es el principal medio de transporte en que migran los residuos de la explotación de metales por la actividad minera desarrollada desde la época colonial. En la Figura 18 se puede apreciar la cercanía del de las minas del distrito minero de Guanajuato al área de influencia del río Guanajuato, aguas arriba del sitio de estudio. Aunado a lo anterior, el río Guanajuato escurre la mayor parte de la zona centro y sur de Guanajuato para luego desembocar y unirse a la corriente del mismo nombre, pero en la ciudad de Irapuato; abarcando zonas industriales, procesos de mezclado con descargas de aguas urbanas, desechos agrícolas y lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.

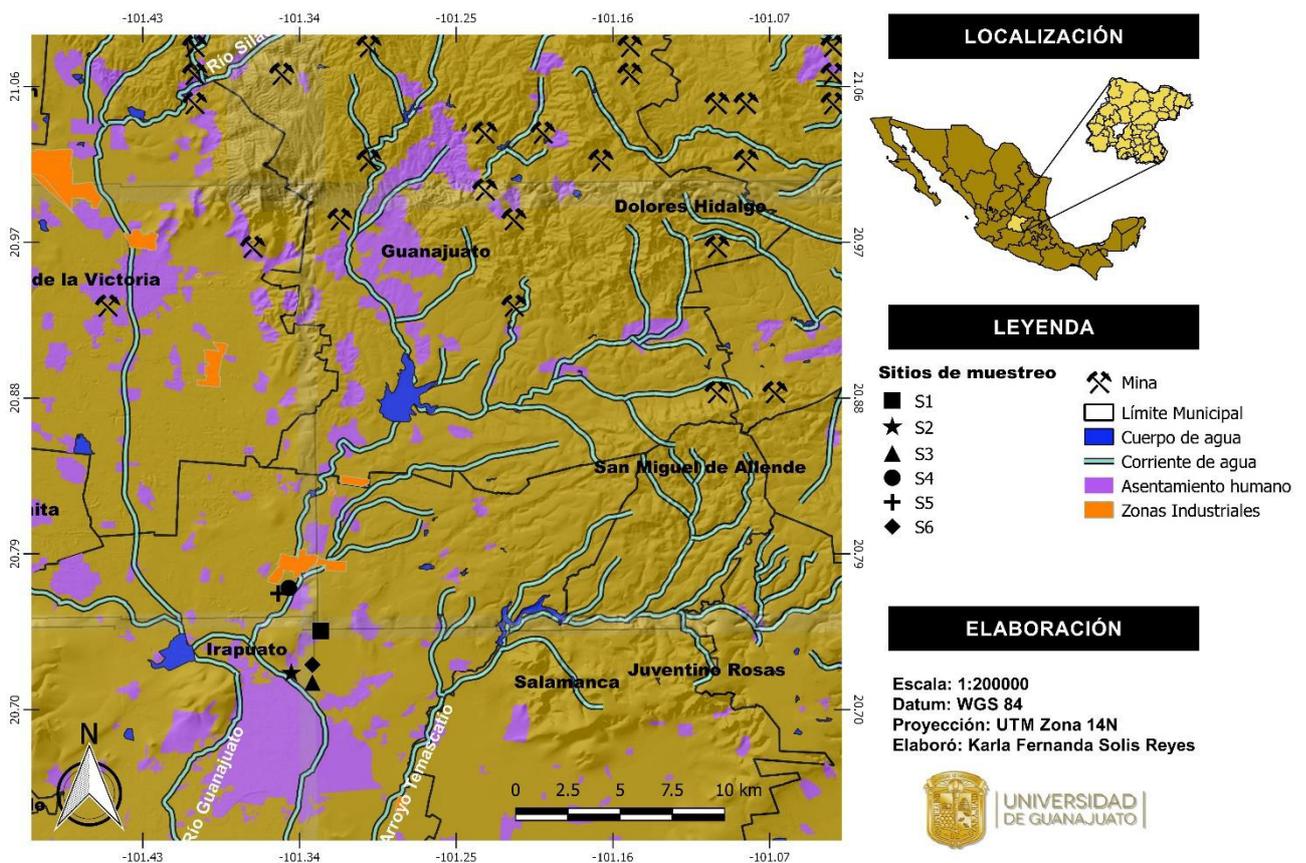


Figura 18: Cercanía de minas, asentamiento humano y zonas industriales al área de influencia de Río Guanajuato. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

6.4 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Con forme al mapa de hidrología subterránea (Figura 19), se puede observar que los sitios de muestreo S4 y S5 se encuentran dentro del área del acuífero Silao-Romita, mientras que S1, S2, S3 y S6 se encuentran dentro del acuífero Irapuato-Valle. De acuerdo con la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (por sus siglas CEAG) (2019), en ambos acuíferos se han encontrado presencia de nitratos y fluoruros, así como en algunos casos evidencia de As, Fe y Na.

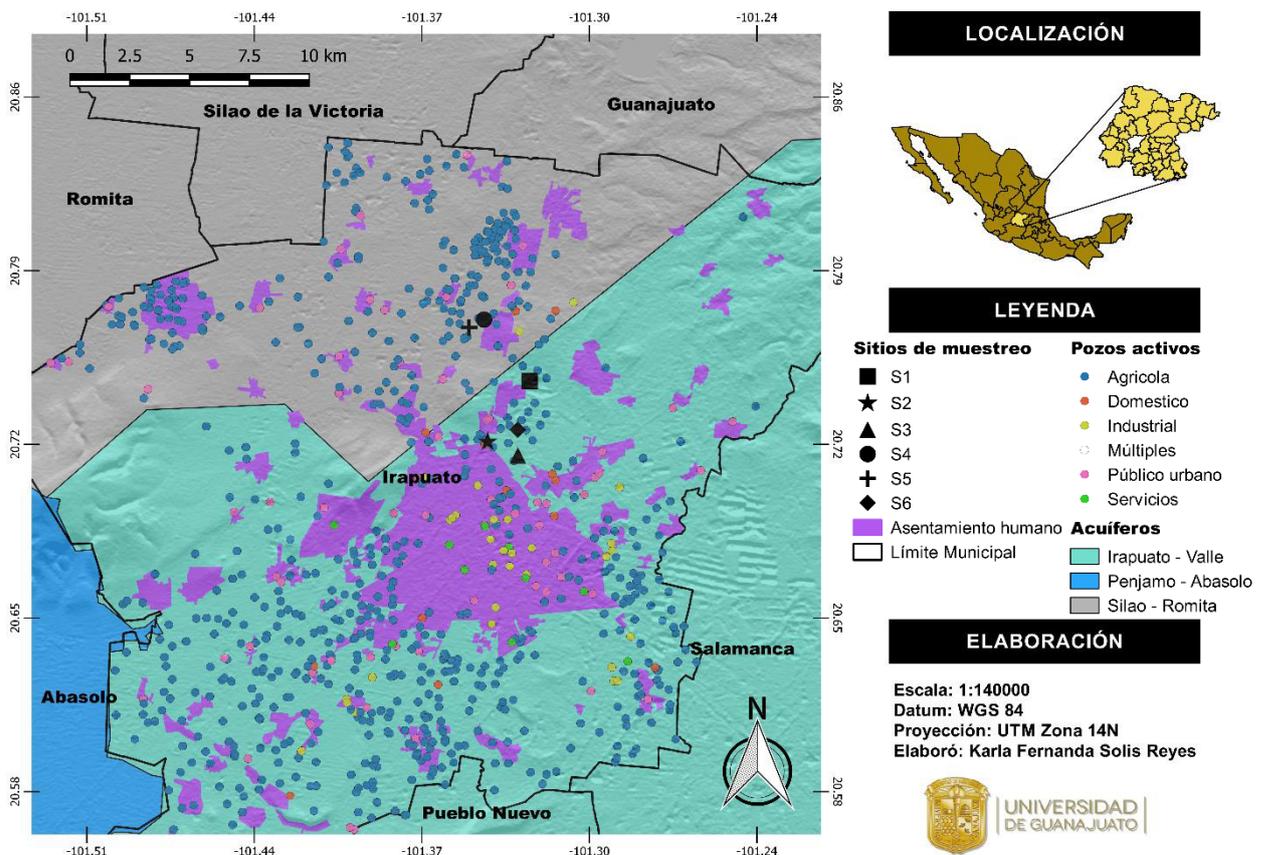


Figura 19: Acuíferos y pozos del área de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2017). Elaboración propia.

6.4.1 Acuífero Silao-Romita

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer que el sistema acuífero es de tipo libre a semiconfinado, conformado en su porción superior, por un medio granular constituido por depósitos aluviales y fluviales como areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por un medio fracturado alojado en rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que afloran en la mayor parte de su superficie. Presenta condiciones locales

de semiconfinamiento debido a la existencia de lentes de sedimentos arcillosos lacustres, depósitos tobáceos y calizas arcillosas, los cuales provocan el almacenamiento de agua a diferentes profundidades (CONAGUA, 2018).

No existe información hidrogeoquímica actual, la más reciente corresponde al estudio realizado en 1998 por la CEAG. De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Se encontró As en concentraciones que varían de menos 0.005 a 0.040 mg/L. Los valores de CE variaron de 490 a 1,450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con la *American Public and Health Association* (APHA). Los valores de pH encontrados variaron desde 6.9 hasta 8.5 y la temperatura entre 26.2 y 37.8 °C.

La CEAG (1998) clasificó el agua para su uso en riego utilizando la clasificación de Wilcox, que relaciona la CE con la Relación de Adsorción de Na (RAS); puesto que se determinó como C₂-S₁, que corresponde a una salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y C₁-S₁, que representa un agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas clasificaciones se consideran aptas para el uso agrícola sin restricción alguna en el tipo de cultivos y de suelos.

De acuerdo con la CONAGUA (2018), se identifican un total de 1,375 captaciones del agua subterránea: 1,225 pozos, 149 norias y 1 manantial; de los cuales 1,278 se consideran activos y 97 inactivos de manera temporal. Del total de obras 1,049 son para uso agrícola, 268 para abastecimiento de agua potable, 31 para uso industrial y 27 para otros usos. El volumen total de extracción estimado de 371.3 hm³/año, de los cuales, 332.3 hm³/año (89.5%) es utilizado para las actividades agrícolas, 34.5 hm³/año (9.3%) es para uso público-urbano, 4.3 hm³/año (1.2%) para uso industrial y 0.2 hm³/año (0.1%) para otros usos. Además, los pozos que se encuentran explotando este acuífero alcanzan profundidades del orden de 80-200 m.

6.4.2 Acuífero Irapuato-Valle

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer que el sistema acuífero es de tipo libre-semiconfinado, heterogéneo y anisótropo con doble porosidad. El sistema acuífero está conformado, en su porción superior, por un medio

granular constituido por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y conglomerados, cuyo espesor promedio es menor a 100 m, que se encuentran intercalados e interdigitados con derrames basálticos, y está controlado estructuralmente por la presencia de fallas que generan fosas en el subsuelo; y en su porción inferior por un medio fracturado alojado en rocas volcánicas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica (CONAGUA, 2018).

La información hidrogeoquímica más reciente corresponde al estudio realizado en 1997 por la CEAG. De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para los diferentes usos. Se encontró As en concentraciones que varían de menos 0.005 a 0.040 mg/l. Los valores de CE variaron de 490 a 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con la APHA. Los valores de pH varían de 6.9 a 8.5 y la temperatura presentó un rango de variación entre 26.2 y 37.8 °C.

La CEAG (1994) clasificó el agua para su uso en riego utilizando la clasificación de Wilcox, puesto que se determinó como C₂-S₁, que corresponde a una salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y C₃-S₁, que representa agua de alta salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas clasificaciones se consideran aptas para el uso agrícola, en cultivos tolerantes a la salinidad y en suelos de buen drenaje. El agua de los pozos más profundos se clasifica como C₁-S₁, que corresponde a una baja salinidad y un bajo contenido de sodio intercambiable que es apta para la agricultura sin ninguna restricción.

CONAGUA (2018) identificó un total de 2,319 captaciones del agua subterránea: 2,314 pozos, 4 norias y 1 manantial; de los cuales 2,221 se consideran activos y 93 inactivos de manera temporal. Del total de obras 1,766 son para uso agrícola, 422 para abastecimiento de agua potable, 124 para uso industrial y 2 para otros usos. El volumen total de extracción estimado de 672.4 hm³/año, de los cuales, 495 hm³/año (73.6%) es utilizado para las actividades agrícolas, 99.5 hm³/año (14.8%) es para uso público-urbano, 77.8 hm³/año (11.6%) para uso industrial y 0.1 hm³ /año (0.0%) para otros usos. A través del único manantial censado se descarga un caudal de 0.3 hm³/año, que se utiliza para uso agropecuario.

6.5 CLIMATOLOGÍA

De acuerdo con la clasificación de Köppen (Kottek *et al.*, 2006) se encontró que el clima Templado húmedo del tipo (A)C(w₀)(w) es el que cubre la zona de estudio (Figura 20).

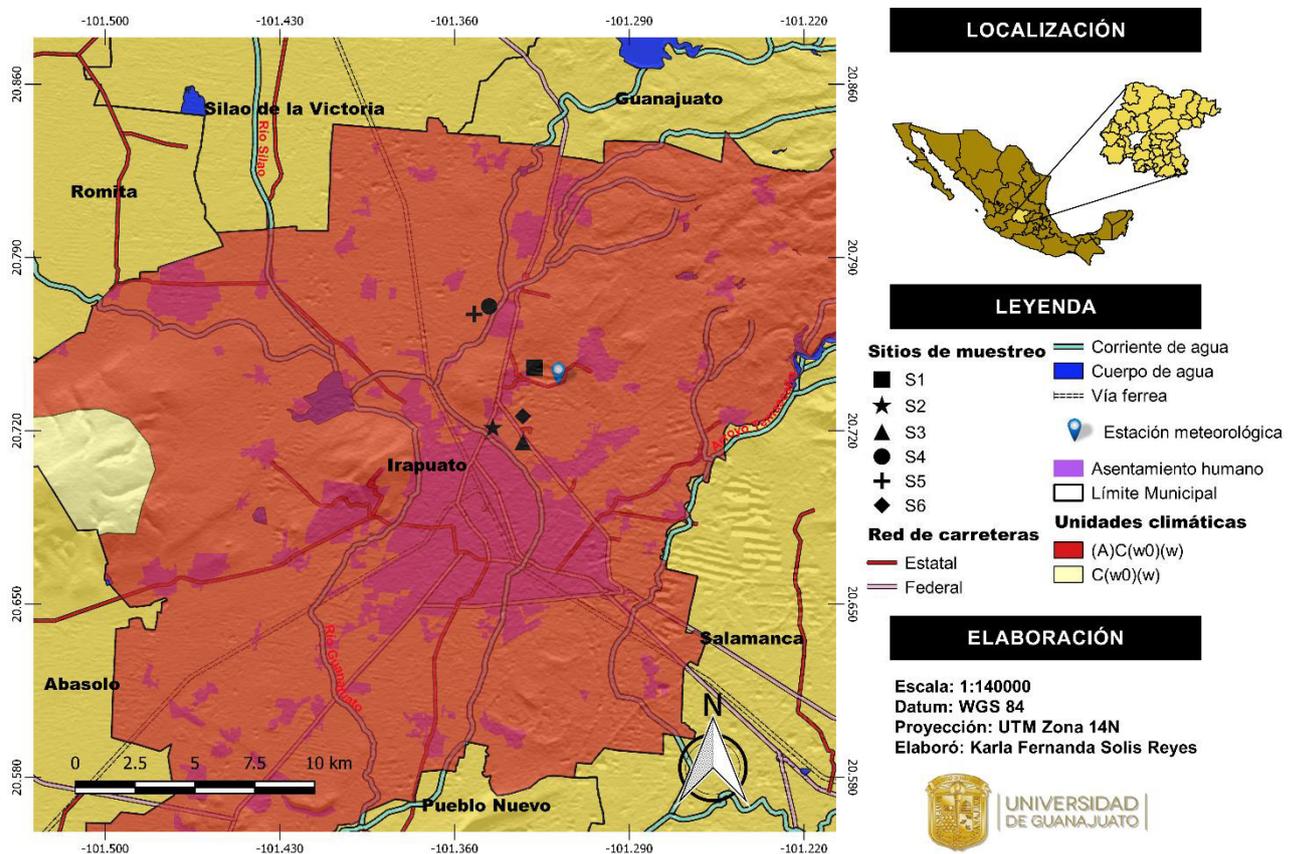


Figura 20: Clima de la zona de estudio. Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: INEGI (2008). Elaboración propia.

Con base en la combinación de valores que presenta el INEGI en su Diccionario de datos climáticos (2000), este tipo climático pertenece a:

- (A)C: Semicálido. Temperatura media anual entre 18 y 22 °C.
- w(w): Subhúmedo. Régimen de lluvias en verano y periodo seco en invierno. Precipitación del mes más seco <60 mm y porcentaje de lluvia invernal con respecto al total anual <5.
- 0: Menos húmedo del grupo de los subhúmedos. Grado de humedad con cociente menor de 43.2.

Para el análisis climatológico se utilizó el registro de datos de la estación meteorológica El Copal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN; periodo 1978-2018) presentes en el Anexo 1. Dicha estación meteorológica es la más cercana a los puntos de muestro, se encuentra a una altitud de 1,757 msnm. y su ubicación se puede apreciar en la Figura 19.

La Figura 21 refleja el cálculo de la temperatura media anual histórica (TMAH), la temperatura media mensual histórica (TMMH), la precipitación media anual histórica (PMAH), la precipitación media mensual histórica (PMMH), la evaporación media mensual histórica (EMMH), la evaporación media anual histórica (EVMAH) y el balance hídrico (BH) de los últimos cuarenta años.

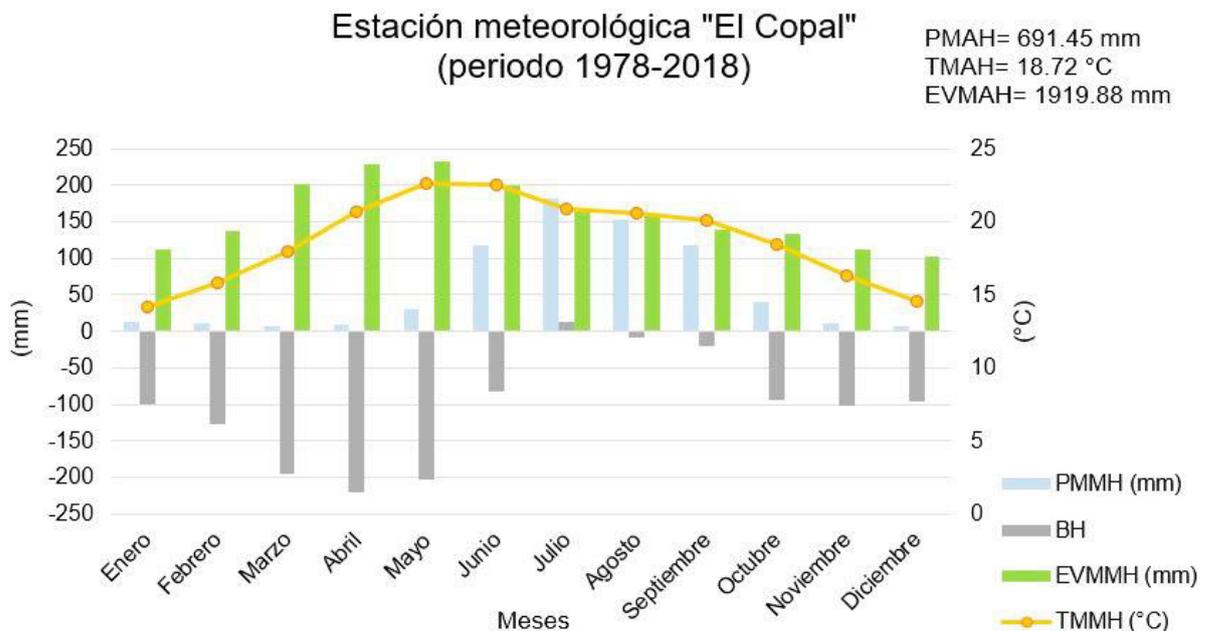


Figura 21: Climograma de la estación meteorológica “El Copal” en Irapuato, Gto. Base de datos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Se puede observar en el climograma una estacionalidad marcada (Figura 21) y coincide con la clasificación asignada de Köppen-Geiger, puesto que el periodo de máxima precipitación ocurre en los meses de junio a septiembre, siendo el mes de julio el que registra la máxima lluvia con un valor de 181.14 mm mientras que el mes de menor incidencia pluvial es marzo, con una precipitación menor a 7 mm. Además, la temperatura más fría la presentan los meses de enero y diciembre con menos de 15 °C y el mes más caluroso ocurre en mayo con 22.66 °C.

En promedio, la evaporación (EV) aumenta en los meses de abril y mayo con un máximo de 232.65 mm y disminuye en la temporada de invierno, con un mínimo de 102.26 mm. Además, el BH es negativo en todos los meses, a excepción del mes de julio (+12.91 mm).

6.5.1 Temperatura

Cuervo-Robayo *et al.* (2014), reportaron que la TMAH (periodo 1910-2009) en el municipio de Irapuato varía entre 18 y 20 °C (Figura 22), lo cual coincide con los datos obtenidos presentados en el climograma de la Figura 21.

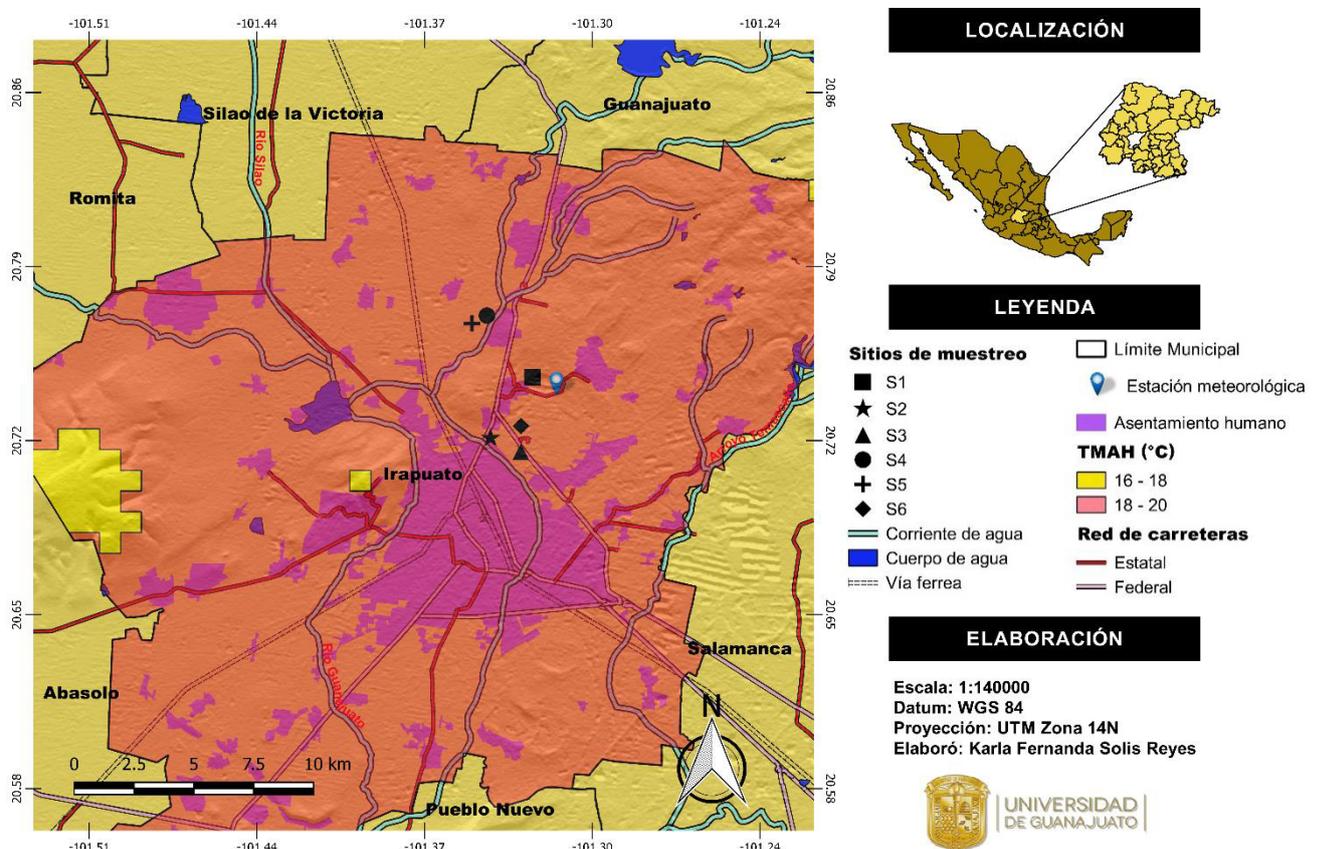


Figura 22: TMAH de Irapuato (periodo 1910-2009). Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: Cuervo-Robayo *et al.* (2014). Elaboración propia.

6.5.2 Precipitación

Como se muestra en la Figura 23, la precipitación anual de Irapuato varía entre 600 y 800 mm (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014), lo cual coincide con el valor de PMAH obtenida.

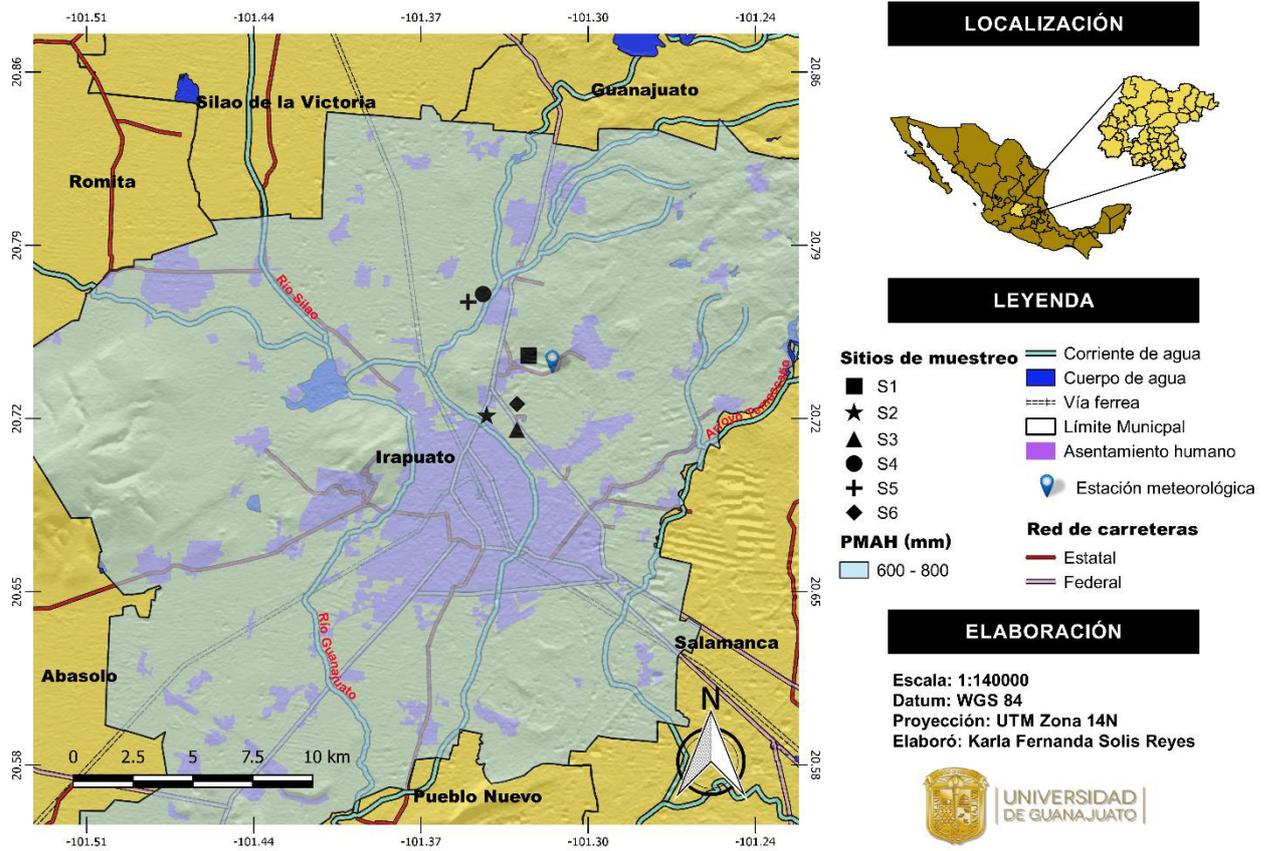


Figura 23: PMAH de Irapuato (periodo 1910-2009). Se muestran los sitios de muestreo (S1-S6). Fuente: Cuervo-Robayo *et al.* (2014). Elaboración propia.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Para efectuar el muestreo de los suelos en el área de estudio, la preparación de las muestras y las determinaciones de propiedades físicas y químicas, se siguieron los protocolos de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

7.1 MUESTREO DE SUELOS

Para el muestreo de suelo superficial se siguió el método zig-zag. Se recolectó una muestra compuesta, en cada una de las seis parcelas seleccionadas, derivada de submuestras simples de suelo tomadas a una profundidad entre 0 a 15 cm a partir de la superficie (Figura 24) para formar un total de 6 muestras compuestas de aproximadamente 1 kg cada una, las cuales se colocaron en bolsas de polietileno y se etiquetaron. Todas las muestras se recolectaron con una pala de plástico para evitar la contaminación por metales.

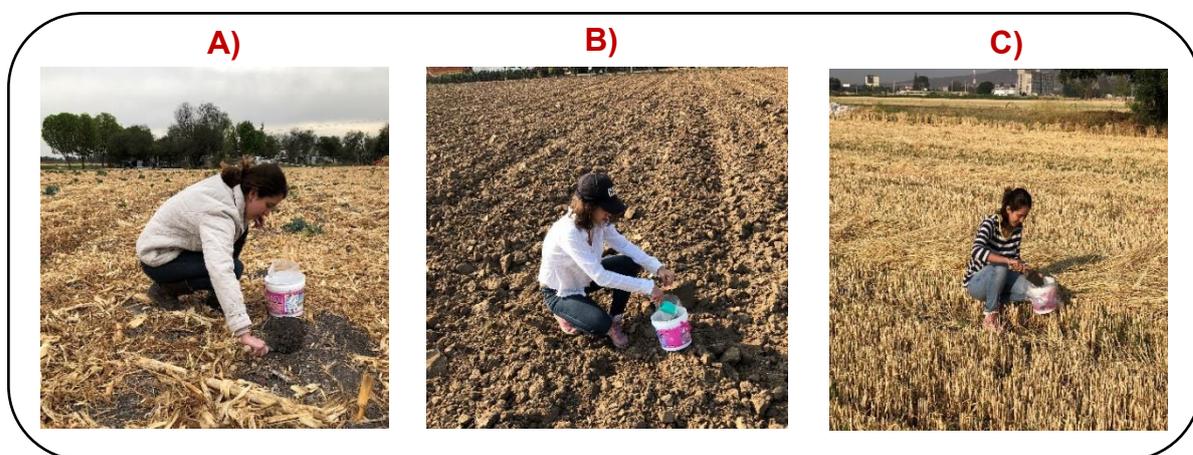


Figura 24: Muestreo de los suelos **A)** S1, **B)** S2 y **C)** S3.

7.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Una vez obtenidas las muestras de suelo, éstas se trasladaron al laboratorio de Geología Ambiental de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA) donde se extendieron y se homogenizaron en charolas de plástico formando una capa de suelo

inferior a 2.5 cm de espesor para su secado a temperatura ambiente durante una semana. Posteriormente, las muestras de suelo se molieron con un mazo de madera, se tamizaron con un tamiz de acero inoxidable malla 10 de 2 mm de diámetro y se almacenaron en bolsas de polietileno.

7.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Para todas las determinaciones se realizaron 3 repeticiones. Los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio de Geología Ambiental y en el laboratorio de Tecnología del Agua para la Agricultura de la DICIVA.

7.3.1 Medición de pH

Mediante el método electrométrico se llevó a cabo la determinación del pH en las muestras de suelo, midiendo en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2. Se mezclaron 10 g de suelo con 20 mL de agua destilada. La mezcla de suelo:agua se agitó manualmente a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos. Posteriormente se dejó reposar durante 15 minutos y se tomaron lecturas de pH, agitando nuevamente la suspensión antes de introducir el electrodo.

Las lecturas se tomaron con un potenciómetro marca Conductronic modelo PC45 (Figura 25), previamente calibrado con soluciones reguladoras a pH 4, 7 y 10.



Figura 25: Medición del pH del suelo con potenciómetro.

7.3.2 Conductividad Eléctrica

La CE se midió en una relación suelo:agua 1:2. Primeramente, la mezcla de 10 g de suelo con 20 mL de agua destilada se agitó por 30 minutos y se dejó reposar por 15 minutos. Después se tomó lectura con un conductímetro marca Conductronic modelo PC45 (Figura 26), previamente calibrado con una solución de KCl 0.1 N a 20 °C, ajustando la CE a 1.4 dS/m.



Figura 26: Medición de la CE en las muestras de suelo.

7.3.3 Humedad

Se siguió el método gravimétrico para la determinación del contenido de humedad de las muestras de suelo. El método se basa en la medición de la cantidad de agua, expresada en gramos, que contiene una muestra de suelo. La determinación de la masa de agua se realiza por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco.

En primer lugar, se introdujeron los crisoles en una estufa marca Felisa modelo FE291AD durante 8 horas a una temperatura de 105 °C, hasta lograr un peso constante. Posteriormente, los crisoles se colocaron en un desecador hasta enfriar para poder pesarlos en una balanza analítica Velab modelos VE-300. Después de anotar el peso de cada crisol, se le colocó aproximadamente 3 g de suelo húmedo para luego someterlo a una temperatura de 105 °C por 24 h. Por último, se enfrió el crisol con la muestra seca en un desecador de vacío y se pesó nuevamente.

Con los datos obtenidos (Anexo 2) se aplicó la Ecuación 2 para el cálculo del contenido de *g*.

$$\%g = \frac{(PC + PSH) - (PC + PSS)}{(PC + PSS) - PC} \times 100$$

Ecuación 2

Donde:

%g = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje

PC = Peso del crisol (g)

PSH = Peso del suelo húmedo (g)

PC+PSH = peso del crisol más peso del suelo húmedo (g)

PC+PSS = Peso del crisol más peso del suelo seco (g)

7.3.4 Pérdida de Peso por Ignición

La metodología de Pérdida de Peso por Ignición (PPI) se empleó para determinar el contenido de CO, basado en un calentamiento secuencial de las muestras en un horno, para luego pesar el sedimento antes y después de ser calcinado. Se introdujeron 3 g de muestra, previamente secada a 105 °C, en una mufla marca Thermo Scientific modelo F479 a una temperatura de 550 °C, durante 3 horas para posteriormente pesar los crisoles con la muestra de suelo calcinado.

Con los datos obtenidos (Anexo 2) se aplicó la Ecuación 3 para calcular el porcentaje en peso del CO.

$$\%CO = \frac{PSS_{105} - PSS_{505}}{PSS_{105}} \times 100$$

Ecuación 3

Donde

PSS_{105} = Peso del suelo seco a 105 °C (g)

PSS_{550} = Peso de la muestra después de la combustión a 550 °C (g)

7.4 CUANTIFICACIÓN DEL ARSÉNICO TOTAL

La determinación de la concentración total de As se realizó en el Centro de Innovación Aplicada en Tecnología Competitiva (CIATEC, A.C.) León, Gto., siguiendo los métodos USEPA 3050B y USEPA 6010C, mediante Espectrometría Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) con un equipo marca Thermo iCAP 6500 Duo (Figura 27), a una longitud de onda de 189.042 nm y con una potencia del Generador de radiofrecuencia de 1,05 kW.



Figura 27: Equipo de ICP-AES. Fuente: Tecnofrom (2009).

7.5 EXTRACCIÓN QUÍMICA SIMPLE

Para extraer la fracción de cambio y/o soluble del As en agua ligeramente acidificada (pH 5.5), la cual corresponde a las formas más fácilmente disponible del elemento, se llevó a cabo una Extracción Química Simple del As en las muestras de suelo, empleando el protocolo de especiación que consiste en mezclar 1 g de suelo con 40 mL de agua destilada en un agitador orbital a 300 rpm, durante 16 h, a temperatura ambiente (27 °C), en un agitador de incubación marca IKA KS 3000 i control (Figura 28). Después del balance, las suspensiones se centrifugaron a 3000 rpm durante 20 minutos. Los sobrenadantes se filtraron a través de una membrana de 0.45 µm (Figura 29), se acidificaron a pH <2 usando HNO₃ y se almacenaron a 4 °C para el análisis posterior de As (Ruíz-Huerta *et al.*, 2017). Todas las extracciones se llevaron a cabo por triplicado para cada muestra y un blanco. Todo el material en contacto con muestras y reactivos se remojó en una solución de HNO₃ 4 M durante 24 h previas a su uso y se enjuagó repetidamente con agua destilada.



Figura 28: Agitador de incubación con muestras.



Figura 29: Filtración a través de una membrana de 0.45 μm .

7.6 COLORIMETRÍA DE AZUL DE MOLIBDENO

Para la determinación del As soluble en agua se empleó el método del azul de molibdeno. Es un método espectrofotométrico basado en la generación de complejos coloridos en medio ácido. El arseniato, en solución acuosa, reacciona con la solución de molibdato, en medio ácido, obteniéndose un compuesto amarillo y posteriormente, en presencia de un reductor, forma un color azul característico. Esta reacción es nula con el arsenito, por lo tanto se requiere la oxidación de As (III) a As (V). Un inconveniente importante en esta técnica es la interferencia del P (V) presente en la disolución con el arseniato. Tanto H_3PO_4 como H_3AsO_4 tienen propiedades físicas y químicas análogas, en consecuencia, forman complejos de molibdeno (molibdofosfato y molibdoarsenato, respectivamente) con espectros de absorción similares en un rango de 500 a 950 nm (Tsang *et al.*, 2007).

Para el desarrollo del método colorimétrico de azul de molibdeno se mezcló consecutivamente 8.8 mL del analito con 0.1 mL de KMnO_4 (>99%), 0.1 mL de H_2SO_4 al 98%, 0.4 mL de Agente A, 0.2 mL de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ al 10.8% y se aforó a 10 mL (Figuras 30 A y B). Luego, se calentó a temperatura de aproximadamente 50°C durante 5 min. para oxidación del As (Lenoble *et al.*, 2003). Finalmente, se dejó enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se midió la absorbancia por espectrofotometría UV-Vis, con un equipo marca PerkinElmer modelo LAMBDA 365 de doble haz (190-1100 nm), controlado desde PC (Figuras 29 C y D). El agente A se preparó mediante la disolución de 10.4 g de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (>99%) y 0.0176 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (>99%) en 29.4 mL de 9 mol/L H_2SO_4 y se diluyó con agua destilada hasta un volumen final de 100 mL en un matraz color ámbar. Debido a problemas de estabilidad en la mezcla obtenida, el ácido ascórbico se agregó en primer lugar con 30.6 mL de agua destilada y luego se agregaron los demás compuestos con agitación para mezclar y espera de 45 segundos entre cada adición.

Todas las soluciones se prepararon de acuerdo con Tsang *et al.* (2007) y a temperatura ambiente ($28 \pm 2^\circ\text{C}$) usando agua destilada. Las masas de todos los sólidos se midieron utilizando una balanza analítica.

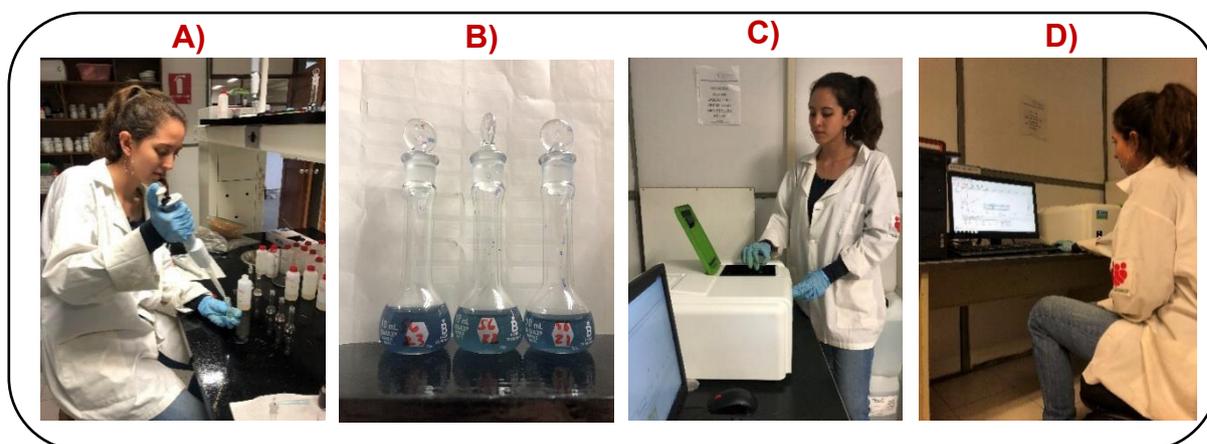


Figura 30: Realización del método colorimétrico de azul de molibdeno.

7.6.1 Curva de calibración

Para la preparación de la curva de calibración se utilizó una solución madre de 10 mg/L de As, a partir de la cual se prepararon patrones en el rango de concentración comprendido entre 0 y 10 mg/L con intervalos de 1 mg/L. Se trataron los patrones

igual que la muestra y se midieron por espectrofotometría UV-Vis. En el Anexo 2 se muestran los datos obtenidos al realizar la curva de calibración para la determinación de As, en el intervalo de trabajo mencionado anteriormente.

Como se observa en la Figura 31, la curva de calibración del As fue lineal. Igualmente se muestra la ecuación de la recta promedio, donde y es la absorbancia (absorción lumínica) y x la concentración, con un valor de R^2 de 0.9951.

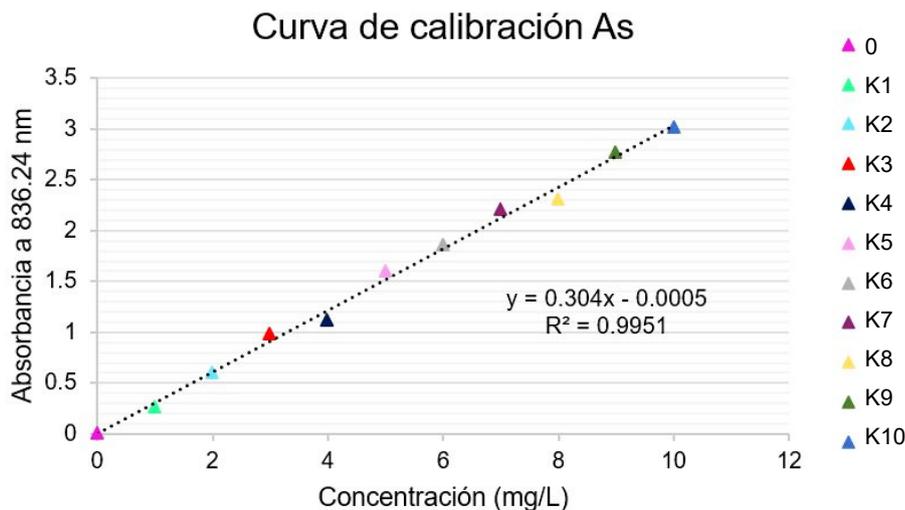


Figura 31: Curva de calibración de contenido de As.

7.7 ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

Para interpretar el grado de contaminación de los suelos se aplicó el I_{geo} propuesto por Müller (1969), el cual es utilizado para evaluar la contaminación a través de la relación de la concentración medida frente a los valores de referencia, su expresión matemática se muestra en la Ecuación 4:

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \frac{C_i}{1.5B_i}$$

Ecuación 4

Donde C_i es la concentración total del elemento i en el suelo, B_i es el valor de la concentración de fondo del elemento i en la corteza continental y 1.5 es la constante que representa las fluctuaciones naturales de una sustancia dada en el medio ambiente y pequeñas influencias antropogénicas. Los valores resultantes se

compararon con las seis clases de I_{geo} propuestas por Loska *et al.* (1996), como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12: Clasificación del I_{geo} y grado de contaminación (Loska *et al.*, 1996).

CLASE	VALOR	GRADO DE CONTAMINACIÓN
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

7.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Se realizaron correlaciones de la fracción disponible del As entre el contenido de As total del suelo y algunas características edáficas (contenido de humedad, contenido de arcilla, CE, CO y pH). Para estimar la bondad de la regresión se utilizó el coeficiente de determinación (R^2). Los análisis estadísticos se realizaron usando Microsoft Excel y se visualizan en el Anexo 3.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos de las propiedades físicas y químicas de los suelos de cultivo muestreados.

Tabla 13: Resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos analizados.

MUESTRA	PARÁMETRO				
	Humedad (%)	CE (dS/m)	%CO	pH	%Arcilla ⁶
S1	6.99	0.35	6.07	7.65	55.96
S2	1.93	0.69	3.43	8.18	22.96
S3	3.51	0.52	5.24	8.12	27.96
S4	2.60	0.27	4.22	8.34	9.68
S5	1.51	0.30	3.59	8.20	9.68
S6	6.62	0.47	7.22	8.41	60.96

El contenido de humedad es fundamental para la producción de alimentos, sin embargo, los resultados del porcentaje de humedad gravimétrica (Tabla 13) indican que los sitios de muestreo se describen como secos, conforme a la Tabla 1, esto quiere decir que no presenta gran cantidad de agua disponible para el cultivo. No obstante, hay que tener en cuenta la alta tasa de EV anual promedio del área de estudio, con valores que alcanzan los 1919.88 mm (Figura 21). Aunado a lo anterior, los meses en que se elaboró el muestreo, enero, marzo y abril, corresponden a la época seca (temporada de sequía), de acuerdo con el climograma (Figura 21), por lo que, dichos meses, se asocian al periodo con déficit de humedad en el suelo.

Asimismo, en la Tabla 13, se observa que los valores más alto de contenido de humedad se presentaron en las muestras S1 con 6.99% y S6 con 6.62%, como resultado de la alta capacidad de retención de agua de los suelos Vertisoles (INEGI,

⁶ Recuperado de Zanol *et al.* (2019) y Medina (2017).

2015). Este comportamiento puede deberse a que las partículas de arcilla presentan baja permeabilidad al agua y por consiguiente una elevada retención de agua (Figura 5), debido a su estructura expandible. En cambio, los valores de contenido de humedad más bajos se observaron en los suelos Entisoles: S3 con 3.51%, y S4 con 2.60%, S2 con 1.92% y S5 con 1.51%. Esto es debido a que los Entisoles son suelos con baja capacidad de retención de humedad, por lo que pueden presentar una marcada necesidad de agua en épocas de déficit hídrico (INEGI, 2015).

En la Tabla 13 se puede observar que los valores de CE de las muestras de suelo fueron de < 1 dS/m, por este motivo se clasifican como suelos libres de sales (Tabla 2). Igualmente, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, estos valores señalan efectos despreciables de salinidad en el cultivo, de modo que, son adecuados para actividades agrícolas.

Una de las principales causas antrópicas de la salinidad en los suelos es el riego con aguas salinas (Courel, 2019). Esto coincide con la diferencia entre los resultados de CE de las muestras de suelo, ya que, S4 y S5 son de agricultura temporal, por lo que, presentaron los valores más bajos de CE con 0.27 y 0.30 dS/m, respectivamente. Mientras que S1 (con 0.35 dS/m), S2 (con 0.69 dS/m), S3 (con 0.52 dS/m) y S6 (con 0.47 dS/m) presentaron valores más altos de CE en comparación, resultado de la agricultura de riego bajo influencia de fuentes de agua procedente de pozos del acuífero Irapuato-Valle. El agua de dicho acuífero se clasifica como de media y alta salinidad (ver en capítulo 6.4.2).

El contenido de CO (Tabla 13) de las muestras de suelo S1, S3 y S6 fueron de 6.07%, 5.24% y 7.22%, respectivamente, por lo cual, de acuerdo con la Tabla 4, se clasifican como suelos con muy alto contenido de CO. En cambio, las muestras de suelo S2, S4 y S5 con resultados de 3.43%, 4.22% y 3.59% de CO, respectivamente, se clasifican como suelos con alto contenido de CO. Además, con base en la FAO (2018), todas las muestras se consideran intrínsecamente fértiles debido a su contenido relativamente alto de CO (más del 1%).

Igualmente, se puede notar en la Tabla 13 que, el contenido de humedad fue afectado positivamente por el %CO, resaltando la influencia de la MO en la disponibilidad de agua para las plantas.

La Tabla 13 muestra que, en general, el pH de las muestras analizadas varió en un intervalo de 7.65 a 8.41, por lo cual se clasifican como suelos alcalinos (Tabla 3). Probablemente el carácter alcalino de los suelos muestreados es un fenómeno natural que nace de su pedogénesis, influenciada principalmente por el alto contenido calcáreo del material parental y por las reacciones de meteorización de las rocas del área de estudio, principalmente basaltos y andesitas (Figura 14).

Otra fuente de alcalinidad son los procedimientos para la producción agrícola que se llevan a cabo en los suelos de cultivo, principalmente la aplicación de fertilizantes, considerando que, afectan la reacción del suelo de forma diferente, dependiendo del tipo y dosis (FAO, 2002). Por consecuente, las distintas prácticas agrícolas de cada sitio de muestreo puede que explique la variación entre los resultados de alcalinidad de los suelos muestreados, ya que, S6 presentó el valor más alto de pH con 8.41, posteriormente S4 con 8.34, S5 con 8.20, S2 con 8.18, seguidos por S3 con 8.12 y el valor más bajo de pH lo presentó S1 con 7.65.

Como se ha mencionado anteriormente, el efecto del pH del suelo sobre el desarrollo de las plantas no afecta directamente la producción, sino que tiene un efecto indirecto o secundario, como por ejemplo la solubilización de elementos tóxicos.

Como aproximación, sin tener en cuenta otros factores como contenido en MO y condiciones oxidantes o reductoras, predominan el As (V) y el As (III) en la solución del suelo, encontrándose fundamentalmente como HAsO_4^{2-} y H_3AsO_3 por las condiciones de alcalinidad de los sitios de muestreo, conforme a la Figura 8.

Las muestras S1 y S6 se pueden considerar suelos arcillosos acorde a la Figura 6, pues su contenido de arcilla es de 55.96% y 60.96%, respectivamente (Tabla 13). Por el contrario, presentaron menor contenido de arcilla las muestras de suelo S3 con 27.96%, S2 con 22.96%, S4 con 9.68% y S5 con 9.68%. En la sección 6.2.2 se mencionó que, en el abanico aluvial del área de estudio se ha depositado material detrítico de origen lacustre y constituido por limos, arenas y gravas, parcialmente consolidados. Esto quiere decir que, probablemente se pueda relacionar el bajo contenido de arcilla de los suelos S3, S2, S4 y S5 por su mayor proximidad al Río Guanajuato.

8.2 ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

En la Tabla 14 se observa que las muestras S1, S3, S5 y S6 presentaron un I_{geo} de clase 0, lo que corresponde a la categoría de suelo no contaminado. Por otra parte, los valores máximos de I_{geo} se encontraron en las muestras S4 con 0.8799 y S2 con 0.2033, las cuales resultaron con una clase 1, indicando de esta manera una categoría entre suelo no contaminado a moderadamente contaminado.

Tabla 14: Resultados del I_{geo} de las muestras.

MUESTRA	VALOR	CLASE	GRADO DE CONTAMINACIÓN
S1	-2.0655	0	No contaminado
S2	0.2033	1	No contaminado a moderadamente contaminado
S3	-0.1903	0	No contaminado
S4	0.8799	1	No contaminado a moderadamente contaminado
S5	-0.2775	0	No contaminado
S6	-1.1081	0	No contaminado

Al ser S4 y S2 los sitios de muestreo los más cercanos al cauce del río Guanajuato (Figura 17), el mayor grado de contaminación de ambas muestras podría atribuirse a las aportaciones periódicas de minerales que contienen As provenientes principalmente de áreas con explotación minera ubicadas en la zona de influencia del río Guanajuato aguas arriba (Figura 18), como ha sido reportado por Zanol *et al.* (2019) y Medina (2017).

8.3 CONCENTRACIÓN TOTAL Y SOLUBLE EN AGUA DEL ARSÉNICO

Las concentraciones obtenidas de As total y As soluble en agua de las muestras de suelo se presentan en la Figura 32, en donde se observa que los valores máximos de As total se registraron en los suelos Entisoles: S4 con 13.25 mg/Kg, seguido por S2 con 8.29 mg/Kg, S3 con 6.31 mg/Kg, S5 con 5.94 mg/Kg; mientras que en los suelos Vertisoles los contenidos de As total fueron menores: S6 con 3.34 mg/Kg y el mínimo lo presentó la muestra S1 con 1.72 mg/Kg. Estos valores se encuentran por debajo de

la Concentración de referencia Total (CR_T)⁷ que es de 22 ppm, de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para uso de suelo agrícola. El referente normativo en cuestión, comparado con las regulaciones o recomendaciones nacionales e internacionales de diferentes países u organización (Tabla 9), evidencia que no hay normas equivalentes para la comparación del límite permisible para el As total en suelo agrícola.

Igualmente, en la Figura 32, se puede apreciar que el contenido de As total en los suelos Entisoles (S2-S5) sobrepasó el valor de fondo geoquímico, que es de 4.8 ppm para este metaloide (Rudnick & Gao, 2003). Lo anterior sugiere que la acumulación de As en dichos suelos proviene de fuentes antrópicas. Además, conforme aumenta la cercanía de los suelos Entisoles (S2-S5) al río Guanajuato (Figura 16), la concentración de As total es mayor, posiblemente por la presencia de As en los contaminantes (desechos industriales, urbanos, agrícolas y mineros) acarreados desde aguas arriba y depositados por el afluente en dichos suelos (Figura 18).

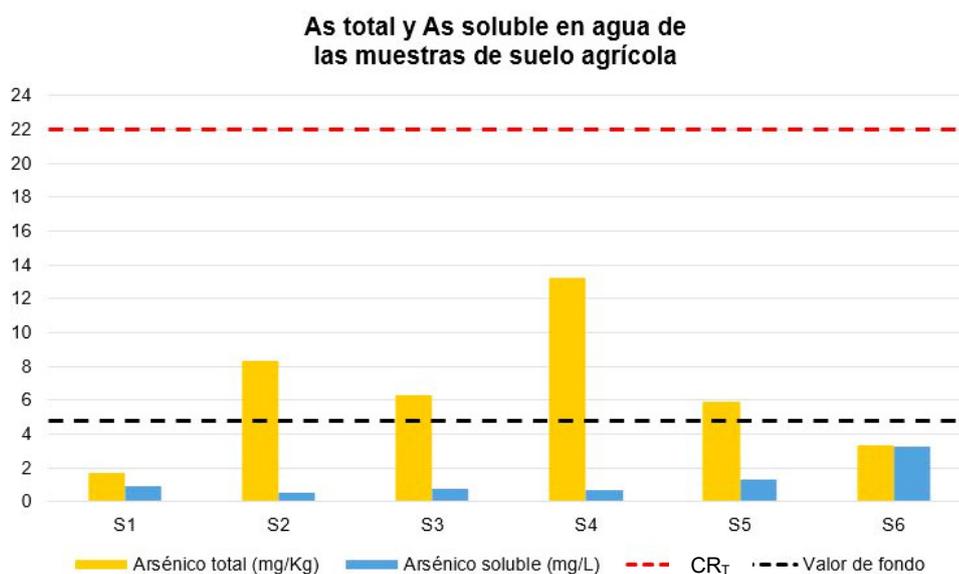


Figura 32: Concentraciones de As total y As soluble en agua de las muestras.

La extracción química simple del As mostró el contenido de As soluble en agua de cada muestra (Figura 32). A continuación, se presentan los datos obtenidos en orden

⁷ Es la masa del elemento químico regulado, expresado en mg, por unidad de masa del suelo en estudio, expresado en Kg, base seca, por encima de la cual se considera existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud.

descendente: S6 con 3.25 mg/L, S5 con 1.31 mg/L, S1 con 0.91 mg/L, S3 con 0.80 mg/L, S4 con 0.68 mg/L y S2 con 0.55 mg/L.

En la Figura 33 se ilustra el porcentaje de As soluble en agua (fracción soluble) con respecto al contenido de As total. Dicho porcentaje se considera como la fracción del contenido total de As en el suelo que podría permitir la transferencia del elemento hacia sistemas acuosos y/o al cultivo y, por ende, su incorporación a la cadena trófica. En otros términos, representa la fracción del As más disponible.

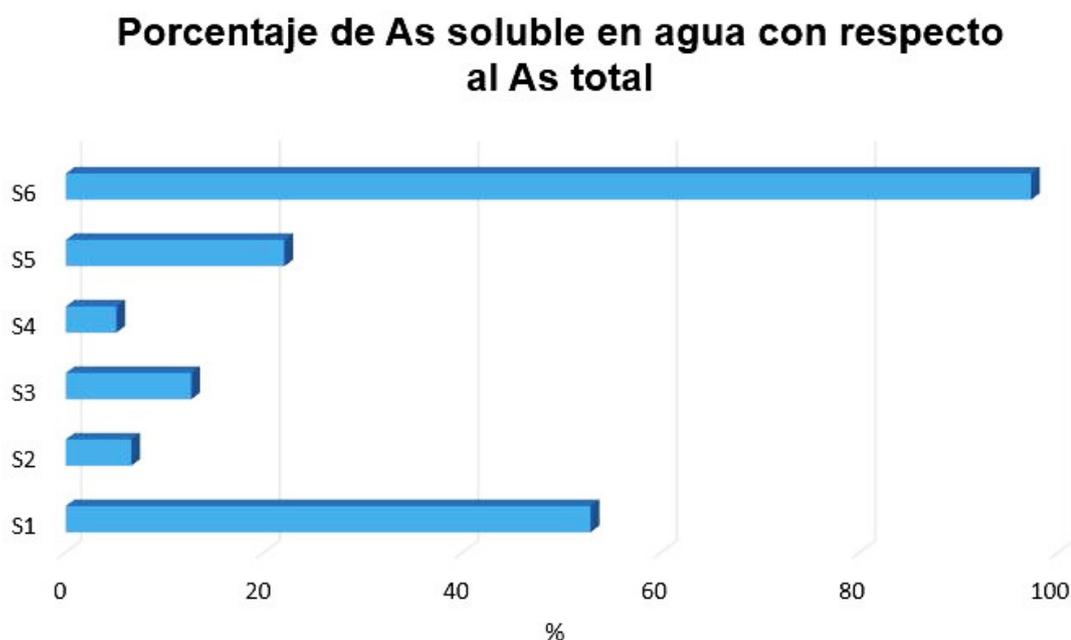


Figura 33: Porcentaje de As soluble en agua con respecto a la concentración de As total de cada muestra de suelo.

Los resultados obtenidos, a partir del análisis estadístico de la Figura 33, revelaron que la fracción soluble del As en los suelos Vertisoles presentó valores de 52.90% en S1 y 97.30% en S6. Este hecho implica que gran parte del contenido de As en los suelos Vertisoles se encuentra disponible en su forma soluble. Además, la fracción soluble de As en los suelos Entisoles fue de 6.63% para S2, 12.68% para S3, 5.13% para S4 y 22.05% para S5. Por lo tanto, los suelos Entisoles (S2-S5) mostraron un %As soluble menor que los suelos Vertisoles (S1 y S6).

Finalmente, la gráfica de la Figura 34 refleja que no existe una relación estadística significativa entre el %As soluble y el contenido de As total de las muestras de suelo, esto se confirma con el coeficiente de determinación ($R^2=0.51$).

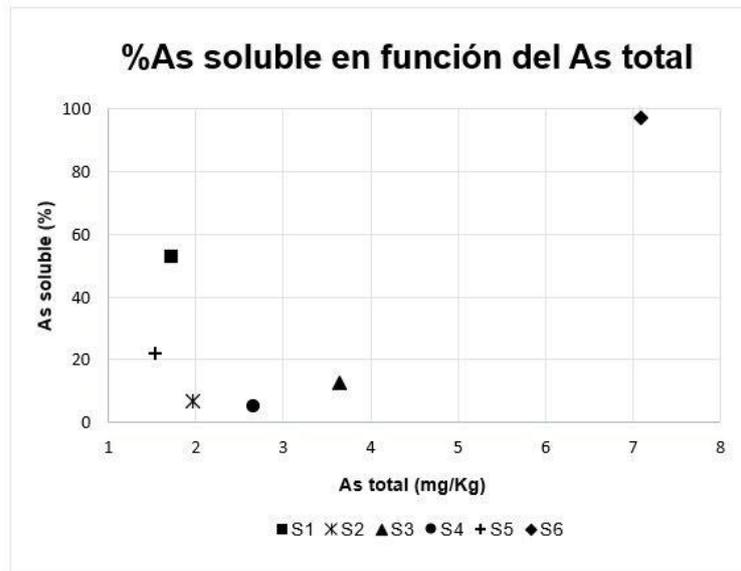


Figura 34: %As soluble en función del contenido de As total de las muestras de suelo.

8.4 CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO CON LA FRACCIÓN SOLUBLE DEL ARSÉNICO

Los resultados de la fracción soluble del As tanto en suelos Vertisoles como en Entisoles no fueron uniformes (Figura 33), por lo que, la solubilidad de este elemento podría estar relacionada con algunas características edáficas como el contenido de humedad, CE, CO, pH y contenido de arcilla. En la Figura 35 se muestran la relación entre dichas propiedades y el %As soluble en agua de las muestras de suelo. Cabe mencionar que, los comportamientos de dichas relaciones fueron confirmadas por los modelos de regresión que se aprecian en el Anexo 3.

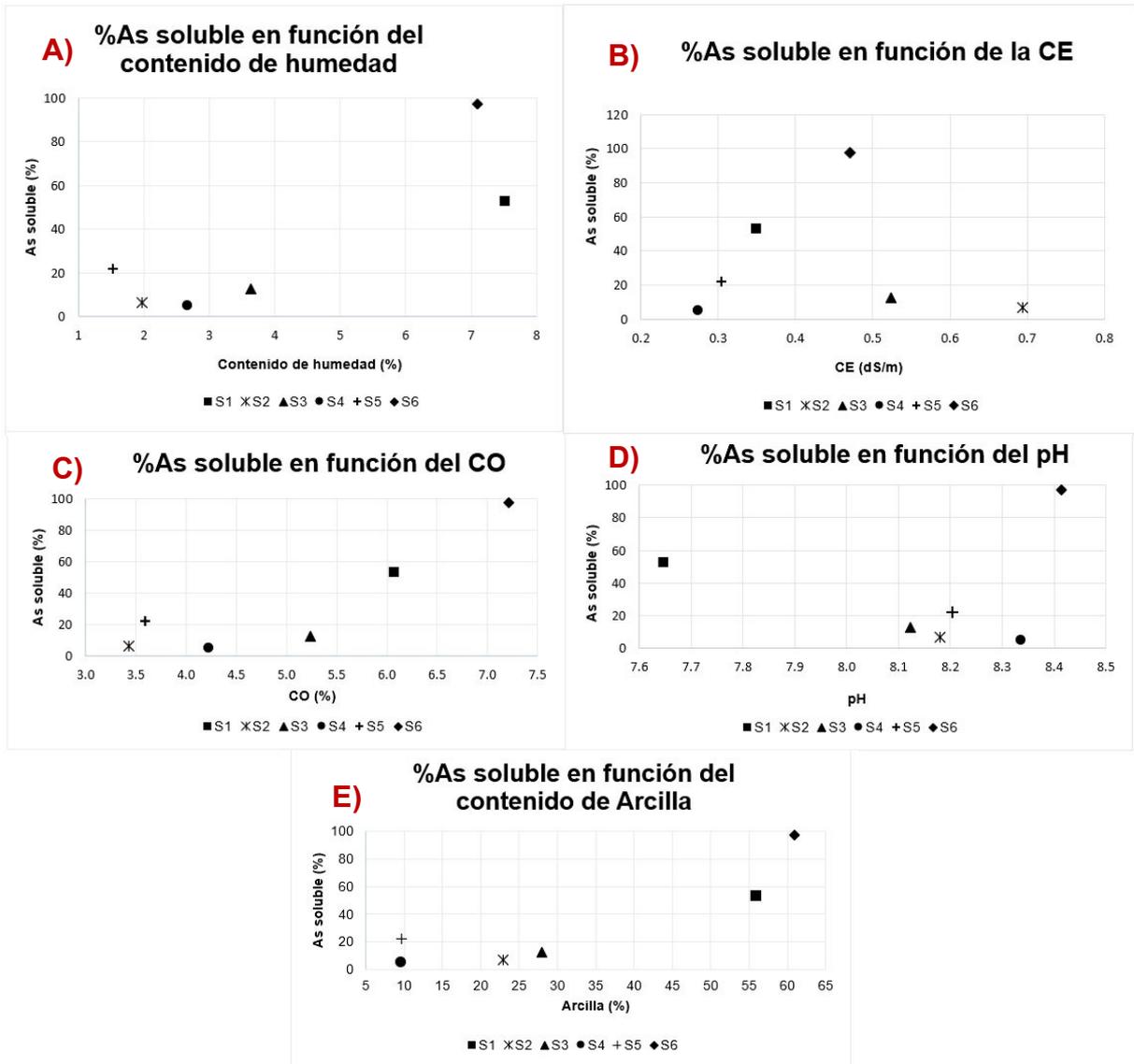


Figura 35: A) %As soluble en función del contenido de humedad de las muestras de suelo B) %As soluble en agua en función de la CE de las muestras de suelo C) %As soluble en agua en función del contenido de CO de las muestras de suelo D) %As soluble en agua en función del pH de las muestras de suelo E) %As soluble en función del contenido de Arcilla obtenido de Zanor *et al.* (2019) y Medina (2017).

En la Figura 35A, se puede observar que la fracción soluble del As en los suelos mostró una ligera tendencia a aumentar conforme incrementa el contenido de humedad del suelo ($R^2=0.69$). Esto podría deberse a que, la movilización natural de metales pesados del suelo puede tener lugar por acción del agua a tenor de Blanco *et al.* (2018). Particularmente, la hidratación de las arcillas podría liberar iones arseniato, ya que las unidades estructurales de la arcilla pueden comprimirse o expandirse según las condiciones de desecación y humectación del medio (Carbonell,

1995), lo cual explicaría el mayor %As soluble en relación con el contenido de humedad en los suelos Vertisoles (S1 y S6) que en los suelos Entisoles (S2-S5).

En la Figura 35B no se puede apreciar una evidente relación entre la fracción soluble del As en los suelos y los resultados de CE, a causa de que, conforme a Galán y Romero (2008), el aumento de la salinidad puede conducir tanto a una desorción, como a la adsorción reducida de metales mediante dos mecanismos. Primeramente, los cationes asociados con las sales (Na^+ y K^+) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar, los aniones cloruro y sulfuro pueden formar compuestos más estables con metales pesados.

Se debe tener en cuenta que, los efectos de la MO sobre los elementos traza de un suelo dependen de su composición cualitativa. Aquella fracción orgánica de alto peso molecular retendrá los elementos traza de forma efectiva, pero la más soluble y ligera puede solubilizar elementos ya sea por quelación (metales) o por desplazamiento (aniones). Por tanto, la relación entre el As del suelo y la MO es compleja y dependiente de la porción de CO soluble, de las fracciones más estables e insolubles del humus y de la cantidad de Fe, Al y Mn de dicha MO (Moreno, 2010).

No obstante, Beesley & Dickinson (2010) afirmaron que, al añadir abono orgánico al suelo, la cantidad de As disponible puede ser alta. Los resultados coinciden con estas apreciaciones pues, en la Figura 35C se muestra que, el aumento en contenido de CO favorece el incremento de la fracción soluble del As en el suelo ($R^2=0.77$).

No se observaron efectos claros sobre la solubilidad del As dentro del pH de los suelos estudiados (Figura 35D). Sin embargo, la pH influye en la sorción o desorción del As en las partículas coloidales del suelo (ver capítulo 2.11.1). Es decir que, puede existir una relación entre el pH y la disponibilidad del As, pero también depende de otros factores como el tipo y cantidad de colides del suelo (capacidad sorcitiva del suelo).

De acuerdo con la Figura 9 y el rango de pH de los suelos muestreados, la sorción del As se puede dar mayoritariamente en la superficie de carbonato de calcio y/o en la superficie de óxido de Fe. Esto explica la diferencia entre los resultados de la fracción soluble del As en los suelos Vertisoles y en los suelos Entisoles. Primeramente, en el caso de los suelos Vertisoles, existe menor %As soluble en S1 que en S6, puesto que

podría existir una mayor sorción de oxoácidos de As en S1 que en S6, debido a que la muestra de suelo S1 puede presentar mayor contenido de carbonato de calcio al ser de origen calcáreo (Figura 14). Asimismo, se asume que el menor %As soluble en los suelos Entisoles en comparación con los Vertisoles, es debido las partículas minerales (óxidos e hidróxidos de Fe) provenientes desde el distrito minero de Guanajuato, ya que retienen a los oxoácidos de As mediante procesos de adsorción o precipitación.

Fernández (2012), reportó que existe una fuerte correlación entre los suelos arcillosos y el aumento de la concentración de As adsorbido e inmovilizado, debido al mayor potencial de adsorción que presentan las partículas de tamaño fino y también probablemente por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso que recubren las partículas de arcilla, aumentando la fijación cuanto mayor sea la acidez. Por otro lado, cuando el humus se fija en la arcilla, puede desplazar a los compuestos que están adsorbidos sobre las partículas de arcilla, provocando una solubilización del As (Carbonell, 1995). Lo anterior coincide las determinaciones de la Figura 35E, ya que evidencian una correlación significativa entre el aumento de la fracción soluble del As y el incremento del contenido de arcilla de las muestras de suelo ($R^2=0.75$).

9. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

Las características físicas y químicas mostraron diferencias entre los distintos sitios de muestreo y condiciones óptimas en los suelos para la agricultura, a excepción de los bajos contenidos de humedad, no obstante, se debe tener en cuenta que el muestreo se llevó a cabo en los meses sin cultivo, posteriores a la cosecha y correspondientes al periodo de sequía.

En los suelos Vertisoles se observaron contenidos más altos de arcilla, humedad y CO que en los suelos Entisoles. En general, tanto en Vertisoles como en Entisoles, el contenido de humedad aumentó conforme incrementó el contenido de arcilla, aludiendo que la estructura expandible de la arcilla permite una mayor retención de agua. Asimismo, el contenido de humedad fue afectado positivamente por el contenido de CO, resaltando la influencia de la MO en la disponibilidad de agua. Debido al alto contenido de CO en los suelos, estos se consideran intrínsecamente fértiles.

Los resultados de pH categorizaron a los suelos Vertisoles y Entisoles como alcalinos. Además, los valores de CE indicaron efectos despreciables de salinidad en ambos suelos. Sin embargo, los suelos con agricultura de riego presentaron valores más altos de CE en comparación con los suelos de agricultura temporal. Este hecho se puede relacionar con la fuente del agua de riego, puesto que, procede de pozos del acuífero Irapuato-Valle y el agua de dicho acuífero se clasifica como de media y alta salinidad.

La capa superficial del suelo agrícola (0-15 cm de profundidad), del municipio de Irapuato, presentó concentraciones de As total que fluctúan de 1.72 a 13.25 ppm. Aun cuando estas concentraciones de As se encuentran dentro de los límites permisibles para suelo de agrícola, establecidos en la normatividad vigente, hay que tener en cuenta que el contenido de As en los suelos Entisoles supera el valor de fondo, lo que indica que la influencia antrópica está repercutiendo en la acumulación de As en estos suelos. Se debe agregar que, no hay normas equivalentes en diferentes países u organización para la comparación del límite permisible del As en suelo agrícola establecido por la legislación.

Los suelos Vertisoles presentaron un I_{geo} de clase 0 (no contaminado) y su contenido de As total no sobrepasa el valor de fondo. En cambio, los suelos Entisoles mostraron

un I_{geo} de clase 0, pero también un I_{geo} clase 1 (no contaminado a moderadamente contaminado) en las áreas aledañas al río Guanajuato. Además, el contenido de As total de los suelos se ve favorecido con la cercanía al afluente, debido a que es el principal medio de transporte en que migran los desechos industriales, urbanos, agrícolas e incluso jales del distrito minero de Guanajuato. Por lo tanto, el río Guanajuato actúa como principal fuente de contaminación por As en los suelos.

A pesar de que los suelos Entisoles mostraron mayor contenido de As total en comparación con los suelos Vertisoles, la fracción soluble del As fue menor en los suelos Entisoles (>25%) que en los suelos Vertisoles (<50%), probablemente porque las partículas minerales (óxidos e hidróxidos de Fe), acarreadas desde áreas con explotación minera ubicadas en la zona de influencia del río Guanajuato aguas arriba, aumentan el contenido de As total en los suelos Entisoles, pero disminuyen la fracción soluble del As mediante la retención del metaloide en procesos de adsorción o precipitación.

Es importante destacar el alto %As soluble en los suelos Vertisoles, puesto que indica que gran parte del contenido de As en estos suelos se encuentra disponible en su forma soluble. Además, la disminución de la fracción soluble del As en los suelos Vertisoles puede estar determinada por los procesos de sorción en carbonato de calcio.

Los resultados de la fracción soluble del As en los suelos no fueron uniformes, por lo que, la solubilidad de este elemento se atribuye las diferentes características edáficas. Las asociaciones más significativas fueron las siguientes:

- 1) La fracción soluble del As en los suelos mostró una ligera tendencia a aumentar conforme incrementa el contenido de humedad del suelo
- 2) El aumento en contenido de CO favorece el incremento de la fracción soluble del As en el suelo
- 3) La fracción soluble del As aumenta con el incremento del contenido de arcilla de las muestras de suelo, posiblemente debido a procesos de liberación del As relacionados con el contenido humedad o MO.

En vista de todo lo expuesto en este estudio podemos indicar las siguientes sugerencias:

- Estudios posteriores como la mineralogía, el análisis de cultivos, Extracción Química en las fases sólidas del suelo y caracterización de las especies de As aportarán información fundamental de los mecanismos de retención de este metaloide en el suelo.
- Es importante determinar los valores de fondo geoquímicos de As en la región, debido a que, no hay información disponible sobre las concentraciones de este elemento en los suelos de Guanajuato, lo que ha llevado a utilizar datos de otros lugares con condiciones climáticas y geológicas diferentes.
- Efectuar análisis de laboratorio para el agua de riego y para el río Guanajuato.
- Realizar caracterización y evaluación de la peligrosidad de los jales mineros provenientes del distrito minero de Guanajuato.
- Optar por técnicas de la agricultura de conservación.
- Mostrar especial atención en las prácticas agrícolas, como es la adición fertilizante y pesticidas amigables con el medio ambiente y de acuerdo con las necesidades del cultivo y las parcelas.
- Controlar el pH de suelo.

10. LITERATURA CITADA

- Agroasemex, S. (16 de Noviembre de 2018). *En la Expo Agroalimentaria Gto, Jóvenes se interesan por el aseguramiento agropecuario*. Recuperado el 2 de Febrero de 2020, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/agroasemex/articulos/en-la-expo-agroalimentaria-gto-jovenes-se-interesan-por-el-aseguramiento-agropecuario>
- Alloway, B. (1990). Soil processes and the behavior of metals. *Heavy metals in soils*, 7-18.
- Álvarez-Benedí, J., Rodríguez, S. B., Carro, I. C., & Revuelta, C. C. (2003). Álvarez-Benedí et al. Dinámica de adsorción – desorción de Arsénico (V) en suelos de cultivo de Castilla y León. En *Estudios de la zona no saturada del suelo* (Vol. 6).
- Angella, G., Salgado, R., & Frías, C. (2016). *Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta*. INTA Ediciones. Colección Divulgación.
- Antolín, M. C. (2013). Hacia una gestión sostenible del planeta. En D. Galadí-Enríquez, J. F. Pertusa, L. F. Pascual, I. N. Antolín, M. J. Llofriu, B. Sánchez, M. C. Lezana, R. Vidal, & G. Quintás (Edits.), *Ciencias para el mundo contemporáneo: Reflexiones sobre los contenidos de las ciencias y sobre nuestra forma de vida* (págs. 141-164). Universidad de Valencia.
- ATSDR. (Agosto de 2007). *Resumen de Salud Pública Arsénico*. (Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública) Recuperado el 25 de Marzo de 2018, de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf
- ATSDR. (1 de Octubre de 2009). *La toxicidad del arsénico*. Recuperado el 10 de Abril de 2019, de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/docs/arsenic_csem_spanish.pdf
- Badía, D. (2016). ¿Para qué estudiar el suelo?: una visión centrada en el Alto Aragón. *Lucas Mallada*(18), 9-27.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2014). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Beesley, L., & Dickinson, N. (2010). Carbon and trace element mobility in an urban soil amended with green. *Journal of Soils & Sediments*, 10, 215-222.

- Blanco, M. d., Amiotti, N. M., & Espósito, M. E. (2018). Arsénico en suelos y sedimentos del sudoeste pampeano: origen, acumulación en el agua y riesgo para consumo humano. *Ciencia del Suelo*, 36(1).
- Boersma, L., Cary, J. W., Evans, D. D., Ferguson, A. H., Gardner, W. H., Hanks, R. J., . . . Uehara, G. (1972). The Soil-Water System. En *Soil Water* (págs. 1-4). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Brady, N., & Weil, R. (2008). *The nature and properties of soil* (14 ed.). New Jersey, Upper Saddle River: Prentice-Hall.
- Brandy, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and propertis of soils* (14th ed.). New Jersey, United States of America: Pearson.
- Carbonell, A. A. (1995). *Estudios de la dinámica en el suelo y del comportamiento agroquímico del metaarsenito como fungicida*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante.
- Castellanos, R. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. . México: Intagri Gto.
- Castillo, N., Franco, M. L., González, M. J., Santillán, J. M., Vázquez, M., & Botto, I. L. (8 de Agosto de 2013). Efecto del riego con aguas ricas en arsénico sobre un cultivo de rúcula (*Eruca sativa* L.). *AUGMDOMUS*, 5, 29-41.
- CEAG. (1994). *Comisión Estatal de Agua de Guanajuato*. Obtenido de Realización del Diagnóstico de la Problemática, el Establecimiento de los Postulados Básicos, la Realización de los Programas de Manejo de Cuencas, Uso Eficiente del Agua y la Integración del Plan Hidráulico de Guanajuato.
- CEAG. (1997). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Irapuato-Valle de Santiago, Guanajuato*. (G. d. C.V., Ed.) Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- CEAG. (1998). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Silao-Romita, Guanajuato*. (S. d. Lesser y Asociados, Ed.) Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- CEAG. (Febrero de 2019). Situación hídrica y disponibilidad en el Estado de Guanajuato. *Expo Agua*. Guanajuato: Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- CONAGUA. (2015). *Programa estatal hidráulico de Guanajuato*. Resumen ejecutivo, Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (4 de Enero de 2018). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Irapuato-Valle, Estado de Guanajuato*. Obtenido de Comisión

- Nacional del Agua:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1119.pdf
- CONAGUA. (4 de Enero de 2018). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Silao-Romita, Estado de Guanajuato*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1110.pdf
- Courel, G. F. (2019). *Suelos salinos y sódicos*. Guía de estudio, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia.
- Cuervo-Robayo, A. P., Gómez-Albores, M., Martínez-Meyer, E., Manjarrez, J., Venegas-Barrera, C. S., & Téllez-Valdés, O. (2014). *Precipitación anual y Temperatura media anual en México (1910-2009), escala 1:1000000*. Recuperado el 1 de Abril de 2020, de CONABIO:
<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Eash, N. S., Green, C. J., Razvi, A., & Bannet, W. F. (2008). *Soli science simplified* (5ta ed.). Blackwell.
- EPA. (2006). *Edition of the drinking water standards and health advisories*. Recuperado el 8 de Abril de 2019, de Environmental Protection Agency (EPA/822-R-06-013):
https://leg.mt.gov/content/committees/interim/2007_2008/water_policy/meetings/minutes/wpic08162007_ex06.pdf
- Esparza, J. d. (Marzo de 2011). *Simulación de flujo y trazado de partículas generadas por un depósito de jales mineros, para el análisis de riesgo en la zona de alta vulnerabilidad del acuífero Silao-Romita, en el municipio de Guanajuato*. León, Guanajuato, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- European Commission. (8 de Junio de 2016). *Soil*. Recuperado el 11 de Abril de 2019, de Agriculture, Forests and Soil:
http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm
- FAO. (1985). Trace elements and their toxicity. En R. S. Ayers, & D. W. Westcot, *Water quality for agriculture* (1 ed., Vol. 29, págs. 95-97). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- FAO. (2015). *"Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables"*. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia: <http://www.fao.org/soils-2015/resources/fact-sheets/es/#c327325>.
- FAO. (2018). Global Soil Organic Carbon Map Version 1.2.0. Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2019). Los impactos de la contaminación del suelo en la cadena alimentaria y los servicios ecosistémicos. En N. Rodríguez, M. McLaughlin, & D. Pennock, *La contaminación del suelo: una realidad oculta* (págs. 47-53). Food and Agriculture Organization.
- Fernández del Baño, I. (3 de Diciembre de 2012). Factores que afectan la movilidad del Arsénico en los suelos. Propuesta de protocolo de actuación para valorar la contaminación de suelos por Arsénico. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Flores, J. C., Ortiz, M. D., Ruiz, J. A., Peinado, F. M., & Fernández, I. G. (2009). Estudio de metales pesados y arsénico en los suelos de olivar de Sierra Mágina, Jaén (España). *ACTA AGRONÓMICA*, (págs. 303-307).
- Francesconi, K., & Kuehnelt, D. (2002). Environmental Chemistry of Arsenic. En F. W.T. (Ed.), *Arsenic Compounds in the environment* (págs. 51-94). New York: Marcel Dekker Inc.
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. J. (Noviembre de 2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*(10), 48-60.
- García Reynoso, A. (20 de Septiembre de 2007). Plano Geológico de Irpuato.
- García, S. (2013). Estudios de especiación de Arsenico y acumulacion de metales en muestras de interes medioambiental. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., . . . Vargas, R. (Edits.). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxembourg: Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE.
- GLOBE. (2005). *Protocolo del pH del suelo*. Global Learning and Observations to Benefit the Environment.

- Henrriquez, R. (2011). *Cadena Agroproductiva de Papa. Manejo y Fertilidad de Suelos*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.
- Hermelo, P. H. (2007). Tesis doctoral. *Especiación de metales pesados mediante la formación de quelatos. Distribución de las especies inorgánicas de As y Cr en la ría de Arousa*. Universidad Santiago de Compostela.
- Hernández, A., Ascanio, M., Morales Marisol, B. I., García, N., & García, D. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo* (1ra ed.). Universidad Autónoma de Nayarit.
- Hernández, J. P. (2015). Agua en el suelo. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- IICA. (1979). En I. I. Agrícolas, *Cuadro de interpretación de suelos*. San Jose, Costa Rica.
- IMTA. (2009). *Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala*. Informe Final, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. (1998). *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Recuperado el 1 de Abril de 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222253/702825222253_1.pdf
- INEGI. (2000). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I*. Recuperado el 18 de Marzo de 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- INEGI. (30 de Septiembre de 2000). *Diccionario de datos climáticos: vectorial: escalas 1:250 000 y 1:1 000 000. 2001*. Recuperado el 13 de Marzo de 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223885/702825223885_2.pdf
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Recuperado el 13 de Marzo de 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: <https://www.google.com/search?q=instituto+nacional+de+estad%C3%ADstica>

+y+geograf%C3%ADa&rlz=1C1GCEA_enES827ES827&oq=instituto+naciona
l+de+es&aqs=chrome.1.69i57j0l5j69i61j69i60.17769j0j7&sourceid=chrome&ie
=UTF-8

- INEGI. (Septiembre de 2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Irapuato, Guanajuato*. Recuperado el 7 de Abril de 2019, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11017.pdf
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : Edafología: Escala 1:250 000: Serie III*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (16 de Diciembre de 2016). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)*. Recuperado el 11 de Enero de 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática : <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (2017). *Mapa Digital de México en línea*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- IPCS. (2005). *Environment Health Criteria 224: Arsenic and arsenic compounds*. Recuperado el 11 de Abril de 2019, de International Programme on Chemical Safety: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc224.htm#2>
- IPLANEG. (Julio de 2015). *Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato*. Recuperado el 13 de Marzo de 2020, de Programa municipal de desarrollo urbano y de ordenamiento ecológico territorial de Irapuato, Gto.: http://seieg.iplaneg.net/seieg/doc/pmduoet_irapuato_vi_2015_1454700794.pdf
- IPLANEG. (2019). *Instituto de Planeación, Estadística y Geografía de Guanajuato*. Recuperado el 29 de Enero de 2020, de Catálogo Geográfico del Sistema Estatal de Información Estadística y Geográfica: <http://geoinfo.iplaneg.net/>
- Jolliffe, D. M. (Mayo de 1993). A history of the use of arsenicals in man. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 86, págs. 287 - 289.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. En *World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated* (Vol. 15, págs. 259-263).
- Krzcic, M., Wiseman, K., Dampier, L., Grand, S., Wilson, J., & Gaumont-Guay, D. (2013). *Introduction to Soil Science*. Recuperado el 18 de Abril de 2019, de The University of British Columbia: <http://soilweb200.landfood.ubc.ca/>

- Lenoble, V., Deluchat, V., Serpaud, B., & Bollinger, J.-C. (28 de March de 2003). Arsenite oxidation and arsenate determination by the molybdene blue method. *Talanta*, 61(3), 267- 276.
- Lillo, J. (1 de Enero de 2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Grupo de Estudios de Minería y Medio ambiente.
- Litter, M. I., Farías, S. S., & Armienta, M. A. (2009). *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. (CYTED, Ed.) Argentina: IBEROARSEN.
- Litter, M., Carrera, A. P., Morgada, M. E., Ramos, O., Quintanilla, J., & Fernández-Cirelli, A. (2008). En J. Bundschuh, A. P. Carrera, & M. Litter, *IBEROARSEN. Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana* (págs. 5-27). CYTED.
- López, P. L., & Mandado, J. M. (2002). Extracciones Químicas Secuenciales de metales pesados. Aplicación en Ciencias Geológicas. *Estudios Geológicos*(58), 133-144.
- Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D., & Kwapilinski. (1996). Use of Enrichment and Contamination Factors Together with Geoaccumulation Indexes to Evaluate the Content of Cd, Cu and Ni in the Rynik Water Reservoir in Poland. *Water, Air, and Pollution*(93), 347-365.
- Martínez, E., Fuentes Espoz, J., & Acevedo Hinojosa, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental Contamination by Heavy Metals. En H. E.-D. Saleh, *Heavy Metals*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.76082
- Medina Guerrero, M. d. (Febrero de 2017). Tesis de Grado. *Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del Municipio de Irapuato (Guanajuato)*. Irapuato, Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- Mínguez, I. P. (Junio de 2015). Ecotoxicología de arsénico en suelos de la comunidad de Madrid. *Trabajo de Fin de Grado*. Madrid, Comunidad Autónoma de Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia.
- Monroy-Torres, R., Ramírez-Gómez, X. S., & Macías- Hernández, A. E. (2009). Accesibilidad a agua potable para el consumo y preparación de alimentos en una comunidad expuesta a agua contaminada con arsénico. *Rev Med UV*, 9(1), 10-13.

- Moreno, E. (2010). *Recuperación de los suelos mineros contaminados con Arsénico mediante Fitotecnologías*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Química Agrícola, Madrid.
- Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- Niu, S., Gao, L., & Wang, X. (19 de Noviembre de 2018). Characterization of contamination levels of heavy metals in agricultural soils using geochemical baseline concentrations. (D. C. Tsang, Ed.) *Journal of Soils and Sediments*(19), 1697–1707.
- Norma Oficial Mexicana. (18 de Enero de 1996). NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*.
- Norma Oficial Mexicana. (31 de Diciembre de 2002). NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. *Diario Oficial de la Federación*.
- Norma Oficial Mexicana. (2 de Marzo de 2007). 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*.
- Olmos Espejel, J. d. (2006). Tesis. *Estudio de los métodos de especiación química secuencial de mercurio en jales de minería*. D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- OMS. (15 de Febrero de 2018). *Arsénico*. Recuperado el 30 de Marzo de 2018, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Palacio, Á. G., & Zúñiga, F. B. (2005). *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales* (ilustrada ed.). Instituto Nacional de Ecología.
- Pedreño, R. J. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. (I. H. Úbeda, Ed.) Madrid, Comunidad Autónoma de Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Perez, L. P. (1981). *Importancia de la reacción del suelo*. Salamanca, España: Centro de edafología y biología aplicada.

- Porta, C. J., López - Acevedo, R. M., & Roquero, d. L. (1994). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. España: Mundi - Prensa.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (1999). *Edafología: Uso y protección de suelos* (2da ed.). Mundi-Prensa.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2011). *Edafología: Uso y protección de suelos* (2da ed.). Mundi-Prensa.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2013). *Edafología: Uso y protección de suelos* (3ra ed.). Mundi-Prensa.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología, para la agricultura y el medio ambiente*. México: Mundi-Prensa.
- Quansah, R., Armah, F. A., Essumang, D. K., Luginaah, I., Clarke, E., Marfoh, K., . . . Dzodzomenyo, M. (1 de Mayo de 2015). Association of Arsenic with Adverse Pregnancy Outcomes/Infant Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 123(5), 412- 421.
- Rao, C. R., Sahuquillo, A., & Sanchez, J. F. (2008). A Review of the Different Methods Applied in Environmental Geochemistry For Single and Sequential Extraction of Trace Elements in Soils and Related Materials. *Water Air Soil Pollut*(189), 291–333.
- Rosa de Lima, H. (2015). *Relación suelo-planta-agua*. Río Negro, Argentina: Ediciones INTA.
- Rudnick, R., & Gao, S. (2003). The composition of the continental crust. (H. Holland, & K. Turekian, Edits.) *Treatise on Geochemistry*, 3, 1-64.
- Ruíz-Huerta, E. A., Varela, A. d., 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. *Journal of Hazardous Materials*(339), págs. 330–339.
- Sadiq, M. (1986). Solubility relationships of arsenic in calcareous soils and its uptake by corn. *Plant Soil*, 91(2), 241–248.
- Sadiq, M. (1997). Arsenic chemistry in soils: An overview of thermodynamic predictions and field observations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 93, 117–136.
- SAGARPA. (2013). *Manual De Manejo Sustentable Del Cultivo De Jitomate En Invernadero*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Organización para los Pueblos Indígenas y Campesinos. Palibrio.

- SAGARPA. (14 de Septiembre de 2017). *"Planeación agrícola nacional 2017-2030"*. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci_n_Agr cola
-
- Salas Megchún, E. F. (2014). Tesis para obtener el grado de maestro en Ciencias de la. *Geoquímica y mineralogía de jales en mina Aurora, Xichú, Guanajuato*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Saldaña Robles, A. (Agosto de 2010). Tesis de Grado. *Efecto de la Contaminación por Arsénico en Cebada (*Hordeum vulgare*) en el Municipio de Irapuato Gto*. Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas.
- Saldaña, A. (Agosto de 2008). Tesis de Grado. *Cuantificación de Arsénico absorbido por plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) desarrolladas en sustrato e invernadero, y en alfalfa (*Medicago sativa*) en condiciones de campo*. Irapuato, Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- Sarkar, B. (2002). *Heavy Metals in the Environment*. New York, U.S.A.: Marcel Dekker.
- SCT. (2010). *Autopista Salamanca - León*. Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional, Sector Vías, Secretaria de comunicaciones y transportes.
- SEMARNAT. (20 de Febrero de 2019). *SUELO*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe15/tema/cap3.html>
- Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*(17), 517–568.
- Soil Science Society of America . (2008). *Glossary of Soil Science Terms*.
- Solís, J. N. (1985). *Fundamentos de Edafología* (2da ed.). (EUNED, Ed.) San José, Costa Rica: Eniversidad Estatal a Distancia.
- SPP. (2008). *Secretaría de Programación y Presupuesto*. Recuperado el 5 de Abril de 2019, de Síntesis Geográfica de Guanajuato: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220457/702825220457_1.pdf
- Tapia, R. B. (13 de Abril de 2012). *Propiedades Físicas de los Suelos*. Recuperado el 21 de Abril de 2019, de Programa Sub Sectorial de Irrigaciones. Ministerio de Agricultura:

- <http://www.psi.gob.pe/docs//biblioteca/exposiciones/2012/Propiedades%20Físicas%20de%20los%20Suelos.pdf>
- Tecnofrom. (2009). *iCAP 6500 ICP Spectrometer*. Obtenido de Thermo Fisher Scientific Inc: http://www.tecnofrom.com/moduloProductos/noti_12/file.pdf
- Tessier, A., Campbell, P., & Bisson, M. (Junio de 1979). Sequential extraction procedure for speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844 – 851.
- Thomas, R. P., Ure, A. M., Davidson, C. M., Littejohn, D., Rauret, G., Rubio, R., & López-Sánchez, J. F. (1994). Three-stage sequential extraction procedure for the determination of metals in river sediments. *Analyt. Chim. Acta*(286), págs. 423-429.
- Tsang, S., Phu, F., Baum, M. M., & Poskrebyshev, G. A. (2007). Determination of phosphate/arsenate by a modified molybdenum blue method and reduction of arsenate by ([S2O4]2-). *Talanta*, 71, 1560–1568.
- USDA. (1993). Soil Survey Division Staff. En *United States Department of Agriculture* (Vol. 18). DC., Washington.
- Vaughan, D. J. (2006). Arsenic. *Elements*, 2(2), 71-75.
- WHO. (2001). Air Quality Guidelines for Europe. En *World Health Organization* (2da ed.). Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark: WHO Regional Publications.
- WHO. (2010). *Summary and conclusions of the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. Roma: World Health Organizatio.
- Winship, K. (1984). Toxicity of inorganic arsenic salts. En *Adverse Drug React Acute Poisoning Rev* (3 ed., Vol. 3, págs. 129-60).
- Zamudio, S. (2012). Diversidad de ecosistemas del Estado de Guanajuato. En *La biodiversidad en Gunajuato: Estudio de Estado* (Vol. II, págs. 21-55). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)/ Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE) .
- Zanor, G. A., García, M. G., Venegas-Aguilera, L. E., Saldaña-Robles, A., Saldaña-Robles, N., Martínez-Jaime, O. A., . . . Ramírez-Santoyo, L. F. (29 de Enero de 2019). Sources and distribution of arsenic in agricultural soils of Central Mexico. *Journal of Soils and Sediments*, págs. 1–14.

11. ANEXOS

ANEXO	CONTENIDO
<p style="text-align: center;">Anexo 1</p> <p style="text-align: center;">Análisis climatológico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de temperatura en °C del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica “El Copal” • Datos de precipitación en mm del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica “El Copal” • Datos de evaporación en mm del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica “El Copal” • Balance hídrico del periodo 1978-2018
<p style="text-align: center;">Anexo 2</p> <p style="text-align: center;">Resultados</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Curva de calibración • Determinación del contenido de humedad • CE • Determinación de CO • pH • Determinación del porcentaje de As soluble
<p style="text-align: center;">Anexo 3</p> <p style="text-align: center;">Análisis estadístico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resumen de modelos de regresión

ANEXO 1

Análisis climatológico

Datos de temperatura en °C del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica "El Copal"

Año\Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Julio	Agto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	TMA
1978	14.17	14.06	17.48	21.15	22.41	22.06	21.35	20.24	19.97	17.77	16.78	15.68	18.59
1979	14.44	15.49	18.40	20.85	22.19	23.61	22.26	20.70	19.38	18.52	15.38	14.52	18.81
1980	13.43	15.54	18.78	20.40	23.68	23.23	22.35	21.29	20.69	18.72	15.83	14.62	19.05
1981	12.38	15.91	18.10	20.11	21.94	22.74	21.19	20.89	19.74	19.19	15.13	14.78	18.51
1982	14.98	16.57	19.43	22.81	23.02	24.57	21.19	20.72	20.35	18.19	15.43	13.66	19.24
1983	13.01	13.21	16.23	20.09	23.34	24.00	21.02	20.60	20.40	18.34	16.26	15.19	18.47
1984	14.37	15.61	19.32	21.99	23.35	21.54	19.69	19.79	19.00	19.35	16.09	13.83	18.66
1985	13.69	15.46	19.27	21.52	23.05	20.35	19.76	20.10	19.73	19.22	16.35	14.86	18.61
1986	13.40	15.59	16.15	18.82	22.18	21.58	20.19	20.26	20.43	18.34	17.28	15.82	18.34
1987	14.28	16.16	18.11	19.59	21.69	22.48	21.19	20.97	20.87	16.88	16.02	15.68	18.66
1988	13.43	17.01	17.62	21.18	23.28	22.79	21.17	20.79	19.21	17.85	16.73	14.90	18.83
1989	15.99	16.06	16.86	20.34	22.84	23.21	21.40	20.38	18.99	17.59	17.66	13.72	18.75
1990	15.25	15.75	NA	21.35	22.82	22.55	20.27	20.07	19.61	18.85	16.03	14.40	18.81
1991	14.85	16.41	19.14	21.49	23.40	22.58	19.95	20.47	19.11	17.41	15.62	14.98	18.79
1992	13.13	14.36	17.94	18.27	20.24	21.38	20.62	20.25	20.05	17.52	15.64	14.98	17.87
1993	14.45	15.58	16.89	19.62	21.09	22.66	20.55	20.33	19.28	18.42	16.80	14.44	18.34
1994	14.21	16.44	18.82	20.13	23.05	21.77	20.73	20.30	19.53	19.34	17.31	15.98	18.97
1995	14.70	16.95	17.92	20.79	23.73	22.66	20.64	20.73	20.19	17.81	17.01	14.60	18.98
1996	13.48	15.66	17.02	19.73	22.73	21.73	21.13	20.48	20.15	17.98	15.63	14.84	18.38
1997	13.23	16.16	17.65	18.00	20.90	22.69	21.55	20.94	20.37	17.67	16.75	13.76	18.31
1998	13.52	13.86	17.74	20.81	23.73	23.97	21.32	20.89	20.94	18.82	17.36	15.10	19.00
1999	15.99	16.06	16.86	20.34	22.84	23.21	21.40	20.38	18.99	17.59	17.66	13.72	18.75
2000	13.94	16.21	18.65	21.13	22.83	21.15	20.63	20.28	20.05	18.98	17.65	14.15	18.81
2001	14.89	17.01	17.51	21.71	22.12	21.46	20.58	20.63	19.98	17.63	15.17	14.68	18.61
2002	13.60	15.39	18.56	21.79	23.74	22.25	20.45	20.31	20.39	19.52	15.15	13.84	18.75
2003	13.73	16.52	17.64	21.21	24.11	22.43	20.56	20.03	20.55	18.73	17.08	12.69	18.77
2004	13.60	14.35	18.88	19.77	22.06	20.69	20.37	20.85	20.25	19.92	16.29	13.62	18.39
2005	14.20	16.28	17.27	21.54	22.05	23.91	21.83	20.89	20.13	19.19	16.19	14.77	19.02
2006	14.12	16.71	19.33	22.27	22.40	22.17	NA	20.73	20.87	19.40	15.85	13.99	18.89
2007	15.11	15.89	18.52	20.82	22.69	22.10	20.91	20.75	20.87	18.12	16.08	15.71	18.96
2008	14.47	16.66	18.07	21.69	23.33	22.22	20.71	20.90	19.64	18.18	15.07	14.05	18.75
2009	15.22	16.49	18.94	21.12	22.91	22.98	21.73	22.03	21.26	19.69	15.77	14.69	19.40
2010	13.24	13.96	17.48	19.87	23.18	23.34	21.19	21.44	21.28	17.49	15.42	13.20	18.42
2011	14.61	16.48	19.19	22.09	24.51	23.30	21.66	21.74	20.07	18.04	16.51	15.68	19.49
2012	14.89	16.66	19.28	20.79	23.44	23.38	20.89	20.93	20.33	19.90	16.76	15.53	19.40
2013	15.35	17.44	17.26	21.90	22.68	22.67	20.79	20.63	20.37	19.45	17.57	14.91	19.25
2014	14.15	16.85	18.89	21.28	21.90	22.58	21.32	20.88	20.85	19.10	16.74	15.68	19.18
2015	15.41	16.54	17.77	20.92	22.01	21.85	21.20	21.36	21.36	19.90	18.95	16.17	19.45
2016	13.3	13.5	15.2	19.1	21.4	21.7	20.8	20.1	18.8	17.55	16.55	14.15	17.67
2017	15.5	16.05	18.5	19.4	21.6	22.4	19.6	20.2	18.05	16.4	15.5	11.7	17.90
2018	11.5	14.45	15.5	20.1	22.75	22.9	20	19.35	20.2	18.95	14.95	12.6	17.76
TMMH	14.17	15.79	17.95	20.68	22.66	22.51	20.90	20.62	20.05	18.48	16.34	14.53	-
TMAH													18.72

Datos de precipitación en mm del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica "El Copal"

Año\Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Julio	Agto.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	PAA
1978	0.00	16.10	4.60	0.00	30.00	103.60	164.20	106.70	216.60	166.00	0.00	17.40	825.20
1979	0.00	25.40	0.00	0.00	4.40	49.30	113.50	73.30	90.40	0.00	1.70	50.00	408.00
1980	96.80	5.10	0.00	3.60	8.40	12.80	77.40	221.80	135.40	30.90	17.50	4.50	614.20
1981	57.50	11.10	2.00	56.10	14.50	106.50	132.80	165.10	57.00	143.10	0.00	27.00	772.70
1982	0.20	9.30	0.00	18.60	41.90	9.20	173.50	64.30	30.10	74.30	26.00	48.50	495.90
1983	17.20	2.60	1.70	0.00	30.60	22.80	265.00	141.00	91.90	28.60	44.30	1.20	646.90
1984	14.20	9.90	0.00	0.00	19.40	111.80	166.40	105.30	42.70	14.00	0.00	3.30	487.00
1985	0.00	1.00	2.60	49.30	15.70	119.60	135.00	128.80	131.30	28.60	11.30	1.50	624.70
1986	0.00	2.20	0.00	10.50	9.70	243.70	155.50	62.20	162.20	30.60	21.10	0.00	697.70
1987	3.20	0.00	0.00	9.50	25.10	66.10	173.20	139.50	76.40	0.00	2.20	2.10	497.30
1988	14.00	0.00	29.10	0.00	0.00	82.10	154.40	287.10	29.30	0.70	4.80	0.00	601.50
1989	0.00	0.60	0.00	5.40	2.10	39.80	118.60	190.10	75.80	2.00	4.40	12.90	451.70
1990	12.20	8.10	NA	3.40	84.00	40.90	198.80	206.80	105.00	127.80	0.00	0.40	787.40
1991	1.50	2.20	0.00	0.00	18.00	184.80	403.20	81.50	124.40	26.50	6.30	20.30	868.70
1992	129.90	18.10	2.80	1.80	106.10	47.20	189.50	82.20	111.10	102.00	25.50	4.80	821.00
1993	8.30	3.50	0.10	20.00	2.00	138.20	179.80	142.60	218.60	21.00	4.90	0.00	739.00
1994	0.70	0.00	0.20	28.90	10.60	154.30	74.90	96.10	87.70	14.80	0.00	0.20	468.40
1995	0.00	12.80	0.00	2.20	71.70	94.50	175.60	190.60	87.90	1.00	19.40	20.60	676.30
1996	0.00	0.00	0.00	5.70	23.30	77.90	136.80	283.40	218.70	63.80	0.50	0.30	810.40
1997	0.00	0.70	15.60	47.00	30.60	132.70	120.50	183.10	23.90	97.40	6.90	0.00	658.40
1998	0.00	1.90	0.00	0.00	0.00	194.70	160.10	167.50	140.30	71.70	8.90	0.00	745.10
1999	0.00	0.00	0.00	0.40	9.00	81.50	201.40	73.30	66.20	3.40	0.00	2.50	437.70
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	73.30	138.60	114.30	44.90	53.30	13.30	0.00	5.30	443.00
2001	5.4	0	12	11.6	47	175.8	141.6	221.8	136.5	29.1	1.5	0	782.30
2002	24.60	22.70	0.00	9.30	15.50	91.00	266.00	157.90	118.40	38.80	60.70	0.80	805.70
2003	27.90	0.00	0.00	0.40	23.00	136.60	360.00	162.10	245.10	60.70	0.00	0.00	1015.8
2004	49.90	0.00	31.70	0.70	71.90	246.70	174.50	312.70	275.70	35.80	0.00	6.30	1205.9
2005	9.90	13.30	19.70	1.20	0.50	20.20	160.00	162.30	53.20	20.60	0.00	0.00	460.90
2006	26.40	0.00	0.00	6.20	64.00	48.70	NA	251.40	79.40	91.10	17.90	13.90	599.00
2007	8.00	13.60	9.50	0.50	38.10	275.00	224.10	124.70	79.40	14.10	15.30	0.00	802.30
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20	194.50	235.70	245.00	130.30	7.50	0.00	0.00	816.20
2009	6.50	0.00	0.50	7.00	52.80	222.20	108.90	28.20	180.80	11.60	0.30	10.00	628.80
2010	13.10	192.00	0.00	6.20	0.50	109.80	256.60	137.20	109.50	0.00	0.00	0.00	824.90
2011	0.80	0.00	0.00	29.50	1.60	73.60	106.20	126.80	91.80	52.90	0.00	0.00	483.20
2012	6.10	43.10	0.00	0.00	21.20	65.60	240.00	70.40	60.70	5.30	14.60	3.10	530.10
2013	7.20	0.00	0.00	2.20	47.00	148.50	293.60	126.50	231.40	50.00	12.20	30.70	949.30
2014	3.00	0.00	1.40	1.00	69.10	160.40	108.10	232.90	135.10	56.00	6.20	1.80	775.00
2015	1.50	5.00	107.40	7.20	86.60	173.60	207.90	90.40	120.40	87.70	11.50	7.80	907.00
2016	5.8	0.2	16.2	3.4	37	66.8	250.6	211.2	51.8	0	0	0	643.00
2017	4	2.8	1.6	0	2.4	82.6	231	182	197.2	0.2	0	0	703.80
2018	0	11.2	0.6	9	24.2	256	96.4	170.2	181.6	18.8	69.6	0.6	838.20
PMMH	13.56	10.60	6.48	8.73	30.15	117.08	181.14	152.46	118.40	40.04	10.13	7.26	-
PMAH													691.45

Datos de evaporación en mm del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica "El Copal"

AñoMes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Julio	Agto.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	EVAA
1978	138.20	142.30	224.80	269.70	274.50	206.90	197.50	160.20	128.70	129.90	117.40	119.10	2109.2
1979	136.70	130.70	226.00	254.70	257.70	253.90	211.50	165.50	144.20	187.90	138.30	101.10	2208.2
1980	119.70	141.70	238.00	255.10	286.50	266.50	227.70	183.90	147.90	142.30	111.70	114.70	2235.7
1981	116.00	135.90	201.30	172.60	208.60	193.80	158.00	160.00	136.00	126.80	118.50	116.30	1843.8
1982	133.50	150.70	227.70	281.80	217.90	276.10	177.60	181.00	172.90	146.70	124.70	95.10	2185.7
1983	99.60	161.90	252.50	325.00	327.60	243.30	177.30	164.60	142.80	153.60	120.40	113.60	2282.2
1984	107.90	133.60	271.40	303.80	232.80	184.60	133.80	154.50	127.80	150.50	136.40	109.30	2046.4
1985	113.90	135.10	165.30	192.40	217.90	156.50	150.40	175.20	157.40	152.60	124.80	118.80	1860.3
1986	125.40	154.70	226.30	205.70	228.20	154.10	171.60	170.20	156.50	120.80	130.00	119.50	1963.0
1987	137.10	136.80	222.10	225.50	233.90	214.60	176.80	180.40	164.00	159.60	126.00	117.60	2094.4
1988	127.40	163.90	186.00	229.90	268.50	214.50	154.10	151.80	149.10	153.60	133.80	124.60	2057.2
1989	134.00	153.50	220.80	258.10	280.10	238.30	197.70	144.90	150.70	158.30	122.60	112.40	2171.4
1990	125.30	142.30	NA	251.20	240.10	220.90	141.60	156.20	135.30	126.70	118.20	103.80	1761.6
1991	123.40	133.90	217.20	246.60	252.40	193.40	134.90	166.30	109.90	110.80	103.30	87.70	1879.8
1992	63.70	114.30	166.90	188.10	167.40	199.70	163.00	145.90	132.90	105.40	92.90	95.60	1635.8
1993	103.10	137.90	196.60	215.40	237.00	188.80	146.70	161.60	130.80	117.10	102.00	101.50	1838.5
1994	109.50	141.20	215.80	222.10	226.40	173.80	186.80	146.20	142.10	131.90	129.60	117.30	1942.7
1995	125.20	150.20	236.00	267.60	260.60	202.90	172.30	143.50	140.00	159.70	114.60	110.70	2083.3
1996	131.60	161.70	228.40	250.80	206.00	191.70	186.50	156.00	126.20	116.90	109.60	93.20	1958.6
1997	112.70	145.10	169.90	163.70	201.60	183.30	170.30	174.30	148.00	125.60	101.80	100.60	1796.9
1998	119.00	156.00	217.80	237.40	255.20	203.90	168.40	151.40	106.50	105.30	97.40	92.70	1911.0
1999	134.00	153.50	220.80	258.10	280.10	238.30	197.70	144.90	150.70	158.30	122.60	112.40	2171.4
2000	125.30	144.00	198.30	225.00	210.70	142.10	168.40	149.80	155.60	135.30	120.20	94.00	1868.7
2001	110.10	128.20	203.00	206.80	207.90	163.50	155.60	146.00	137.30	122.90	104.30	89.10	1774.7
2002	101.90	115.30	186.40	204.10	217.30	177.50	144.60	157.10	116.00	114.80	85.60	82.60	1703.2
2003	86.80	141.30	192.00	205.80	244.60	163.30	156.40	143.00	125.20	104.50	96.50	94.90	1754.3
2004	87.00	131.90	160.90	193.80	194.20	128.00	148.90	154.10	118.40	105.80	101.40	81.70	1606.1
2005	93.60	104.50	176.40	205.40	212.00	219.30	165.10	142.80	145.20	126.20	119.20	104.60	1814.3
2006	106.20	125.80	216.30	268.40	237.90	234.60	NA	157.90	136.10	122.20	105.40	106.60	1817.4
2007	101.20	138.70	189.80	235.60	246.80	208.30	183.20	169.50	136.10	140.10	119.20	115.20	1983.7
2008	136.30	187.70	241.20	271.10	267.70	216.00	171.10	171.70	135.70	135.70	118.90	104.80	2157.9
2009	102.60	129.30	192.60	229.80	222.60	220.50	189.30	192.20	137.10	110.50	106.20	89.20	1921.9
2010	93.40	98.20	182.90	208.90	239.10	210.90	147.80	178.40	143.10	141.50	118.60	107.00	1869.8

Datos de evaporación en mm del periodo 1978-2018, registrados de la estación meteorológica "El Copal"

AñoMes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Julio	Agto.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	EVAA
2011	126.70	140.70	208.00	242.10	266.40	219.60	177.30	199.50	175.80	155.90	124.90	119.00	2155.9
2012	119.10	108.80	205.50	251.90	275.60	232.10	173.70	165.90	164.20	163.50	109.30	110.40	2080.0
2013	107.90	161.80	201.00	268.90	251.50	225.10	182.10	171.50	128.90	132.50	102.90	92.40	2026.5
2014	111.40	147.40	216.90	239.20	212.50	207.70	183.70	186.00	146.60	133.20	94.10	82.50	1961.2
2015	98.40	110.80	145.20	188.30	197.30	175.00	179.60	183.20	148.20	136.50	83.00	66.10	1711.6
2016	83	100.3	129.2	144.9	163.8	134.8	133.1	125.9	119.7	115.5	75.6	82.3	1408.1
2017	94.8	116.3	141.5	149.8	148.7	148.4	123.7	141.6	117.1	128.7	128.1	97	1535.7
2018	95.1	112.5	157.7	170.1	161.4	130.4	143.2	130.9	117.8	119.6	92.7	95.6	1527.0
EVMMH	112.63	137.08	201.91	228.91	232.66	198.95	168.23	161.11	139.13	133.79	112.26	102.26	-
EVMAH													1919.8
													8

Balance hídrico del periodo 1978-2018

MESES	PMMH	EVMMH	BALANCE HÍDRICO
Enero	13.56	112.63	-99.07
Febrero	10.60	137.08	-126.49
Marzo	6.48	201.91	-195.43
Abril	8.73	228.91	-220.18
Mayo	30.15	232.66	-202.51
Junio	117.08	198.95	-81.87
Julio	181.14	168.23	12.92
Agosto	152.46	161.11	-8.65
Septiembre	118.40	139.13	-20.73
Octubre	40.04	133.79	-93.74
Noviembre	10.13	112.26	-102.13
diciembre	7.26	102.26	-95.00

ANEXO 2

Resultados

Resultados de curva de calibración

<p>User Information</p> <p>Name:</p>						
<p>Experiment Information</p> <p>Title: Untitled-1 Comment: Instrument Serial No.: 365K6092308 Software Version: UV Express - Version 4.1.0</p> <p>Experimental Date: 05-23-2019 13:58:41 (GMT -6:00) System Name: Undefined Firmware Version: 160529</p>						
<p>Method</p> <p>Experiment Type : Quantification Standard</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th style="background-color: yellow;">Experiment Setup</th> <th style="background-color: yellow;">Quantification Standard</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Data Type: Absorbance SBW (nm) : 1.0 Beam Type : Double Normal Accessory : Single-Cell Replicates: 1</td> <td>Analytical Name: Test Concentration Unit: mg/L Use Wavelength(nm): 836.24 Intercept: Yes Fit Order: Linear Standard Concentration: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10</td> </tr> </tbody> </table>			Experiment Setup	Quantification Standard	Data Type: Absorbance SBW (nm) : 1.0 Beam Type : Double Normal Accessory : Single-Cell Replicates: 1	Analytical Name: Test Concentration Unit: mg/L Use Wavelength(nm): 836.24 Intercept: Yes Fit Order: Linear Standard Concentration: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Experiment Setup	Quantification Standard					
Data Type: Absorbance SBW (nm) : 1.0 Beam Type : Double Normal Accessory : Single-Cell Replicates: 1	Analytical Name: Test Concentration Unit: mg/L Use Wavelength(nm): 836.24 Intercept: Yes Fit Order: Linear Standard Concentration: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10					

Result Data				
<p>Function: $Y = 3.04E-01X + -4.68E-04$ $R^2: 0.9951$</p>				
Name	Type	Concentration (mg/L)	AU (836.24 nm)	Date
0	Standard	0.00	0	05-23-2019 13:59:17 (GMT -6:00)
K1	Standard	1.00	0.2649	05-23-2019 14:02:39 (GMT -6:00)
K 2	Standard	2.00	0.5946	05-23-2019 14:05:22 (GMT -6:00)
K 3	Standard	3.00	0.9817	05-23-2019 14:08:43 (GMT -6:00)
K 4	Standard	4.00	1.1121	05-23-2019 14:14:05 (GMT -6:00)
K5	Standard	5.00	1.6022	05-23-2019 14:16:59 (GMT -6:00)
K6	Standard	6.00	1.8583	05-23-2019 14:19:26 (GMT -6:00)
K7	Standard	7.00	2.206	05-23-2019 14:21:57 (GMT -6:00)
K8	Standard	8.00	2.3023	05-23-2019 14:25:10 (GMT -6:00)
K9	Standard	9.00	2.7734	05-23-2019 14:28:47 (GMT -6:00)
K10	Standard	10.00	3.0166	05-23-2019 14:32:05 (GMT -6:00)

Determinación del contenido de humedad de las muestras de suelo

MUESTRA	REPETICIÓN	PC	PSH	PC+PSH	PC+PSS	PSS	Humedad (%)	MEDIA	$(x-\bar{x})^2$	DESVIACIÓN ESTANDAR
S1	D1	13.29	3.10	16.40	16.19	2.90	6.57	7.52	0.240019	0.12
	D2	13.22	3.00	16.22	15.99	2.78	7.59		0.485341	
	D3	16.47	3.06	19.55	19.33	2.86	6.81		0.042744	
S2	E1	16.03	3.03	19.07	19.01	2.98	1.88	1.97	0.002732	0.01
	E2	17.00	3.01	20.01	19.95	2.95	1.99		0.004300	
	E3	15.82	3.07	18.91	18.84	3.02	1.92		0.000177	
S3	N1	14.56	3.03	17.60	17.49	2.93	3.47	3.64	0.002614	0.03
	N2	15.69	3.02	18.71	18.60	2.91	3.61		0.010457	
	N3	16.42	3.03	19.45	19.34	2.93	3.47		0.002614	
S4	J1	13.49	3.00	16.51	16.42	2.93	2.59	2.66	0.000002	0.05
	J2	14.84	3.09	17.94	17.86	3.02	2.52		0.006694	
	J3	14.85	3.06	17.92	17.83	2.98	2.67		0.006954	
S5	G1	14.07	3.02	17.10	17.05	2.98	1.49	1.53	0.000301	0.08
	G2	13.96	3.02	17.00	16.94	2.98	1.65		0.022525	
	G3	14.01	3.04	17.06	17.01	3.01	1.38		0.017614	
S6	Z1	14.05	3.00	17.06	16.85	2.80	6.63	7.09	0.000287	0.01
	Z2	14.55	3.00	17.57	17.36	2.81	6.62		0.000003	
	Z3	17.09	3.00	20.10	19.89	2.80	6.60		0.000351	

CE de las muestras de suelo

MUESTRA	REPETICIÓN	CE (dS/m)	MEDIA	$(x-\bar{x})^2$	DESVIACIÓN ESTANDAR
S1	D1	0.34	0.35	0.00004	0.004
	D2	0.34		0.00004	
	D3	0.36		0.00018	
S2	E1	0.71	0.69	0.00028	0.010
	E2	0.69		0.00001	
	E3	0.68		0.00018	
S3	N1	0.51	0.52	0.00018	0.008
	N2	0.53		0.00004	
	N3	0.53		0.00004	
S4	J1	0.27	0.27	0.00001	0.002
	J2	0.28		0.00004	
	J3	0.27		0.00001	
S5	G1	0.29	0.30	0.00018	0.008
	G2	0.31		0.00004	
	G3	0.31		0.00004	
S6	Z1	0.48	0.47	0.00004	0.004
	Z2	0.48		0.00004	
	Z3	0.46		0.00018	

Determinación de CO de las muestras de suelo

MUESTRA	REPETICIÓN	PC	DW105	PC+DW505	DW505	%CO	MEDIA	$(x-\bar{x})^2$	DESVIACIÓN ESTANDAR
S1	D1	13.29	2.90	16.02	2.73	5.96	6.07	0.0118	0.03
	D2	13.22	2.78	15.83	2.61	6.13		0.0031	
	D3	16.48	2.86	19.16	2.68	6.12		0.0028	
S2	E1	16.04	2.98	18.92	2.88	3.39	3.43	0.0014	0.01
	E2	17.00	2.95	19.85	2.85	3.46		0.0006	
	E3	15.83	3.02	18.74	2.92	3.44		0.0002	
S3	N1	14.57	2.93	17.33	2.77	5.37	5.24	0.0167	0.04
	N2	15.69	2.91	18.46	2.77	5.05		0.0362	
	N3	16.42	2.93	19.19	2.77	5.30		0.0037	
S4	J1	13.50	2.93	16.30	2.80	4.37	4.22	0.0219	0.04
	J2	14.85	3.02	17.75	2.90	4.01		0.0464	
	J3	14.85	2.98	17.71	2.86	4.29		0.0046	
S5	G1	14.08	2.98	16.95	2.87	3.43	3.59	0.0276	0.02
	G2	13.97	2.98	16.84	2.87	3.73		0.0182	
	G3	14.01	3.01	16.91	2.90	3.62		0.0010	
S6	Z1	14.05	2.80	16.66	2.60	7.14	7.22	0.0061	0.08
	Z2	14.56	2.81	17.17	2.61	7.16		0.0033	
	Z3	17.10	2.80	19.69	2.60	7.35		0.0185	

pH de las muestras de suelo

MUESTRA	REPETICIÓN	PH	MEDIA	$(x-\bar{x})^2$	DESVIACIÓN ESTANDAR
S1	D1	7.66	7.65	0.00018	0.008
	D2	7.61		0.00134	
	D3	7.67		0.00054	
S2	E1	8.15	8.18	0.00090	0.017
	E2	8.22		0.00160	
	E3	8.17		0.00010	
S3	N1	8.13	8.12	0.00004	0.004
	N2	8.09		0.00111	
	N3	8.15		0.00071	
S4	J1	8.33	8.34	0.00004	0.004
	J2	8.32		0.00028	
	J3	8.36		0.00054	
S5	G1	8.12	8.20	0.00694	0.048
	G2	8.24		0.00134	
	G3	8.25		0.00218	
S6	Z1	8.41	8.41	0.00001	0.002
	Z2	8.41		0.00001	
	Z3	8.42		0.00004	

Determinación del porcentaje de As soluble de las muestras de suelo

MUESTRA	REPETICIÓN	As SOLUBLE (mg/L)	MEDIA	$(x-\bar{x})^2$	DESVIACIÓN ESTANDAR	As TOTAL (mg/Kg)	%As SOLUBLE
S1	D1	0.86	0.91	0.0025	0.006	1.72	52.91
	D2	0.97		0.0036			
	D3	0.90		0.0001			
S2	E1	0.49	0.55	0.0036	0.058	8.29	6.63
	E2	0.51		0.0016			
	E3	0.65		0.0100			
S3	N1	0.80	0.80	0.0000	0.065	6.31	12.68
	N2	0.68		0.0136			
	N3	0.91		0.0128			
S4	J1	0.73	0.68	0.0028	0.010	13.25	5.13
	J2	0.64		0.0013			
	J3	0.66		0.0003			
S5	G1	1.30	1.31	0.0001	0.017	5.94	22.05
	G2	1.29		0.0004			
	G3	1.34		0.0009			
S6	Z1	3.17	2.80	0.1344	0.013	3.34	97.31
	Z2	2.46		0.1179			
	Z3	2.78		0.0005			

ANEXO 3

Análisis estadístico

Resumen del modelo de regresión %As soluble/As total

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.715604954
Coefficiente de determinación R ²	0.512090451
R ² ajustado	0.390113063
Error típico	28.23496117
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	3346.892319	3346.892319	4.198240851	0.1098198
Residuos	4	3188.852129	797.2130321		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	74.16564273	23.25382217	3.189395799	0.033235395	9.602681994	138.7286035
As total	-6.390804507	3.119046559	-2.04896092	0.1098198	-15.05066606	2.269057045

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares
1	63.17345898	-10.26648224	-0.406527072
2	21.18587337	-14.55137398	-0.57619809
3	33.83966663	-21.16137787	-0.837937745
4	-10.51251698	15.64459245	0.619486813
5	36.20426396	-14.15039191	-0.560320201
6	52.82035568	44.48503354	1.761496295

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	%As soluble
8.333333333	5.132075472
25	6.634499397
41.66666667	12.67828843
58.33333333	22.05387205
75	52.90697674
91.66666667	97.30538922

Resumen del modelo de regresión %As soluble/Humedad

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.83528141
Coefficiente de determinación R ²	0.697695035
R ² ajustado	0.622118793
Error típico	22.22491844
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4559.956448	4559.956448	9.231671518	0.038463731
Residuos	4	1975.787999	493.9469997		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-14.28984586	17.95477731	-0.795879872	0.470663118	-64.14029944	35.56060772
Contenido de humedad	11.57108466	3.808324086	3.038366587	0.038463731	0.997481889	22.14468743

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares
1	72.72471076	-19.81773402	-0.996939551
2	8.505190914	-1.870691517	-0.094105934
3	27.82890229	-15.15061386	-0.762158084
4	16.48923933	-11.35716386	-0.571326965
5	3.413913665	18.63995839	0.937691046
6	67.74914436	29.55624486	1.486839487

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	%As soluble
8.333333333	5.132075472
25	6.634499397
41.66666667	12.67828843
58.33333333	22.05387205
75	52.90697674
91.66666667	97.30538922

Resumen del modelo de regresión %As soluble/CE

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.073056641
Coefficiente de determinación R ²	0.005337273
R ² ajustado	-0.243328409
Error típico	40.31395973
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	34.88305094	34.88305094	0.021463648	0.89061
Residuos	4	6500.861396	1625.215349		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	40.01913304	52.04753701	0.768895808	0.484839439	-104.4879963	184.5262624
CE	-16.6085575	113.3652998	-0.146504773	0.89061	-331.3610892	298.1439742

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares	Percentil	%As soluble
1	34.20613792	18.70083883	0.518633584	8.333333333	5.132075472
2	28.50386651	-21.86936711	-0.606506925	25	6.634499397
3	31.32732128	-18.64903285	-0.51719684	41.66666667	12.67828843
4	35.47946066	-30.34738519	-0.84162926	58.33333333	22.05387205
5	34.98120393	-12.92733188	-0.358515922	75	52.90697674
6	32.21311102	65.0922782	1.805215363	91.66666667	97.30538922

Resumen del modelo de regresión %As soluble/CO

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.879283462
Coefficiente de determinación R ²	0.773139407
R ² ajustado	0.716424259
Error típico	19.25294043
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	5053.041586	5053.041586	13.63197366	0.020979154
Residuos	4	1482.702861	370.6757152		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-72.84266286	29.66884757	-2.455190168	0.070052872	-155.2165895	9.531263765
CO	21.28830218	5.765827659	3.692150276	0.020979154	5.279798202	37.29680616

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares	Percentil	%As soluble
1	56.38226392	-3.475287176	-0.201812767	8.333333333	5.132075472
2	0.188066628	6.446432769	0.37434962	25	6.634499397
3	38.67074056	-25.99245213	-1.509402942	41.66666667	12.67828843
4	17.03838638	-11.90631091	-0.691409207	58.33333333	22.05387205
5	3.659550892	18.39432116	1.068173266	75	52.90697674
6	80.77209294	16.53329628	0.96010203	91.66666667	97.30538922

Resumen del modelo de regresión %As soluble/pH

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.01808725
Coefficiente de determinación R ²	0.000327149
R ² ajustado	-0.249591064
Error típico	40.41536307
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2.138159773	2.138159773	0.001309023	0.972872083
Residuos	4	6533.606287	1633.401572		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	12.97626438	547.7524195	0.023690017	0.982234564	-1507.828259	1533.780788
pH	2.43037656	67.17380904	0.036180419	0.972872083	-184.0740168	188.9347699

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares	Percentil	%As soluble
1	31.56054381	21.34643294	0.590518945	8.333333333	5.132075472
2	32.85674464	-26.22224524	-0.725401412	25	6.634499397
3	32.7190233	-20.04073487	-0.554398651	41.66666667	12.67828843
4	33.23750364	-28.10542816	-0.77749701	58.33333333	22.05387205
5	32.91345343	-10.85958137	-0.300414995	75	52.90697674
6	33.4238325	63.88155672	1.767193123	91.66666667	97.30538922

Resumen del modelo de regresión %As soluble/Arcilla

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.871469394
Coefficiente de determinación R ²	0.759458904
R ² ajustado	0.69932363
Error típico	19.82495354
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4963.629315	4963.629315	12.62917509	0.023718505
Residuos	4	1572.115132	393.0287829		
Total	5	6535.744447			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-11.14824617	14.77623519	-0.754471354	0.492550393	-52.17365205	29.87715971
Contenido de Arcilla	1.408122747	0.396235171	3.553755069	0.023718505	0.307997546	2.508247948

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico %As soluble	Residuos	Residuos estándares	Percentil	%As soluble
1	67.65030278	-14.74332604	-0.831454136	8.333333333	5.132075472
2	21.18225211	-14.54775272	-0.820424722	25	6.634499397
3	28.22286585	-15.54457742	-0.876640939	41.66666667	12.67828843
4	2.482382028	2.649693444	0.149430228	58.33333333	22.05387205
5	2.482382028	19.57149003	1.10373984	75	52.90697674
6	74.69091652	22.6144727	1.275349729	91.66666667	97.30538922