

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS: CADMIO, NÍQUEL, PLOMO Y ZINC, EN ZONAS
ALEDAÑAS AL RELLENO SANITARIO DEL MUNICIPIO DE
TEXISTEPEQUE, SANTA ANA, EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

MARTA GRACIELA CARRILLO CERÓN

MÓNICA RAQUEL SOLÓRZANO CRUZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS**

DIRECTORA :

ING. SARA ELIZABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título :

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS: CADMIO, NÍQUEL, PLOMO Y ZINC, EN ZONAS
ALEDAÑAS AL RELLENO SANITARIO DE SANTA ANA**

Presentado por :

MARTA GRACIELA CARRILLO CERÓN

MÓNICA RAQUEL SOLÓRZANO CRUZ

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Directores :

ING. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO

LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO

ING. LUIS RAMÓN PORTILLO TRUJILLO

San Salvador, Agosto de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO

LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO

ING. LUIS RAMON PORTILLO TRUJILLO

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación de las matrices agua superficial, agua subterránea y suelo de las zonas aledañas al Relleno Sanitario de Santa Ana con el fin de conocer el estado de los recursos a partir de la falta de clasificación de la basura común y la inadecuada disposición final de pilas, baterías y componentes electrónicos; los cuales pueden contribuir al aumento de los niveles de concentración de metales pesados en la zona de estudio, determinando específicamente cadmio, níquel, plomo y zinc, en los meses de septiembre a octubre del año 2019.

La zona de estudio se ubica en la subcuenca del río San Jacinto, y abarca dos caseríos rurales, sin acceso a servicio de aguas negras ni agua potable, de población con bajo índice de escolaridad, mayormente de actividades agrícolas y ganaderas, y que se encuentran en las proximidades de dos instancias de disposición final de desechos sólidos, el ex botadero de Camones y el relleno sanitario de Santa Ana. Esta investigación contribuye como una fuente de referencia adicional en este tipo de estudios ambientales realizados en las zonas de influencia de los rellenos sanitarios del país, desarrollados por el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN).

La evaluación cuantitativa de la concentración de Cd, Ni, Pb y Zn en las muestras recolectadas se realizó mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica de llama (FLAA, por sus siglas en inglés) y con horno de grafito (GFAA, por sus siglas en inglés). Los resultados se contrastaron con las Guías para la calidad del agua potable (OMS, 2006) y RTS 13.02.01:14 (El Salvador, 2018), para agua de consumo, Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM (Perú, 2015) en aguas consideradas para el desarrollo de la vida acuática animal y vegetal. Para la matriz suelo se consideraron las normativas NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, (México, 2007) y Real Decreto 1310/1990 (España, 1990).

Además se realizó un levantamiento de las cargas potencialmente generadoras de contaminación al subsuelo, con enfoque en la totalidad de la subcuenca del río San Jacinto.

En cuanto a los principales hallazgos se informa que referente a la matriz suelo, todos los puntos se hallan bajo los límites permisivos, donde para cada metal son los siguientes: cadmio, 37 mg/kg base seca; níquel, 1600 mg/kg base seca; plomo, 400 mg/kg base seca y zinc, 150 mg/kg; $\text{pH} < 7$. En el caso del análisis de las muestras de agua superficial todas se encontraron bajo el límite permisivo al contrastarse con la normativa correspondiente. El mismo comportamiento se evidencia para el agua subterránea, donde todas las muestras del caserío San José El Zompopo se hallan bajo el límite permisivo según las normativas, mientras que en el caserío San Jacinto, se identificaron tres pozos que se encuentran fuera de norma para plomo (> 0.01 mg/L), y uno adicional también se halla fuera de norma para níquel (> 0.07 mg/L).

También, se identificaron e inventariaron las fuentes con potencial de generación de contaminación al subsuelo, ubicadas en la subcuenca del río San Jacinto, y se realizó la valoración de cada carga individual en tres niveles, como reducido, moderado y elevado.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por todo el conocimiento transferido a través de sus docentes en nuestros años de estudio.

Al director del CIAN de la Universidad de El Salvador, Ing. Luis Ramón Portillo Trujillo, por permitirnos la realización de este trabajo de graduación en sus instalaciones, así como por facilitarnos el equipo, reactivos y materiales requeridos para el análisis de las muestras.

A nuestros asesores, Ing. Ana Cecilia Díaz de Flamenco, Lic. José Ramiro Rodríguez Carpio e Ing. Luis Ramón Portillo Trujillo, a quienes expresamos nuestro agradecimiento por todo el apoyo y asesoría brindada a lo largo de la investigación.

A los técnicos del CIAN, por su apoyo prestado en el análisis de las muestras.

Al jefe del Departamento de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, MSc. Freddy Alexander Carranza Estrada, por permitirnos el uso de las instalaciones del Laboratorio de Química Agrícola para la etapa de digestión de muestras, así como por su asesoría técnica en la misma y en el análisis de los resultados de las muestras de agua.

Al personal del Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, por todo el apoyo brindado en la realización del tratamiento de las muestras, así como su asesoría en el análisis de los resultados obtenidos en las muestras de agua.

Al Ing. Carlos Alberto Aguirre Castro del Departamento de Ciencias Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, a quien queremos expresar nuestra gratitud por su colaboración desde la etapa de selección de los puntos de muestreo de suelo, hasta su asesoramiento técnico en el análisis de los resultados obtenidos en la matriz suelo.

A los pobladores de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, cantón Cujucuyo, Texistepeque, Santa Ana, quienes amablemente nos abrieron las puertas de

sus hogares y nos apoyaron con la toma de muestras. Les estaremos agradecidas siempre.

A los señores agentes de la Policía Nacional Civil (PNC) del puesto Santa Ana Norte, de la Subdelegación de Texistepeque y de la Policía Rural de Santa Ana, por prestarnos su compañía, tiempo y protección en cada una de las visitas de campo realizadas.

A la Subdelegación de Texistepeque además, por facilitarnos el uso de sus mapas detallados de la zona de estudio para la planeación y desarrollo de nuestras jornadas de muestreo.

Marta Carrillo y Mónica Solórzano

DEDICATORIA

Primeramente agradezco a Dios, por hacerse presente en cada momento de mi vida y por valorar el esfuerzo, perseverancia y esmero que he dedicado junto a mi compañera Mónica Solórzano en la trayectoria de la presente investigación. Agradezco inmensamente la gracia de Dios todo poderoso que me permite culminar una etapa más de mi formación académica.

A mis padres, Blanca Lucila Cerón y Oscar Mauricio Carrillo por brindarme su apoyo emocional, material y por concederme con mucho esfuerzo la oportunidad de estudiar y mantenerme firme ante las dificultades y obstáculos que se hicieron presentes durante todo el proceso. Gracias totales, este logro también les pertenece.

A mi compañera y amiga Mónica Solórzano por su compromiso y leal amistad. Me enorgullezco de trabajar en conjunto y expreso mi infinita admiración a sus capacidades, entrega y sacrificio que aportó para la realización de esta investigación. Es un honor iniciar y finalizar mi etapa de estudiante universitaria a su lado.

A Pedro Sigüenza y su familia que con mucho cariño me acogieron como parte de ella y me acompañaron con sus consejos y oraciones, gracias por haber creído en mí y por estar dispuestos a ayudarme en cualquier situación. Son realmente importantes en mi vida.

A cada docente que tuve la oportunidad de conocer, gracias por su paciencia dedicación y tiempo en impartir sus conocimientos.

Doy gracias también a mis amigos y compañeros con quienes compartí conocimientos, momentos inolvidables, conversaciones, muchas tardes estudiando, opiniones, música, paseos, bromas; especialmente a Cristian Bran, Mónica Solórzano, Gerson Azucena y Laura Manzur. Agradezco a Dios por sus vidas y por conocerlos.

Marta Graciela Carrillo Cerón

DEDICATORIA

A Dios y a la Santísima Virgen María, siempre primero a ellos. Porque donde no estaban las fuerzas físicas, nunca faltaron las espirituales. Nada pasa si no es por su bendición.

A mis padres, Daysi de Solórzano y Edwin Solórzano, por haber guiado mi vida de forma tan magnífica hasta hoy. Soy lo que soy por ustedes, tengo lo que tengo por ustedes y logro lo que logro, por ustedes. Los amo inmensamente. Todos mis esfuerzos siempre están dedicados a ustedes y a sus sacrificios.

A mi hermana, Fabiola Solórzano, por prestarse a escucharme y acompañarme a lo largo de la carrera y de este trabajo de graduación, y porque sin importar lo que necesite, siempre puedo encontrar apoyo incondicional en ella. Gracias, toda la vida, gracias.

A mi amiga y compañera, Marta Carrillo, por ser la mejor compañera de tesis que pude imaginar. Te estaré eternamente agradecida por todo tu esfuerzo y sobre todo tu paciencia para conmigo a lo largo de este proceso. Gracias por estar desde el principio de la carrera, a pesar de los altos y bajos, me enorgullece que podamos terminar esto juntas.

A Grecia, Maura, Lupe, Fátima, Claudia, Rhina, Rosa, Napoleón (Q.D.D.G) y Leonor (Q.D.D.G) por ser y haber sido tías, primas y abuelos increíbles, personas excepcionales y un gran soporte en mi vida. Les amo a todos.

A mis amigos y compañeros, Marta, Caro, Kevin y Laura, por su compañía e infinito apoyo desde el ciclo I, mis primeros amigos y los que están siempre en todas. Y a todas las demás personas maravillosas con quienes conviví mis últimos años de carrera y con quienes pasé el tiempo más increíble. Gracias por hacer de ésta, la mejor etapa de mi vida. Les llevo siempre conmigo.

Mónica Raquel Solórzano Cruz

ÍNDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Contexto.....	3
1.1.1 Ubicación geográfica	3
1.1.2 Situación socioeconómica	4
1.1.3 Descripción del medio ambiente físico en la zona de estudio.....	7
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Hipótesis de investigación.....	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo General.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
1.5 Justificación.....	21
1.6 Delimitación física del área de estudio	22
1.7 Limitaciones y alcances de la investigación	24
1.7.1 Limitaciones de la investigación	24
1.7.2 Alcances de la investigación.....	25
1.8 Antecedentes	26
1.8.1 Otros trabajos en El Salvador.....	30
1.8.2 Otros trabajos en Latinoamérica.....	33
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	37
2.1 Generación de basura del departamento de Santa Ana	38
2.1.1 Evolución histórica de la generación de desechos en el municipio de Santa Ana	40
2.2 Composición general de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.....	41

2.3	Proceso de contaminación a partir de lixiviados.....	44
2.4	Movilidad de los metales pesados en el suelo	52
2.5	Factores del suelo que inciden en la disponibilidad y acumulación de metales pesados	56
2.5.1	Cadmio	56
2.5.2	Níquel	59
2.5.3	Plomo	60
2.5.4	Zinc.....	62
2.6	Potencial de contaminación al agua subterránea.....	64
2.6.1	Mapeo del inventario de cargas contaminantes mediante el método POSH.....	68
2.7	Técnicas analíticas: Espectroscopía de absorción atómica de llama y espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito	71
2.7.1	Fundamentos de la técnica.....	71
2.7.2	Instrumentación	73
2.7.3	Fuentes de radiación	74
2.7.4	Atomizadores.....	75
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS		79
3.1	Fase de campo.....	82
3.1.1	Visitas de reconocimiento.....	82
3.1.2	Inventario de puntos de muestreo para las matrices de estudio.....	82
3.1.3	Selección de los puntos de muestreo	84
3.1.4	Procedimientos de toma de muestras	89
3.2	Fase de laboratorio	93
3.2.1	Pretratamiento de las muestras	93
3.3	Criterios de evaluación de resultados versus normas de referencia	94
3.3.1	Evaluación fisicoquímica de suelos	95
3.3.2	Evaluación fisicoquímica de aguas.....	97
3.4	Metodología para la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea	98
3.4.1	Inventario de cargas contaminantes al subsuelo	98
3.4.2	Metodología para la evaluación de la movilidad de los metales	101

CAPÍTULO 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
4.1 Cálculo de concentraciones reales y consideraciones generales	107
4.2 Presentación de resultados experimentales de las matrices de estudio.....	109
4.2.1 Resultados obtenidos del análisis de metales pesados en matriz suelo	109
4.2.2 Discusión y análisis de resultados para matriz suelo.....	118
4.2.3 Resultados obtenidos del análisis de metales pesados en las matrices agua superficial y agua subterránea.....	122
4.2.4 Discusión y análisis de resultados de las matrices de aguas	137
4.3 Mapeo de cargas contaminantes.	140
CONCLUSIONES.....	143
RECOMENDACIONES	146
BIBLIOGRAFÍA	148
ANEXOS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Mapa de ubicación del relleno sanitario de Santa Ana en la jurisdicción de Texistepeque. Fuente: mapadeelsalvador.com.	4
Figura 1.2 Distribución de los tipos de suelos Lía y Aga en la zona de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, Texistepeque. Fuente: Levantamiento General de Suelos Vectorizado, 2005 Escala 1:50,000.	11
Figura 1.3 Hidrología superficial, curvas isofreáticas y dirección del flujo subterráneo en la zona del relleno sanitario de Santa Ana. Fuente: Meléndez, et al, (2011).	16
Figura 1.4 Relieve aproximado del área de influencia delimitada por un radio de 1,500 m alrededor del relleno sanitario. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales obtenidas de Google Maps y CNRcloud.	22
Figura 2.1 Toneladas totales de basura depositada en los rellenos sanitarios de El Salvador en el año 2014. Fuente: Adaptado de MARN (2017).	39
Figura 2.2 Crecimiento de generación de basura con el crecimiento poblacional de la ciudad de Santa Ana, El Salvador (1970-2019). Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Toledo (2017), Henríquez (2019) y el portal web de la Alcaldía Municipal de Santa Ana.	41
Figura 2.3 Contaminación de un acuífero por lixiviado de residuo sólido depositados en la superficie. Fuente: IGME (2002).	46
Figura 2.4 Esquema de infiltración del agua. Fuente: Adaptado de Fetter (2014).	48
Figura 2.5 Esquema de la movilidad del agua subterránea a través de los poros del suelo. Fuente: Easterbrook (1999).	49
Figura 2.6 Representación del sistema hidrológico. Fuente: Najera, 2016.	51
Figura 2.7 Diagrama de movilidad de metales pesados en el suelo. Fuente: Sánchez, 2003.	53
Figura 2.8 Representación esquemática de especies de metales pesados y reacciones en suelos. Fuente: Bruemmer, Gerth, y Herms, 1986.	54
Figura 2.9 Especies químicas del plomo a distintos valores de pH y pe en disolución acuosa. Fuente: Appelo y Postma (2005).	55
Figura 2.10 Solubilidad de Cd en suelos como función del pH. Equilibrio con 15, 25 y 100 µg de Cd per 2 g de suelo. Fuente: Kabata-Pendias y Pendias (2001).	57
Figura 2.11 Esquema de tendencias de la movilidad de los metales por la influencia del pH del suelo (para suelos ligeramente minerales). Fuente: Kabata-Pendias y Pendias (2001).	58
Figura 2.12 Resumen de los procesos de atenuación de contaminantes en las aguas subterráneas. Fuente: Foster e Hirata (1991).	65

	Página
Figura 2.13 Componentes básicos de un equipo de absorción atómica.	74
Figura 3.1 Descripción de la fase de campo en la metodología de investigación. Elaboración propia.....	81
Figura 3.2 Ubicación de los pozos seleccionados y los puntos escogidos sobre la ruta de las fuentes de agua superficial, como puntos de muestreo.	87
Figura 3.3 Sección típica de tubería y laguna de lixiviados. Fuente: Meléndez, et al, (2011).	92
Figura 3.4 Desarrollo de un inventario de fuentes potenciales de carga contaminante al subsuelo. Fuente: Adaptado de Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, y Paris (2003).....	99
Figura 4.1 Descripción general del procedimiento de laboratorio y análisis de resultados ejecutado.	106
Figura 4.2 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.	110
Figura 4.3 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Cadmio en suelo de la zona de estudio.	110
Figura 4.4 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.	112
Figura 4.5 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Níquel en suelos....	112
Figura 4.6 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.	114
Figura 4.7 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Plomo en suelos....	114
Figura 4.8 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.	116
Figura 4.9 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Zinc en suelos.	116
Figura 4.10 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Cd, Ni, Pb y Zn en los perfiles de concentración vertical PF-01 y PF-02 y líneas de tendencia lineal para cada metal.	117
Figura 4.11 Representación gráfica de la relación de pH, fósforo y potasio en cinco muestras de suelo de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto.....	119
Figura 4.12 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo....	124
Figura 4.13 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo..	124

Figura 4.14 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo....	127
Figura 4.15 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo..	127
Figura 4.16 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Níquel en aguas superficiales y subterráneas.	128
Figura 4.17 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo....	131
Figura 4.18 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo..	131
Figura 4.19 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Plomo en aguas superficiales y subterráneas.	132
Figura 4.20 Perfil de elevación del ex botadero de Camones con respecto a los pozos excavados IIPZE09, IIPZE10 y IIPZE12 ubicados en el caserío San Jacinto. Fuente: Google Earth.	132
Figura 4.21 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo....	135
Figura 4.22 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo..	135
Figura 4.23 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Zinc en aguas superficiales y subterráneas.	136
Figura 4.24 Representación gráfica de las mediciones de pH realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.	138
Figura 4.25 Representación gráfica de las mediciones de oxígeno disuelto realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.	138
Figura 4.26 Representación gráfica de las mediciones de sólidos totales disueltos realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.....	139
Figura 4.27 Representación gráfica de las mediciones de conductividad eléctrica realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.....	139
Figura 4.28 Mapeo del inventario de cargas contaminantes identificadas en la subcuenca del río San Jacinto.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Indicadores socioeconómicos para los caseríos de la zona de estudio para una muestra poblacional.	5
Tabla 1.2 Supuestos y riesgos de la investigación.....	24
Tabla 2.1 Total de desechos depositados por municipio del departamento de Santa Ana en el año 2014.	40
Tabla 2.2 Rango de composición típica de lixiviados.	44
Tabla 2.3 Clasificación de los tipos de lixiviados en función de la edad.	45
Tabla 2.4 Contaminantes comunes del agua subterránea y fuentes de contaminación asociadas.....	67
Tabla 2.5 Compendio de las características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes.....	68
Tabla 2.6 Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo.	70
Tabla 2.7 Mezclas típicas de gases y propiedades de la llama generada.	77
Tabla 3.1 Puntos de muestreo de aguas superficiales.....	84
Tabla 3.2 Modelo de puntuación y ponderación de los parámetros de selección de pozos para toma de muestras de agua subterránea.....	86
Tabla 3.3 Modelo de ponderación de los criterios de selección de puntos de muestreo superficial de suelos.	89
Tabla 3.4 Procedimientos de toma de muestras y referencia de las mismas, designados para cada matriz en estudio.....	91
Tabla 3.5 Tipo de envase que debe ser utilizado para la recolección y transporte de muestras. Fuente: IHOBE.....	93
Tabla 3.6 Valores y normas de referencia para la evaluación de la calidad de aguas y suelos en contenido de metales pesados.	95
Tabla 3.7 Valores de referencia de los parámetros fisicoquímicos y de nutrientes a considerar en las matrices de estudio.	98
Tabla 3.8 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo al método POSH.	100
Tabla 3.9 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación puntuales de acuerdo al método POSH.....	101
Tabla 3.10 Metodologías a utilizar y normativas de referencia para el análisis químico y de resultados de las matrices de estudio.	103

	Página
Tabla 4.1	Resultados obtenidos para Cd en la matriz suelo, mediante las técnicas de GFAA. 109
Tabla 4.2	Resultados obtenidos para Ni en matriz suelo, mediante las técnicas de GFAA..... 111
Tabla 4.3	Resultados obtenidos para Pb en matriz suelo, mediante las técnicas FLAA. 113
Tabla 4.4	Resultados obtenidos para Zn en la matriz suelo, mediante la técnica de FLAA..... 115
Tabla 4.5	Resultados de análisis del contenido de metales Cd, Ni, Pb y Zn para una muestra aleatoria de lixiviados..... 118
Tabla 4.6	Resultados de los parámetros físicos y de nutrientes del suelo medidos en muestras de suelo de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, Texistepeque..... 118
Tabla 4.7	Resultados obtenidos para Cd en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo (octubre, 2019)..... 122
Tabla 4.8	Resultados obtenidos para Cd en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo (octubre, 2019)..... 123
Tabla 4.9	Resultados obtenidos para Ni en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.... 125
Tabla 4.10	Resultados obtenidos para Ni en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo. . 126
Tabla 4.11	Resultados obtenidos para Pb en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.... 129
Tabla 4.12	Resultados obtenidos para Pb en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo. . 130
Tabla 4.13	Resultados obtenidos para Zn en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.... 133
Tabla 4.14	Resultados obtenidos para Zn en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo. . 134
Tabla 4.15	Parámetros fisicoquímicos medidos para aguas superficiales y aguas subterráneas. 137
Tabla 4.16	Clasificación de ríos según subcuenca hidrográfica en la zona de estudio. 140
Tabla 4.17	Clasificación y caracterización de las posibles fuentes contaminantes identificadas en la subcuenca del río San Jacinto según el método POSH..... 141

INTRODUCCIÓN

Según datos de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), el promedio del crecimiento de generación de desechos sólidos, según el crecimiento poblacional, aumenta en un 0.1% al año (Machuca, 2017). Según Sibrán (2019), a mayo de 2019, se estimaba una generación diaria en El Salvador a nivel nacional de 3,900 toneladas de basura. En el país, la única forma de tratamiento final que reciben los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es su depósito en rellenos sanitarios.

El manejo integral de los RSU incluye el tratamiento de su lixiviado, el efluente producto de la degradación de la fracción orgánica, con su humedad y agua de lluvia. A pesar de que las celdas de desechos de los rellenos sanitarios se encuentran impermeabilizadas, siempre existe el riesgo de falla de estos sistemas y posterior liberación de lixiviados al medio ambiente circundante. La disposición final de desechos como Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), pilas y baterías, cuyos componentes puedan percolar sustancias tóxicas, puede significar un problema ambiental en caso de derrame accidental. Los sistemas más vulnerables suelen ser las aguas superficiales y subterráneas más cercanas. Los suelos representan un riesgo mayor en caso de ser de utilidad agrícola.

El enfoque de la presente investigación es conocer el estado de los recursos que podrían ser afectados debido al aumento de los niveles de concentración de cadmio, níquel, plomo y zinc en la zona de estudio, por la falta de clasificación de los desechos sólidos. Adicional al análisis cuantitativo de metales pesados, se inventariaron las cargas con potencial generador de contaminación al subsuelo, con énfasis en la subcuenca del río San Jacinto.

La presente investigación surge con la necesidad de nuevos estudios de referencia que evalúen los niveles de concentración de metales pesados en aguas y suelos en las inmediaciones de sitios de disposición final de desechos, así como la incorporación de metodologías que valoren y caractericen las fuentes potencialmente contaminantes con enfoque de cuenca hidrológica.

CAPÍTULO 1

**ALCANCES Y PLANTEAMIENTO
DEL PROBLEMA**

1.1 Contexto

1.1.1 Ubicación geográfica

Texistepeque es un municipio perteneciente al departamento de Santa Ana, tiene una extensión territorial de 178.97 km², se encuentra a 405 metros sobre el nivel del mar (msnm) y es de clima cálido. Está limitado al sur por el municipio de Santa Ana, al norte por los municipios de San Antonio Pajonal, Masahuat y Metapán, al este por Nueva Concepción (departamento de Chalatenango), y al oeste por Candelaria de la Frontera.

Según el catastro del Centro Nacional de Registro (CNR), el relleno sanitario de Santa Ana está ubicado al costado derecho de la carretera pavimentada que conduce del municipio de Santa Ana a Metapán, en la Hacienda Santa Rosa del caserío San José El Zompopo, Cantón Cujucuyo, municipio de Texistepeque, departamento de Santa Ana (Meléndez, Zavala, Ávalos, Estévez, y Quintanilla, 2011). Las coordenadas aproximadas que se encuentran dentro del área del relleno sanitario son: 14°03'58" N y 89°30'05" O.

El área total del relleno de acuerdo al mismo catastro del CNR es de 1222,176.16 m². La totalidad de la hacienda Santa Rosa fue adquirida mediante escritura pública privada, a favor de las municipalidades de Santa Ana, Metapán, Chalchuapa, San Sebastián Salitrillo y El Congo, que conforman parte de ASEMUSA y del Concejo Departamental de Alcaldes de Santa Ana (CDA) (Meléndez, et al, 2011).

Los titulares y administradores del proyecto del relleno sanitario del departamento de Santa Ana son la Asociación Ecológica de Municipios de Santa Ana (ASEMUSA) y el CDA.

La ubicación geográfica del relleno sanitario se visualiza en la Figura 1.1.

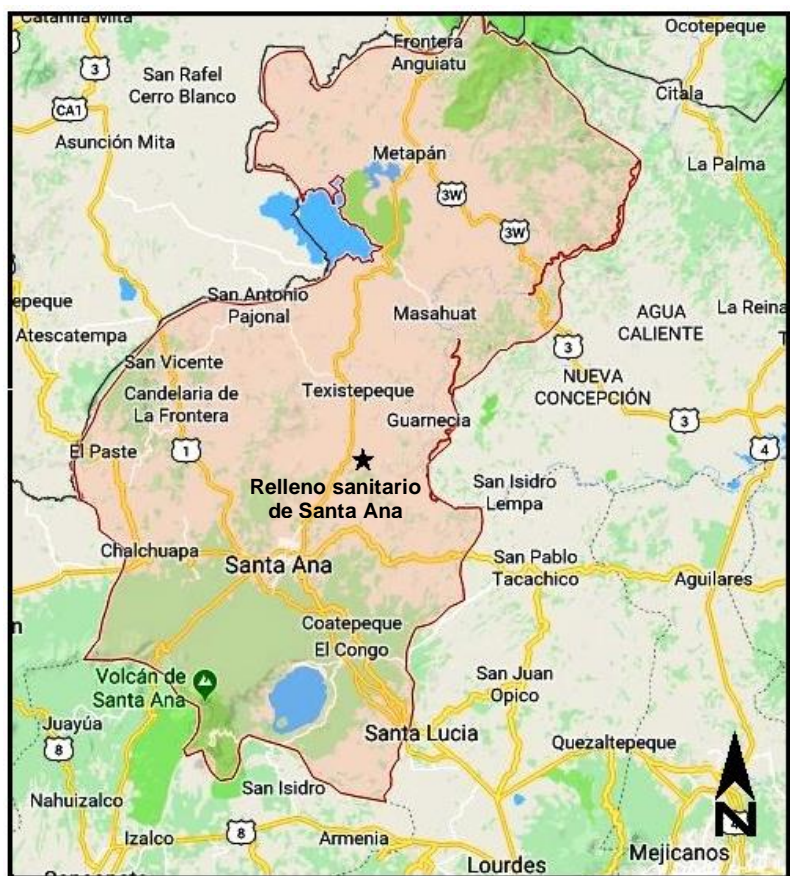


Figura 1.1 Mapa de ubicación del relleno sanitario de Santa Ana en la jurisdicción de Texistepeque. Fuente: mapadeelsalvador.com.

1.1.2 Situación socioeconómica

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2009), el municipio de Texistepeque tiene un índice de desarrollo humano de 0.675. En el área rural la escolaridad promedio (en años) es de 3.6, una tasa de alfabetismo adulto de 69.9%, un porcentaje de personas receptoras de remesas de 17.8%, porcentaje de hogares con acceso a agua potable de 57.7%, porcentaje de hogares con acceso a alumbrado del 88.7%, porcentaje de hogares con acceso a recolección de basura de 2.7%, un porcentaje de hogares con saneamiento por alcantarillado de 23.6%, un 58.1% de hogares que utilizan leña para cocinar, 0.2% tienen servicio de internet y 26.9% tienen servicio de telefonía.

Para caracterizar a la población potencialmente afectada, se realizó una encuesta con algunos indicadores socioeconómicos en un total de 36 hogares: 18 en el case-río San José El Zompopo, 17 en el case-río San Jacinto y 1 en el cantón Cutumay Camones. Todos los sujetos encuestados son pobladores de los case-ríos mencio-nados y viven dentro de un radio de 1500 m alrededor del relleno sanitario. Los resultados se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Indicadores socioeconómicos para los case-ríos de la zona de estudio para una muestra poblacional.

Indicador	Parámetro	Porcentaje	Representación gráfica	
Sexo ^a	Mujeres	67%		
	Hombres	33%		
Edad muje-res	18-35 años	31%		
	36-50 años	17%		
	51-70 años	19%		
Edad hom-bres	18-35 años	8%		
	36-50 años	17%		
	51-70 años	8%		
Número de habitantes por vivienda	1-3 personas	39%		
	4-7 personas	56%		
	8-10 personas	6%		
Escolaridad	Ninguno	22%		
	1er ciclo	33%		
	2do ciclo	28%		
	3er ciclo	8%		
	Bachillerato	8%		
Sector econó-mico ^{a,b,c}	Sector económico pri-mario	25%		
	Sector secundario	3%		
	Sector terciario	8%		
	Población Económi-camente Inactiva	64%		

Continúa página siguiente

Tabla 1.1 Indicadores socioeconómicos para los caseríos de la zona de estudio para una muestra poblacional (continuación).

Indicador	Parámetro	Porcentaje	Representación gráfica
Servicios básicos	Solo agua potable	3%	<p>Bar chart showing the distribution of basic services. The y-axis ranges from 0% to 100%. The x-axis categories are Agua potable (3%), Electricidad (8%), Ambos (83%), and Ninguno (6%).</p>
	Solo suministro eléctrico	8%	
	Agua potable/Suministro eléctrico	83%	
	Ninguno	6%	
Servicios varios	Telefonía/Internet/Cable	3%	<p>Bar chart showing the distribution of various services. The y-axis ranges from 0% to 60%. The x-axis categories are Telefonía (6%), Cable (36%), Telefonía/Cable (3%), Todos (3%), and Ninguno (53%).</p>
	Telefonía/Cable	3%	
	Solo Cable	36%	
	Solo telefonía	6%	
	Ninguno	53%	
Métodos de cocina	Cocina a leña o gas	81%	<p>Bar chart showing the distribution of cooking methods. The y-axis ranges from 0% to 100%. The x-axis categories are Leña/Gas (81%), Gas (8%), and Leña (11%).</p>
	Cocina de gas	8%	
	Cocina de leña	11%	
Método de saneamiento de desechos biológicos	Letrina abonera o fosa séptica	58%	<p>Bar chart showing the distribution of biological waste disposal methods. The y-axis ranges from 0% to 80%. The x-axis categories are Inodoro (3%), Letrina (58%), Lavable (28%), and Ninguno (11%).</p>
	Inodoros lavables	31%	
	Ninguno	11%	
Agricultura ^{b,d}	Solo maíz	22%	<p>Bar chart showing the distribution of agricultural products. The y-axis ranges from 0% to 45%. The x-axis categories are Maíz (22%), Maíz-Maicillo (19%), Maíz-Maicillo-Frijol (14%), Otros (3%), and Ninguno (42%).</p>
	Maíz y maicillo	19%	
	Maíz, maicillo y frijol	14%	
	Otros	3%	

Continúa página siguiente

Tabla 1.1 Indicadores socioeconómicos para los caseríos de la zona de estudio para una muestra poblacional (continuación).

Indicador	Parámetro	Porcentaje	Representación gráfica
Disposición de desechos ^e	Camiones recolectores	19%	<p>A bar chart with a vertical axis from 0% to 35% in 5% increments. The horizontal axis lists five categories: 'Camión Recolector' (19%), 'Enterrada' (8%), 'Quemada' (31%), 'Enterrada/Quemada' (28%), and 'Camión/Quemada' (14%). Each bar is green and has its percentage value labeled above it.</p>
	La entierra	8%	
	La quema	31%	
	La entierra o la quema	28%	
	Camión recolector o quema	14%	

^aReferida solamente a la persona encuestada.

^bPoblación Económicamente Inactiva (PEI): Conjunto de personas en edad de trabajar, que no teniendo ocupación, no buscan trabajo. En este porcentaje se toman en cuenta también las personas cuyo trabajo se vincula a las tareas de cuidado de las personas, que se realiza en los hogares. Incluye actividades tales como la preparación de la comida, el cuidado de los infantes y adultos mayores dependientes, el lavado y planchado de ropa, y el cuidado y limpieza del hogar. Es mayormente realizado por mujeres (PNUD, 2018).

^cEl 42% de los encuestados afirma ser receptor de remesas como ingreso extra.

^dLos usos mayoritarios del suelo son para agricultura, ganadería y habitacional. El 58% de los encuestados se dedican a la agricultura como único medio de subsistencia o secundario.

^eLas personas encuestadas afirman tener que buscar alternativas de disposición de sus desechos, ya que el servicio de recolección es irregular en la zona y no cubre todo el caserío.

1.1.3 Descripción del medio ambiente físico en la zona de estudio

Los principales suelos de El Salvador por su extensión, diversificación agrícola y condiciones particulares son los reconocidos como Latosoles Arcillo Rojizos, clasificados dentro de la primera aproximación como Alfisoles (Haplustalfs), estos suelos se han formado a partir de rocas Basálticas, Andesíticas y Conglomerados (Lahars) de estos mismos materiales y algunas veces recubiertos por materiales piroclásticos no consolidados. Estas rocas datan del Plioceno (Rico, 1974). Según el Levantamiento General de Suelos (1963), los suelos predominantes en la zona de estudio pertenecen a la serie Litosoles no diferenciados muy accidentado en terrenos elevados (Lía), Gran Grupo Litosoles; y serie Aguacayo arcilloso en planicies (Aga), Gran Grupo Grumosoles.

1.1.3.1 Fisiografía y tipos de suelo en la zona de estudio

i. Lía, Litosoles no diferenciados muy accidentado en montaña¹

Fisiografía. Comprende cerros y montañas fuertemente diseccionados con cimas estrechas y quebradas profundas; también se encuentran pequeños valles ondulados o alomados y cadenas de cerros con menor disección; los plegamientos y fallas originan las áreas más diseccionadas y escarpadas. El relieve local varía de moderado a alto; las pendientes predominantes oscilan entre 40-75% llegando a más de 100% en las áreas falladas. Las capas inferiores están formadas en su mayoría por lavas claras y grises, en menor proporción por lavas blancas, conglomerados y tobas; lavas oscuras se encuentran como intrusiones y en los límites de separación de esta unidad pero en un porcentaje bajo.

Gran Grupo Litosol. Se caracterizan por agrupar suelos pedregosos muy superficiales de textura franco gravilosa a franco arcillo gravilosa originados de lavas claras (blancas y grises), conglomerados y tobas. Su distribución es muy amplia en tal forma que no se puede diferenciar con claridad las áreas específicas de cada material original. Con muy poca presencia y formando bolsones se encuentran áreas de suelos poco profundos originados de ceniza volcánica, así como intrusiones de suelos arcillo rojizos originados de lavas oscuras. En general, estos suelos son de baja productividad. El drenaje externo es rápido y causa fuerte erosión, el interno es lento. La capacidad de retención de humedad es de moderada a baja.

En la mayor parte de estos suelos se encuentra vegetación natural sin ningún valor económico, como plantas arvenses, monte bajo y muy poca vegetación de bosque primitivo. En el resto (15-20%) se cultiva maíz, maicillo, frijol, caña de azúcar, cacahuete y pastos.

¹ Ministerio de Agricultura. 1963. Levantamiento General de Suelos, Escala 1:50,000. Cuadrante 2457 IV.

ii. **Aga, Aguacayo arcilloso en planicie**²

Se encuentra en las márgenes de las planicies de pie de monte de la zona baja costera, en donde se unen con las planicies aluviales actuales o desaparecen debajo de los estratos que componen los manglares y esteros. Son áreas sin disección y de ligera inclinación. Las capas inferiores están constituidas por polvos volcánicos depositados en diversas épocas geológicas, con períodos de intemperización entre sí. La última es en parte aluvión reciente.

Pertenece principalmente a los Grumosoles con tendencia hacia los Latosoles Arcillo Rojizos y en las partes más bajas, Regosoles Aluviales. El suelo principal es una arcilla negra acromática, muy plástica, pegajosa y de profundidad de más de metro y medio. En las partes un poco convexas, el color tiene tendencia hacia café rojizo y con estructura en bloques. A veces la arcilla está cubierta con un suelo superficial franco arcilloso, color café grisáceo muy oscuro y hasta con 30 cm de espesor. En las cañadas y márgenes de la unidad se encuentra arcilla aluvial estratificada, de color gris, moteado con café fuerte y negro. El drenaje es algo pobre debido a la lenta permeabilidad y baja posición del suelo. Son tierras húmedas en la época de lluvia y algo húmedas en la época seca. Se usa principalmente para pastos y cultivos intensivos como maíz y arroz.

Gran Grupo Grumosoles. Son suelos muy arcillosos de color gris a negro con vegetación de morros, cuando están muy mojados son muy pegajosos y muy plásticos. Cuando están secos son muy duros y se rajan. Son suelos de topografía un poco disectada que varía de ondulada a plana. Son altamente cohesivos, con un color negro acromático muy típico pero con poco humus o materia orgánica. Los horizontes superficiales son arcillas plásticas compactas y de color negro. Por lo general no varían hasta una profundidad de 75 cm. Estas capas se agrietan cuando están secas. Los subsuelos son arcillosos, plásticos, de color gris claro a oscuro y usualmente con moteados. Las capas de toba o talpetate se encuentran a profundi-

² Ministerio de Agricultura. 1965. Levantamiento General de Suelos, Escala 1:50,000. Cuadrante 2358 II.

dades que varían de 1 a 2 metros. En áreas muy pequeñas se presenta una delgada capa superficial de textura franca y de mejores características para cultivar. Son muy profundos y poco permeables, con alta capacidad de retención de agua (la infiltración de agua lluvia es muy lenta), y dificultan el laboreo y las comunicaciones durante la estación lluviosa. Su uso potencial es de moderado a bajo, no apto para cultivos permanentes de alto valor comercial porque al rajarse rompen las raíces de las plantas. Algunas áreas pueden ser moderadamente apropiadas para cultivos, tales como maíz y maicillo. Necesitan la incorporación de fertilizantes nitrogenados y fosforados, particularmente en la producción de gramíneas como el arroz, el millo u otros cultivos similares (Carías, Chacón, y Martínez, 2004; OEA-CONAPLAN, 1974).

En menor medida, según la clasificación de suelos del MAG por división política (2012), en la zona del cantón Cujucuyo, en la que se ubican los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto se encuentran también suelos del tipo Latosoles Arcillo Rojizos:

Latosoles Arcillo-Rojizos: Suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo aunque algunas veces se encuentran amarillentos o cafezoso. Esta coloración se debe principalmente a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. Los horizontes superiores de los Latosoles Arcillo Rojizos son de textura franca a franco arcillosa, de color café muy oscuro y con estructura granular. Los subsuelos son arcillosos con estructura en bloques fuertes y con películas de arcilla, de color café oscuro a café rojizo oscuro, bastante desarrollados y profundos. Las capas inferiores están constituidas por pómez medianamente grueso de textura arenosa y de cenizas volcánicas a distintas profundidades, y de intemperización variable. En general, varían de medianamente profundos a profundos; sin embargo, en las quebradas se encuentran suelos muy poco profundos y mezclados con Latosoles. La profundidad promedio es de un metro aunque en algunos sitios se observa afloración de roca debido a los procesos de erosión. La

fertilidad puede ser alta en terrenos protegidos pudiéndose utilizar maquinaria agrícola cuando la pendiente es moderada. Responden a los fertilizantes a base de nitrógeno y fósforo. Son suelos aptos para casi todos los cultivos (Carias, Chacón y Martínez, 2004; OEA-CONAPLAN, 1974).

La distribución de los tipos de suelos Lía y Aga se muestran en la Figura 1.2.

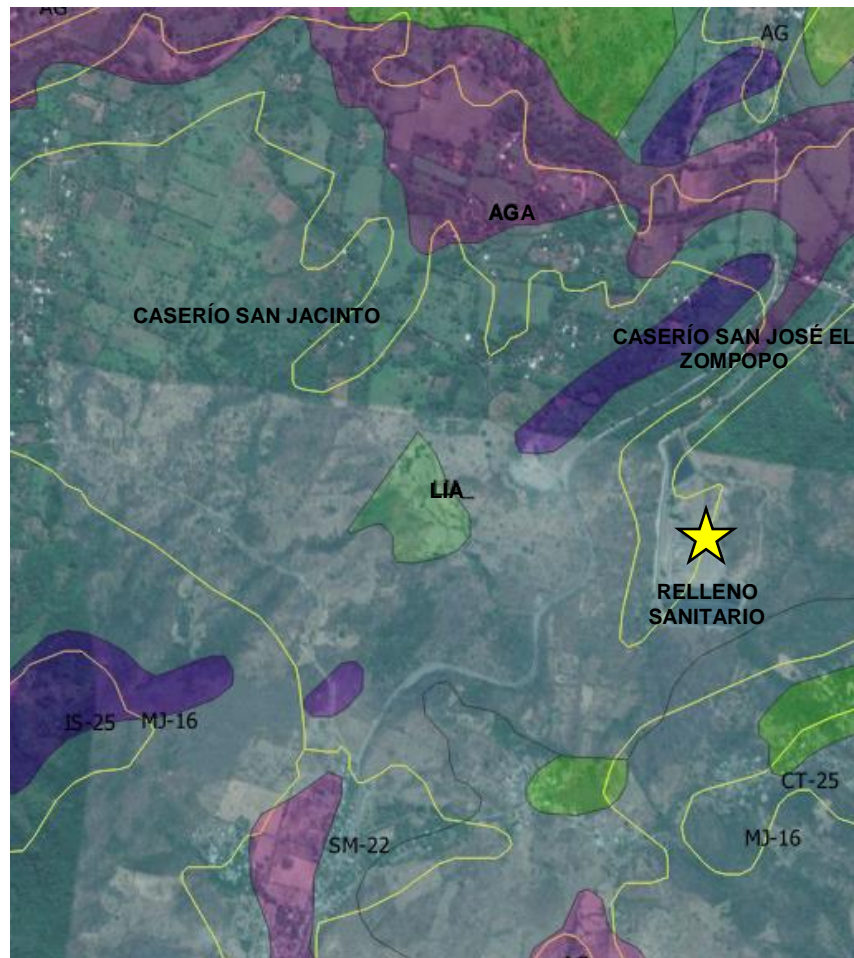


Figura 1.2 Distribución de los tipos de suelos Lía y Aga en la zona de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, Texistepeque. Fuente: Levantamiento General de Suelos Vectorizado, 2005. Escala 1:50,000.

El potencial agrícola de estos suelos es de bajo a muy bajo. La mayoría de la tierra es apropiada solamente para pasto nativo no mejorado y para bosque bajo. Pequeñas áreas dispersas son apropiadas para cultivos tales como maicillo y algunas áreas de Grumosoles, particularmente aquellas enterradas bajo unos pocos centíme-

tros de ceniza volcánica reciente, son apropiadas para arroz. Los rendimientos son generalmente bajos y el manejo difícil (Rico, 1974).

1.1.3.2 Geología

El área del Relleno Sanitario se encuentra localizada en el departamento de Santa Ana, el área en estudio se encuentra comprendida en la parte noroeste de la unidad denominada “Fosa Central Oeste”, en su límite norte, justo en límite con la “fosa interior” la cual cubre un 5% aproximadamente del territorio nacional. En general el estudio se desarrolla en la parte suroeste de la población de Texistepeque, la cual está conformada por un grupo de cerros y lomas de moderada elevación delimitados por quebradas y surcos de erosión profundos incluidos dentro de la sub cuenca del Río Amayo o San Jacinto, cerros y lomas de edad antigua. El sistema de drenaje de la zona ha sido influenciado en parte por al menos cinco fallas tectónicas secundarias, que no poseen influencia estructural en el sitio seleccionado para el relleno sanitario ya que las más cercanas se encuentran localizadas a más de 1.5 km. de distancia, en dirección SSO, NNO y NNE (Meléndez, et al, 2011).

A nivel de geología superficial, la parte central, sureste y noreste del área del relleno sanitario posee inclusiones aisladas, estrechas y largadas capas basálticas, aglomerados y tobas antiguas que emergen en forma aislada, entre las capas epiclásicas volcánicas y piroclásticas basálticas con una facies de lapillis de pómez, la cual es la capa de mayor extensión en esa zona (Meléndez, et al, 2011).

La zona está constituida por formaciones geológicas de edades antiguas como Balsamo y Cuscatlán que rellenan un pequeño valle interno y parte del río Río Amayo o San Jacinto, en forma de una capa estrecha y alargada de regular extensión, perteneciente al período Plioceno y Pleistoceno, correspondiente a la era geológica terciaria y cuaternaria (Meléndez, et al, 2011).

1.1.3.3 Hidrología superficial

El drenaje superficial en la zona del relleno se inicia cuando el agua lluvia o pluvial cae en las partes altas de las elevaciones topográficas accidentadas de la parte

norte del cantón Cutumay Camones. Parte del agua es interceptada por la vegetación y otra se infiltra en el suelo almacenándose en las formaciones geológicas superficiales poco permeables, a la vez que una buena parte se desplaza corriente abajo por los drenajes naturales en la época lluviosa. De esta parte del agua almacenada un porcentaje escurre hacia las quebradas y surcos de erosión que drenan toda la región en la parte alta y al norte del cantón Cutumay Camones (Meléndez, et al, 2011).

En la parte norte del relleno el drenaje superficial está definido también por la quebrada El Almendro con algunos surcos de erosión desarrollados en forma dendrítica, que representan afluentes temporales durante la época lluviosa, la más significativas son la de La Tequera y dos flujos temporales de la zona media de la quebrada las cuales conducen las masas de agua y drenan con dirección norte en forma serpentina. Las descargas de las quebradas se convierte en afluente del río Amayo o Chilcuyo, que luego en unión con el río Cujucuyo se convierte en afluente del río San Jacinto, que al unirse con la quebrada Guarnecia se le denomina río Ipayo, que desemboca al río Lempa (Meléndez, et al, 2011).

1.1.3.4 Hidrogeología

La formación Bálsamo es la de mayor presencia e importancia del área y caserío San José El Zompopo y Hacienda Santa Rosa, en la que sobresalen las siguientes características hidrogeológicas (Meléndez, et al, 2011):

- a. Las lavas basálticas, aglomerados y tobas antiguas, tienen una porosidad baja y una permeabilidad baja a nula, mientras que las capas epiclásticas volcánicas y piroclásticas basálticas con la inclusión aislada de una facies de lapillis de pómez, tienen una porosidad baja y una permeabilidad media a baja.
- b. Las capas de epiclásticas volcánicas fluviales, tienen una porosidad media y una permeabilidad media a baja, formando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad.

Estas capas almacenan y permiten la circulación a través de sus poros e intersticios, de acuíferos de medios a bajos rendimientos, los que dependerán de su extensión y espesor, de su grado de compactación, su granulometría y de su conexión hidráulica entre otras capas de contacto de mayor permeabilidad (Meléndez, et al, 2011).

La zona de recarga principal del agua subterránea de la región la constituyen las elevaciones topográficas de mayor elevación, las cuales rodean por la parte sureste y suroeste en forma semicircular el caserío San José El Zompopo, la Hacienda Santa Rosa y el cantón y caserío Cujucuyo, con los cerros de Camones, El Sillón o El Sapo. A su vez, desde la parte noreste hasta el noroeste se elevan cerros como El Amatillo, Las Colimas, Pelón, El Carmen, Rincón del Gato, El Vainillo, Casaca, El Garrobo y Loma de Cuchilla o La Pedrera; grupos de elevaciones topográficas que forman una microcuenca hidrológica aislada con sus propias condiciones hidrogeológicas independientes. En la parte sureste y suroeste se forman dos microcuencas y se origina un drenaje superficial y un drenaje subterráneo en forma dendrítica, que se inicia prácticamente en la parte alta sur, modificando su gradiente hidráulico y direcciones principales de descarga, refiriéndose en el presente caso al drenaje de dirección noreste y noroeste predominante en la microcuenca hidrológica de las quebradas El Almendro y del Muerto las cuales delimitan en forma lateral el sitio del relleno sanitario, como se ve en las líneas de flujo en la Figura 1.3 (Meléndez, et al, 2011).

El drenaje subterráneo en los cerros y lomas antes mencionadas se inicia cuando el resto del agua lluvia que se infiltra en el suelo y se almacena en las formaciones geológicas superficiales porosas poco permeables, origina un drenaje gravitacional subterráneo en forma dendrítica a través de las formaciones geológicas de baja permeabilidad en su parte superficial. Parte del agua que drena gravitacionalmente es absorbida y almacenada en delgadas capas porosas, circulando por dichas capas originando horizontes de agua dispersos retentivos de medianos a bajos rendimientos (véase la Figura 1.3) (Meléndez, et al, 2011).

Otra parte del agua que drena gravitacionalmente es desviada y forzada a aflorar cerca de la superficie, por cambios de permeabilidad en las capas y siguiendo la

morfología del terreno, formando manantiales o fuentes aisladas de medianos a bajos rendimientos. A este tipo de manantiales son a los que aflora en la parte sur del caserío San José El Zompopo en el cerro de Camones conocidos como los manantiales o fuentes como El Jute y La Lechera, un mayor porcentaje de agua que no se infiltra profundamente, ni se almacena, ni circula en las capas geológicas parcialmente fracturadas y fisuradas poco porosas de mayor espesor, por las cuales drena en su totalidad por los surcos de erosión hasta descargar cerca del cauce profundo del río principal no originando acuíferos con niveles freáticos continuos ni una zona de saturación de gran espesor (debido a que la capa subyacente constituye el basamento o piso impermeable del área), solamente grandes bolsones que almacenan acuíferos regionales o zonales de alto gradiente hidráulico y sin una buena factibilidad de aprovechamiento (Meléndez, et al, 2011).

En las extensas llanuras de las microcuencas formada por las quebradas El Almendro y El Muerto, que delimitan el terreno del relleno sanitario que recibe la descarga subterránea proveniente de la parte alta de los cerros y lomas del área, el agua se almacena y circula en las capas geológicas superficiales y poco profundas parcialmente fracturadas y fisuradas de mayor espesor, formando acuíferos con niveles freáticos intermitentes y una zona de saturación de mediano espesor, con diferentes características hidrogeológicas y propiedades hidráulicas debido a las formaciones geológicas siempre antiguas de baja a nula permeabilidad (acuífero regional con poca factibilidad de explotación en forma adecuada) (Meléndez, et al, 2011).

En las capas de epiclástitas volcánicas y piroclástitas basálticas con una facies aislada de lapillis de pómez en contacto con capas de epiclástitas volcánicas fluviales, de porosidad media baja y permeabilidad baja a media, se forma una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad, en la que por sus intersticios se almacenan y circulan acuíferos de medianos a bajos rendimientos en las capas que componen la zona saturada de un mediano espesor y que constituyen la capa geológica principal (Meléndez, et al, 2011).

La dirección del flujo subterráneo en el área total (20 km²) considerada por los autores del estudio de impacto ambiental, tiene una dirección noreste predominante y

un gradiente hidráulico mayor del 0.05. La profundidad del nivel freático intermitente del acuífero superficial existente en el caserío San José El Zompopo y el caserío San Jacinto, con una dirección noreste predominante, se encuentran entre 3.50 m y 10.0 m (11.48 pies y 32.80 pies) de profundidad dependiendo de los cambios topográficos y de permeabilidad local, alto gradiente hidráulico, de la subsidencia del nivel freático en la estación de verano y los cambios de permeabilidad locales (Meléndez, et al, 2011).

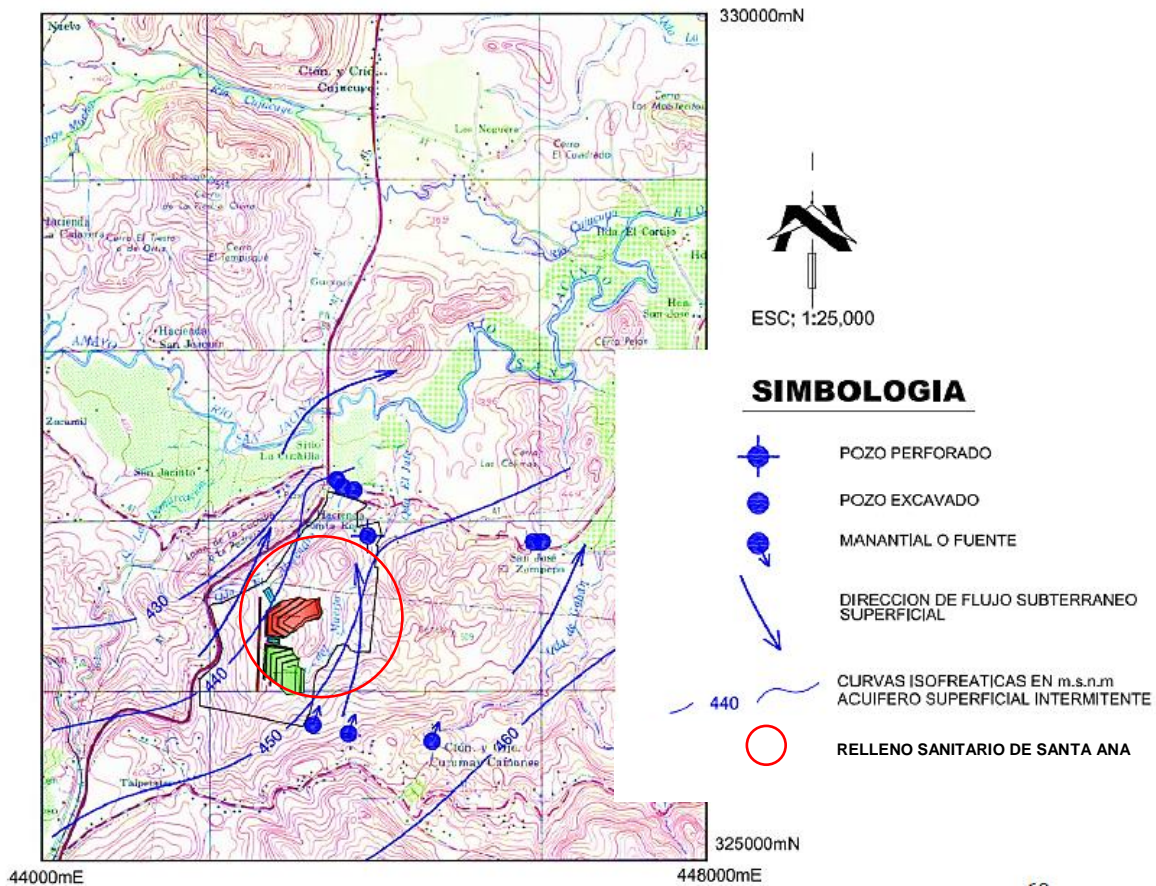


Figura 1.3 Hidrología superficial, curvas isofreáticas y dirección del flujo subterráneo en la zona del relleno sanitario de Santa Ana. Fuente: Meléndez, et al, (2011).

1.1.3.5 Clima

La zona de estudio está ubicada en el trópico y está localizada en la zona climática de Sabana Tropical caliente o tierra caliente (según la Clasificación climática de

Köppen). Por lo tanto cuenta con un clima cálido semihúmedo que presenta dos estaciones claramente diferenciadas: la estación seca (de noviembre a mayo) y la estación lluviosa de (mayo a noviembre) (Meléndez, et al, 2011).

A la vez la zona se caracteriza por una temperatura media anual de 24°C y que oscila alrededor de los 17 °C como mínima y 34 °C como máxima, aunque en ocasiones las temperaturas máximas suelen rebasar los 35 °C, ya que es una ciudad con un clima cálido. Además cuenta con una humedad relativa anual de entre 70% y 75% (Meléndez, et al, 2011).

En la zona predominan los vientos del suroeste y oeste tanto durante la estación seca como durante la estación lluviosa; con una velocidad anual de 7.8 km/h (Meléndez, et al, 2011).

1.2 Planteamiento del problema

Con el considerable aumento demográfico y el ritmo de vida actual, se han intensificado los fenómenos de consumo, que en virtud del tiempo y las necesidades de comunicación, han adaptado el ritmo de vida a los cambios; así como la necesidad de comunicación impuesta por los cambios tecnológicos; han aumentado la generación de basura, principalmente en plásticos de un solo uso, y materiales no reciclables, materiales de empaque y embalaje y RAEE, que en El Salvador se desechan conjuntamente con restos orgánicos, textiles y otros domiciliarios. Esta situación toma relevancia debido a que no existen leyes específicas referentes a la forma en que se recolecta y se dispone de la basura según su tipo. Generalmente, las municipalidades cuentan con servicios de recolección y transporte de desechos desde su punto de origen hasta los lugares de disposición final autorizados (rellenos sanitarios), y ya ahí pasan por filtros poco rigurosos para la separación de los residuos peligrosos de la basura común.

Asimismo se conoce que los aparatos electrónicos están compuestos de una variedad de materiales, incluidos metales, por lo que es incorrecto su desecho junto a la

basura común, ya que la descomposición de sus materiales se convierte en el mecanismo de liberación de metales pesados, que depositados de forma inadecuada pueden causar riesgos a la salud, como el arsénico, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, plomo, selenio, níquel, zinc, cobre, entre otros. Según Quinteros, Ramírez y Ramos (2013), las pilas alcalinas compuestas de Zinc y de Óxido de Manganeso, son una de las opciones más empleadas en El Salvador en cuanto a prestaciones de alto rendimiento en este tipo de dispositivos. La mayor proporción de materiales contenidos en las pilas son solubles en los lixiviados que se producen en los rellenos sanitarios, dando lugar a una potencial fuente de contaminación por metales pesados en el ambiente circundante.

Debido a que en El Salvador el único tratamiento que se le da a la basura es enterrarla, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas y suelos por los lixiviados generados, crece. Con ellos pueden darse fenómenos de transporte de metales pesados, que podrían acumularse en los suelos cercanos y permitir su ingreso a la cadena trófica por absorción en las plantas o en cultivos de consumo, así como la migración a los mantos freáticos y otros impactos ambientales generados por las actividades directas de un relleno sanitario, como la disminución de las superficies de suelo disponibles para infiltración de aguas lluvias (menor recarga acuífera); ruido causado por la maquinaria de trabajo y contaminación del aire, con los gases liberados.

El relleno sanitario situado en Santa Ana inició operaciones en el año 2014 con capacidad para recibir en promedio 300 toneladas de basura/día y una vida útil de 5 años. En marzo de 2018 se inauguró una segunda fase que le aseguraba 5 años más de servicio y recibiría aproximadamente 38,000 toneladas de desechos en ese lapso. Actualmente recibe los desechos sólidos de empresas particulares y trece municipalidades: doce del departamento de Santa Ana (Chalchuapa, Coatepeque, El Congo, El Porvenir, Masahuat, Metapán, San Antonio Pajonal, San Sebastián Salitrillo, Santa Ana, Santa Rosa Guachipilín, Texistepeque y Santiago de La Frontera) y El Refugio, perteneciente a Ahuachapán. A diario, el relleno recibe en promedio

de 250-300 toneladas de basura (Jefe de operaciones Relleno Sanitario de Santa Ana, comunicación personal, abril 3 de 2019).

Previo al inicio de operaciones del relleno sanitario, los desechos sólidos del departamento tenían otros destinos, controlados y no controlados (otros rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto). En la misma zona, a más o menos 1 km de distancia, antes existía el botadero a cielo abierto de Camones, clausurado en 2007. Pese a eso y contra la ley, se ha continuado haciendo uso del botadero. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) calculaba para el año 2013, que había aproximadamente 51,000 m³ de basura depositada a cielo abierto (La Prensa Gráfica, 2013, párr. 7 y 9).

Además según el anuario estadístico 2017 del MARN, el relleno sanitario de Santa Ana es de los más notables en cuanto a la cantidad de desechos sólidos que recibe; al municipio homónimo se le conoce como el tercer mayor generador de basura en el país (sólo superado por San Salvador y La Libertad), con aproximadamente 83,007.38 toneladas en el año 2017.

Por consiguiente se consideró conveniente que la investigación realizada tuviera como resultado identificar la posibilidad de presencia y en ese caso, la cuantificación de metales pesados; Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en aguas superficiales, subterráneas y suelos, consecuencia de la inadecuada disposición de RAEE.

1.3 Hipótesis de investigación

Existe incidencia por parte de los desechos que se depositan en la instancia del Relleno Sanitario de Santa Ana, respecto a la presencia de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en las zonas aledañas a éste, específicamente para las matrices suelo, agua superficial y agua subterránea.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar la concentración de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en zonas aledañas al relleno sanitario de Santa Ana, en matrices de agua superficial, agua subterránea y suelo para conocer su estado en función de los usos potenciales de estos recursos en el área de estudio a través de la aplicación de espectroscopía de absorción atómica

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Cuantificar los niveles de concentración de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica, para establecer los niveles presentes de estos elementos en las matrices de agua superficial, agua subterránea y suelo analizados.
- b. Contrastar los resultados obtenidos con estándares de calidad nacionales e/o internacionales para los posibles usos potenciales de los recursos agua superficial, agua subterránea y suelo con el fin de establecer el cumplimiento de estos parámetros en la zona de estudio.
- c. Realizar un inventario de cargas potencialmente generadoras de contaminación al subsuelo mediante la aplicación de la metodología POSH (Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically), a partir de la identificación y caracterización de las fuentes contaminantes localizadas en la subcuenca del río San Jacinto.

1.5 Justificación

A pesar de los avances, la gestión de desechos sólidos sigue siendo insuficiente, pues no considera la separación desde el origen, reducción de generación, reutilización y reciclaje, por lo que se vuelve necesario evaluar la posibilidad de afectación de los recursos circundantes a los rellenos sanitarios, que pueden derivar de la ruptura de la membrana impermeabilizante por la maquinaria de trabajo, así como de la sobrecarga de las lagunas de lixiviados en invierno.

En una zona donde previo a la existencia de un relleno sanitario, por años se utilizaban sitios ilegales de deposición de desechos, se hace obligatorio un estudio de caracterización de los sistemas más vulnerables a la contaminación, como los suelos lindantes, las aguas subterráneas y las aguas superficiales, con el fin de identificar zonas afectadas o fuentes de contaminación difusa.

Dado el interés de conocer el estado de los recursos naturales existentes, se cree idóneo desarrollar un estudio en esta zona, que permita la determinación de los niveles de concentración de los metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, aplicando las técnicas analíticas de espectroscopía de absorción atómica por llama y con horno de grafito. Los resultados obtenidos pueden ser contrastados contra otras investigaciones del mismo tipo realizadas en el área de interés (si las hay), para saber si se presenta repetitividad en los resultados que apoyen las hipótesis planteadas y poder decir si hay patrones observables en los valores obtenidos que ayuden a evidenciar los cambios o la constancia de los niveles de concentración de metales con el tiempo; así como también, deben estar disponibles para consulta de otros estudios más específicos, como de movilidad de metales, determinación de niveles fondo y niveles disponibles; que puedan estar asociados con distintas fuentes de contaminación.

La presente investigación pretende aportar una nueva fuente de referencia en la línea de investigación de estudios ambientales realizados en las zonas de influencia de los rellenos sanitarios del país, llevados a cabo por el CIAN.

1.6 Delimitación física del área de estudio

El relleno sanitario de Santa Ana está ubicado en la subcuenca del río San Jacinto, en el límite municipal de Santa Ana y Texistepeque. El paisaje general del terreno incluye pequeños valles en la zona norte y cerros en todo el perímetro suroeste, sureste y noreste, por lo que se consideró un área de influencia de aproximadamente 1,500 m de radio desde el relleno, delimitado por la geografía física de la zona: hacia el norte se ubican los cerros El Tempisque y El Tiesto; al noreste el cerro Las Colimas y el Cerro de Camones; y al sureste el Cerro El Nispero (Figura 1.4). El área delimitada circunscribe los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto.

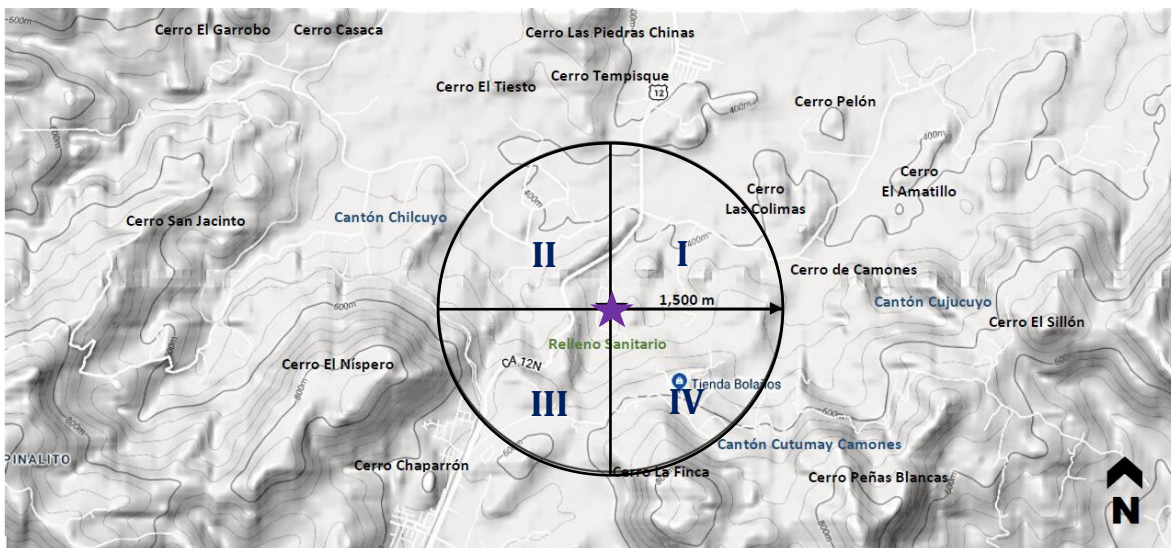


Figura 1.4 Relieve aproximado del área de influencia delimitada por un radio de 1,500 m alrededor del relleno sanitario. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales obtenidas de Google Maps y CNRcloud.

Se dividió la zona en cuatro cuadrantes imaginarios (Figura 1.4). Los cuadrantes III y IV comprenden la zona de los cerros El Nispero y La Finca, que se elevan sobre los 800 msnm dispuestos en una especie de semicírculo junto con el cerro Chaparrón y Peñas Blancas en el perímetro sur del relleno (405 msnm aproximadamente). Los cuadrantes II y III incluyen la línea de cerros sobre los que serpentea la carretera CA12, que funciona como parteaguas y deja al relleno en una hondonada en la que el posible arrastre de contaminantes con la escorrentía superficial no tiene incidencia hacia el otro lado de la carretera. El relleno está delimitado al este y al oeste por

dos quebradas (El Almendro y El Muerto) cuyas aguas corren en dirección noreste, hacia el río San Jacinto. En los cuadrantes I y II se extiende un valle que se interrumpe con los cerros de Camones, Las Colimas, Pelón y El Amatillo al noreste; El Tempisque y El Tiesto al Norte; y con los cerros San Jacinto, Casaca y Garrobo al noroeste.

En el valle norte, en las inmediaciones del relleno, se circunscriben los caseríos San José El Zompopo (cuadrante I) y San Jacinto (cuadrante II). Los pobladores cuentan con una red de suministro de agua potable por gravedad y además es común la existencia de pozos excavados (individuales o comunales) como alternativa de abastecimiento. Estos pozos se recargan de un acuífero superficial de poca profundidad, identificado en la zona de San José El Zompopo y San Jacinto. La zona de recarga principal de esta red subterránea es la parte alta de los cerros al sur del relleno sanitario. El agua lluvia que se infiltra, se mueve en forma dendrítica por los suelos de baja permeabilidad de la zona; y la escorrentía superficial baja por los diferentes drenajes naturales, incluidas las quebradas El Almendro y El Muerto (Meléndez, et al, 2011).

Las comunidades ubicadas en el cuadrante III y IV (cantón y caserío Cutumay Camones) se encuentran fuera de la incidencia del movimiento de una posible pluma de elementos contaminantes, debido a su ubicación sobre la parte alta de los cerros al sur del relleno. Los pobladores de este cantón se abastecen del manantial El Jute que aflora en la zona alta del cerro de Camones.

Considerando todo lo anterior, se definió como el área de estudio principal, el valle al norte del relleno, en los cuadrantes I y II, zona de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, ya que es la zona cuyos pozos se abastecen del acuífero superficial potencialmente afectado y cuya zona de recarga está directamente intervenida en la parte baja por el relleno sanitario; lo que implica que el flujo de agua que se drena de forma superficial y subterránea desde la parte alta de los cerros ubicados en el perímetro sur, podría percolar, solubilizar y arrastrar elementos no deseados hasta el acuífero superficial poco profundo de la zona, cuyas aguas se mueven pri-

mordialmente en dirección noreste. Además, en una posible sobrecarga de las lagunas de lixiviados, el líquido podría verterse y mezclarse con el caudal de la quebrada más próxima (El Almendro) y bajar en dirección del caserío San José El Zompopo, hasta el río San Jacinto.

1.7 Limitaciones y alcances de la investigación

1.7.1 Limitaciones de la investigación

La planificación y realización de este estudio en los alrededores del relleno sanitario de Santa Ana, consideró una serie de supuestos de los cuales dependería la obtención de los resultados esperados en el tiempo planificado. Igualmente, cada uno de estos supuestos llevó asociado factores de riesgo de tipo humano, climatológicos, de tiempo, entre otros, que están latentes en el proceso de ejecución de todo proyecto de investigación. Un resumen de éstos, así como las estrategias planeadas como parte de las precauciones previstas a implementar y que permitieron el logro de los objetivos de la investigación se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Supuestos y riesgos de la investigación

Supuestos	Riesgos	Precauciones
Contar con el apoyo técnico y de seguridad para el acceso a la zona de estudio y contar con las condiciones óptimas para la toma de muestras de las matrices a investigar	Que por condiciones de seguridad o ubicación geográfica se dificulte el acceso a los puntos de muestreo previamente seleccionados para la toma de la muestra	Implementar un plan alternativo de selección de puntos de muestreo de las matrices a investigar y/o modificación del número de puntos de muestreo
Contar con el equipo para la penetración y extracción de la muestra suelo a diferentes profundidades y a nivel superficial de acuerdo a los objetivos de la investigación	Que por las características geológicas de la zona sea difícil la extracción de muestras con el equipo del que se dispone para muestreo de suelos	Aplicar alternativas equivalentes para la penetración y extracción de la muestra de suelo, ajustar el número de muestras o ajustar las profundidades de penetración en el suelo utilizando otros equipos
Contar con el funcionamiento óptimo de equipos y accesorios para la toma de muestra, pretratamiento de las muestras y su análisis químico, así como con la disponibilidad de los técnicos especialistas del manejo y operación de éstos, según los objetivos planteados	Fallas en el funcionamiento del equipo para análisis químico y pretratamiento de las muestras, así como cruce de actividades de los técnicos del CIAN con otros proyectos de investigación.	Aplicar el análisis químico y/o el pretratamiento de las muestras con otras técnicas analíticas, disponibles en el CIAN o en otros laboratorios dentro de la UES u otras instituciones, que tengan la misma sensibilidad y aplicabilidad requerida para los objetivos de la investigación, así como la gestión de asesoría de estos otros laboratorios.

- a. El monitoreo de los niveles de concentración de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en la zona de influencia del relleno sanitario de Santa Ana en las matrices de agua subterránea está limitada en su mayoría a la información proveniente del muestreo de pozos excavados habilitados en la zona de estudio, así como a la existencia de solo dos pozos perforados, ubicados en el terreno del relleno sanitario de Santa Ana.
- b. Para establecer los perfiles de concentración de los metales Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en suelos, por el tipo de geología y características propias del tipo de suelo de la zona, su estudio fue limitado a la inclusión de solo dos puntos de muestreo a profundidad por la falta de equipo adecuado para realizar las perforaciones en los suelos de la zona.
- c. La realización del inventario de cargas contaminantes según la metodología propuesta por Foster, Hirata, Gomes, D'Elia y Paris (2003) incluyó el levantamiento de todas las fuentes individuales con potencial de generación de contaminación al subsuelo, para lo que se requería de la identificación por medio de distintas fuentes, de las actividades desarrolladas dentro de la subcuenca del río San Jacinto; teniendo como principal limitante el acceso a información hidrogeológica de fuentes secundarias.

1.7.2 Alcances de la investigación

Como resultado de la adaptación a las condiciones reales, la superación de los factores asociados a los supuestos y riesgos considerados (véase la Tabla 1.2), y la puesta en marcha de las alternativas estratégicas de precaución que se implementaron al momento de ejecutar el plan de trabajo del proyecto, la investigación tuvo los siguientes alcances:

- a. La zona de estudio se delimitó en función de la dirección del flujo de agua subterránea, tomando en cuenta la fisiografía y el relieve del área de influencia del relleno sanitario.
- b. Se generó un inventario de pozos artesanales, pozos perforados y manantiales, así como de ríos y quebradas para la zona de estudio delimitada en

la investigación.

- c. Se diseñó una metodología para la selección de los puntos de muestreo de agua superficial, agua subterránea y suelo, en el área de influencia del relleno sanitario considerado en el estudio.
- d. Se determinaron los niveles de concentración de Cd, Ni, Pb y Zn en matrices de agua superficial, agua subterránea y suelo, por la técnica espectroscópica de absorción atómica con llama y horno de grafito para la zona de estudio.
- e. Además de la determinación cuantitativa de la concentración en aguas y suelos de los metales anteriormente mencionados, se midieron otros parámetros en suelos como pH, textura, fósforo y potasio; y pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos en aguas, necesarios para poder asociar los resultados obtenidos, con la ocurrencia de los metales pesados en las matrices estudiadas.
- f. Se realizó un inventario de cargas potencialmente generadoras de contaminación al subsuelo en la subcuenca del río San Jacinto, basado en la recolección, análisis y síntesis de información socioeconómica obtenida de fuentes primarias y secundarias, para la identificación, clasificación como lineal, puntual o difusa, la valoración del potencial de contaminación de las cargas individuales como reducido, moderado y elevado, la localización de las mismas y su representación a través de un mapa dentro de la subcuenca del río San Jacinto.

1.8 Antecedentes

La era tecnológica ha significado grandes mejoras en la calidad de vida de las personas, sin embargo también ha dado resultado a nuevos efectos que perturban el medio ambiente, como lo son los residuos producidos y el hecho de que no se les da una adecuada disposición.

En El Salvador 2,228 toneladas de computadoras son desechadas al año, de las cuales 479 toneladas va a disposición final. En 2010 se consumieron, 1,097,099 de toneladas en televisores y 8,316,150 de líneas de telefonía móvil (MARN, 2017).

En la actualidad, El Salvador cuenta con documentos técnicos para la Gestión Integral de Residuos Sólidos bajo el marco legal del Art. 52 de la Ley de Medio Ambiente, el cual establece lo siguiente:

“Art. 52 El ministerio promoverá, en coordinación con el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, Gobiernos Municipales y otras organizaciones de la sociedad y el sector empresarial, el reglamento y programas de reducción en la fuente, reciclaje, reutilización y adecuada disposición final de los desechos sólidos. Para lo anterior se formulará y aprobará un programa nacional para el manejo integral de desechos sólidos, el cual incorporará los criterios de selección de los sitios para su disposición final.”

En este sentido y dando respuesta al problema nacional del manejo de los desechos sólidos, en mayo de 2010 el entonces presidente de la República de El Salvador, Mauricio Funes Cartagena presentó el Programa Nacional para el Manejo Integral de los Desechos Sólidos (MIDS), que está comprendido por 3 planes:

- a. Plan Nacional de Sensibilización para MIDS, coordinado por el Ministerio de Medio Ambiente en conjunto con el Ministerio de Salud, gobiernos municipales y otras organizaciones de la sociedad y el sector empresarial. Tiene como finalidad dotar de infraestructura para un adecuado tratamiento y disposición final de los desechos sólidos, por medio de la construcción y ampliación de rellenos sanitarios y plantas de compostaje y recuperación.
- b. Plan Nacional de Recuperación de Desechos Sólidos, busca fomentar la participación de la empresa privada y los gobiernos locales, en actividades de gestión integral de los desechos sólidos, promoviendo la reducción, reutilización segregación, recolección selectiva y aprovechamiento, como parte de su responsabilidad en la generación de éstos.
- c. Plan Nacional para el Mejoramiento del Manejo Integral de los Desechos Sólidos, tiene como propósito promover cambios de actitudes y comportamientos

en la población, que generen compromisos y responsabilidades en la gestión integral de los desechos sólidos, mediante la práctica de las 3Rs: Reducir, Reutilizar y Reciclar.

A este plan se adjuntan lineamientos que incorporan los criterios de selección de sitios de acopio y disposición final, como es el caso del documento: *“Lineamientos técnicos para el adecuado manejo de los residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos”*. En dicho documento se presentan lineamientos para la gestión de los RAEE en los distintos lugares de recuperación, tratamiento y disposición final; además de cumplir con todas las normas ambientales, sanitarias y otras establecidas por el Estado.

Además, se cuenta con un Acuerdo Regional Centroamericano que prohíbe la importación de desechos peligrosos a la región, de acuerdo a lo establecido en el artículo 11 del Convenio de Basilea.

Sin embargo, la situación actual no refleja a cabalidad lo que los documentos técnicos y Planes de Mejoramiento del Manejo Integral de Sólidos postulan, esto posiblemente debido a diversos factores, entre ellos intereses económicos de instituciones que manejan los desechos, falta de concientización de la población e instituciones privadas, falta de leyes regulatorias especificadas a la separación y disposición adecuada, etc.

En cuanto a la normativa oficial que regula el manejo de sólidos se tiene el “Reglamento Especial para el Manejo Integral de los Desechos Sólidos”, el cual promueve a las instituciones competentes el cumplimiento obligatorio de diversos criterios de selección de sitios de disposición, permisos ambientales, tratamiento, transferencia y disposición final de los desechos, entre otros.

Con respecto al área de ubicación del relleno sanitario de Santa Ana se han realizado los siguientes estudios:

- a. ***Evaluación y caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas superficiales y subterráneas para el consumo humano del sector de influencia de Mazacúa del Cantón Cutumay Camones.*** Trabajo de grado pre-

sentado por Chicas Murillo, H. J. y Velásquez, D. A., Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Universidad de El Salvador, 2011. El documento presenta un análisis de calidad del agua del manantial de Mazacúa y de la red de suministro de agua potable, basado en catorce parámetros fisicoquímicos, tres microbiológicos y el Índice de Calidad del Agua (ICA). Los valores obtenidos se confrontaron con la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.35.01:05. Los catorce parámetros fisicoquímicos analizados se encontraron conformes con la norma y los microbiológicos muy por encima de los valores permisibles. El ICA clasifica como regular al afloramiento de agua estudiado, lo que indica que es aceptable para consumo humano pero se encontraría en un punto crítico en el que requeriría de intervención para la recuperación y preservación de la calidad del agua. La red de suministro fue evaluada con trece parámetros en total, diez fisicoquímicos y tres microbiológicos; encontrándose nuevamente que los valores obtenidos para el análisis fisicoquímico, estaban todos dentro de los límites permitidos, no así el análisis de Coliformes Totales, Coliformes Fecales y *Escherichia Coli*.

- b. Reconocimiento hidrogeológico de la zona norte del departamento de Santa Ana y área aledaña del departamento de Chalatenango.** Trabajo de grado presentado por López Araujo, D. R. y Retana Peña, J. R., Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, 2007. El trabajo presenta la descripción geológica (composición y formaciones predominantes) de la zona de estudio, la identificación de las unidades hidrogeológicas correspondientes, los acuíferos de la zona (confinados y libres), su extensión, productividad aproximada y nivel freático.
- c. Estudio de impacto ambiental del proyecto: “Construcción del relleno sanitario”.** Estudio de impacto ambiental realizado por un equipo consultor designado por la Corporación de Servicio Integral, S.A. de C.V. e integrado por los profesionales Meléndez Avalos, C. E. Ing., Zavala Velásquez, C. A. Ing., Ávalos de Jule, E. Lic., Estevez, J. A. Ing. y Quintanilla, F. M. Lic., para el proyecto de construcción del relleno sanitario de Santa Ana. En el documento se especifican los métodos de impermeabilización de la laguna de lixiviados y de las celdas pa-

ra disposición de desechos, así como el acomodo de la red de drenaje de aguas lluvias, la remoción del cauce natural de la quebrada El Almendro y la ubicación de las tuberías de circulación de gases, además de ahondar en detalles de diseño estructural de las oficinas, el arco de entrada y las calles de acceso internas. También se adjunta el Programa de Manejo Ambiental (PMA) y el cronograma de ejecución de las medidas ambientales, con las medidas de mitigación y/o compensación y el programa de implementación de las medidas ambientales, el programa de monitoreo y el plan de contingencia.

1.8.1 Otros trabajos en El Salvador

El CIAN, junto con la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos (EI-QIA) de la UES, ha realizado anteriormente dos estudios sobre la evaluación y caracterización de metales pesados en los alrededores de los rellenos sanitarios de MIDES³ y de Sonsonate. A su vez, en el año 2014 se realizó como tesis de maestría para la UES, un estudio sobre la evaluación de la concentración de plomo en suelos y aguas subterráneas, así como la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, haciendo uso del método POSH y GOD en la zona de Sitio del Niño, San Juan Opico. El resumen de los resultados obtenidos se presenta a continuación.

- a. *Evaluación de contaminación por metales pesados en la cuenca baja del río San Antonio, municipio de Nejapa.*** Trabajo de grado presentado por Quinteros Escalante, H. E. D., Ramírez Morataya, B. J. G. y Ramos Orantes, J. A., Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2013. La investigación fue realizada en la zona del acuífero de Nejapa, delimitada por la cuenca del río San Antonio, con el objetivo de determinar las concentraciones de los metales pesados Ni, Pb, Cd y Zn en las matrices agua superficial, agua subterránea, suelo, sedimento de río y biomasa (maíz, caña de azúcar y pipián). El análisis cualitativo y cuantitativo de los metales pesados se realizó con la técnica de análisis fluorescencia de rayos X por reflexión

³ Acrónimo de la empresa Manejo Integral de Desechos Sólidos, responsable del relleno sanitario más grande de El Salvador y que recibe la mayor parte de los desechos generados en el área metropolitana de San Salvador y otros municipios.

total (TXRF). Las concentraciones de los metales Ni, Pb y Zn para agua superficial y suelo se incrementaron en las zonas intermedias y de desembocadura del río. Para agua subterránea, las concentraciones de las muestras analizadas presentaron mayor concentración en la zona de inicio del recorrido del río San Antonio. Los valores de concentraciones de plomo en las muestras de biomasa (caña de azúcar, maíz y pipián), agua superficial y agua subterránea contrastadas versus el CODEX alimenticio y la normativa de agua potable de la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) respectivamente, demostró que ninguna de las muestras analizadas es apta para el consumo humano.

- b. *Determinación de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.*** Trabajo de grado presentado por Mendoza Magaña, L. M., Rivas, J. R., y Villalobos Alfaro, K. L. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2017. La investigación consistió en la determinación de los niveles de concentración de los metales pesados cadmio, níquel, plomo y zinc en matrices de agua superficial, sedimento, agua subterránea, biomasa y suelo, en la zona de influencia del relleno sanitario de la región metropolitana de Sonsonate, ubicado en el Cantón Salinas de Ayacachapa, municipio de Sonsonate, realizada para los meses de abril y mayo del año 2016. Las concentraciones de metales pesados se midieron con las técnicas TXRF y GFAA. Los resultados obtenidos mediante la técnica de TXRF para Cd se reportan en todas las muestras bajo el límite de detección, mientras que para Pb no se realizaron con esta técnica. Con GFAA se cuantificaron solamente níquel y plomo, obteniéndose para muestras de agua y biomasa valores bajo el límite de detección del método (aproximadamente 0.000 ppm de Ni y 0.000 ppm de Pb). Las muestras de las matrices agua superficial, sedimento, agua subterránea, biomasa y suelo, no sobrepasaron los límites permitidos por las normas de referencia para los metales pesados. De las muestras de biomasa, solo una (ayote), sobrepasó el límite permitido por el CODEX Alimentario.

c. ***Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico.*** Tesis de maestría presentada por Payes Hernández, J. E., Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2014. Como parte de esta investigación se realizaron mediciones de concentración de plomo en muestras de suelo y de agua de pozos excavados en el cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad. Las mediciones de plomo en suelo revelaron concentraciones en el rango de 108 a 339481 mg Pb/kg de suelo, algunos de los valores fueron superiores a los límites que el MARN consideraba al momento de realización de la investigación como ambientalmente permisibles. Los resultados de los análisis en agua de pozos excavados no sobrepasaron el valor de referencia de concentración de plomo en agua, especificada en la Norma Salvadoreña Obligatoria vigente al momento del estudio (NSO 13.07.01:08, AGUA. AGUA POTABLE. Segunda actualización). En el sitio de muestreo donde se encontró la máxima concentración de plomo en suelo, se perfilaron verticalmente las concentraciones de plomo y se confirmó la evolución de una pluma contaminante en el subsuelo. Se estimó el avance vertical del plomo, encontrando concentraciones de 339481 a 1095 mg Pb/kg de suelo, en las condiciones de pH y de óxido-reducción analizadas al momento de efectuar el muestreo. Se empleó una metodología propuesta por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) que, mediante un inventario de fuentes potenciales de contaminación y su respectiva caracterización relaciona las cargas potencialmente contaminantes al subsuelo con la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se evaluó mediante la metodología GOD (G: Grado de Confinamiento Hidráulico, O: Ocurrencia del Substrato Suprayacente y D: Distancia al Nivel del Agua Subterránea) obteniendo una clasificación de vulnerabilidad de alta, media y baja. Se encontró que la zona de vulnerabilidad alta corresponde a las márgenes del río Sucio, el área de vulnerabilidad media se ubica en el cantón Sitio del Niño y la región de vulnerabilidad baja se encuentra hacia el norte del cantón Sitio del Niño.

El mapa de los peligros potenciales de contaminación al agua subterránea por actividad industrial puntual, mostró que la mayor parte de las empresas se ubicaron en la zona de vulnerabilidad media. Se determinó que las zonas de riesgo alto de contaminación por plomo al sistema de flujo de agua subterránea subyacente al sitio de estudio, se encuentran en el área de vulnerabilidad media. El estudio concluye que los suelos de la zona de estudio, en sitios que sobrepasan límites máximos permisibles, constituyen una amenaza a la salud humana por la potencial contaminación del agua subterránea subyacente de la cual dependen fuentes específicas de suministro de agua subterránea para consumo humano.

1.8.2 Otros trabajos en Latinoamérica

Son muchísimas las investigaciones realizadas por las distintas universidades y centros de investigación en América Latina relativas a la contaminación y resultados adversos ocasionados por el vertido de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios y botaderos, así como el grave problema que representa a la salud humana la acumulación de metales pesados en suelos agrícolas (y posterior transferencia a las plantas y cultivos) y en aguas, provenientes de lixiviados. En este apartado se cita una mínima porción de la gran cantidad de estudios de este tipo que producen las casas de estudios latinoamericanas, con el fin de evidenciar la importancia de la realización de investigaciones sobre los problemas ambientales generados por la deposición de desechos sólidos.

- a. *Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México.*** Por Robles-Martínez, F., Morales-López, Y., Piña-Guzmán, A. B., Espíndola-Serafín, O., Tovar-Gálvez, L. R., y Valencia-del Toro, G., para la revista *Universidad y Ciencia* (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), volumen 27, número 2, 2011. Se midió el pH y la concentración de Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Hg, Se y Ba en los lixiviados generados en las cuatro macroceldas, operadas por etapas desde 1985, que componen el relleno sanitario Bordo Poniente, y se realizaron análisis de varianza de uno y dos factores a los

resultados obtenidos para determinar si había diferencia entre las celdas donde se colocó la geomembrana en relación a aquellas que no contaban con esta película plástica. La concentración de metales pesados se comparó con los límites máximos establecidos en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. En los puntos muestreados se encontró que las concentraciones de los elementos analizados no fueron mayores a los límites establecidos por la norma oficial mexicana. Los análisis estadísticos mostraron que no hubo diferencia significativa en el pH y en la concentración de metales relacionada con la presencia o ausencia de geomembrana.

- b. Contaminación por metales pesados en sedimentos de Quebrada Azul (Río Azul, Costa Rica).** Por Mora, R. y Mora, R., para la *Revista de Ciencias Ambientales* (Universidad Nacional de Costa Rica), volumen 29, número 1, 2005. Se realizó un muestreo de sedimentos fluviales en la quebrada Azul, que drena directamente el Relleno Sanitario de Río Azul, recogiendo la mayor parte de sus lixiviados. Las muestras se analizaron por medio de fluorescencia de rayos X, con el objetivo de determinar la concentración de algunos metales pesados y establecer el nivel de contaminación que presentan los sedimentos. La fracción fina de los sedimentos presentó las mayores concentraciones de metales pesados, por lo que puede considerarse como una guía y se sugiere su utilización en este tipo de estudios. Se utilizaron los procedimientos establecidos por la Swedish Environmental Protection Agency para establecer los niveles de contaminación de la quebrada, encontrándose que no existe contaminación por cobre, rubidio, ni estroncio; la contaminación por vanadio y manganeso es moderada y la contaminación por zinc es seria. El plomo y el mercurio no alcanzan aún las corrientes superficiales y se estima que se están manteniendo dentro de los límites del relleno. Se estimó que el cadmio, que no fue medido por la configuración del equipo, puede tener un comportamiento similar al del zinc.
- c. Estudio sobre la concentración de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos en lixiviados del relleno sanitario “San Nicolás” y en**

agua de pozos aledaños. Tesis de maestría presentada por Martínez Guerrero, R., Departamento de Fisiología y Farmacología, Universidad Autónoma de Aguas Calientes, 2007. En este trabajo se realizó un análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lixiviados provenientes del relleno sanitario “San Nicolás”, de los pozos de agua circunvecinos al relleno, así como de un bordo de agua localizado aproximadamente a 150 m del relleno, con el objetivo de establecer el grado de estabilización de la materia orgánica, el balance de nutrimentos, la concentración de tóxicos orgánicos, metales pesados y de agentes patógenos en los lixiviados del relleno sanitario “San Nicolás”, así como estudiar la posible infiltración de contaminantes al agua de los pozos aledaños, y determinar si se tiene dispersión de contaminantes provenientes del relleno sanitario “San Nicolás” hacia el agua superficial adyacente. Se efectuaron dos muestreos: uno en época de estiaje, en marzo del 2005, y otro posterior a las lluvias, en septiembre del 2005. Los parámetros fisicoquímicos evaluados en el relleno sanitario “San Nicolás”, en general, presentaron un aumento de aproximadamente más del doble en la temporada de lluvia respecto a la temporada de estiaje. Los metales pesados que se encontraron en mayor concentración en lixiviados fueron hierro (27.29 mg/l en estiaje y 36.92 mg/l posterior a las lluvias), aluminio (9.27 mg/l en estiaje y 2.48 mg/l posterior a las lluvias) y manganeso (1.48 mg/l en estiaje y 0.42 mg/l posterior a las lluvias), no obstante, las concentraciones de metales pesados en los lixiviados fueron bajas para un residuo de este tipo. De forma contraria, las determinaciones microbiológicas disminuyeron en la temporada posterior a las lluvias; probablemente esta disminución se haya debido al aumento de contaminantes y tóxicos en los lixiviados. Se observó un considerable grado de contaminación por materia fecal en temporada de estiaje (coliformes fecales 30 000 UFC/100ml). La mayor parte de las bacterias que se identificaron en los lixiviados de “San Nicolás” son patógenas oportunistas. Los pozos de agua no presentaron contaminación físicoquímica pero

se observó contaminación microbiológica. El bordo de agua cercano al relleno sanitario “San Nicolás” presenta un considerable grado de contaminación tanto fisicoquímica como microbiológica.

- d. ***Evaluación de la concentración de metales pesados como As, Cu, Cd, Hg y Pb en el botadero de Cancharani de la ciudad de Puno.*** Tesis de grado presentada por Torres Quispe, N. E., Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Altiplano (Perú), 2018. El trabajo se realizó con el propósito de determinar la concentración de As, Cd, Cu, Pb y el Hg en los suelos próximos al botadero de Cancharani y comparar con los Estándares de Calidad Ambiental para el Suelo. Los objetivos específicos fueron: a) Determinar el grado de contaminación por las concentraciones de los metales pesados (cadmio, cobre, plomo, mercurio y arsénico) en los suelos del botadero de Cancharani. Se graficó la distribución de concentración de los metales pesados en suelos, para lo que se realizó un muestreo de suelo en 9 puntos estratégicos a una profundidad de 40 cm, a diferentes distancias en los márgenes del botadero analizándose la concentración de los metales en cada punto por el método de GFAA y para la distribución se utilizó el modelo Kriging. Los resultados obtenidos para las concentraciones de los metales pesados Pb, Cd y Cu en los suelos del botadero de Cancharani sobrepasan los límites máximos permisibles, a excepción del As y Hg, que se encuentran dentro de los Estándares de Calidad Ambiental para un suelo agrícola. Sobre la distribución de metales se concluye que el cadmio, plomo, mercurio y cobre a medida que se alejan del centroide del botadero disminuyen los niveles de la concentración, a excepción del arsénico que aumenta su nivel de concentración a medida que se aleja del botadero. La investigación comprueba que el botadero de Cancharani está contaminando el suelo del lugar.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Generación de basura del departamento de Santa Ana

Los desechos se definen como materiales sólidos o semisólidos que son descartados por la actividad del hombre y la naturaleza, que no teniendo utilidad inmediata para su actual poseedor, se transforman en indeseables (Leiva, 2000).

Los residuos sólidos se clasifican en:

- a. Residuos sólidos urbanos.
- b. Residuos radioactivos.
- c. Residuos agrarios.
- d. Residuos hospitalarios.
- e. Residuos industriales.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los que se originan en la actividad doméstica y comercial de ciudades y pueblos. En los países desarrollados en los que cada vez se usan más envases, papel, y todo tipo de materiales desechables, la cultura de “usar y tirar” se ha extendido e implantado a todo tipo de bienes de consumo. Las cantidades de basura que se generan han ido creciendo hasta llegar a cifras muy altas. Los principales factores que han dado lugar a este problema son (Leiva, 2000):

- a. El rápido crecimiento demográfico.
- b. La concentración de la población en centros urbanos.
- c. La utilización de bienes materiales de rápido envejecimiento.
- d. El uso de envases sin retorno, fabricados con materiales poco o no degradables.

Los residuos producidos por los habitantes urbanos comprenden basura, muebles y electrodomésticos viejos, embalajes, y desperdicios de la actividad comercial, restos del cuidado de los jardines, la limpieza de las calles, etc. El grupo más voluminoso es el de las basuras domésticas (Leiva, 2000) El Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos (2007) estimaba una generación total de 270.56 toneladas de basura solo para el área urbana del departamento de Santa Ana, un 8.49% de la generación a nivel nacional.

La basura suele estar compuesta por:

- a. Materia orgánica: son los restos procedentes de la limpieza o la preparación de los alimentos junto con la comida que sobra.
- b. Papel y cartón: periódicos, revistas, publicidad, cajas y embalajes.
- c. Plásticos: botellas, frascos diversos, vajilla rota, etc.
- d. Metales: latas de aluminio, botes, envases, etc.
- e. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

En el año 2014 el relleno sanitario de Santa Ana fue el tercero a nivel nacional en la recepción de desechos, solo detrás de CAPSA y MIDES, como se muestra en la Figura 2.1. Ese mismo año el municipio de Santa Ana fue el responsable del 63.96% de los desechos generados en el departamento, la Tabla 2.1 detalla las toneladas depositadas por cada municipio. Esto es importante ya que es el municipio más densamente poblado del departamento homónimo (660.2 hab/km²) y el que concentra la mayor parte de la actividad industrial del mismo, por lo que los desechos generados no se reducen a RSU. Leiva (2000), apunta que la composición promedio aproximada de los residuos sólidos urbanos es: 58% materia orgánica y 42% materia inorgánica. La composición de la fracción inorgánica es; 2% aluminio, 2% vidrio, 11% plástico, 19% papel y 8% otros.

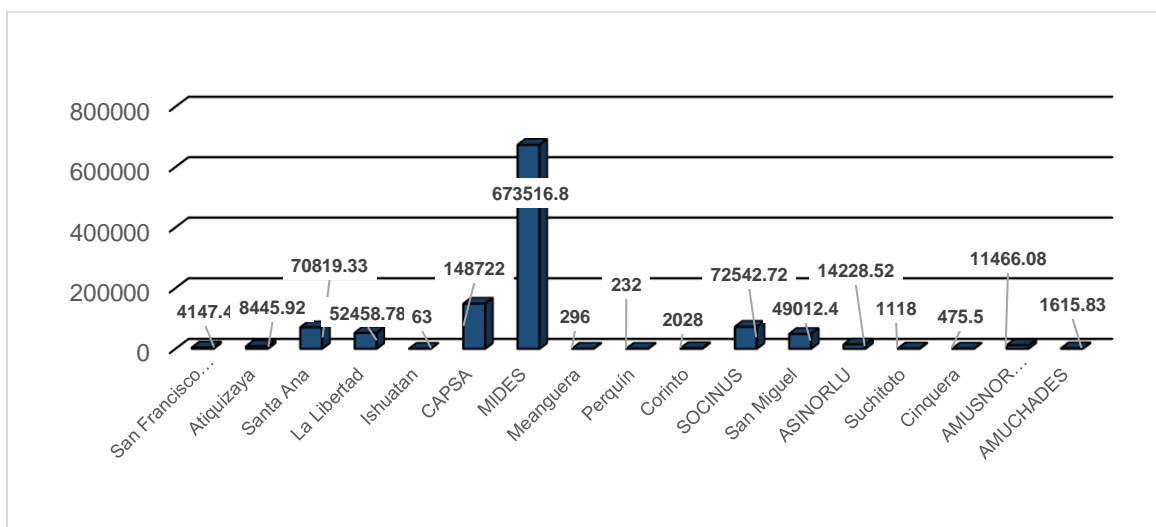


Figura 2.1 Toneladas totales de basura depositada en los rellenos sanitarios de El Salvador en el año 2014. Fuente: Adaptado de MARN (2017).

Tabla 2.1 Total de desechos depositados por municipio del departamento de Santa Ana en el año 2014.

Departamento	Municipio	Total depositado (ton/año)
Santa Ana	Candelaria de la Frontera	899.96
Santa Ana	Coatepeque	875.97
Santa Ana	El Porvenir	144.58
Santa Ana	San Sebastián Salitrillo	3,218.50
Santa Ana	El Congo	3,656.65
Santa Ana	Santa Ana	45,913.44
Santa Ana	Chalchuapa	8,200.77
Santa Ana	Masahuat	130.44
Santa Ana	Metapán	7,161.26
Santa Ana	San Antonio Pajonal	151.90
Santa Ana	Santiago de la Frontera	236.63
Santa Ana	Texistepeque	1,047.38
Santa Ana	Santa Rosa Guachipilin	150.45

Fuente: MARN (2017).

2.1.1 Evolución histórica de la generación de desechos en el municipio de Santa Ana

En la década de los años de 1970 al 1979, en la ciudad de Santa Ana había una población de más de 121,095 habitantes; se implementó el recoger los residuos de las vías públicas urbanas mediante el barrido manual. En ese entonces se recolectaban 15 toneladas de residuos sólidos al día (15,000 Kg=0.124 Kg diarios por persona). Para la década de los años 1980 al 1989 había una población de más de 160,382 habitantes. Para esta época se inauguró el botadero municipal en el cantón Cutumay Camones, se continuó con el sistema manual y se agregó un sistema mecánico en camiones especializados para tal fin. El procedimiento se iniciaba con la recolección de la basura por calles para luego ser recolectados en promontorios específicos o lugares señalados para tal efecto. Se recolectaba 30 toneladas de residuos al día (30,000 Kg=0.187 Kg diarios por persona). En la década de los años 1990 a 1999 había una población de más de 210,970 habitantes y se recolectaba un promedio de 62 toneladas de residuos sólidos al día (62,000 Kg=0.294 Kg diarios por persona). Según estudios de impacto ambiental realizados por la municipalidad en ese entonces, eran más de 60 toneladas de basura las que se producían cada día en la ciudad. En la década de los años 2000 al 2009 había una población de

más de 245,421 habitantes, y se recolectaba un promedio de 95 toneladas de residuos sólidos al día (95,000 Kg=0.387 Kg diarios por persona). En los años recientes, comprendidos entre 2010 al 2016, hay una población de más de 264,091 habitantes; y se calcula que se recolecta un promedio de 160 toneladas de residuos sólidos al día (160,000 Kg=0.606 Kg diarios por persona). Hacia el año 2019, con 270,413 habitantes se reporta una generación diaria de aproximadamente 350 toneladas (Toledo, 2017; Henríquez, 2019; Alcaldía Municipal de Santa Ana, s.f.), tal como se muestra en la Figura 2.2.

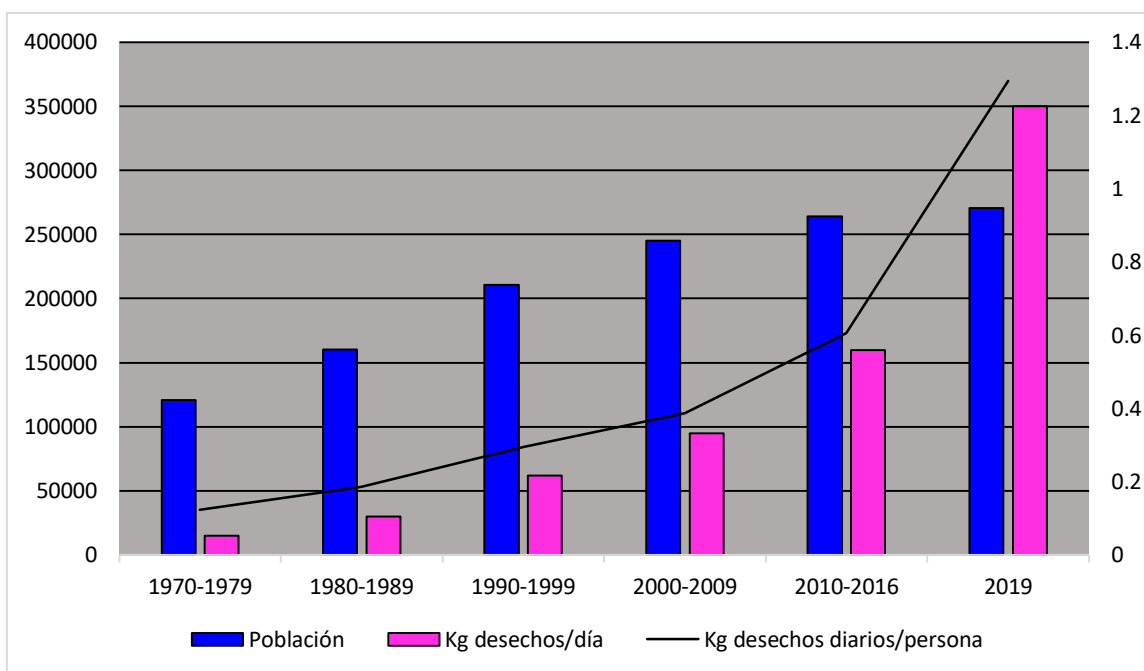


Figura 2.2 Crecimiento de generación de basura con el crecimiento poblacional de la ciudad de Santa Ana, El Salvador (1970-2019). Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Toledo (2017), Henríquez (2019) y el portal web de la Alcaldía Municipal de Santa Ana.

2.2 Composición general de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son productos muy complejos que, generalmente, incluyen numerosas partes y componentes: piezas metálicas y plásticas variadas, carcasas de plástico, madera o metal, tarjetas de circuitos impresos,

tubos de rayos catódicos, pantallas de cristal líquido, cables, pilas, baterías, componentes eléctricos y electrónicos, diversos fluidos, contrapesos de hormigón, cartuchos de impresión, motores eléctricos, etc.

Estas piezas y componentes están fabricados en materiales muy diversos y de diferente naturaleza. Básicamente, se trata de metales (férreos y no férreos), polímeros, vidrios y otros materiales (madera, caucho, cartón, etc.). Pueden contener más de 1.000 sustancias diferentes, que caen bajo las categorías de “no peligrosas” y “peligrosas”. Los elementos potencialmente peligrosos pueden representar un 3% de la composición total de los RAEE.

La proporción de cada uno de estos materiales dependerá del tipo de AEE en cuestión. Por ejemplo, un aparato de línea blanca se compone principalmente de metales, mientras que en un equipo de electrónica de consumo predomina el plástico, representando el 20% de la corriente de los RAEE. Los AEE de naturaleza tecnológica o de telecomunicaciones pueden llegar a contener más de 60 elementos diferentes. En el caso de un teléfono móvil (donde los metales representan el 23 % de su peso) se puede contar con la presencia de 40 de los metales recogidos en el sistema periódico: metales básicos como el cobre, estaño, metales especiales como el cobalto, indio y antimonio, y metales preciosos como la plata, oro y paladio. El hierro y el acero constituyen aproximadamente el 50 % de los RAEE seguidos por los plásticos (21 %), los metales no ferrosos (13 %) y otros constituyentes.

Estos aparatos contienen sustancias peligrosas que, si bien son necesarias para garantizar su funcionalidad, pueden emitirse al medio ambiente o ser perjudiciales para la salud humana si, una vez convertidos en residuos, los aparatos no se gestionan y tratan adecuadamente. Los RAEE y sus componentes en cantidades que superan los umbrales de las normas relacionadas con los residuos peligrosos de los diferentes países, se clasifican como tales cuando tienen presencia de elementos como: plomo, mercurio, berilio, arsénico, cadmio, selenio, cromo hexavalente, sustancias halogenadas, bifenilos policlorados, policloruros de vinilo, retardantes de llama, aceites peligrosos, y gases que agotan la capa de ozono o que afectan al

calentamiento global como los clorofluorocarburos o hidrofluorocarburos, cuya emisión debe controlarse especialmente y que se encuentran presentes en los circuitos de refrigeración y en las espumas aislantes de los aparatos de intercambio de temperatura. Es por eso que todas las etapas de la gestión, desde su recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento deben hacerse en unas condiciones seguras, sin mezclarse con otros flujos de residuos (recogida separada) y que eviten manipulaciones o roturas que puedan liberar este tipo de sustancias peligrosas al medio ambiente o exponer a los trabajadores que están en contacto con estos residuos, durante su tratamiento a sustancias peligrosas.

Las sustancias peligrosas más habituales que incorporan los AEE para su funcionamiento y que deben ser gestionadas y tratadas una vez que los aparatos se conviertan en RAEE son:

- a. Cadmio: Más del 90% en las pilas recargables.
- b. Plomo: Más del 90% en las baterías, con pequeñas contribuciones por parte de las soldaduras para los circuitos impresos, lámparas y tubos fluorescentes.
- c. Óxido de plomo (utilizado en el vidrio): Más del 80% en los tubos de rayos catódicos mientras que el resto procede de las lámparas y los tubos fluorescentes.
- d. Mercurio: Más del 90% procede de las pilas y sensores de posición con una pequeña contribución por parte de los relés y lámparas fluorescentes.
- e. Cromo hexavalente: Utilizado como inhibidor de corrosión en el sistema de refrigeración de los refrigeradores por absorción.
- f. Níquel: Baterías Ni-Cd.
- g. PCB (Bifenilos policlorados): Más del 90% provienen de los condensadores y transformadores.
- h. Compuestos bromados/retardantes de llama: TBBA (Tetra-bromo-bifenil A): Más del 90% proviene de los circuitos impresos, placas y carcasas. PBB (Polibromobifenilos) y PBDE (polibromodifenil-eteres): Componentes termoplásticos, cables, etc. Octa y deca BDE (octa y decabromo difenil eter): Más del

80% dentro de los ordenadores, con menores contribuciones por parte de los aparatos de TV y aparatos eléctricos de cocinas domésticas.

- i. CFC, HCFC, HC: Unidades de refrigeración y espumas aislantes.
- j. Cloroparafinas: Más del 90% en el PVC de los cables.

2.3 Proceso de contaminación a partir de lixiviados

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a su composición, y tanto la calidad como la cantidad de ellos varía sustancialmente entre sitios y estaciones, dependiendo de factores como el contenido de humedad de los residuos dispuestos; la hidrogeología específica del sitio: el diseño, operación y edad del relleno sanitario; así como la biodegradabilidad relativa de los diferentes contaminantes orgánicos presentes en el relleno sanitario (Bagchi, 1990).

Aunque no se habla de composición promedio, si se manejan valores típicos que sirven de referencia. En la Tabla 2.2 se muestra una composición típica de acuerdo a los valores propuestos por Bagchi (1990):

Tabla 2.2 Rango de composición típica de lixiviados.

Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)	Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)
Sólidos Disueltos Totales	584-55,000	Fósforo Total	ND-234.0
Sólidos Suspendidos Totales	2-140,900	Boro	0.87-13.0
Conductancia Específica	480-72,500 micromhos/cm	Bario	ND-12.50
DBO ₅	6.6-99,000	Níquel	ND-7.50
DQO	10-195,000	Nitrógeno de Nitratos	ND-250.0
Carbono Orgánico Total	ND-40,000	Plomo	ND-14.20
pH	3.7-8.9	Cromo	ND-5.60
Alcalinidad Total	ND-15,050	Antimonio	ND-3.19
Dureza	0.1-225,000	Cobre	ND-9.0
Cloruros	2.0-11,375	Talio	ND-0.78
Calcio	3.0-2,500	Cianuro	ND-6.0
Sodio	12.0-6,010	Arsénico	ND-70.20
Nitrógeno Total	2.00-3,320	Molibdeno	0.01-1.43
Fierro	ND-4,000	Estaño	ND-0.16
Potasio	ND-3,200	Nitrógeno de Nitritos	ND-1.46
Magnesio	4.0-780	Selenio	ND-1.85
Nitrógeno Amoniacal	ND-1,200	Cadmio	ND-0.40

Continúa página siguiente

Tabla 2.2 Rango de composición típica de lixiviados (Continuación)

Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)	Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)
Sulfatos	ND-1,850	Plata	ND-1.96
Aluminio	ND-85.0	Berilio	ND-0.36
Zinc	ND-731.0	Mercurio	ND-3.00
Manganeso	ND-400.0	Turbiedad	40-500UTJ

Fuente: Adaptado de Bagchi (1990).

Los datos de la Tabla 2.3 es evidente la gran variabilidad que existe en la concentración de contaminantes en un lixiviado. En términos generales pueden ser clasificados como lixiviados Tipo I, II y III. Los primeros son también conocidos como lixiviados jóvenes, los segundos como medios y los del tipo III como viejos o estabilizados. Se observa que los lixiviados jóvenes contienen la mayor carga orgánica—DQO mayor a 20,000 mg/L—, y de la cual más del 50% es biodegradable al presentar una relación DBO₅/DQO superior a 0.5. Por su parte, el lixiviado catalogado como viejo registra una menor carga orgánica con una relación DBO₅/DQO inferior a 0.1, por lo que la mayor parte de los contaminantes orgánicos son de naturaleza refractaria. Cabe aclarar, que esta relación es de suma importancia en la definición del sistema de tratamiento a seguirse en la depuración de estos líquidos. Así para un lixiviado joven siempre será recomendable pensar en sistemas biológicos: mientras que para un lixiviado viejo, dada su baja biodegradabilidad, los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción (Najera, 2016).

Tabla 2.3 Clasificación de los tipos de lixiviados en función de la edad.

Parámetro	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	<5 (joven)	5-10 (medio)	>10 (viejo)
	I (biodegradable)	II (intermedio)	III (estabilizado)
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 20,000	3,000-15,000	< 5,000
DQO/COT	> 2.7	2.0-2.7	> 2.0
DBO ₅ /DQO	> 0.5	0.1-0.5	< 0.1
(%COT)	> 70	5-30	< 5
Metales pesados (g/L)	2		< 50 mg/L

Fuente: Adaptado de Bagchi (1990).

La cantidad generada de lixiviados es baja comparada con los volúmenes producidos en otros tipos de aguas residuales como las domésticas, sin embargo, los contaminantes que contiene son extremadamente peligrosos (Najera, 2016).

Cuando el agua se infiltra a través de los desechos sólidos, éstos se disuelven y se arrastra una variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, al lixiviarse pueden filtrarse si el contenido de humedad de los desechos sólidos supera al contenido de humedad que éstos pueden retener. La cantidad de estos lixiviados es pequeña en comparación con otras aguas residuales, pero su contenido es extremadamente peligroso. Cuando estos líquidos no son controlados—captados, almacenados y tratados pueden permear hasta llegar al agua subterránea o mezclarse con aguas superficiales y contribuir a la contaminación de suelo agua subterránea y superficial. El movimiento de estos líquidos sigue el movimiento del agua (véase la Figura 2.3) y bajo este concepto es importante seguir su curso (Najera, 2016).

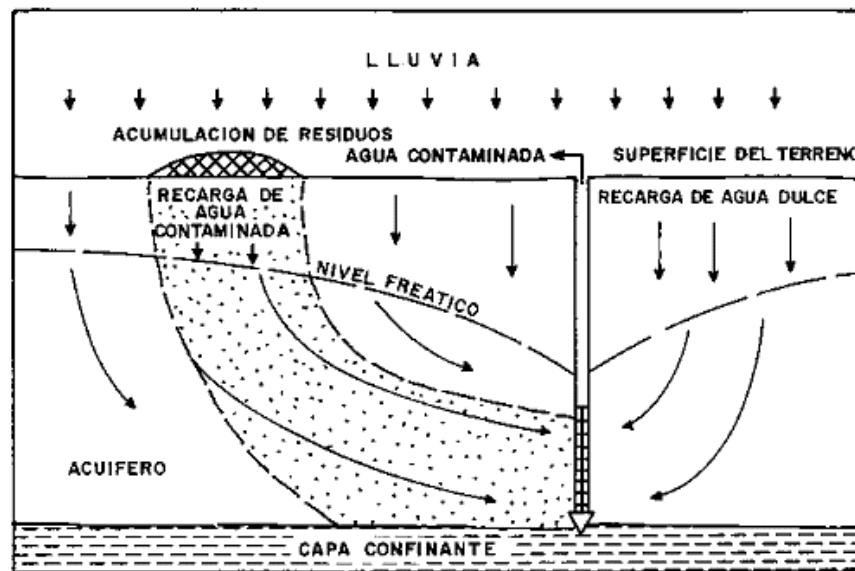


Figura 2.3 Contaminación de un acuífero por lixiviado de residuo sólido depositados en la superficie. Fuente: IGME (2002).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación), la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento) (Ordóñez, 2011).

La evaporación del agua tiene lugar en la superficie de aguas libres como lagos, embalses, charcos, gotas de rocío. La tasa de evaporación depende de factores

como la temperatura del agua, el viento y la temperatura y humedad absoluta de la capa de aire justo por encima de la superficie del agua libre. Las moléculas de agua se intercambian continuamente entre líquido y el vapor de agua atmosférico. Si el número de moléculas que pasa al estado de vapor exceden a las moléculas en estado líquido, el resultado es la evaporación. La evaporación continuará hasta que el aire se sature de humedad.

Las plantas en crecimiento están continuamente bombeando agua desde el suelo hacia la atmósfera a través de la transpiración. El agua se extrae de la humedad del suelo a una raíz de la planta debido a la presión osmótica, con la cual se mueve a través de la planta hasta las hojas. El agua pasa como vapor a través de las aberturas en la superficie de las hojas conocidas como estomas. Una parte del agua que absorben las plantas se usa para fabricar el tejido vegetal, pero la mayoría se transpira a la atmósfera.

El agua que escurre superficialmente corre hacia los cuerpos de agua y finalmente al mar. Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende de su textura y estructura (porosidad); otra parte del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento se convierte también en flujo subsuperficial, y por último otra parte percola, hacia capas inferiores produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra, viaja lentamente y llega a alimentar a ríos y manantiales y finalmente al mar (SNET⁴, 2005).

La infiltración está más relacionada con el movimiento del agua en la parte edáfica del suelo donde tiene lugar el desarrollo radicular de las plantas. La percolación está más relacionada con el movimiento vertical del agua en la zona no saturada. En Figura 2.4 se muestra un esquema del suelo y los diferentes flujos existentes en él. Se distingue la infiltración, la percolación, el flujo hipodérmico⁵, el flujo subterráneo y la recarga que le llega al medio saturado.

⁴ Siglas del Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador.

⁵ Este tipo de escorrentía se infiltra en el suelo hasta alcanzar el nivel freático, donde circula hasta alcanzar la red de drenaje principal.

También se ha incluido el flujo subsuperficial epidérmico, que es el agua que se encuentra en la parte del suelo edáfico y que, en un momento dado puede aflorar, incorporándose a la escorrentía superficial (Fetter, 2014).

El agua subterránea fluye a través de espacios interconectados, a lo largo de microfisuras entre las partículas y a través de fracturas de mayor escala. El movimiento se produce en respuesta a las diferencias de elevación y presión del fluido. La fuerza directriz se mide en términos de altura hidráulica. El agua subterránea fluye de regiones donde la altura hidráulica es alta hacia regiones donde dicha altura es baja. Encima del nivel freático, en la franja de capilaridad y zonas vadosas, el agua está sometida a tensión por lo que la presión del fluido es menor que la atmosférica. Por debajo del nivel freático, en la zona saturada, la presión del fluido excede a la atmosférica. El nivel freático está definido como la superficie en la cual la altura de presión es igual a cero (MacDonald y Foster, 2016).

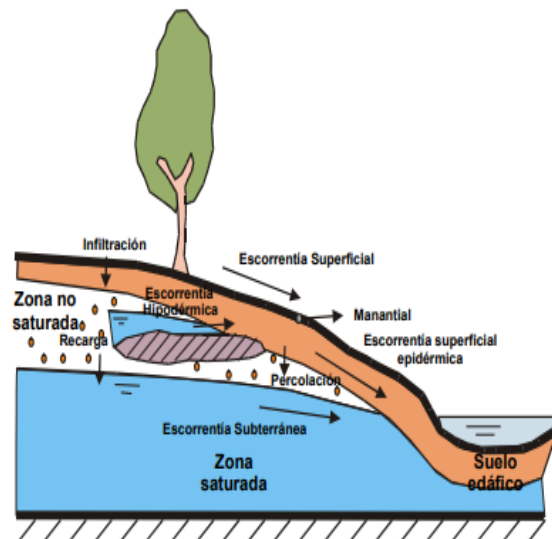


Figura 2.4 Esquema de infiltración del agua. Fuente: Adaptado de Fetter (2014)

El movimiento del agua subterránea ocurre debido a tres condiciones, la fuerza, la presión y energía, sin embargo las propiedades de los acuíferos subterráneos de contener agua se produce por varios factores como (Easterbrook, 1999):

- a. **La porosidad:** la porosidad de un material representa un porcentaje que relaciona el volumen que ocupan los poros en un volumen unitario de roca; esto es

si la porosidad es del 50% significa que la mitad de la roca está constituida por poros y la otra mitad por partículas sólidas.

En la Figura 2.5 se representa a las partículas del suelo (círculos amarillos) y las aguas subterráneas (flechas azules). Es de esta manera como llega el agua superficial a formar parte del agua subterránea, que se almacena en el suelo y forman acuíferos.

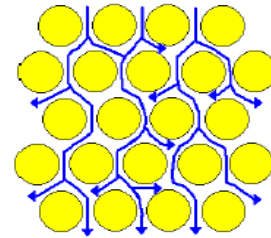


Figura 2.5 Esquema de la movilidad del agua subterránea a través de los poros del suelo.
Fuente: Easterbrook (1999).

- b. La permeabilidad:** Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua, es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula. Esta libertad de movimiento depende del tamaño y forma de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. Las arcillas se utilizan a menudo para fines de ingeniería, como forro de sitios de eliminación de residuos sólidos debido a su extremadamente baja permeabilidad intrínseca.
- c. La conductividad hidráulica:** Es la capacidad de una roca para transmitir agua que, junto con su capacidad para retener agua, constituyen las propiedades hidrológicas más importantes. Hay algunas rocas que muestran porosidad pero carecen de huecos interconectados. Estas rocas no pueden transportar agua de un vacío a otro. Algunos sedimentos y rocas tienen porosidad, pero los poros son tan pequeños que el agua fluye a través de la roca con dificultad, arcilla y pizarra son ejemplos de ello.
- d. Transmisibilidad del acuífero:** es la medida de la cantidad de agua que puede transmitirse horizontalmente a través de una unidad de ancho por espesor saturado total del acuífero bajo un gradiente hidráulico de 1.
- e. Coeficiente de almacenamiento:** Es el volumen de agua que una unidad permeable absorberá o expulsará del almacenamiento por unidad de cambio en la cabeza.

Los fenómenos hidrológicos son muy complejos, por lo que nunca pueden ser totalmente conocidos. Sin embargo, se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema (véase la Figura 2.6).

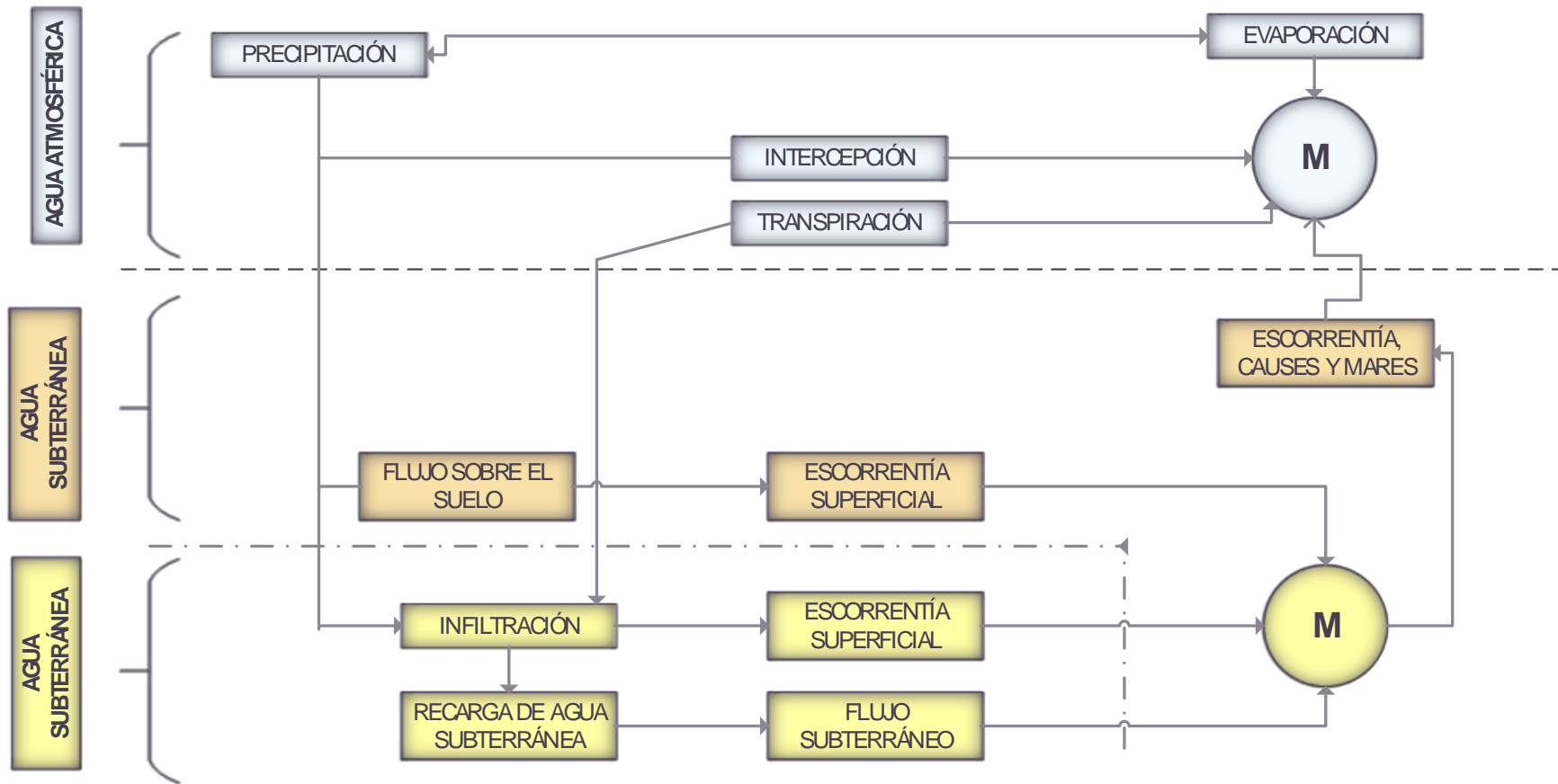


Figura 2.6 Representación del sistema hidrológico. Fuente: Adaptado de Najera, 2016.

2.4 Movilidad de los metales pesados en el suelo

El término "metales pesados", aunque no está rígidamente definido, generalmente se refiere a "aquellos metales con una densidad superior a cinco". Algunos de estos metales son fisiológicamente importantes como elementos traza. La mayoría de ellos ejercen acciones tóxicas si están presentes en concentraciones más altas (Passow, Rothstein, y Clarkson, 1961).

El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que da lugar al suelo, pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de su presencia a niveles tóxicos (Sánchez M. I., 2003).

Por otro lado, las diferentes fuentes de agua pueden ver mermada su calidad por dos tipos de contaminación según su origen: contaminación natural o geoquímica y contaminación antropogénica (causada por el hombre). Gray (1994), expone los siguientes factores de origen natural sobre los que depende la calidad del agua: naturaleza del agua de lluvia que rellena los acuíferos, tipos de aguas subterráneas (edad del agua del acuífero), tipo de suelo y el tipo de roca que forma el acuífero. Como factores antropogénicos de contaminación están los usos del suelo cercanos a los acuíferos (agrícola, ganadero, etc.) y la infiltración de aguas residuales (González, et al., 2007).

Como los suelos consisten en mezclas heterogéneas de diferentes sustancias orgánicas y organominerales, minerales arcillosos, óxidos de hierro, aluminio y manganeso y otros componentes sólidos, así como de una variedad de sustancias solubles; los mecanismos de unión de los metales pesados en los suelos son múltiples y varían con la composición de los suelos, la reacción del suelo y las condiciones redox. Por lo tanto, un metal puede formar diferentes especies según esté unido a varios compuestos del suelo, superficies de reacción y sitios de unión externos o internos con diferente energía de enlace (Bruemmer, Gerth, y Herms, 1986).

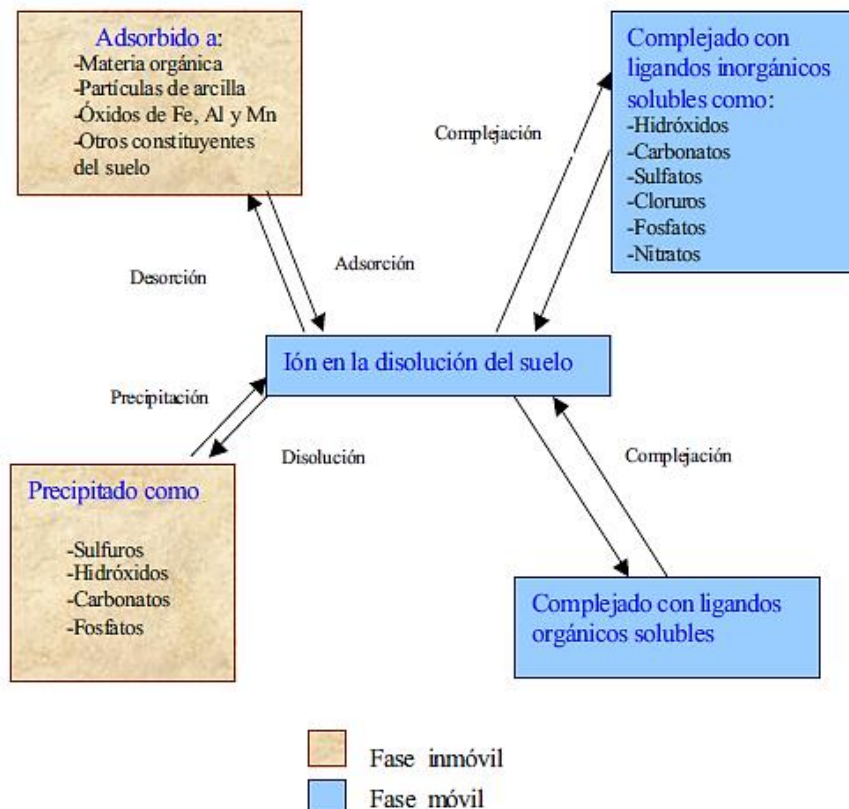


Figura 2.7 Diagrama de movilidad de metales pesados en el suelo. Fuente: Sánchez, 2003.

La composición de los suelos cambia con la profundidad de la superficie a los horizontes subsuperficiales. Especialmente en condiciones climáticas húmedas, el agua de precipitación se filtra a través de los suelos y puede transportar metales pesados solubles con la solución del suelo. La concentración de metales pesados en la fase de solución es de gran importancia para todas las consideraciones ecológicas porque las plantas toman los metales disponibles de la solución del suelo. El transporte de metales dentro del suelo o incluso al agua subterránea también depende de la concentración de metal de la fase de solución. Los cambios en el contenido de agua del suelo, las desviaciones del equilibrio a las condiciones de no equilibrio y los cambios en la actividad de los microorganismos que influyen en las condiciones redox, los contenidos de agentes quelantes⁶ solubles y la composición de la atmósfera del suelo, requieren consideración simultánea. Estos procesos moderan las

⁶ Sustancia que forma complejos fuertes con iones de metales pesados. A estos complejos se los conoce como quelatos, y generalmente evitan que estos metales pesados puedan reaccionar.

reacciones de los metales pesados, como la precipitación-disolución, la adsorción-desorción y la formación de complejos iónicos en relación con el pH y, por lo tanto, influyen en la distribución de las diversas especies metálicas en la fase sólida del suelo y en la solución del suelo (Bruemmer, et al, 1986).

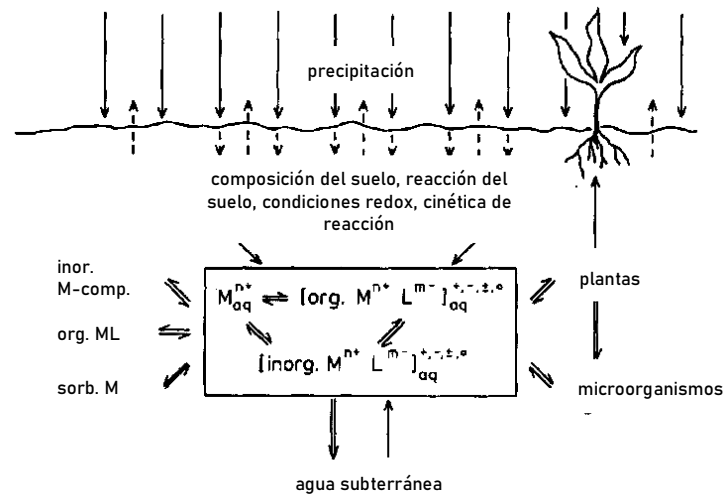


Figura 2.8 Representación esquemática de especies de metales pesados y reacciones en suelos. Fuente: Bruemmer, Gerth, y Herms, 1986.

El suelo actúa en general como una barrera protectora de otros medios más sensibles (hidrológicos y biológicos), filtrando, descomponiendo, neutralizando o almacenando contaminantes y evitando en gran parte su biodisponibilidad. Esta capacidad depuradora de un suelo depende de los contenidos de materia orgánica, carbonatos, proporción y tipos de minerales de arcilla, capacidad de cambio catiónico del suelo, pH y Eh (potencial de reducción), textura, permeabilidad y actividad microbiana (Galán y Romero, 2008). En la Figura 2.7 se muestra, de manera esquemática, la forma en que los metales están presentes en la fase móvil o en la fase inmóvil del suelo y el tipo de reacción que permite el paso de metal de una fase a otra (Sánchez M. I., 2003).

Para cada situación, el poder depurador de un suelo tiene límite. Cuando se superan esos límites para una o varias sustancias, el suelo funciona como contaminado y es fuente de contaminantes, de aquí radica la importancia de determinar variables y

condiciones en la matriz suelo, para estimar la interacción química entre el sustrato y el contaminante (Payes, 2014).

Esta interacción se puede visualizar por ejemplo mediante diagramas redox que muestran las diferentes especies químicas del plomo, que pueden estar presentes en la zona vadosa según distintos valores de pH y potencial redox (pe), como se muestra en la Figura 2.9. A valores de pH menor a 7 (medio ácido) y a valores de pe de 0 a 20 predomina el plomo en forma iónica como Pb^{2+} , el cual es completamente soluble en agua (Payes, 2014).

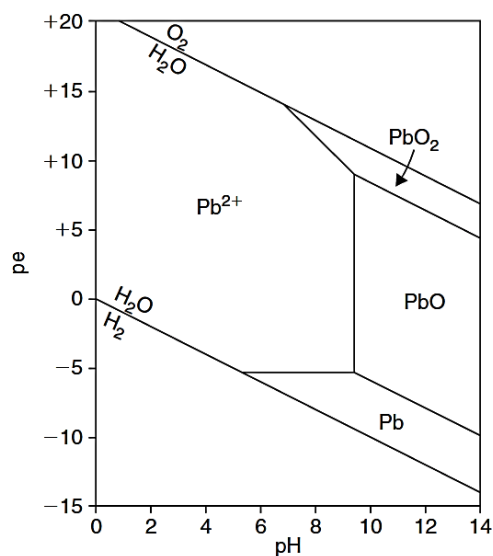


Figura 2.9 Especies químicas del plomo a distintos valores de pH y pe en disolución acuosa. Fuente: Appelo y Postma (2005).

En la descripción de la concentración de compuestos inorgánicos, considerados “sustancias traza” en los ambientes naturales, es frecuente encontrar la misma expresada en términos de elementos químicos. Sin embargo éstos son parte de moléculas y forman diversas especies moleculares presentes simultáneamente y en relaciones diversas en el ambiente. Por otro lado el comportamiento de un elemento depende de las especies particulares en la que está presente y la mayor reactividad de una especie no necesariamente coincidirá con la mayor concentración del metal en esa forma química. De allí que el comportamiento de un elemento en el ambiente (biodisponibilidad, toxicidad, distribución, etc.) no pueda predecirse basándose en su concentración total (Castañé, et al, 2003).

2.5 Factores del suelo que inciden en la disponibilidad y acumulación de metales pesados

2.5.1 Cadmio

La abundancia de Cd en rocas magmáticas y sedimentarias no excede alrededor de 0.3 ppm (valores mundiales), y es probable que este metal se concentre en depósitos de arcillas y lutitas. El Cd está fuertemente asociado con el Zn en su geoquímica, pero parece tener una mayor afinidad por el S que el Zn, y también exhibe una mayor movilidad que este último en ambientes ácidos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Durante la meteorización⁷, el Cd se disuelve fácilmente y, aunque se sabe que está presente como Cd^{2+} , también puede formar varios iones complejos (CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$) y quelatos orgánicos. Sin embargo, el estado de valencia más importante del Cd en la naturaleza es +2, y los factores más importantes que controlan la movilidad del ion Cd en suelos son el pH y el potencial de oxidación. En condiciones de fuerte oxidación, es probable que el Cd forme minerales (CdO , CdCO_3) y también se acumule en depósitos de fosfato y biolitos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El factor principal que determina el contenido de Cd del suelo es la composición química de la roca madre. El contenido promedio de Cd en los suelos se encuentra entre 0.06 y 1.1 ppm (valores mundiales). Esta relación queda bien ilustrada por los contenidos medios geométricos de Cd que aumentan con el contenido de la fracción de arcilla del suelo. Aunque la fracción arcillosa no es un factor importante del suelo que controla la distribución de Cd, contribuye hasta el 10% de todas las relaciones. Los óxidos parecen ser de menor importancia en el suelo a pH bajo (5.5). La media mundial calculada es de 0,53 ppm de Cd en suelos superficiales, y aparentemente todos los valores más altos reflejan el impacto antropogénico en el estado de Cd en la capa superficial del suelo (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

⁷ Proceso de desintegración física y química de los materiales sólidos en o cerca de la superficie de la Tierra.

La adsorción competitiva por arcillas es el proceso predominante en la unión de Cd. La adsorción, en lugar de la precipitación, controla las concentraciones de Cd en las soluciones del suelo hasta que se excede un valor umbral de pH. El diagrama de solubilidad del pH (Figura 2.10) indica que por encima de pH 7.5, el Cd sorbido en los suelos no es fácilmente móvil; por lo tanto, la solubilidad de CdCo_3 , y posiblemente de $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$, controlaría la movilidad de Cd en los suelos. La solubilidad de Cd parece ser altamente dependiente del pH; sin embargo, la naturaleza de las superficies sorbentes y de los ligandos orgánicos también es importante. Los hidróxidos parecen no ser de mucha importancia en las interacciones de Cd en suelo a pH bajo (<5.5). La sorción de Cd en suelo ácido está altamente influenciada por la composición de la fase líquida (Kabata-Pendias y Pendias, 2001)

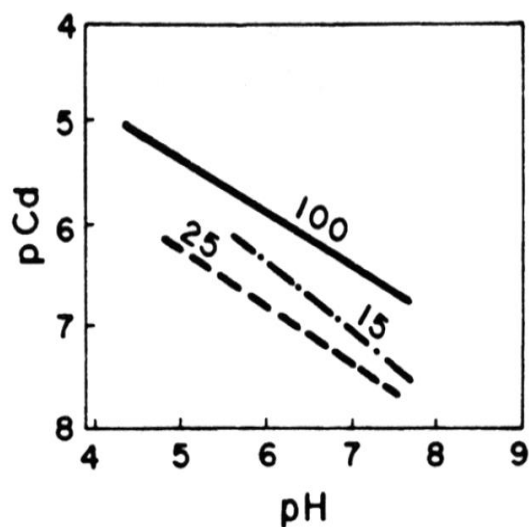


Figura 2.10 Solubilidad de Cd en suelos como función del pH. Equilibrio con 15, 25 y 100 µg de Cd per 2 g de suelo. Fuente: Kabata-Pendias y Pendias (2001).

También se ha estudiado la adsorción de Cd a materia orgánica, así como a Fe y a óxidos de Mn. Todos los hallazgos conducen a algunas generalizaciones: en todo el suelo, la actividad de Cd se ve fuertemente afectada por el pH; en suelos ácidos, la materia orgánica y los sesquióxidos⁸ pueden controlar en gran medida la solubilidad del Cd, y que en el suelo alcalino, la precipitación de los compuestos de Cd puede explicar los equilibrios de Cd.

⁸ Óxido cuya molécula está formada por tres átomos de oxígeno y dos de otro elemento.

La cantidad de Cd unido a la materia orgánica en fracción residual parece ser relativamente estable en el suelo, mientras que sus formas intercambiables aumentan significativamente con la presencia de lodos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). La concentración de carbonato en la solución del suelo conduce a la precipitación total de Cd, y ningún otro factor del suelo es tan activo en la inmovilización de Cd. El Cd es más móvil en suelos ácidos dentro del rango de pH 4.5 a 5.5, mientras que en suelos alcalinos el Cd es bastante inmóvil. Sin embargo, a medida que el pH aumenta en el rango alcalino, es probable que aparezcan especies monovalentes de iones hidroxilo (por ejemplo, CdOH^+), que no podrían ocupar fácilmente los sitios en los complejos de intercambio catiónico. Se sabe que la sorción de Cd es un proceso rápido. Christensen (1984) descubrió que el 95% de la sorción de Cd tiene lugar en 10 minutos, alcanzando el equilibrio en 1 hora y que el suelo tiene una afinidad muy alta por el Cd a pH 6. En el intervalo de pH de 4 a 7.7, la capacidad de sorción del suelo aumenta aproximadamente 3 veces para cada aumento de pH de una unidad. La solubilidad del Cd está estrechamente relacionada con la acidez de la solución del suelo (Figura 2.11).

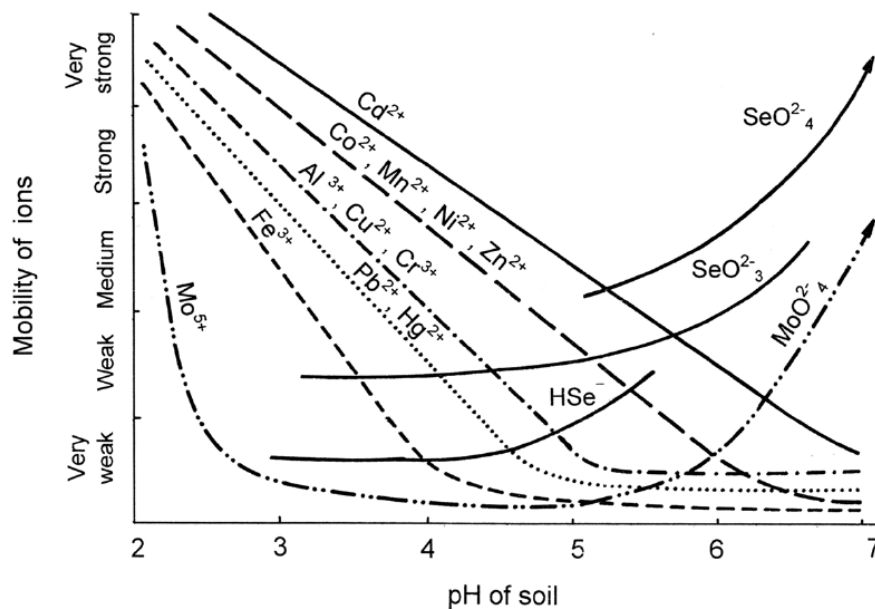


Figura 2.11 Esquema de tendencias de la movilidad de los metales por la influencia del pH del suelo (para suelos ligeramente minerales). Fuente: Kabata-Pendias y Pendias (2001).

Las rutas de exposición a este metal son principalmente la dieta y el cigarrillo. El cadmio está presente en la gran mayoría de la comida, especialmente en los vegetales y en la comida de mar. En la población humana, los órganos donde este metal puede acumularse son los riñones y los huesos, ocasionando la excreción de proteínas de bajo peso molecular en la orina y un incremento en el riesgo de osteoporosis, así como un incremento en el riesgo de contraer cáncer de pulmón y de próstata (Sánchez M. S., 2010).

2.5.2 Níquel

Los contenidos de Ni son más altos en rocas ultramáficas (1400 a 2000 ppm), y sus concentraciones disminuyen con el aumento de la acidez de las rocas hasta 5 a 15 ppm en los granitos. Las rocas sedimentarias contienen Ni en el rango de 5 a 90 ppm, siendo el rango más alto para las rocas arcillosas y el más bajo para las areniscas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Ni se moviliza fácilmente durante la meteorización y luego se coprecipita principalmente con óxidos de Fe y Mn. Sin embargo, a diferencia de Mn^{2+} y Fe^{2+} , el Ni^{2+} es relativamente estable en soluciones acuosas y es capaz de migrar a larga distancia. Durante la erosión de rocas ricas en Ni (principalmente en climas tropicales), se observa la formación de garnierita, $(Ni, Mg) SiO_3 \cdot nH_2O$, que es una mezcla mal definida de minerales arcillosos. La materia orgánica revela una fuerte capacidad de absorber Ni; por lo tanto, es probable que este metal se concentre en carbón y petróleo. Esta concentración es aparentemente un efecto de la precipitación de Ni como sulfuros en sedimentos ricos en organismos y en condiciones reductoras (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

En los horizontes de la superficie del suelo, el Ni parece encontrarse principalmente unido a formas orgánicas, una parte de las cuales pueden ser quelatos fácilmente solubles. Sin embargo, la fracción de Ni del suelo transportada en los óxidos de Fe y Mn también parece ser la forma más disponible para las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Naturalmente, el Ni se encuentra en varios estados de oxidación (-1 a +4), pero el estado de oxidación existente en los sistemas biológicos es el +2. Las formas solubles en el suelo son: Ni^{2+} , $NiOH$, $HNiO_2$ y $Ni(OH)_3$. Los compuestos

de níquel son importantes en la industria, especialmente en los procesos de la producción de baterías de cadmio y níquel, en la fabricación de equipo electrónico y maquinaria industrial y armamento. En seres humanos, la toxicidad por este elemento se ha relacionado con efectos adversos y reacciones alérgicas en la piel. Las principales fuentes de contaminación son la ingestión de comida y agua contaminada (Sánchez M. S., 2010).

2.5.3 Plomo

La abundancia terrestre de Pb indica una tendencia a concentrarse en la serie ácida de rocas magmáticas y sedimentos arcillosos en los que las concentraciones comunes de Pb varían de 10 a 40 ppm, mientras que en rocas ultramáficas y sedimentos calcáreos su rango es de 0.1 a 10 ppm. La abundancia promedio de Pb en la corteza terrestre se estima en aproximadamente 15 ppm. En el entorno terrestre, se conocen dos tipos de Pb: primario y secundario. El Pb primario es de origen geogénico⁹ y se incorporó a los minerales en el momento de su formación; y el Pb secundario es de origen radiogénico¹⁰ debido a la descomposición de U y Th. La relación de Pb de varios orígenes se utiliza para fechar los materiales al que está adherido (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Pb tiene propiedades altamente calcófilas¹¹ y, por lo tanto, su forma primaria en el estado natural es la galena (PbS). El Pb ocurre principalmente como Pb²⁺, aunque también se conoce su estado de oxidación +4, y forma varios otros minerales que son bastante insolubles en aguas naturales (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Durante la meteorización, los sulfuros de Pb se oxidan lentamente y tienen la capacidad de formar carbonatos y también de incorporarse en minerales arcillosos, en óxidos de Fe y Mn, y en materia orgánica. Las características geoquímicas de Pb²⁺ se parecen un poco al grupo de metales alcalinotérreos divalentes; así, Pb tiene la

⁹ Del origen y formación de la tierra.

¹⁰ Procedente de una desintegración radiactiva.

¹¹ Afinidad por los ambientes ricos en calcio.

capacidad de reemplazar K, Ba, Sr e incluso Ca, tanto en minerales como en sitios de sorción (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El contenido natural de Pb de los suelos está fuertemente relacionado con la composición de la roca madre, y se conoce que el Pb es el menos móvil entre los otros metales pesados. Las concentraciones relativamente bajas de Pb en las soluciones naturales del suelo respaldan esta afirmación. Aunque las especies de Pb pueden variar considerablemente de un tipo de suelo a otro, se puede observar que el Pb está asociado principalmente con minerales arcillosos, óxidos de Mn, Fe e hidróxidos de Al y materia orgánica. Sin embargo, en algunos suelos, el Pb puede estar altamente concentrado en partículas de carbonato de Ca o en concentraciones de fosfato (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). En la naturaleza se encuentra como Pb elemental, y tiene valencias +2 (en compuestos inorgánicos) y 4+(en compuestos orgánicos), formando metales como la galena (PbS), la cerusita (PbCO₃) y la anglesita (PbSO₄), entre otros (Sánchez M. S., 2010).

La solubilidad del Pb puede reducirse en gran medida por encalado. Un pH alto del suelo puede precipitar Pb como hidróxido, fosfato o carbonato, así como promover la formación de complejos orgánicos de Pb que son bastante estables. El aumento de la acidez puede aumentar la solubilidad de Pb, pero esta movilización suele ser más lenta que la acumulación en la capa de suelos ricos en materia orgánica (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Una vez que el Pb se deposita en el suelo, es inmovilizado por el componente orgánico de tal forma que la cantidad disponible para las plantas es baja y se encuentra en los primeros 5 cm superficiales (Sánchez M. S., 2010).

La localización característica de Pb cerca de la superficie del suelo en la mayoría de los perfiles del suelo está relacionada principalmente con la acumulación superficial de materia orgánica. Las mayores concentraciones de Pb también se encuentran a menudo en los horizontes superiores orgánicamente ricos de los suelos no cultivados, por lo tanto, la materia orgánica debe considerarse como un importante sumidero de Pb en suelos contaminados (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La exposición al plomo puede ocurrir a través de diferentes vías, como el agua y los alimentos, así como la inhalación a través de los pulmones. La ingestión de vegetales con altas concentraciones de Pb es la vía de mayor exposición de organismos en los niveles superiores de la cadena trófica. En los humanos, el efecto nocivo del Pb se ha asociado con daños neurológicos, especialmente por sus efectos negativos en el aprendizaje de los niños. Su acumulación se observa principalmente en los huesos (Sánchez M. S., 2010).

2.5.4 Zinc

El Zn parece estar distribuido de manera bastante uniforme en las rocas magmáticas, y solo se observa un ligero aumento en las rocas máficas (80 a 120 ppm) y una ligera disminución en las rocas ácidas (40 a 60 ppm). La concentración de Zn en sedimentos arcillosos y lutitas aumenta, en un rango de 80 a 120 ppm; mientras que en areniscas y rocas carboníferas, las concentraciones de este metal oscilan entre 10 y 30 ppm. El Zn se presenta principalmente como sulfuros simples (ZnS), pero también se sabe que sustituye al Mg^{2+} en silicatos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La solubilización de minerales de Zn durante la intemperización produce Zn^{2+} móvil, especialmente en ambientes ácidos y oxidantes. Sin embargo, el Zn también es fácilmente adsorbido por componentes minerales y orgánicos y, por lo tanto, en la mayoría de los tipos de suelo, se observa su acumulación en los horizontes superficiales (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Se cree que la forma más común y móvil en que se encuentra el Zn en el suelo es como iones libres y complejados en soluciones del suelo, aunque también, varias otras especies iónicas que se presentan como cationes adsorbidos de forma no específica y específica, pueden mobilizarse fácilmente en los suelos. Los factores importantes que controlan la movilidad de Zn en los suelos son muy similares a los del Cu, pero el Zn parece ocurrir en formas más fácilmente solubles. Las arcillas y la materia orgánica del suelo son capaces de retener Zn con bastante fuerza; así,

la solubilidad de Zn en suelos es menor que la de $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ y $Zn(PO_4)$ en sistemas experimentales puros (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Se reconocen dos mecanismos diferentes de adsorción de Zn: uno en medio ácido, relacionado con los sitios de intercambio catiónico, y el otro en medio alcalino (considerado quimisorción¹²) y que está muy influenciado por los ligandos orgánicos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La nucleación de hidróxido de Zn en las superficies arcillosas puede producir una retención de Zn fuertemente dependiente del pH en los suelos. La adsorción de Zn^{2+} puede reducirse a un pH más bajo ($pH < 7$) mediante cationes competitivos y esto resulta en una fácil movilización y lixiviación de Zn en suelos ligeramente ácidos. En suelos arenosos y ácidos, la materia orgánica parece ser el componente más importante del suelo para enlazar Zn (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Se sabe que la materia orgánica del suelo es capaz de unirse al Zn en formas estables; por lo tanto, se observa la acumulación de Zn en los horizontes orgánicos del suelo y en algunas turbas. Sin embargo, las constantes de estabilidad de la materia orgánica—Zn en los suelos son relativamente bajas, aunque una alta proporción de Zn está ligada a la materia orgánica en los suelos minerales. La adición de lodos de depuración a estos suelos modifica el patrón de distribución de Zn, aumentando significativamente dos especies de Zn, fácilmente solubles e intercambiables (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Zn es más fácilmente móvil y está disponible en suelos minerales ligeramente ácidos. La fracción de Zn asociada con los óxidos de Fe y Mn probablemente sea la más disponible para las plantas. La lixiviación ácida es bastante activa en la movilización de Zn; así, se observan pérdidas de este metal en ciertos horizontes, particularmente de podsols y suelos ácidos marrones derivados de arenas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

¹² Adsorción. Existe reacción química entre las moléculas de adsorbato y la superficie del adsorbente.

2.6 Potencial de contaminación al agua subterránea

Las actividades humanas en la que se llevan a cabo en la superficie de los cuerpos de agua subterráneos pueden constituir una amenaza a la calidad del agua. La contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre los subsuelos generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes.

Los perfiles naturales del subsuelo atenúan muchos contaminantes en forma activa e históricamente han sido considerados potencialmente eficaces para la disposición segura de excretas humanas y aguas residuales domésticas. La autoeliminación de contaminantes durante el transporte subterráneo en la zona vadosa (no saturada) es resultado de la degradación bioquímica y de la adsorción química, pero los procesos de retardo de contaminación por fenómenos de adsorción son igualmente importantes, ya que aumentan el tiempo disponibles para los procesos que conducen a su eliminación.

En la Figura 2.12 se muestra un resumen de los procesos de atenuación de contaminantes en donde el grosor de la línea correspondiente, indica la importancia del proceso en el suelo, sobre y bajo el nivel freático, indican desprendimiento de gases o una menor presencia de O_2 . Los procesos involucrados en la atenuación de contaminantes continúan, en menor grado, a mayores profundidades, especialmente en donde se encuentren sedimentos no consolidados en la zona saturada. Adicionalmente la dispersión hidrodinámica asociada con el flujo del agua subterránea ocasiona la dilución de contaminantes móviles y persistentes, especialmente en la zona saturada de los acuíferos, debido a la tortuosidad¹³, viscosidad y difusión, con interacción de los solutos entre sí y con las paredes de los poros. Luego para la reducción de los contaminantes mediante retardación, los procesos involucrados son la filtración, sorción y el intercambio iónico. Finalmente para la eliminación de

¹³ Grado de vueltas o rodeos que tiene los lechos o rocas (camino poroso interconectado).

los contaminantes los procesos involucrados son precipitación, hidrólisis, complejación, la volatilización y transformación bioquímica.

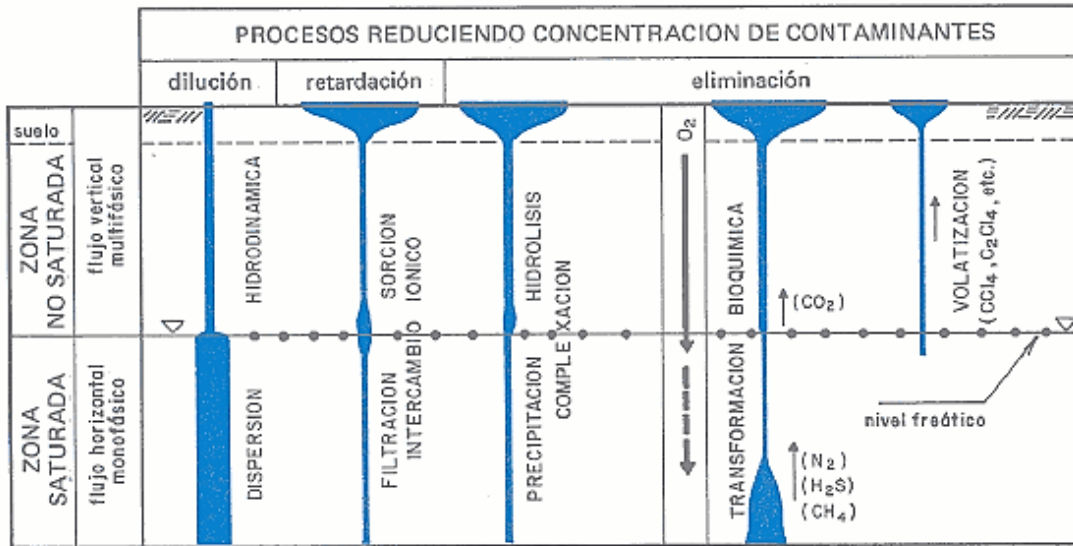


Figura 2.12 Resumen de los procesos de atenuación de contaminantes en las aguas subterráneas. Fuente: Foster e Hirata (1991).

Sin embargo no todos los perfiles del subsuelo y estratos subyacentes son igualmente eficaces en la atenuación de contaminantes, y los acuíferos son particularmente vulnerables a la contaminación cuando, por ejemplo, se encuentran rocas consolidadas altamente fisuradas. El grado de atenuación también variará ampliamente según el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en un ambiente determinado al igual que la posición del punto de vertido en relación con la topografía y sistema de flujo subterráneo.

Es importante señalar que aquellas actividades de mayor potencial de generación están asociadas a la utilización o manejo de compuesto de gran toxicidad, persistencia y movilidad en los acuíferos, así como a importantes cargas hidráulicas impuestas como lagunas e irrigación, en el caso de actividades agrícolas. Aunque se considera por la gran complejidad de las actividades potencialmente contaminantes, tendrían que ser estudiadas individualmente, un análisis de los casos de contaminación conocidos permite obtener algunas conclusiones importantes (Hirata, 2002):

- a. Una gran cantidad de actividades humanas es potencialmente capaz de generar importantes cargas contaminantes, aunque solamente unas pocas son responsables por la mayoría de los casos de contaminación de las aguas subterráneas.
- b. El volumen de sustancias químicas usadas en una actividad no tiene una relación directa con su presencia en los acuíferos. Esto ocurre debido al comportamiento de las mismas en subsuperficie.
- c. La intensidad de la contaminación de un acuífero no es una función directa del tamaño de la actividad antrópica. Muchas veces pequeñas actividades, como talleres mecánicos y pequeñas industrias, pueden causar gran impacto en las aguas subterráneas. Las actividades grandes son más fáciles de identificar y localizar, manipulan los compuestos químicos de forma más controlada, lo que no ocurre con las pequeñas actividades, que muchas veces actúan clandestinamente, sin registros comerciales ni fiscalización de entidades de control ambiental y de salud pública.
- d. En zonas urbanizadas, las pequeñas actividades son responsables por la mayoría de los casos de contaminación. Por la economía poco estable de los países en desarrollo es común la abertura y cierre de muchas actividades en pocos años. Esto dificulta la identificación de la actividad y también su acompañamiento. Se tiene conocimiento de muchas áreas industriales abandonadas que generaron contaminación a los acuíferos. La situación agravante en muchos casos es que esas áreas acaban teniendo otros usos, muchas veces incompatibles con el grado de contaminación existente en el suelo.
- e. Pequeñas cantidades de compuestos químicos pueden generar grandes plumas de contaminación, sobre todo cuando el acuífero impactado presenta gran velocidad de circulación de agua y los compuestos son muy tóxicos, como los hidrocarburos halogenados.

Es factible percibir que algunas actividades antropogénicas tendrán mayor posibilidad de contaminar un acuífero cuando se implementa un inventario y la clasificación de las fuentes contaminantes asociadas a cada actividad.

Los compuestos normalmente detectados en plumas de contaminación de aguas subterráneas relacionadas con las actividades industriales, usualmente muestran una estrecha relación con las sustancias utilizadas en la actividad industrial, las que a su vez están directamente relacionadas con el tipo de industria, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Contaminantes comunes del agua subterránea y fuentes de contaminación asociadas.

Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Actividad Agrícola	Nitratos; amonio; pesticidas; organismos fecales
Saneamiento in situ	Nitratos; hidrocarburos halogenados; microorganismos
Gasolineras y Garajes	Hidrocarburos aromáticos; bencenos; fenoles; hidrocarburos halogenados
Disposición de Residuales Sólidos	Amonio; salinidad; hidrocarburos halogenados; metales pesados
Industrias Metalúrgicas	Tricloroetileno; tetracloroetileno; hidrocarburos halogenados; fenoles; metales pesados; cianuro
Pintura y Esmaltes	Alcalobenceno; hidrocarburos halogenados; metales; hidrocarburos aromáticos; tetracloroetileno
Industria Maderera	Pentaclorofenol; hidrocarburos aromáticos; hidrocarburos halogenados
Tintorería	Tricloroetileno; tetracloroetileno
Manufacturera de Pesticidas	Hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénicos
Disposición de Lodos Residuales Domésticos	Nitratos, hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico
Curtidurías	Cromo, hidrocarburos halogenados, fenoles
Exploración/Extracción de Gas y Petróleo	Salinidad; hidrocarburos aromáticos
Minas de Carbón y de Metales	Acidez; varios metales pesados; hierros; sulfatos

Fuente: Foster e Hirata (1991).

Foster et. al., (2003), han propuesto una clasificación de las actividades industriales más comunes, en relación al índice de Peligro de Mazurek y el índice de Contaminación Potencial del Agua Subterránea; esta clasificación se asocia a la probabilidad de que existan concentraciones problemáticas en los líquidos y/o efluentes de los procesos industriales (véase la Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Compendio de las características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes.

Resumen de las características químicas e índices de peligro para actividades industriales comunes										
TIPO DE INDUSTRIA	Índice de peligro de Mazurek	Uso relativo del agua	Carga salina	Carga de nutrientes	Carga orgánica	Hidrocarburos	Patógenos Fecales	Metales pesados	Orgánicos sintéticos	Índice de Contaminación potencial del agua
Hierro y acero	6	**	*	*	**	**	*	**	**	2
Procesamiento de metales	8	*	*	*	*	*	*	***	***	3
Talleres mecánicos	5-8	*	*	*	*	***	*	***	**	3
Metales no ferrosos	7	*	*	*	*	*	*	***	*	2
Minerales no metálicos	3-4	**	***	*	*	*	*	*	**	1
Refinerías de petróleo y gas	7-8	*	*	**	***	***	*	*	**	3
Productos plásticos	6-8	**	***	*	**	**	*	*	***	3
Productos de caucho	4-6	*	**	*	**	*	*	*	**	2
Sustancias químicas orgánicas	3-9	**	**	*	**	***	**	**	***	3
Sustancias químicas inorgánicas	6-9	**	**	*	*	*	*	***	*	-
Farmacéutica	6-9	***	***	**	***	*	**	*	***	3
Carpintería	2-4	*	**	*	**	*	*	*	***	1
Pulpa y Papel	6	***	*	**	**	*	*	*	**	2
Jabón y detergente	4-6	**	**	*	**	**	**	*	*	2
Fábricas textiles	6	***	**	**	***	*	*	*	**	2
Curtiduría	3-8	**	***	**	**	*	*	**	***	3
Alimentos y bebidas	2-4	**	**	***	***	*	***	*	*	1
Pesticidas	5-9	**	**	*	*	*	*	*	***	3
Fertilizantes	7-8	*	***	***	*	**	*	*	**	2
Azúcar y alcohol	2-4	**	***	***	***	**	*	*	*	2
Termoeléctricas	-	***	*	*	*	***	*	***	**	2
Eléctricos y electrónicos	5-8	*	*	*	*	***	*	**	***	3

Fuente: Adaptado de Foster, et al, (2003).

Donde: * baja, **moderada, *** alta (Probabilidad de concentraciones problemáticas en líquidos y/o efluentes de proceso).

2.6.1 Mapeo del inventario de cargas contaminantes mediante el método POSH

Existen contaminantes que por su composición química son móviles y persistentes en el subsuelo, lo que hace que no puedan ser degradados eficazmente durante su

transporte hacia el acuífero, y que puedan llegar a contaminar el agua subterránea y pueden clasificarse como (Jarrín, Salazar, y Martínez-Fresneda, 2017; Foster, et al, 2003):

- a. Fuentes difusas:** los sistemas de saneamiento generan nitratos y microorganismos patógenos; mientras que las prácticas agrícolas están asociadas a fertilizantes (nitratos), pesticidas (hidrocarburos halogenados, fenoles, arsénico) y organismos fecales.
- b. Fuentes lineales:** las rutas de transporte están asociadas a accidentes que involucran el derrame de sustancias peligrosas; las tuberías de petróleo pueden ser fuente de hidrocarburos aromáticos; y los cursos de agua superficial contaminada están asociadas principalmente a cargas orgánicas y a elevada salinidad.
- c. Fuentes puntuales:** se incluyen industrias que según su actividad pueden generar hidrocarburos, solventes orgánicos, metales pesados. La disposición de residuos sólidos genera amonio, salinidad, hidrocarburos halogenados, metales pesados. Las lagunas de efluentes pueden contener microorganismos patógenos, metales pesados, nutrientes y solventes orgánicos. Los cementerios están asociados a cargas contaminantes microbiológicas.

Para conocer la amenaza de contaminación que sufre un acuífero es necesario la identificación y caracterización de las actividades potencialmente contaminantes. Para esto, lo mejor es obtener la siguiente información sobre cada actividad antropogénica: la clase de contaminante, la concentración y el volumen de la carga contaminante, el modo de disposición en el subsuelo y el tiempo de aplicación de la carga contaminante. Sin embargo, la complejidad y cantidad de información que se debe recabar hace que este acercamiento sea casi imposible de abordar (Madrigal-Solís, Fonseca-Sánchez, Núñez-Solís, y Gómez-Cruz, 2014).

La Tabla 2.6 muestra un resumen de las actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo que pueden afectar los acuíferos y el tipo de contaminantes comunes que se encuentran asociadas a cada una.

Tabla 2.6 Actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo.

Actividad	Características de la carga contaminante			
	Categoría	Principales tipos de contaminantes	Relativa carga hidráulica	Desvío de suelo
URBANIZACIÓN				
Saneamiento sin alcantarillado	u/r P-D	n f o	+	*
Fugas de desagües (a)	U P-L	o f n	+	*
Lagunas de oxidación de desagües (a)	u/r P	o f n	++	*
Aplicación desagües al suelo (a)	u/r P-D	n s o f	+	
Descarga desagües al río (a)	U P-L	n o f	++	*
Lixiviación de rellenos/botaderos	u/r P	o s h		*
Almacenamiento de combustibles	u/r P-D	o		*
Drenaje por sumideros	u/r P-D	s o	+	*
INDUSTRIAL				
Fugas de tanques/tuberías (b)	u P-D	o h		*
Derrames accidentales	u P-D	o h	+	
Lagunas de efluentes	u P	o h s	++	*
Aplicación de efluentes al suelo	u O-D	o h s	+	
Descarga efluentes al río	u P-L	o h s	++	*
Lixiviación de botaderos	u/r P	o h s		*
Drenaje por sumideros	u/r P	o h	++	*
Precipitaciones aéreas	u/r D	s o		
AGRÍCOLA (c)				
a. Cultivo del suelo con				
Químicos agrícolas	r D	n o		
Irrigación	r D	n o s	+	
Lodos	r D	n o s		
Irrigación de aguas residuales	r D	n o s f	+	
b. Cría de ganado/procesos de cosechas				
Laguna de efluentes	r P	f o n	++	*
Descarga efluentes al suelo	r P-D	n s o f		
Descarga efluentes al río	r P-L	o n f	++	*
EXTRACCIÓN DE MINERALES				
Modificación régimen hidráulico	r/u P-D	s h	++	*
Descarga de agua del drenaje	r/u P-D	h s	+	*
Lagunas de relaves	r/u P	h s		*
Lixiviación de botaderos	r/u P	s h		*

Fuente: Foster e Hirata (1991).

Donde:

- (a) Puede incluir componentes industriales
- (b) Puede ocurrir también en áreas no industriales
- (c) La intensificación representa el principal riesgo de contaminación

u/r urbana/rural

P/D/L Puntual/Lineal/Difusa

f patógenos fecales

n Compuestos de nutrientes

o Carga orgánica general

s Salinidad

t Microorganismos tóxicos

h Metales pesados

+ Incrementa la importancia

2.7 Técnicas analíticas: Espectroscopía de absorción atómica de llama y espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito

La espectrometría de absorción atómica (EAA) es hoy en día una de las técnicas instrumentales más importantes para el análisis cuantitativo de metales (y algunos pocos metaloides) en diversos tipos de muestras y matrices. La historia de la espectrometría de absorción atómica se remonta al descubrimiento de líneas oscuras en el espectro de emisión continua del sol por Wollaston en 1802. Las líneas son causadas por la absorción de los elementos en la atmósfera del sol. Fraunhofer retomó y siguió su trabajo en 1814. En 1860, Kirchhoff y Bunsen demostraron que la línea amarilla emitida por las sales de sodio cuando se introduce en una llama es idéntica a la llamada línea D en el espectro de emisión del sol. Sin embargo, pasó casi un siglo antes de que este importante descubrimiento se transfiriera a una técnica analítica viable. En 1955, Alan Walsh publicó el primer artículo sobre espectroscopía de absorción atómica. Al mismo tiempo, e independientemente de Walsh, Alkemade y Wilatz publicaron los resultados de sus experimentos fundamentales de EAA. Pero fue la visión de Walsh y sus esfuerzos infatigables lo que finalmente llevó a la aceptación general y la comercialización de la instrumentación EAA a mediados de la década de 1960. Otros logros instrumentales, como la introducción del horno de grafito y la técnica de generación de hidruros, en la segunda mitad de la década de 1960 promovieron aún más la popularidad y la aplicabilidad de la técnica (Rosenberg y Panne, 2003).

2.7.1 Fundamentos de la técnica

Los principios teóricos de la absorción atómica fueron establecidos en 1840 por Kirchhoff y Bunsen en sus estudios del fenómeno de autoabsorción en el espectro de los metales alcalinos y alcalino térreos (Razmilic, 1994).

La base de la espectroscopia de absorción atómica (EAA) la entregó Kirchhoff al formular su ley general: «*cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda*». El significado práctico de

esto fue recién desarrollado en 1955 por el australiano Walsh, apareciendo los primeros instrumentos comerciales a principios de 1960 (Razmilic, 1994).

El átomo consiste de un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos. La configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como “estado fundamental” (Razmilic, 1994).

Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía, éste experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia (Razmilic, 1994).

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado excitado (E_1) y el estado fundamental (E_0) como se encuentra descrito en la ecuación de Planck:

$$E = E_1 - E_0 = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

h = constante de Planck

v = frecuencia

c = velocidad de luz

λ = longitud de onda

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados (E_1, E_2, E_3, \dots) y de cada uno de ellos emitir una radiación ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$) característica, obteniéndose así un espectro atómico, caracterizado por presentar un gran número de líneas discretas. En absorción atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado y se conoce como longitud de onda de resonancia (Razmilic, 1994).

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. En absorción atómica interesa medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental. Estos absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su concentración atómica (Razmilic, 1994).

La relación entre absorción y concentración se encuentra definida en la Ley de Lambert-Beer. Como la trayectoria de la radiación permanece constante y el coeficiente de absorción es característico para cada elemento, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes (Razmilic, 1994).

2.7.2 Instrumentación

La fuente radiante más común para las mediciones de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco, que consiste en un cilindro relleno con un gas inerte dentro del cual se encuentra un cátodo (construido del metal a analizar) y un ánodo. Al aplicar un cierto potencial a través de los electrodos esta fuente emite el espectro atómico del metal del cual está construido el cátodo (Razmilic, 1994).

En la EAA se utilizan atomizadores con y sin llama para producir átomos libres del metal en el haz de la radiación. El atomizador con llama está compuesto de un nebulizador y un quemador. La solución de la muestra es convertida primero a un fino aerosol, y luego llevada a la llama que entrega la energía suficiente para evaporar el solvente y descomponer los compuestos químicos resultantes en átomos libres en su estado fundamental. Las mezclas de gases más usados para producir la llama adecuada son: aire/propano, aire/acetileno y óxido nitroso/acetileno. Generalmente, la elección dependerá de la temperatura requerida para la disociación de los compuestos y de las características químicas del elemento a determinar (Razmilic, 1994).

En los atomizadores sin llama (atomización electrotérmica) con horno de grafito el vapor atómico se genera en un tubo de grafito calentado eléctricamente, en cuyo interior se ubica la muestra. Estos atomizadores presentan diversas ventajas, como

una alta eficiencia en generar vapor atómico, permite el empleo de pequeños volúmenes de muestra y análisis directo de muestras sólidas (Razmilic, 1994).

Los espectrofotómetros de absorción atómica poseen generalmente monocromadores de red con montaje de Littrow o de Czerny-Turner. Estos monocromadores permiten aislar una línea de resonancia del espectro emitido por la lámpara de cátodo hueco (Razmilic, 1994).

Como detector, se emplea un fotomultiplicador que produce una corriente eléctrica, la cual es proporcional a la intensidad de la línea aislada por el monocromador. Un amplificador selectivo amplifica la señal pasando luego a un dispositivo de lectura que puede ser un voltímetro digital o un registrador u otros (Razmilic, 1994).

Todos los componentes mencionados anteriormente se esquematizan en la Figura 2.13.



Figura 2.13 Componentes básicos de un equipo de absorción atómica.

2.7.3 Fuentes de radiación

Para los métodos ópticos basados en la absorción, se debe considerar el ancho de línea de la fuente de excitación en relación con el ancho de línea de la transición respectiva de las especies absorbentes. El ancho medio de las líneas elementales es del orden de 0.002 nm cuando se observa por atomización electrotérmica. Si se va a lograr una detección estable y sensible, el ancho de línea de la radiación de excitación debe ser más estrecho que el ancho completo a la mitad del máximo de la línea de analito. En estas condiciones, toda la energía radiante producida por la fuente de excitación estará disponible para su absorción por el analito. Las fuentes

de línea típicas utilizadas para la absorción atómica son fuentes de excitación específicas del elemento, como la lámpara de cátodo hueco (Rosenberg y Panne, 2003).

La lámpara de cátodo hueco. Inicialmente descrita en 1916 por Paschen, la lámpara de cátodo hueco (HCL¹⁴, por sus siglas en inglés) es probablemente la fuente de excitación más versátil para la espectrometría de absorción atómica. Consiste en un tubo de vidrio Pyrex en el cual el cátodo y el ánodo están ubicados bajo una atmósfera de gas inerte (neón o argón) a una presión de típicamente 1-5 torr. El cátodo hueco está hecho de (o recubierto con) el elemento respectivo, y el ánodo es un alambre fuerte de níquel o tungsteno. Los dos electrodos están separados por un escudo de cerámica. En el extremo frontal de la lámpara de cátodo hueco, se adjunta una ventana de cuarzo transparente en el rango espectral UV/vis (Rosenberg y Panne, 2003).

La emisión se genera aplicando un voltaje típicamente de 350 V a 500 V a través de los electrodos que conduce a una corriente de 1 a 50 mA, lo que resulta en una descarga eléctrica. Los iones de gases nobles positivos se aceleran hacia el cátodo hueco donde su impacto pulveriza los átomos del elemento a determinar a partir del cátodo hueco. Los iones metálicos pulverizados se excitan a través de colisiones con iones Ne o Ar en la fase gaseosa. Los iones metálicos regresan al estado fundamental emitiendo radiación a longitudes de onda características. El ancho medio típico de una línea de emisión atómica producida por un HCL es de aproximadamente 0,0002 nm (Rosenberg y Panne, 2003).

2.7.4 Atomizadores

La espectrometría de absorción atómica requiere que la especie bajo investigación prevalezca en estado gaseoso y atómico para que se pueda observar la absorción de átomos libres. Los dos métodos más comunes para la producción de átomos en la fase gaseosa hacen uso de la energía térmica para vaporizar y atomizar el analito. La eficiencia de transferencia de muestra, por ejemplo cuánto de la muestra está

¹⁴ *Hollow Cathode Lamp.*

alcanzando la zona de atomización real, y la eficiencia de atomización que indica qué fracción del analito se libera en forma atómica de sus compuestos, determina la eficiencia general. Estos dos factores son importantes y están directamente relacionados con la sensibilidad que se puede lograr con el método particular de atomización (Rosenberg y Panne, 2003).

2.7.4.1 Atomización por llama

En la atomización por llama, la solución de muestra se introduce en la llama con un nebulizador especialmente diseñado. La función del nebulizador es interrumpir el flujo continuo de la muestra y convertirlo en una neblina de gotitas finas de típicamente 5-20 μm de diámetro que se introducen en la cámara de mezcla. El aerosol se mezcla con el gas combustible y el gas oxidante antes de llegar al cabezal del quemador. Como puede ocurrir una serie de reacciones físicas y químicas, como vaporización, disociación, reducción u oxidación, se hace evidente que se requiere un control preciso de las condiciones de operación de la atomización de la llama para obtener señales estables y sensibles. La optimización de las mediciones de absorción atómica de la llama tiene el doble papel de maximizar la respuesta del elemento y minimizar las reacciones secundarias no deseadas (Rosenberg y Panne, 2003).

Nebulizadores. El tipo más común de nebulizador es el nebulizador de tubo concéntrico que consiste en un capilar a través del cual se introduce el líquido y un tubo externo de mayor diámetro con una boquilla en su extremo. A través de este tubo externo, la corriente de gas del nebulizador se dirige a alta presión y logra el transporte de la corriente de muestra líquida por aspiración y la interrupción del suministro continuo de muestra. La ventaja de este tipo de nebulizador es su construcción simple y el hecho de que es autoaspirante (Rosenberg y Panne, 2003).

Diseño del quemador. El aerosol se pulveriza en la cámara de mezcla que cumple dos funciones: primero, se agrega el gas combustible y el gas oxidante adicional (si es necesario) y se mezclan previamente para lograr condiciones óptimas de llama. En segundo lugar, se evita que las gotas más grandes ($>20 \mu\text{m}$ de diámetro) alcancen la llama mediante la disposición de *spoilers* de flujo dentro de la cámara de

mezcla. Como un nebulizador de tubo concéntrico produce un aerosol de distribución de tamaño de gota bastante amplia, es importante evitar que las gotas de mayor diámetro sean transportadas a la llama. Debido al corto tiempo de residencia de la muestra en la llama, las gotas de gran diámetro no se desolvan y atomizan completamente y, por lo tanto, aumentan el ruido de fondo de la llama. Estas se separan de las gotitas de menor diámetro al impactar en los deflectores y se drenan para desecharlas. Por lo tanto, solo menos del 10% de la muestra real que se convierte en aerosol llega al cabezal del quemador (Rosenberg y Panne, 2003). Las propiedades de llama generada se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Mezclas típicas de gases y propiedades de la llama generada.

Combustible	Oxidante	Temperatura de llama /°C	Velocidad máxima de combustión /cm s ⁻¹	Ranura del quemador /mm
Gas Natural	Aire	1700-1900	39-43	100x1.5
Gas Natural	Oxígeno	2700-2800	370-390	
Hidrógeno	Aire	2000-2100	300-440	
Hidrógeno	Oxígeno	2550-2700	900-1400	
Acetileno	Aire	2100-2400	158-266	100x1.5
Acetileno	Oxígeno	3050-3150	1100-2480	
Acetileno	Óxido nitroso	2600-2800	285	50x0.5

Fuente: Adaptado de Rosenberg y Panne (2003).

La velocidad de combustión es la velocidad a la que la llama se expande en una mezcla premezclada de combustible/gas oxidante. Si la velocidad de combustión es mayor que la velocidad de flujo de la mezcla de gas del quemador, la llama se propaga nuevamente dentro del quemador, lo que provoca un retroceso y puede causar la ignición de la mezcla explosiva en la cámara de mezcla. A caudales más altos se alcanza un punto donde la velocidad del flujo es igual a la velocidad del gas en combustión, de modo que se logra un funcionamiento estable de la llama. Si la velocidad del flujo aumenta aún más, la llama se eleva y eventualmente alcanza un punto donde la llama se apaga (Rosenberg y Panne, 2003).

Las llamas que funcionan en condiciones ricas en combustible a veces se llaman llamas "amarillas", mientras que las llamas que funcionan en condiciones de escasez de combustible a menudo se llaman llamas "azules". Mientras que los últimos

son llamas oxidantes, los primeros proporcionan condiciones reductoras que pueden ser ventajosas para la determinación de ciertos elementos. La atomización de un analito no es homogénea en toda la llama, ya que la producción de átomos libres en la llama se rige por la variación de temperatura en las diferentes zonas de la llama, así como por la velocidad de difusión de los gases de la llama que diluye la población de átomos libres en la zona de observación (Rosenberg y Panne, 2003).

2.7.4.2 Atomización electrotérmica

Las mediciones por EAA electrotérmica son discontinuas, y un ciclo de análisis comprende los siguientes cuatro pasos: (1) La muestra se introduce en el horno de grafito frío, (2) el disolvente se evapora a temperaturas de alrededor de 100 °C, (3) la muestra se incinera y se eliminan los componentes de la muestra volátil manteniendo la muestra durante aproximadamente 1 min a 450-900 °C antes que (4) la temperatura aumente rápidamente a 2000-3000 °C para vaporizar y atomizar la muestra en un intervalo muy corto de tiempo (milisegundos a unos segundos). El ciclo completo se puede lograr en aproximadamente 1 minuto debido a las velocidades de calentamiento rápidas logradas mediante el calentamiento eléctrico directo (resistivo) del horno de grafito a corrientes de hasta 400 A y un voltaje del orden de 8 V (Rosenberg y Panne, 2003).

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de la metodología de investigación constó de las siguientes etapas principales: planeación, fase de campo, fase de laboratorio y análisis de los resultados. Estas se desglosan en actividades más detalladas iniciando por el estudio inicial de la zona (de fuentes primarias y secundarias), que incluye reconocimiento físico, geológico, hidrogeológico, climatológico, geográfico y socioeconómico. De igual forma se indagaron antecedentes relacionados con una posible contaminación por metales pesados, específicamente a causa de la inadecuada disposición de la basura. Posteriormente se dió paso a la planeación y ejecución de la metodología, iniciando las visitas de reconocimiento a la zona de influencia del relleno sanitario, identificando las fuentes de agua superficiales, inventariando pozos excavados y/o perforados, además de las características del suelo y los puntos más vulnerables de las matrices mencionadas.

Se delimitó la zona de estudio basándose principalmente en el movimiento de las aguas, considerándose esta dirección como la de una posible pluma contaminante en caso de haber algún derrame o uso incorrecto de las instalaciones del relleno sanitario. Delimitada la zona se especificaron las rutas y los criterios de selección de puntos de muestreo, se definen los procedimientos de toma y recolección de datos de las muestras, además del transporte y almacenamiento apropiado. Consecutivamente la etapa experimental inició desde la preparación de la cristalería a utilizar, prosiguió la digestión ácida a la que fue sometida cada muestra con el fin de retirar interferencias de material orgánico, para culminar con el análisis de las muestras.

En último lugar se ejecutó el análisis de resultados en el que se comparó contra estándares de calidad de agua y suelo nacionales e internacionales con el fin de verificar el cumplimiento o no cumplimiento de tales normativas. También se interpretaron los resultados a partir de las características fisicoquímicas del agua y suelo de la zona, enumerando posibles causas de los hallazgos resultantes en la fase de campo y fase experimental.

El procedimiento general de la metodología de investigación hasta su fase de campo se presenta en la Figura 3.1.

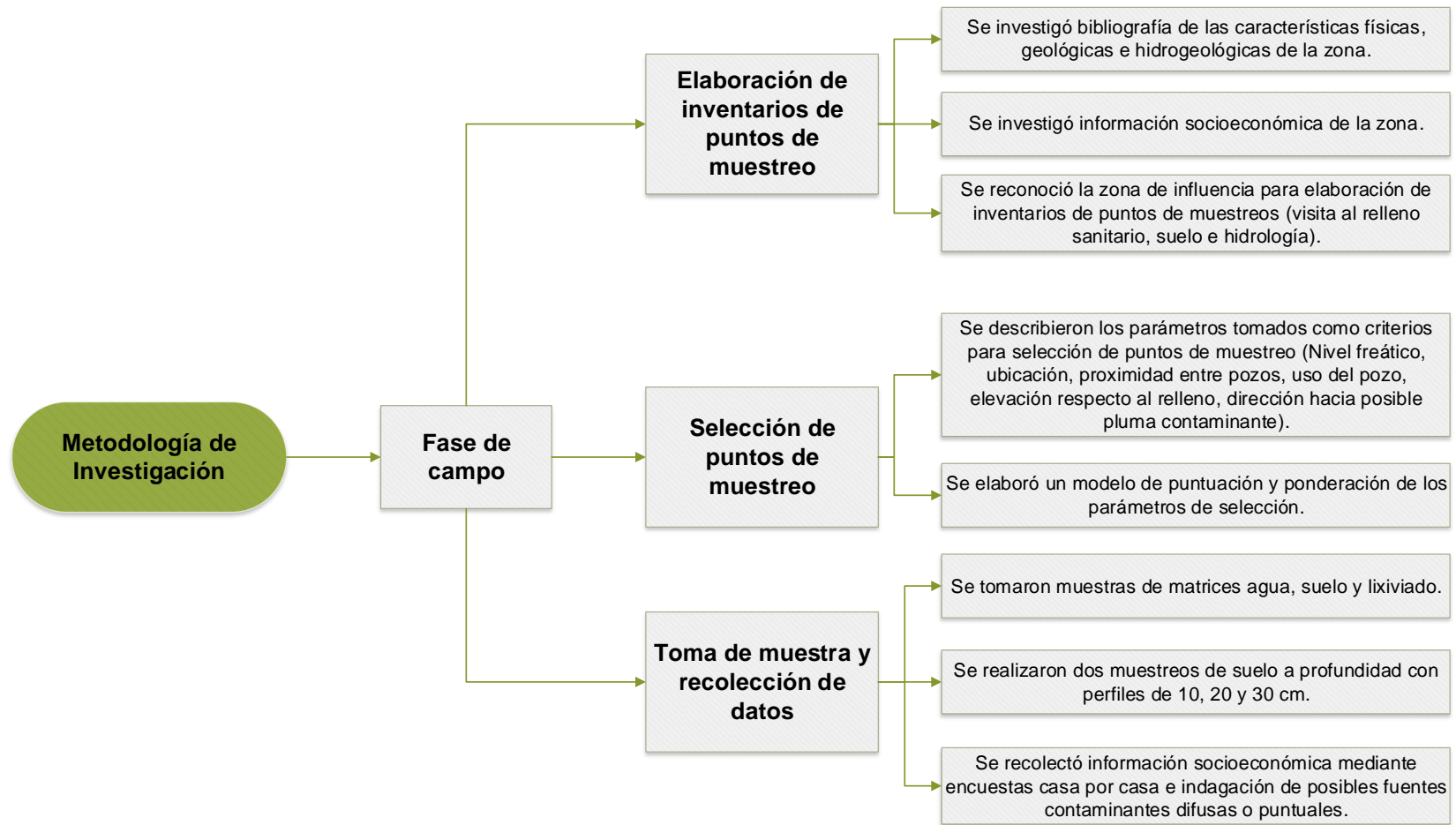


Figura 3.1 Descripción de la fase de campo en la metodología de investigación.

3.1 Fase de campo

3.1.1 Visitas de reconocimiento

Para la selección de los puntos de muestreo, se realizaron dos visitas de reconocimiento a la zona de influencia del relleno sanitario en abril de 2019; en las que se identificaron los pozos excavados ubicados en los cuadrantes I y II del área de estudio (véase la Figura 1.4), las características del terreno y los usos del suelo y agua de la zona.

3.1.1.1 Primera visita de reconocimiento

En la primer visita de reconocimiento se realizó un recorrido guiado a las instalaciones del relleno sanitario, observándose la distribución de las celdas de disposición de desechos y las lagunas de lixiviados. También se efectuó un recorrido por el caserío San José El Zompopo hasta un punto ubicado a aproximadamente 1,500 m del relleno sanitario; identificándose sobre la ruta los pozos artesanales existentes de uso comunitario o individual.

3.1.1.2 Segunda visita de reconocimiento

Se recorrió el caserío San Jacinto, cantón Cujucuyo, y el caserío y cantón Cutumay Camones, donde se realizó un levantamiento de los posibles puntos de muestreo y de referencia (pozos y manantiales) en la zona. La información recolectada se registró en los formatos dispuestos para la recolección de datos (Anexo A 1).

3.1.2 Inventario de puntos de muestreo para las matrices de estudio

3.1.2.1 Aguas superficiales

Se identificaron cinco fuentes de aguas superficiales en los alrededores del relleno sanitario: las quebradas El Almendro y El Muerto, que corren en dirección noreste y son límites naturales del relleno sanitario; el río San Jacinto o Amayito o Chilcuyo que cruza transversalmente la CA12 al norte del relleno (de oeste a este); el río Gallardas al este, en el caserío San José El Zompopo; y el río Gavia al oeste, en el caserío San Jacinto.

Para los puntos de toma de muestras se consideraron las fuentes de agua superficial que estuvieran dentro del área de influencia del relleno sanitario: las quebradas El Almendro y El Muerto, y dos puntos más de referencia en el río San Jacinto, un punto antes del punto de confluencia del río con las quebradas y otro después del mismo.

3.1.2.2 Aguas subterráneas

Durante las visitas exploratorias se realizó un inventario de los pozos excavados en los cuadrantes I y II dentro del área de influencia, encontrándose 15 pozos en el cuadrante I, 19 pozos y un manantial en el cuadrante II; y un manantial más en el cuadrante IV (véase la Figura 1.4). Además, se contabilizan los dos pozos perforados, propiedad del relleno sanitario, como puntos de referencia.

La información general de los pozos excavados identificados sobre las rutas de reconocimiento se detalla en el anexo B.1.

3.1.2.3 Suelos

Los principales criterios utilizados para definir la metodología de muestreo de suelos fueron: tipo de suelo, uso de la tierra, escala del trabajo (exploratorio o a detalle) y accesibilidad al punto de muestreo, etc. De acuerdo a lo anterior, entre las estrategias de muestreo más adecuadas para el tipo de estudio se halla la rejilla circular; ideal para delimitar zonas contaminadas por instalaciones donde existen tanques de almacenamiento o donde la fuente contaminante es conocida y corresponde a un solo punto (MINAM¹⁵, 2014).

Con base a esto, se definió inicialmente un tipo de muestreo de transecto radial que tiene como centro el relleno sanitario (más precisamente el área de la laguna N° 1), de modo que permitiera la identificación de una posible pluma contaminante y la determinación de un posible gradiente de concentración. El trazado de la red sobre

¹⁵ Acrónimo del Ministerio del Ambiente de Perú.

el área de estudio resultó en 33 puntos sujetos a la evaluación y selección de los puntos finales de muestreo.

La información general de los posibles puntos de muestreo se contempla en el anexo B.2.

3.1.3 Selección de los puntos de muestreo

3.1.3.1 Agua superficial

Tomando en cuenta la dirección del flujo de la escorrentía superficial, una potencial intervención en el arrastre de posibles agentes contaminantes con la misma, la facilidad de acceso y la cercanía con el perímetro del relleno sanitario; se seleccionaron para la toma de muestras de la matriz agua superficial, las quebradas El Almendro y El Muerto, y el río San Jacinto. Se dispusieron puntos a la altura de las lagunas de lixiviados y a lo largo de la línea de flujo, dentro y fuera de las instalaciones del relleno. En el río San Jacinto se tomaron muestras en la zona del caserío San José El Zompopo, antes y después del punto de confluencia de las quebradas con el flujo del río. En la Tabla 3.1 se pueden ver con mayor detalle los puntos designados para muestreo.

Tabla 3.1 Puntos de muestreo de aguas superficiales.

Código	Coordenadas geográficas		Fuente de agua superficial
	Latitud	Longitud	
QEA01	14° 3'21.77"N	89°30'24.47"O	Quebrada El Almendro
QEA02	14° 3'45.79"N	89°30'23.07"O	Quebrada El Almendro
QEA03	14° 3'53.97"N	89°30'14.66"O	Quebrada El Almendro
PCQ00	14° 4'7.03"N	89°30'4.40"O	Punto de confluencia de las quebradas El Almendro y El Muerto
QEM01	14° 3'45.78"N	89°30'5.05"O	Quebrada El Muerto
QEM02	14° 3'53.98"N	89°29'57.42"O	Quebrada El Muerto
QEM03	14° 4'7.02"N	89°29'52.62"O	Quebrada El Muerto
RSJ01	14° 4'19.20"N	89°29'53.86"O	Río San Jacinto
RSJ02	14° 4'14.45"N	89°29'47.19"O	Río San Jacinto

3.1.3.2 Agua subterránea

Se realizó una selección no probabilística de los puntos de muestreo, ya que el plan de muestreo debe adaptarse a los pozos excavados existentes en la zona. Los criterios tomados en cuenta fueron sometidos a evaluación mediante un sistema que puntúa en una escala del 1-10 según ponderaciones asignadas por significancia a los parámetros tomados en cuenta, de acuerdo al criterio del investigador (véase la Tabla 3.2). Se promediaron los puntajes finales y se seleccionaron los pozos cuyo puntaje fuera igual o mayor al promedio.

A continuación se describen los principales parámetros tomados en cuenta para la selección de pozos como punto de muestreo:

- a. Nivel freático:** el nivel freático describe el límite entre el suelo saturado de agua y el suelo insaturado, debajo del nivel freático, las rocas y el suelo están llenos de agua. Se filtra a través del suelo, los sedimentos y las rocas. Esta agua incluye precipitaciones, como lluvia y nieve (National Geographic Society, 2013). Según el Estudio de Impacto Ambiental para el relleno sanitario, el nivel freático de la zona varía entre los 3.5 a 10 m, por lo que se dará prioridad a los pozos excavados a mayor profundidad (superior a 10 m), debido a que estos pueden arrojar resultados del estado del acuífero superficial de la zona.
- b. Ubicación con respecto a la carretera CA12:** los pozos más cercanos a la carretera tienen la probabilidad de contaminación cruzada debido a que están expuestos a derrames de lixiviados (de los mismos camiones que ingresan al relleno), igual de aceites u otros líquidos que no provienen directamente de la pluma contaminante. Debido a esto la prioridad de selección de los pozos aumenta a medida que crece la distancia con la carretera CA12.
- c. Proximidad entre pozos:** en caso de encontrarse 2 o 3 pozos contiguos, se seleccionaron los que cumplan los demás criterios. Se definió así, con el objetivo de adaptarse a los recursos disponibles, de tal manera que se pueda abarcar con mayor amplitud la zona de influencia.

d. Uso del pozo: se priorizaron los pozos en uso, sobre todo aquellos que sean utilizados para el consumo humano y riego.

Tabla 3.2 Modelo de puntuación y ponderación de los parámetros de selección de pozos para toma de muestras de agua subterránea.

criterio		Puntaje	Ponderación	Resultado
Nivel freático	0.0-10.0 m	5 ptos	0.30	
	11.0-20m	7 ptos		
	>20.0 m	10 pts		
Ubicación con respecto a la carretera CA12	0.0-25.0 m	2 ptos	0.20	
	26.0-50.0 m	6 ptos		
	>50.0 m	10 ptos		
Proximidad entre pozos (distancia en línea recta con el pozo más próximo)	0-50 m	5 ptos	0.20	
	>50 m	10 ptos		
Uso del pozo	En uso	10 ptos	0.30	
	En desuso	3 ptos		
Total				

La calificación de los parámetros para cada pozo con base en las ponderaciones anteriormente definidas se presenta en el anexo B.3.

La Figura 3.2 ubica en un mapa los puntos de muestreo de las matrices de estudio, seleccionados a través del método evaluador no probabilístico mencionado anteriormente.

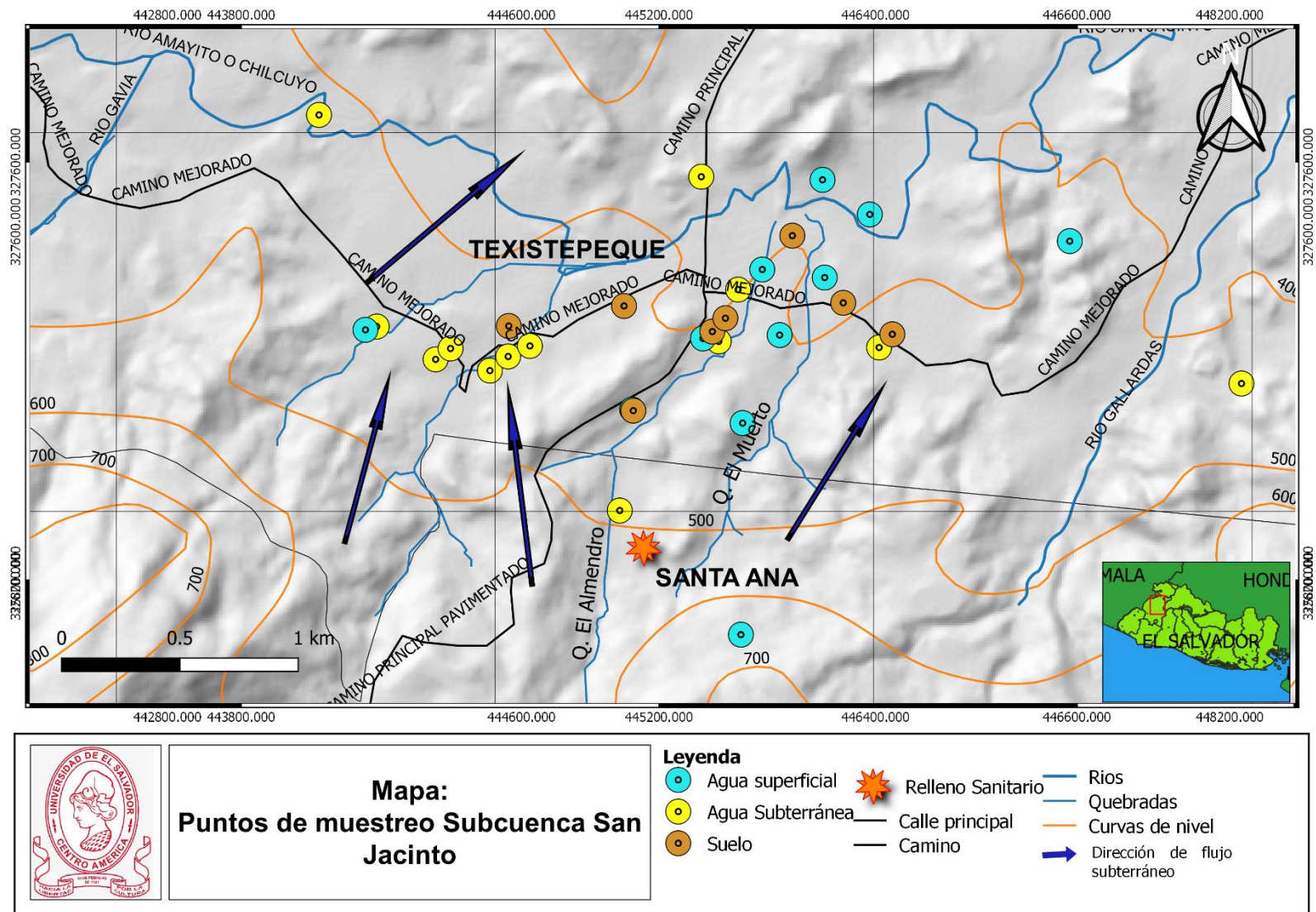


Figura 3.2 Ubicación de los pozos seleccionados y los puntos escogidos sobre la ruta de las fuentes de agua superficial y suelos, como puntos de muestreo.

3.1.3.3 Suelos

Para la selección de los puntos de muestreo se calificaron cada uno de los puntos resultantes de la rejilla circular, con base en un modelo de ponderación de los siguientes parámetros considerados según el criterio del investigador:

- a. **Cercanía con el relleno sanitario:** Se tomaron puntos de muestreo en un radio de 600 metros del relleno sanitario, con la finalidad de centrar el estudio en la identificación de una posible contaminación de metales pesados.
- b. **Accesibilidad a la toma de muestra:** Se seleccionaron puntos que se encuentren en terreno homogéneo, no rocoso y de preferencia que no se trate de laderas o lugares en los que la toma de muestra represente una situación de riesgo de accidentes.
- c. **Preferentemente que sea suelo ocioso:** Se priorizaron áreas no cultivadas, para evitar resultados que puedan venir de contaminación cruzada o causada por agentes externos al relleno sanitario.
- d. **Poca variación en las pendientes del terreno:** Se seleccionaron terrenos cuya variación de la pendiente es mínima, es decir, que no se encuentren lomas o grandes protuberancias que por efecto de gravedad alteren la posible migración del contaminante y sean muestras poco representativas.
- e. **Elevación con respecto al relleno sanitario:** Se priorizaron aquellos puntos ubicados en zonas de menor altitud respecto al relleno sanitario. La posible pluma contaminante tiene origen a una altura de 425 msnm aproximadamente, por lo que pierden prioridad aquellos puntos a más de 430 msnm.
- f. **Que estén en la dirección de la posible pluma contaminante (dirección noreste):** esto debido a que la dirección de una posible pluma contaminante está sometida a la gravedad, es decir que sigue el desnivel del terreno.

El valor de los parámetros a evaluar para cada punto levantado se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Modelo de ponderación de los criterios de selección de puntos de muestreo superficial de suelos.

Criterio		Puntaje	Ponderación	Resultado
Cercanía con el relleno sanitario	0.0-150.0 m	10 ptos	0.25	
	151.0-300.0 m	7.5 ptos		
	301.0-450.0 m	5 ptos		
	451.0-600.0 m	2.5 ptos		
Acceso a la toma de muestra	Accesible	10 ptos	0.25	
	No Accesible	0 ptos		
Preferentemente suelo ocioso	Suelo ocioso	10 ptos	0.10	
	Suelo cultivado	0 ptos		
Elevación con respecto al relleno sanitario	435.0-440.0	10 ptos	0.25	
	441.0-445.0	7.5 ptos		
	446.0-450.0	5 ptos		
	451.0-460.0	2.5 ptos		
Dirección de la posible pluma contaminante (Noreste)	Noreste	10 ptos	0.15	
	Norte	8 ptos		
	Sureste	5 ptos		
	Sur	2 ptos		
	Noroeste	5 ptos		
	Este	8 ptos		
	Suroeste	2 ptos		
	Oeste	5 ptos		
Total				

La calificación de los posibles puntos de muestreo con base en las ponderaciones definidas se presenta en el anexo B.4.

Para la evaluación de un posible gradiente de concentración se consideraron dos puntos adicionales, situados de forma aleatoria en la dirección del flujo de la quebrada El Almendro. Para cada punto se tomaron muestras en tres horizontes verticales: 10 cm, 20 cm y 30 cm para poder evaluar perfiles a profundidad del suelo cercano al relleno.

3.1.4 Procedimientos de toma de muestras

Con base en las consideraciones analíticas correspondientes y con el fin de minimizar la posible injerencia de contaminación cruzada en los resultados provenientes de los procedimientos de muestreo, se seleccionaron técnicas de recolección adecuadas para cada tipo de muestra, condiciones de toma y disponibilidad de materiales según el análisis al que serían sometidas. En la Tabla 3.4 se ordenan de forma resumida los procedimientos de toma de muestra con sus respectivas referencias.

3.1.4.1 Recolección de muestras de agua superficial

Se tomó una muestra simple al azar por punto de muestreo siguiendo la metodología indicada por la *Environment Protection Authority* del estado de Victoria, Australia (EPA Victoria) en sus lineamientos para las fuentes de residuos industriales. Se tomaron las precauciones para que el recipiente de muestra tuviera espacio para la aireación, mezcla, etc. De acuerdo a la sección 3010B del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 20th Ed., de la APHA¹⁶ (en adelante SMEW-W) inmediatamente tomada la muestra se agregaron 2 mL de ácido nítrico para la conservación de la misma. La dilución causada por la acidificación se consideró insignificante debido a la relación de volúmenes muestra/ácido.

3.1.4.2 Recolección de muestras de agua subterránea

Se preparó una metodología de muestreo para pozos excavados basado en protocolos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina, y de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) de Uruguay. La toma de muestras de los pozos perforados se realizó con apoyo del personal del relleno sanitario siguiendo sus protocolos internos de toma de muestras.

Se tomó una muestra de 1000 mL en cada pozo. El volumen de muestras tomadas y método de conservación es igual que los considerados para agua superficial.

3.1.4.3 Recolección de muestras de suelo

Se estableció el procedimiento de recolección de muestras de suelo indicado por la *Science and Ecosystem Support Division* (SESD) de la U.S. *Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) en sus procedimientos de operación en campo (SESDPROC), que también toma en cuenta los cuidados pertinentes para su transporte y conservación. A su vez, para detalles más específicos se utilizan guías de muestreo de suelos de la Universidad Nacional Agraria (UNA) y *Catholic Relief Services* (CRS) de Managua, Nicaragua.

¹⁶ Abreviación de Sociedad Americana de Salud Pública, por sus siglas en inglés.

Se tomaron un total de 13 muestras simples de suelo: 7 muestras superficiales y 6 de muestras en perfiles verticales para evaluar la concentración en distintos horizontes del suelo. El tamaño de muestra tomado en cada punto es de 1 kg.

Tabla 3.4 Procedimientos de toma de muestras y referencia de las mismas, designados para cada matriz en estudio.

Etapa	Matriz	Referencia
Recolección de muestras	Agua superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Sampling and analysis of waters, wastewaters, soils and wastes, EPA Victoria (Australia)
	Agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • Protocolo de Muestreo, Transporte y Conservación de Muestras de Agua con Fines Múltiples (consumo humano, abrevado animal y riego), INTA (Argentina) • Guía para la Toma, Conservación y Transporte de Muestras de Agua Subterránea, DINAMA (Uruguay)
	Suelo	<ul style="list-style-type: none"> • SESDPROC Soil Sampling, U.S. EPA • Guía Técnica de Muestreo de Suelos, UNA (Nicaragua)

3.1.4.4 Recolección de lixiviados

La investigación se complementa con el análisis de los vertidos de las lagunas de lixiviados. El relleno sanitario cuenta con dos lagunas para captación de los lixiviados, de 30 por 75 metros por 4 metros de profundidad (9,000.00 m³) cada una, a las cuales llega el lixiviado a través de tuberías de Polietileno de Alta Densidad (HDPE por sus siglas en inglés) de 15". Las lagunas se han impermeabilizado con una geomembrana de HDPE, de 2 milímetros de espesor sobre 40 centímetros de limo arenoso del lugar (Meléndez et al., 2011).

Debido a las dimensiones de la laguna (véase la Figura 3.3), se dificulta tomar muestras de sedimento del fondo, por lo que se recolectó una sola muestra simple de los vertidos en la boca de la tubería que descarga a la laguna N° 1.

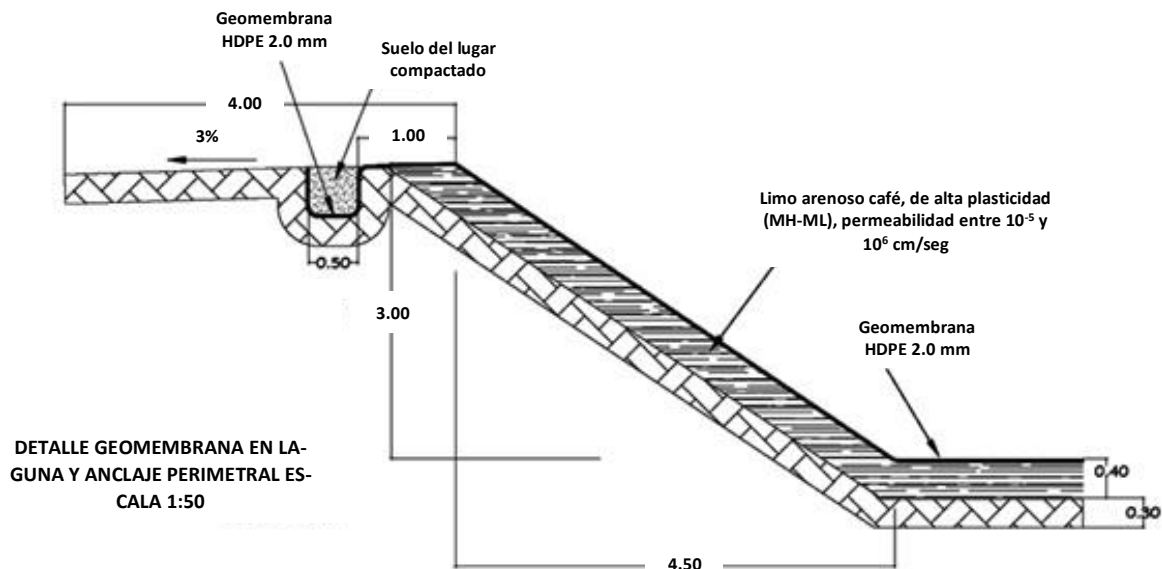


Figura 3.3 Sección típica de tubería y laguna de lixiviados. Fuente: Meléndez, et al, (2011).

3.1.4.5 Envasado y etiquetado

Con base en la sección 1060A y 1060B del SMEWW; y a los protocolos, guías y manuales que propone el IHOBE¹⁷ en la serie de publicaciones Investigación de la Contaminación del Suelo, se definieron los envases y el material de los mismos para contener las muestras de las matrices según el análisis al que serían sometidas. Los envases que contendrían las muestras de agua fueron lavados con ácido nítrico al 30% por 48 h y posteriormente enjuagados con agua del grifo, agua destilada y agua bidestilada. Para suelos se utilizaron bolsas de polietileno selladas al vacío y esterilizadas (así comercializadas).

La etiqueta diseñada para el control de datos de las muestras de agua, se presenta en el anexo A.2.

¹⁷ Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco, por sus siglas en euskera.

Tabla 3.5 Tipo de envase que debe ser utilizado para la recolección y transporte de muestras.
Fuente: IHOBE.

Matriz	Envase	Análisis químico
Agua superficial y agua subterránea	Polietileno, vidrio*	Temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto*
	Polietileno	Cd, Ni, Pb, Zn
Suelos	Bolsa de polietileno	Cd, Ni, Pb, Zn

*Análisis indicado solo para este tipo de envase.

3.1.4.6 Registro de datos

Se preparó un formulario específico para el registro de datos de cada matriz, los cuales se presentan en los anexos B.5-B.7.

3.1.4.7 Transporte y almacenamiento

Todas las muestras recolectadas fueron puestas inmediatamente en oscuridad y transportadas en baño de hielo. Las muestras designadas para determinación de metales pesados acidificadas pueden mantenerse en condiciones idóneas hasta por seis meses.

3.2 Fase de laboratorio

3.2.1 Pretratamiento de las muestras

3.2.1.1 Digestión ácida de las muestras de agua superficial y subterránea

Se ha seleccionado el método EPA 3005A (anexo D.1) para la digestión ácida de las muestras de la matriz aguas. Las muestras preparadas de esta forma fueron sometidas a análisis por espectrometría de absorción atómica de llama y espectrometría de absorción atómica por horno de grafito.

Las muestras que no fue posible cuantificar con espectrometría de absorción atómica de llama, se hicieron analizar por espectrometría de absorción atómica por horno de grafito.

3.2.1.1.1 Preparación de la cristalería

La cristalería a utilizar para el análisis de elementos traza en las muestras se lavó a fondo con una solución de detergente no iónico libre de metales y posteriormente

se enjuagó con abundante agua del grifo, agua destilada y agua bidestilada, para finalmente secar en estufa a 60 °C.

3.2.1.2 Digestión ácida de las muestras de suelo

Las muestras de suelo fueron sometidas a un proceso de digestión vía seca para muestras sólidas basado en los métodos de la *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC).

3.2.1.2.1 Digestión vía seca

La digestión vía seca es un procedimiento rápido por el que la eliminación de la materia orgánica se realiza por incineración a altas temperaturas para posteriormente reducir en caliente con HCl concentrado grado reactivo. El procedimiento se realizó siguiendo la metodología propuesta por Pineda y Rivera (2016) y los protocolos internos del Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador (anexo D.2).

3.2.1.2.2 Preparación de la cristalería

El procedimiento de preparación y lavado de los recipientes para muestras son los mismos especificados en el apartado 3.2.1.1.1.

3.3 Criterios de evaluación de resultados versus normas de referencia

Para evaluar la aptitud de las matrices agua y suelo se seleccionaron normas de referencia priorizando los usos que los pobladores de las comunidades cercanas dan a los recursos en la zona de estudio. Esta diferencia es más evidente en el caso de la matriz agua, por lo que se definen los usos prioritarios 1 y 2, que indican la aptitud para el desarrollo de la vida acuática y para consumo humano/actividades domésticas respectivamente.

En la Tabla 3.6 se resumen las referencias de calidad de aguas para uso agrícola, residencial, consumo humano y que propicie el desarrollo de la vida acuática; así como de suelos con propósitos de explotación agropecuaria.

Tabla 3.6 Valores y normas de referencia para la evaluación de la calidad de aguas y suelos en contenido de metales pesados.

Matriz	Normas de referencia	Límite máximo permisible			
		Cadmio	Níquel	Plomo	Zinc
Agua superficial (ríos y quebradas)	Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, Perú (2015)	0.01 mg/L	0.2 mg/L	0.05 mg/L	2.0 mg/L
Agua superficial (manantiales)	Guías para la calidad del agua potable, OMS (2006) RTS 13.02.01:14, El Salvador (2018)	0.03 mg/L	0.07 mg/L	0.01 mg/L	4.0 mg/L
Agua subterránea (consumo humano/residencial)	Guías para la calidad del agua potable, OMS (2006) RTS 13.02.01:14, El Salvador (2018)	0.03 mg/L	0.07 mg/L	0.01 mg/L	4.0 mg/L
Suelos (uso agrícola/residencial/comercial)	NOM-147-SEMAR-NAT/SSA1-2004, México (2007) Real Decreto 1310/1990, España (1990)	37 mg/kg, base seca	1,600 mg/kg, base seca	400 mg/kg, base seca	150 mg/kg (pH<7) 450.0 mg/kg (pH>7)

Adicionalmente se tomaron cuatro parámetros fisicoquímicos en algunas muestras de aguas con la sonda multiparámetros YSI Professional Plus y se enviaron muestras de suelo a los laboratorios del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA) para medición de contenidos de P, K, pH y textura con el fin de completar los resultados de la investigación en las matrices de estudio según el uso que se hace de ellas.

3.3.1 Evaluación fisicoquímica de suelos

En el caso de los suelos, se midieron parámetros indicadores de la calidad del suelo para usos domiciliarios y agrícolas:

- a. **pH:** determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos

presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5.5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (>8.5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6.5 (FAO, s.f.).

- b. Textura:** se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades (FAO, s.f.).
- c. Fósforo:** El fósforo es un macroelemento esencial para el crecimiento de las plantas. El fósforo participa en los procesos metabólicos, tales como la fotosíntesis, la transferencia de energía y la síntesis y degradación de los carbohidratos. El fósforo se encuentra en el suelo en compuestos orgánicos y en minerales. Sin embargo, la cantidad disponible en el suelo es muy baja en comparación con la cantidad total del fósforo en el suelo. Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo como el ion ortofosfato: HPO_4^{2-} o H_2PO_4^- . La forma en que el fósforo es absorbido es afectado por el pH. En un pH más alto predomina la forma H_2PO_4^- . La movilidad del fósforo en el suelo es muy limitada y por lo tanto, las raíces pueden absorber el fósforo solamente de su entorno inmediato.
- d. Potasio:** Interviene en múltiples procesos en todas las estructuras de las plantas. Entre sus funciones principales incluye su intervención en el proceso de fotosíntesis, en el que se encarga de regular la apertura y cierre de estomas, lo que regula la absorción de CO_2 . El potasio también desencadena la activación de múltiples enzimas, relacionadas sobre todo con el crecimiento de la planta. De igual manera propicia la síntesis de diversas proteínas. Otra de las grandes funciones del potasio es mejorar la tolerancia de la planta al

estrés hídrico a través de la regulación del proceso de osmorregulación. Sobre todo porque tanto la absorción de agua a través de las raíces, como su pérdida a través de los estomas, son procesos condicionados por el potasio.

Los valores de referencia para los parámetros fisicoquímicos medidos en suelos son de uso interno del laboratorio especializado que realizó los análisis.

3.3.2 Evaluación fisicoquímica de aguas

El análisis de la concentración de Cd, Ni, Pb y Zn en aguas superficiales y subterráneas, se complementa con la medición de cuatro parámetros fisicoquímicos de importancia según el uso al que es sometido el recurso:

- a. **Oxígeno disuelto (OD):** cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua y es esencial para los ríos y lagos saludables. Puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los valores de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (MARN, 2017).
- b. **Potencial Hidrógeno (pH):** es una propiedad de carácter químico de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática e indica si el agua es ácida, alcalina o neutra (MARN, 2017).
- c. **Sólidos disueltos totales (STD):** pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua o un efluente de varias formas. Aguas para el consumo humano, con un alto contenido de sólidos disueltos, son por lo general de mal agrado para el paladar y pueden inducir una reacción fisiológica adversa en el consumidor (MARN, 2017).
- d. **Conductividad eléctrica (CE):** La conductividad es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. Esta habilidad depende de la presencia de iones; en su concentración total, movilidad y valencia; y sobre la temperatura de medición (APHA, 1998).

Los valores de referencia para los parámetros fisicoquímicos para aguas superficiales, subterráneas y suelos se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores de referencia de los parámetros fisicoquímicos y de nutrientes a considerar en las matrices de estudio.

Matriz	Parámetro fisicoquímico	Unidades	Valores de referencia	Referencia
Agua superficial: ríos y quebradas (uso agrícola/consumo animal)	pH	Unidades de pH	6.0-8.5	FAO
	Oxígeno Disuelto	mg/L	—	—
	Sólidos Totales Disueltos	mg/L	0-2000	FAO
	Conductividad Eléctrica	mS/m	0-300	FAO
Agua superficial: manantiales (consumo humano)	pH	Unidades de pH	6.0-8.5	RTS 13.02.01:14 (El Salvador)
	Oxígeno Disuelto	mg/L	—	—
	Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1000	RTS 13.02.01:14 (El Salvador)
	Conductividad Eléctrica	mS/m	—	—
Agua subterránea (consumo humano/residencial)	pH	Unidades de pH	6.0-8.5	RTS 13.02.01:14 (El Salvador)
	Oxígeno Disuelto	mg/L	4	Ley Federal de Aguas (México)
	Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1000	RTS 13.02.01:14 (El Salvador)
	Conductividad Eléctrica	mS/m	—	—

Referencia: Mexicanos, EE. UU. (1981). Ley Federal de derechos. Ciudad de México: México; El Salvador. (2018). RTS 13.02.01:14. *AGUA. AGUA DE CONSUMO HUMANO. REQUISITOS DE CALIDAD E INOCUIDAD*. San Salvador: OSARTEC.

3.4 Metodología para la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea

3.4.1 Inventario de cargas contaminantes al subsuelo

Para la elaboración del inventario de cargas contaminantes, se siguió como base el procedimiento propuesto por Foster, et al (2003), expuesto en la Figura 3.4. Se hizo uso de fuentes primarias (encuesta y visitas de campo) y secundarias de información (imágenes satelitales de Google Earth, Google Maps y mapa detallado de Texistepeque cortesía de la Subdelegación PNC del municipio homónimo), para la

identificación y georreferenciación de las posibles fuentes de contaminación según el tipo de la misma a inventariar.

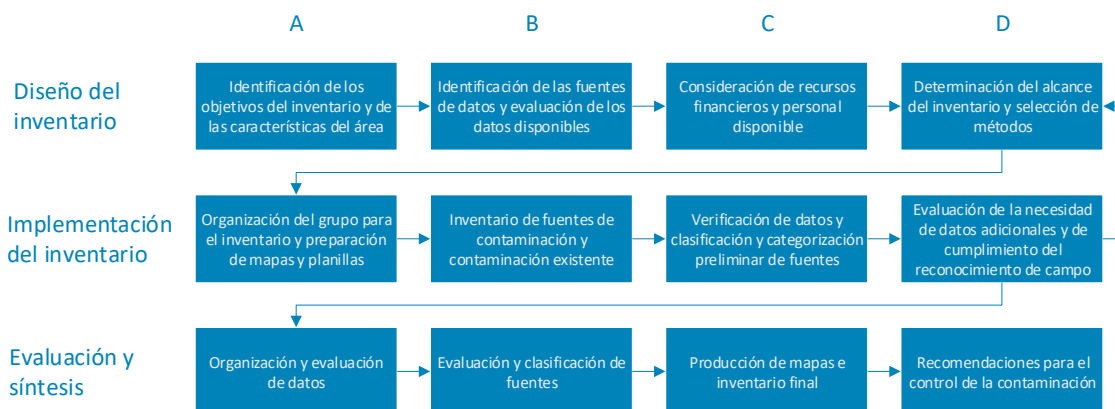


Figura 3.4 Desarrollo de un inventario de fuentes potenciales de carga contaminante al subsuelo. Fuente: Adaptado de Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, y Paris (2003).

Se recurrió a distintas técnicas debido a que la recolección de información debía limitarse a toda el área de la subcuenca del río San Jacinto, al grado de detalle y a las campañas de muestreo de las matrices agua superficial, agua subterránea y suelo detalladas anteriormente en este mismo capítulo.

3.4.1.1 Método POSH para la caracterización de la carga contaminante

Es necesario tener en cuenta las diversas formas de clasificación de las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo durante el inventario. Sin embargo, para el tipo de inventario simplificado a realizar, es conveniente caracterizar las fuentes potenciales de cargas contaminantes al subsuelo sobre la base de dos características (Foster, et al, 2003):

- El origen del contaminante (*Pollutant Origin*):** La posibilidad de presencia de contaminantes que se conoce o se espera sean persistentes y móviles en el subsuelo.
- El incremento de la recarga de agua al acuífero (*Surcharge Hydraulically*):** La existencia de una carga hidráulica (sobrecarga o incremento en la tasa de recarga natural) asociada capaz de generar el transporte advectivo de contaminantes hacia los sistemas acuíferos.

La evaluación de cada fuente en función a las características propuestas por el método POSH, permitió generar tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: reducido, moderado y elevado sobre la clasificación del tipo de fuente: puntual, lineal, difusa (Jarrín, et al, 2017).

Las fuentes dispersas normalmente provocan plumas de contaminación con concentración más baja que las fuentes puntuales, aunque ocupan una gran área dificultando la determinación de su extensión y su monitoreo. Las fuentes puntuales producen plumas más intensas y en puntos específicos, facilitando su identificación. Sin embargo cuando estas actividades son pequeñas y están dispersas dentro del área urbana, acaban siendo de difícil localización, exigiendo la elaboración de un inventario de campo para su identificación (Hirata, 2002).

Para la elaboración del mapa del inventario de fuentes contaminantes se generó una data con todas las posibles fuentes de contaminación identificadas con la caracterización respectiva de la contaminación para ser exportados a QGIS con la simbología específica de cada una. La caracterización de la contaminación de cada fuente se hizo tal como proponen Foster, et al, (2003) (véase la Tabla 3.8 y Tabla 3.9).

Tabla 3.8 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo al método POSH.

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
Elevado	Cobertura del servicio de cloacas menor que el 25% y densidad poblacional superior a 100 personas/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
Moderado	Intermedio entre elevado y reducido	
Reducido	Cobertura del servicio de cloacas mayor al 75% y densidad poblacional menor a 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

Fuente: Adaptado de Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, y Paris (2003)

Tabla 3.9 Clasificación y categorización de fuentes de contaminación puntuales de acuerdo al método POSH.

Potencial por generación de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación				
	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales*	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Exploración minera y petrolera
Elevado	Residuos de industria tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100 kg/día de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5 ha		Operación de campos de petróleo, minas metalíferas
Moderado	Precipitación >500 mm/año con residuos residenciales/industriales tipo 1/ agroindustriales, todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas/canteras de materiales inertes
Reducido	Precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/industriales tipo 1/ agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial urbano mezclado, agroindustrial y minero no metalífero si el área <1 ha	Cementerios	

Fuente: Adaptado de Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, y Paris (2003)

*Los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener las mismas categorías que las propias industrias.

Industria tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos

Industria tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones

Industria tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal

3.4.2 Metodología para la evaluación de la movilidad de los metales

El objetivo de realizar el perfil a profundidad de concentraciones de los metales plomo, níquel, cadmio y zinc es el de identificar una posible pluma contaminante y de-

terminar si los niveles de concentración de metales se atenúan a medida la profundidad aumenta, si se muestran constantes o si hay diferencias considerables que indiquen movilidad o retención de metales en el suelo a las condiciones de pH. Las actividades realizadas para llevar a cabo dicho objetivo son las siguientes:

- a. Identificación de los tipos de suelo de la zona de estudio.
- b. Realización de muestreos.
- c. Análisis químico de las muestras: pH y textura.
- d. Definición de plan de muestreo de profundidad a detalle.

En la Tabla 3.10 se muestra un compilado de todas las metodologías, procedimientos de análisis y de muestreo vertidos en este capítulo con su respectiva referencia de normativa o procedimental, como respuesta a la planificación inicial en función de dar cumplimiento a los objetivos de investigación planteados

Tabla 3.10 Metodologías a utilizar y normativas de referencia para el análisis químico y de resultados de las matrices de estudio.

Objetivo específico	Actividades		Referencia metodológica/Normativa	
<p>Cuantificar los niveles de concentración de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica, para establecer los niveles presentes de estos elementos en las matrices de agua superficial, agua subterránea y suelo analizados.</p>	Toma de muestras	Agua superficial	-Sampling and analysis of waters, wastewaters, soils and wastes, EPA Victoria (Anexo B.1)	
		Agua subterránea	-Protocolo de Muestreo, Transporte y Conservación de Muestras de Agua con Fines Múltiples (consumo humano, abrevado animal y riego, INTA (Argentina); -Guía para la Toma, Conservación y Transporte de Muestras de Agua Subterránea, DINAMA (Uruguay) (Anexo B.2)	
		Suelos	SESDPROC Soil Sampling, U.S. EPA (Anexo B.3)	
	Análisis fisico-químico y de micronutrientes	Agua superficial y agua subterránea	Temperatura	Sonda multiparamétrica YSI Professional Plus
			pH	
			Conductividad eléctrica	
			Oxígeno Disuelto* Sólidos totales disueltos	
	Pretratamiento de las muestras	Agua superficial y agua subterránea	Digestión ácida	Método 3005A, U.S. EPA (Anexo C.1)
		Suelos	Digestión ácida vía seca	Método de digestión vía seca para muestras sólidas propuesto por Pineda y Rivera (2016) (Anexo C.2)
		Análisis cuantitativo de las muestras	Espectroscopía de Absorción Atómica con Horno de Grafito	

Continúa página siguiente

Tabla 3.10 Metodologías a utilizar y normativas de referencia para el análisis químico y de resultados de las matrices de estudio (Continuación)

Objetivo específico	Actividades		Referencia metodológica/Normativa
Contrastar los resultados obtenidos con estándares de calidad nacionales e/o internacionales para los posibles usos potenciales de los recursos agua superficial, agua subterránea y suelo con el fin de establecer el cumplimiento de estos parámetros en la zona de estudio.	Agua superficial	Uso N° 1: Consumo humano	-Guías para la calidad del agua potable, OMS (2006); -Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14
		Uso N° 2: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática	-Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, Perú (2015)
	Agua subterránea	Uso N° 1: Consumo humano	-Guías para la calidad del agua potable, OMS (2006); -Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14
	Suelos	-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, México (2007); -Real Decreto 1310/1990, España (1990)	
Realizar un inventario de cargas potencialmente generadoras de contaminación al subsuelo mediante la aplicación de la metodología POSH (Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically), a partir de la identificación y caracterización de las fuentes contaminantes localizadas en la subcuenca del río San Jacinto.	Diseño del inventario	Delimitación de los objetivos, alcances, nivel de detalle, simplificaciones y área geográfica que cubriría el inventario.	-Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, y Paris (2003); -Hirata (2002); -Jarrín, Salazar, y Martínez-Fresneda (2017); -Madrigal-Solís, Fonseca-Sánchez, Núñez-Solís, y Gómez-Cruz (2014)
	Implementación del inventario	Recopilación de información mediante fuentes primarias y secundarias, clasificación y caracterización de las fuentes contaminantes	
	Evaluación y síntesis	Generación de la data de fuentes contaminantes y exportación a un programa de información geográfica para la elaboración del mapa de cargas contaminantes	

*Parámetro a medir solo en agua superficial en caso de que la fuente de muestreo sea un río o quebrada.

CAPÍTULO 4

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El procedimiento general de la fase de laboratorio y análisis de resultados de metodología de investigación se presenta en la Figura 4.1.

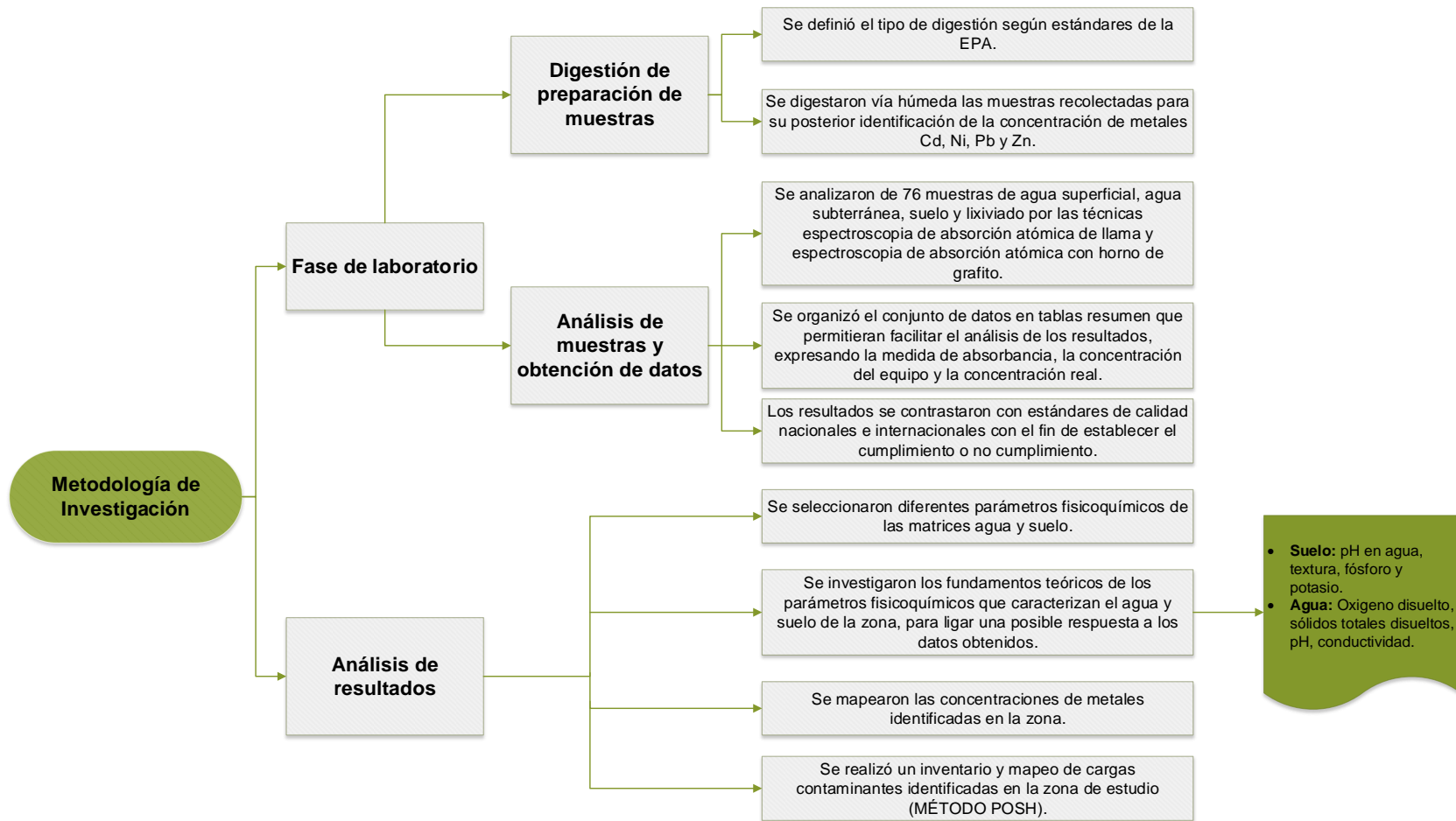


Figura 4.1 Descripción general del procedimiento de laboratorio y análisis de resultados ejecutado.

4.1 Cálculo de concentraciones reales y consideraciones generales

La cuantificación de la concentración de cadmio, níquel, plomo y zinc en muestras de agua y suelo se llevó a cabo con el espectrómetro de absorción atómica Thermo Scientific modelo iCE 3000 series, propósito para el cual se generaron diferentes curvas de calibración, cada una con cinco estándares de concentraciones conocidas, preparadas a partir de una solución patrón multicomponente de 1000 ppm.

Las muestras digeridas se analizaron con las técnicas de FLAA y GFAA. Los elementos no cuantificados con llama se midieron posteriormente con horno de grafito. La concentración real de cada muestra se calculó a partir del factor de dilución y la cantidad inicial de muestra digerida (alícuota o masa de muestra). Para aguas se reporta con respecto al volumen de la muestra, así:

$$\text{Concentración real de la muestra digerida, ppm} = A \times \frac{B}{C} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

A = Concentración del metal en la solución digerida

B = Volumen de aforo de la solución digerida

C = Volumen de la muestra

Por ejemplo, para Zn en el punto 01 tomado en el río San Jacinto en la primera jornada de muestreo, se reporta como:

$$\text{Conc. real, ppm} = 0.1671 \text{ ppm} \times \frac{50 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 0.0835 \text{ ppm}$$

Por su parte, para suelos se reporta con respecto a la masa de la muestra analizada:

$$\text{Concentración real de la muestra digerida, ppm} = A \times \frac{V_{\text{aforo}}}{M_{\text{muestra}}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

A = Concentración del metal en la solución digerida

V_{aforo} = Volumen de aforo de la solución digerida

M_{muestra} = Masa de la muestra

Por ejemplo, para Pb en el punto C0-00, se reporta así:

$$Conc. real, ppm = 0.4823 ppm \times \frac{100 mL}{5.0020 g} = 9.6423 ppm$$

En ambas metodologías de cuantificación se estableció que el límite bajo el cual los resultados no son detectados, es el estándar de menor concentración preparado para la curva de calibración. Se definió así, con el objetivo de reportar los resultados con la seguridad de que el analito se encuentra en el rango cuantificable según el método. Valores menores a éstos se reportan como no detectados.

Los resultados de aptitud de las matrices de estudio se reportan como cumple/no cumple de acuerdo a la referencia seleccionada para la evaluación de la concentración de cada metal.

4.2 Presentación de resultados experimentales de las matrices de estudio

4.2.1 Resultados obtenidos del análisis de metales pesados en matriz suelo

4.2.1.1 Cadmio

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de los análisis realizados en las muestras de suelo de la zona de estudio, específicamente para el metal Cadmio. Además, se indica la aptitud del suelo muestreado contrastando el resultado con el límite máximo permitido por las normas de referencia seleccionadas.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos para Cd en la matriz suelo, mediante las técnicas de GFAA.

Cd	Límite máximo permitido: 37.0 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
Código	Peso de la muestra (g)	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real Cd (ppm)	Aptitud
C0-00	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-01-A	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-01-B	5.0010	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-01-C	5.0040	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-02-A	5.0030	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-02-B	5.0010	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
PF-02-C	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
C3-27	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
CEZ-01	5.0030	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
CEZ-02	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
CEZ-03	5.0010	0.1181	100.0000	2.3616	Cumple
CSJ-18	5.0000	0.1733	100.0000	3.4651	Cumple
EXB	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple

En la Figura 4.2 se visualiza el mapa que contiene los puntos de muestreo de suelo, los puntos con mayor diámetro indican una mayor concentración del metal Cadmio, mientras que la Figura 4.3 muestra una representación gráfica del mismo.

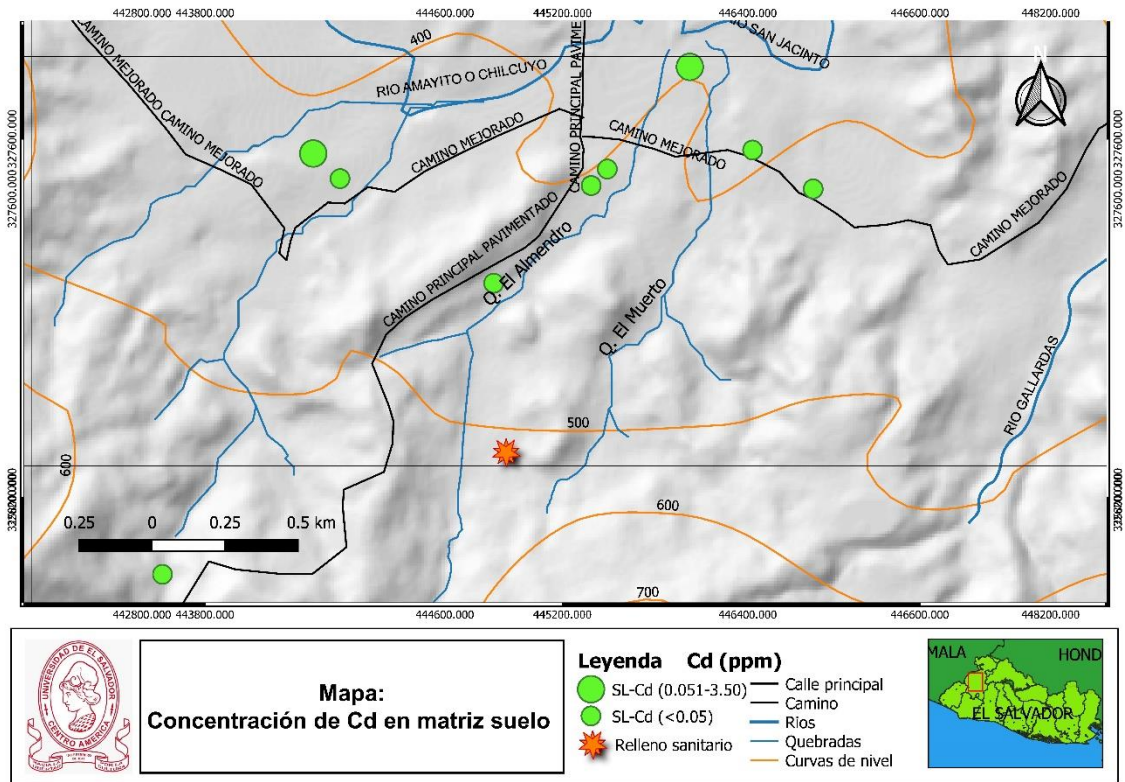


Figura 4.2 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.

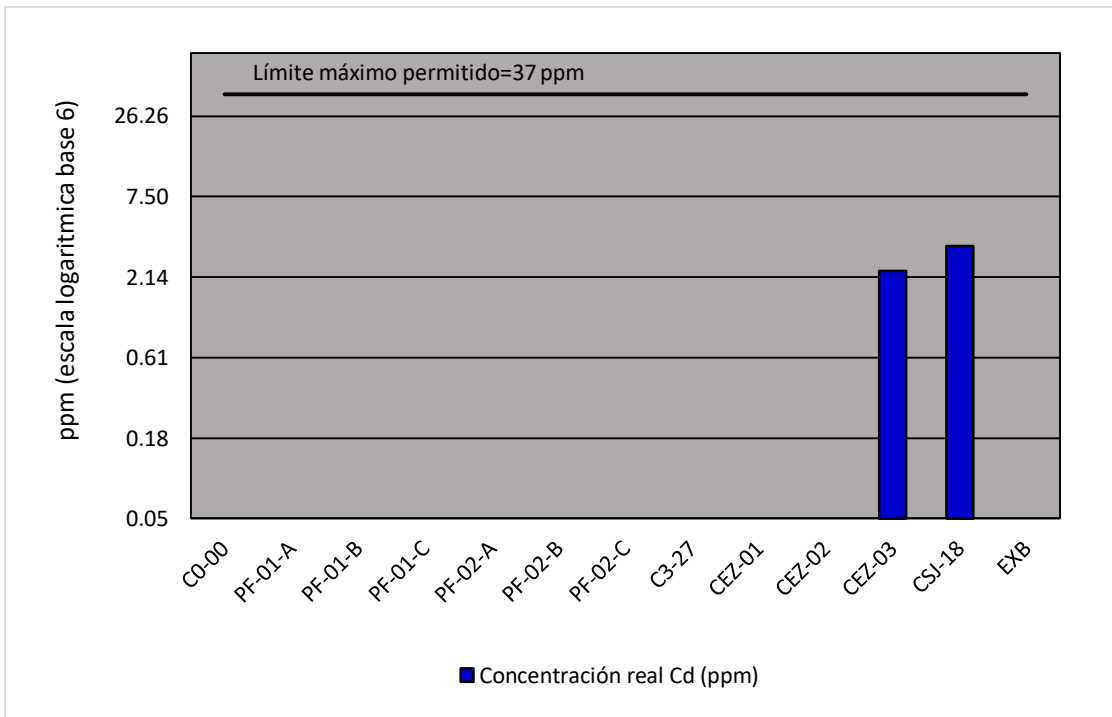


Figura 4.3 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Cadmio en suelo de la zona de estudio.

4.2.1.2 Níquel

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de los análisis realizados en las muestras de suelo de la zona de influencia, específicamente para el metal Níquel, además se plantea la aptitud del suelo muestreado contrastando el resultado con el límite máximo permitido.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos para Ni en matriz suelo, mediante las técnicas de GFAA.

Ni	Límite máximo permitido: 1600.0 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
Código	Peso de la muestra (g)	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
C0-00	5.0020	0.1358	100.0000	2.7156	Cumple
PF-01-A	5.0020	0.0978	100.0000	1.9546	Cumple
PF-01-B	5.0010	0.0813	100.0000	1.6253	Cumple
PF-01-C	5.0040	0.0972	100.0000	1.9429	Cumple
PF-02-A	5.0030	0.1358	100.0000	2.7136	Cumple
PF-02-B	5.0010	0.0847	100.0000	1.6940	Cumple
PF-02-C	5.0020	0.0974	100.0000	1.9464	Cumple
C3-27	5.0020	0.2401	100.0000	4.7992	Cumple
CEZ-01	5.0030	0.1183	100.0000	2.3648	Cumple
CEZ-02	5.0020	N/D	100.0000	<0.05	Cumple
CEZ-03	5.0010	0.0767	100.0000	1.5346	Cumple
CSJ-18	5.0000	0.0753	100.0000	1.5061	Cumple
EXB	5.0020	0.0903	100.0000	1.8049	Cumple

En la Figura 4.4 se visualiza el mapa que contiene los puntos de muestreo de suelo, los puntos con mayor diámetro indican una mayor concentración del metal Níquel, mientras que la Figura 4.5 muestra una representación gráfica del mismo.

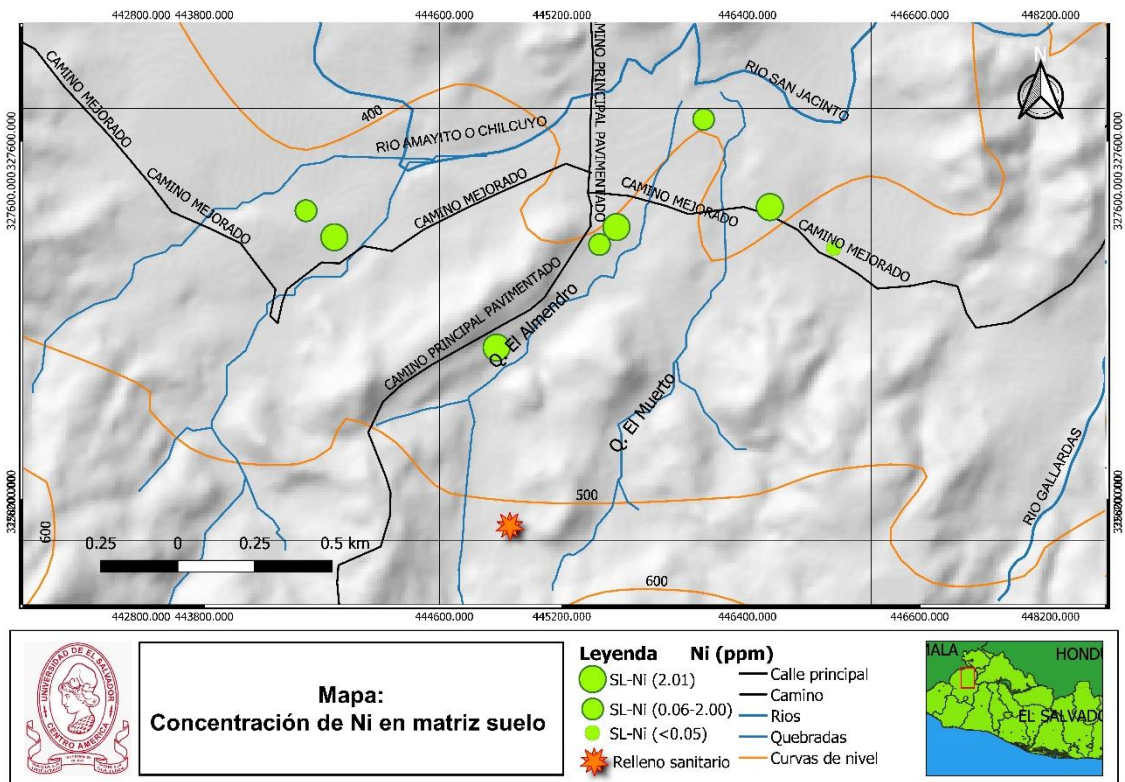


Figura 4.4 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.

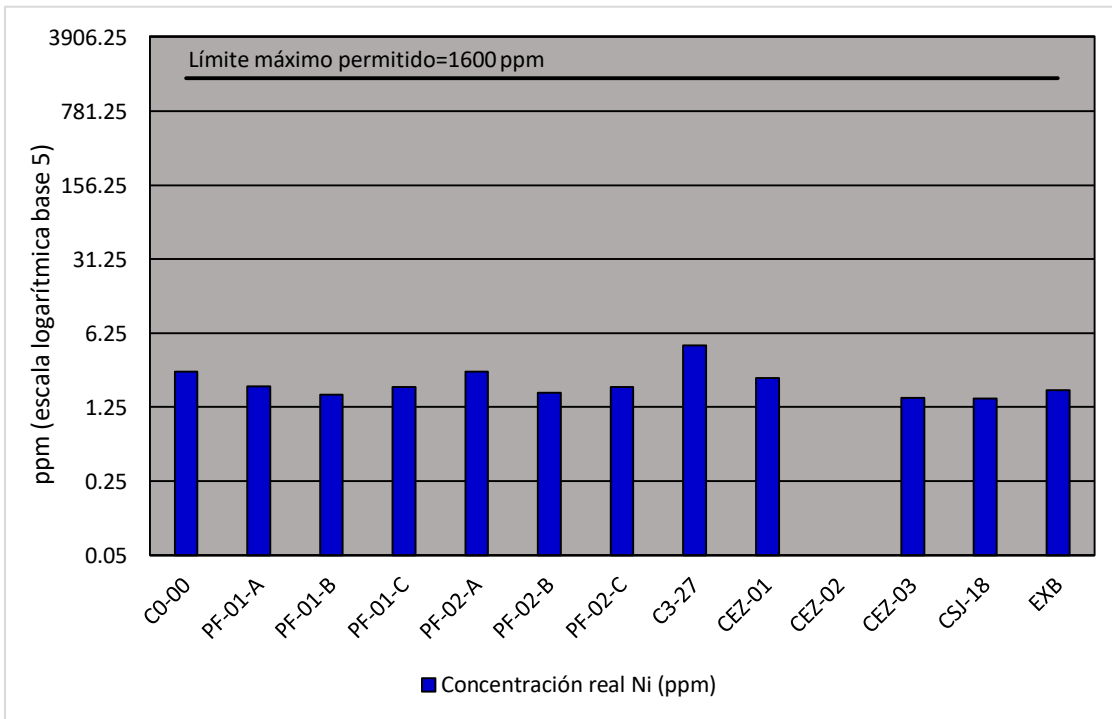


Figura 4.5 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Níquel en suelos.

4.2.1.3 Plomo

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de los análisis realizados en las muestras de suelo de la zona de estudio, específicamente para el metal Plomo, además se indica la aptitud del suelo muestreado contrastando el resultado con el límite máximo permitido según las normas de referencia.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos para Pb en matriz suelo, mediante las técnicas FLAA.

Pb	Límite máximo permitido: 400.0 ppm			Técnica utilizada: FLAA	
Código	Peso de la muestra (g)	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
C0-00	5.0020	0.4823	100.0000	9.6423	Cumple
PF-01-A	5.0020	0.4191	100.0000	8.3791	Cumple
PF-01-B	5.0010	0.5809	100.0000	11.6166	Cumple
PF-01-C	5.0040	0.4485	100.0000	8.9632	Cumple
PF-02-A	5.0030	0.5870	100.0000	11.7333	Cumple
PF-02-B	5.0010	0.5538	100.0000	11.0735	Cumple
PF-02-C	5.0020	0.4926	100.0000	9.8486	Cumple
C3-27	5.0020	0.3681	100.0000	7.3590	Cumple
CEZ-01	5.0030	0.6724	100.0000	13.4405	Cumple
CEZ-02	5.0020	0.4346	100.0000	8.6885	Cumple
CEZ-03	5.0010	0.7520	100.0000	15.0368	Cumple
CSJ-18	5.0000	0.3771	100.0000	7.5413	Cumple
EXB	5.0020	0.3884	100.0000	7.7655	Cumple

En la Figura 4.6 se visualiza el mapa que contiene los puntos de muestreo de suelo, los puntos con mayor diámetro indican una mayor concentración del metal Plomo, mientras que la Figura 4.7 muestra una representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Plomo en la zona de influencia.

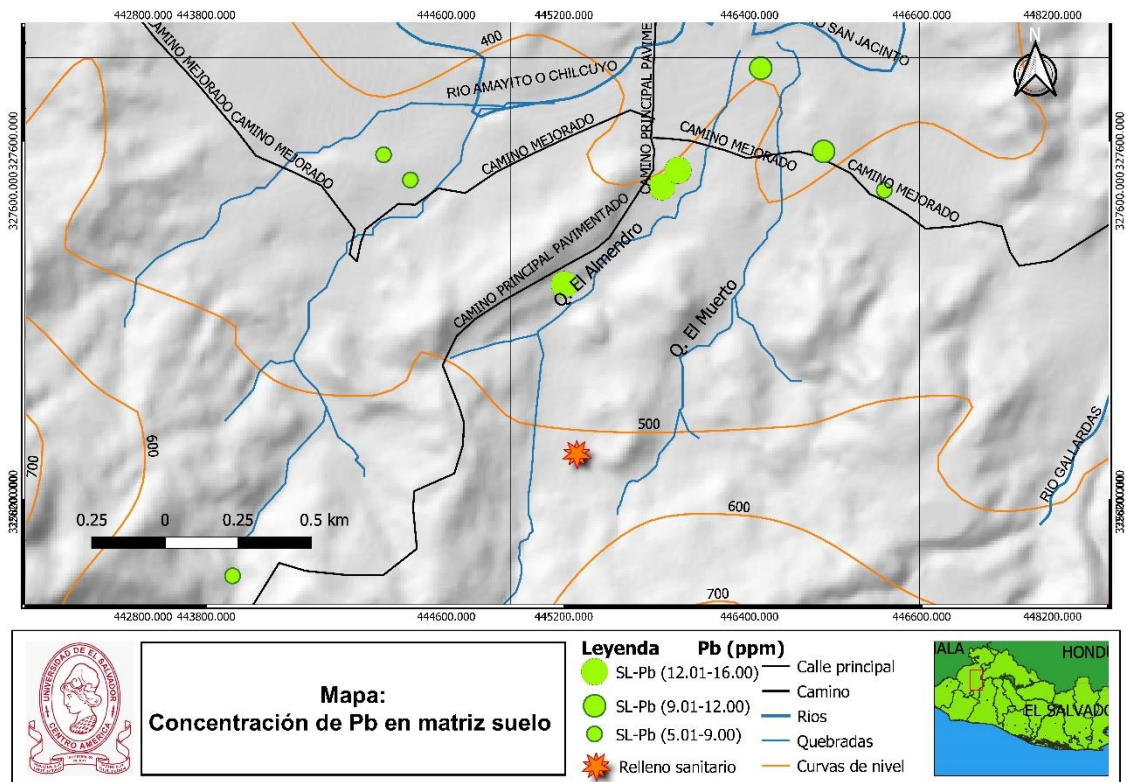


Figura 4.6 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.

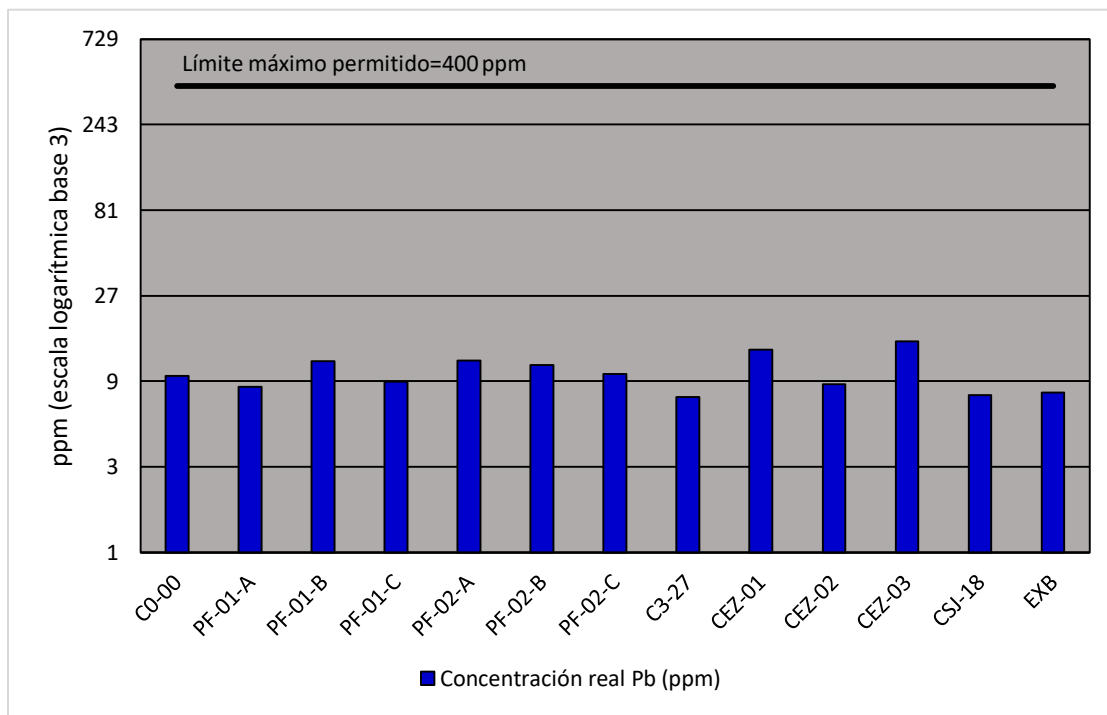


Figura 4.7 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Plomo en suelos.

4.2.1.4 Zinc

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de los análisis realizados en las muestras de suelo de la zona de influencia, específicamente para el metal Zinc, además se plantea la aptitud del suelo muestreado contrastando el resultado con el límite máximo permitido.

Tabla 4.4 Resultados obtenidos para Zn en la matriz suelo, mediante la técnica de FLAA.

Zn	Límite máximo permitido: 150.0 ppm			Técnica utilizada: FLAA	
Código	Peso de la muestra (g)	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
C0-00	5.0020	1.3897	100.0000	27.7836	Cumple
PF-01-A	5.0020	1.2168	100.0000	24.3264	Cumple
PF-01-B	5.0010	1.0086	100.0000	20.1676	Cumple
PF-01-C	5.0040	1.2310	100.0000	24.6001	Cumple
PF-02-A	5.0030	1.8204	100.0000	36.3871	Cumple
PF-02-B	5.0010	1.1575	100.0000	23.1460	Cumple
PF-02-C	5.0020	1.5053	100.0000	30.0932	Cumple
C3-27	5.0020	1.0982	100.0000	21.9559	Cumple
CEZ-01	5.0030	0.8796	100.0000	17.5813	Cumple
CEZ-02	5.0020	1.2264	100.0000	24.5187	Cumple
CEZ-03	5.0010	1.4617	100.0000	29.2276	Cumple
CSJ-18	5.0000	0.8842	100.0000	17.6839	Cumple
EXB	5.0020	1.1924	100.0000	23.8391	Cumple

En la Figura 4.8 se visualiza el mapa que contiene los puntos de muestreo de suelo, los puntos con mayor diámetro indican una mayor concentración del metal Zinc, mientras que la Figura 4.9 muestra una representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Zinc en la zona de influencia.

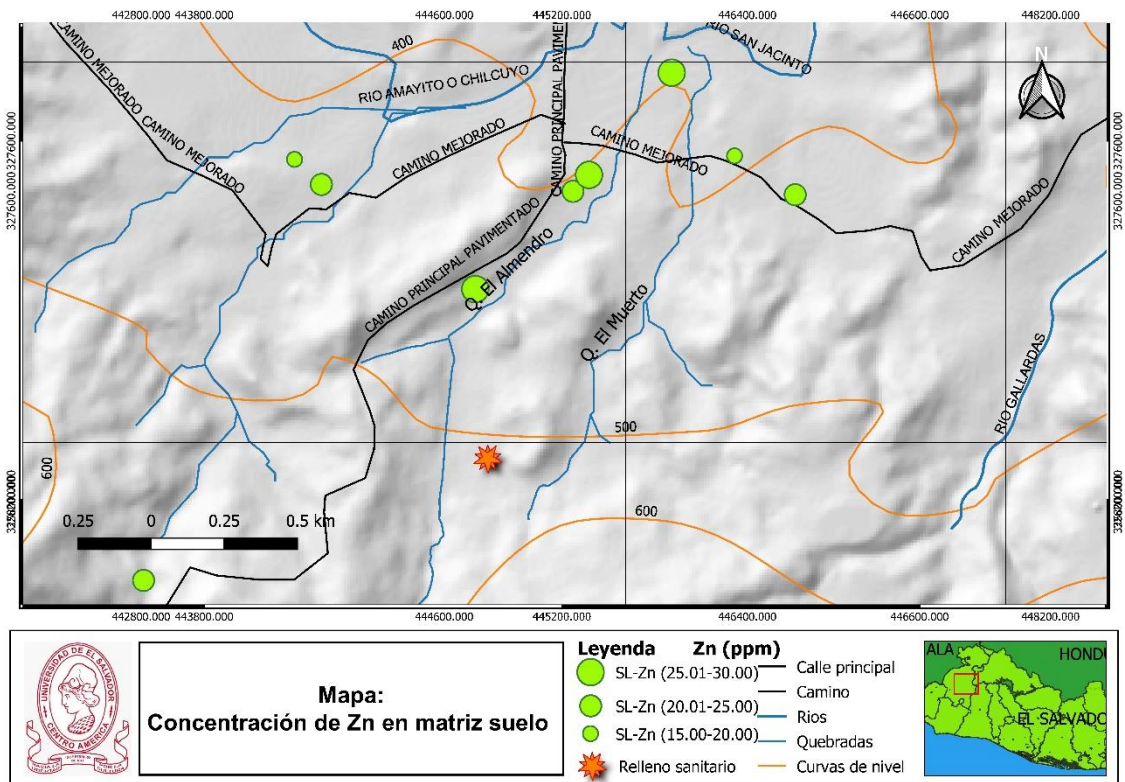


Figura 4.8 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo de suelo. En los dos perfiles verticales se utiliza el valor correspondiente al promedio de las tres concentraciones.

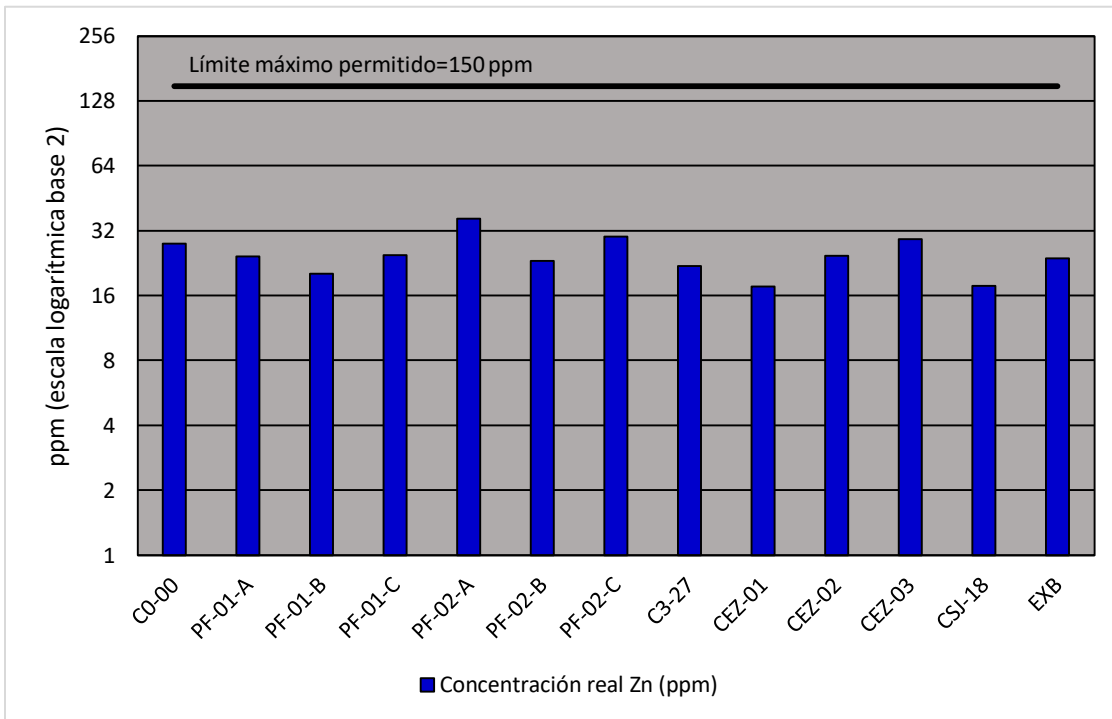


Figura 4.9 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Zinc en suelos.

4.2.1.5 Perfiles de concentración y análisis de una muestra de lixiviados

En las Figuras 4.3, 4.5, 4.7 y 4.9; y en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, las profundidades del suelo se expresan como horizontes A, B y C correspondientes a 10, 20 y 30 cm respectivamente. Se observa en la Figura 4.10 comportamientos similares en las concentraciones de cada metal en cada punto a profundidad. Las líneas de tendencia del Cd para ambos puntos permanecen pegada al eje vertical debido a que todas las concentraciones de este elemento en estos puntos estaban bajo el límite de cuantificación.

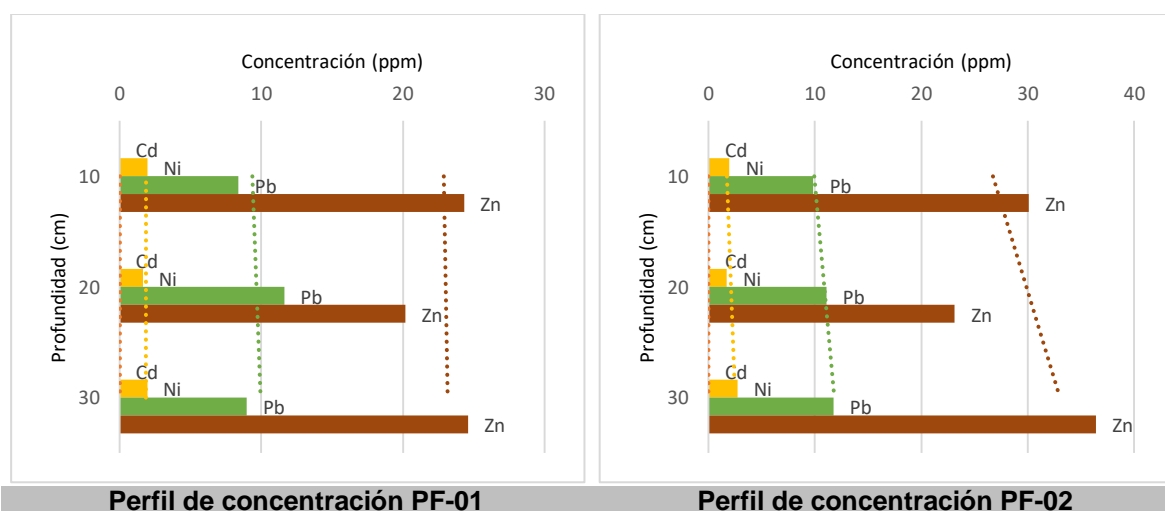


Figura 4.10 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Cd, Ni, Pb y Zn en los perfiles de concentración vertical PF-01 y PF-02 y líneas de tendencia lineal para cada metal.

Se analizó la muestra de lixiviados tomada de la boca de la tubería de descarga de la celda 1A como referencia del contenido de metales en los desechos sólidos al momento de los muestreos. Cabe aclarar que el contenido de metales en una muestra aleatoria no es un parámetro indicador definitivo del contenido promedio de metales en la basura común que genera una población a lo largo del tiempo. Para los propósitos de esta investigación, la muestra fue tomada en la última semana del mes de septiembre, en época lluviosa. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 4.5 según el límite de cuantificación de cada técnica de análisis utilizada.

Tabla 4.5 Resultados de análisis del contenido de metales Cd, Ni, Pb y Zn para una muestra aleatoria de lixiviados.

Técnica analítica	Elemento	Concentración leída (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)
FLAA	Cd	N/D	0.5	<0.25
	Ni	N/D	0.5	<0.25
	Pb	N/D	0.5	<0.25
	Zn	1.2057	0.5	0.6029
GFAA	Cd	N/D	0.5	<0.025
	Ni	0.0541	0.5	0.0270
	Pb	N/D	0.5	<0.025

N/D =No detectado; <0.25 = Menor al LC, FLAA <0.025 = Menor al LC, GFAA

4.2.2 Discusión y análisis de resultados para matriz suelo

Los suelos de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto son de uso prioritario residencial y agrícola. Con el fin de determinar la calidad de los mismos se determinaron dos parámetros fisicoquímicos y se cuantificaron dos micronutrientes esenciales en suelos agrícolas: fósforo y potasio, como se muestra en Tabla 4.6 y se visualiza de forma gráfica en la Figura 4.11.

Tabla 4.6 Resultados de los parámetros físicos y de nutrientes del suelo medidos en muestras de suelo de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto, Texistepeque.

	Ubicación	Textura	pH en agua 1:2.5	Fósforo (mg/kg)	Potasio (mg/kg)
CEZ-01	Caserío San José El Zompopo	Franco arcillo limoso	6.6 neutro	0.4 muy bajo	244 muy alto
CEZ-02	Caserío San José El Zompopo	Franco limoso	6.4 ligeramente ácido	0.4 muy bajo	191 alto
CEZ-03	Caserío San José El Zompopo	Franco limoso	6.6 neutro	16 alto	262 muy alto
C3-27	Caserío San Jacinto	Franco limoso	6.1 ligeramente ácido	0.4 muy bajo	173 muy alto
CSJ-18	Caserío San Jacinto	Franco limoso	6.9 neutro	3 muy bajo	277 muy alto

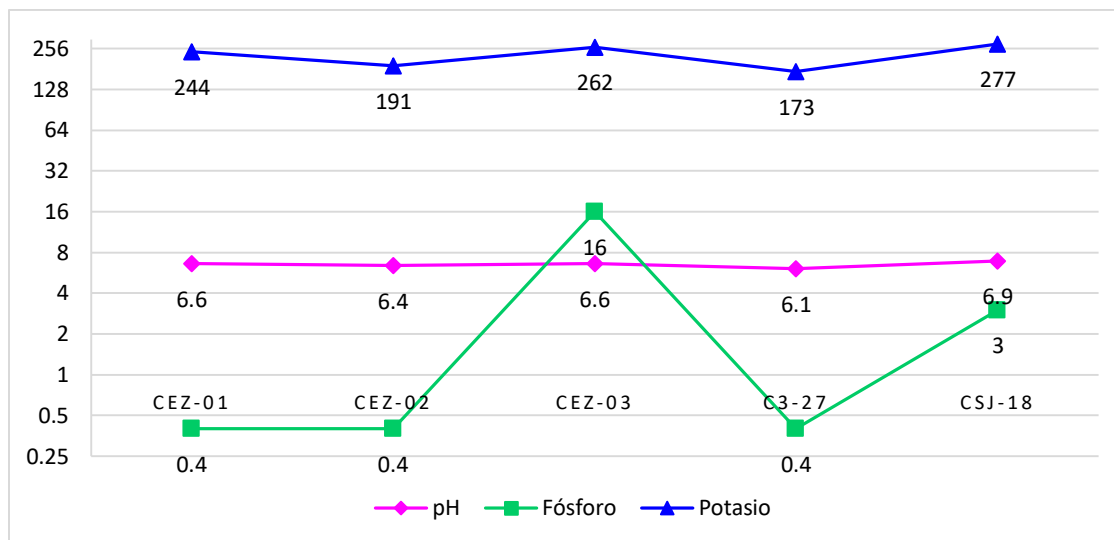


Figura 4.11 Representación gráfica de la relación de pH, fósforo y potasio en cinco muestras de suelo de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto.

En la Tabla 4.6 se muestran las propiedades fisicoquímicas textura, pH y los contenidos de P y K para las muestras de suelos de los caseríos San José El Zompopo y San Jacinto. Estos resultados no revelan variación con respecto a los niveles normales esperados dado los tipos de suelo, que indique incidencia o modificación significativa por actividad antropogénica (el relleno sanitario y las actividades agrícolas) según el contenido natural en los suelos de El Salvador. Los valores de pH se encuentran en el rango óptimo para la disponibilidad de nutrientes que pueden absorber las plantas, de neutros a ligeramente ácidos ($6.0 \leq \text{pH} \leq 7.0$) (Protocolo del laboratorio del CENTA). La acidez de los suelos se produce por la participación aislada, o en conjunto de varios factores como lixiviación de bases, presencia de sulfuros en el ambiente edáfico, fertilización de cultivos con fertilizantes que generan acidez (Kass, 1996), sin embargo el pH de la zona muestreada presenta una acidez ligera que no es para considerar ácido el suelo. En la Tabla 4.6 se observa que los valores más bajos de fósforo (0.4 mg/kg) en la región superficial del suelo (15 cm), si bien se asocian a valores de pH fuertemente ácidos, para este caso en suelos ligeramente ácidos, se debe al bajo contenido del elemento en el material parental que dio origen al suelo. El valor ligeramente bajo del pH de los suelos ($\text{pH} < 7.0$) podría obedecer también al uso de fertilizantes fosfatados, ya que el ácido fosfórico libe-

rado (H_3PO_4) puede producir valores de pH de 1.5 cerca de los gránulos, pero normalmente el H_3PO_4 es neutralizado rápidamente por mecanismos de regulación de pH de los suelos, denominado capacidad tampón o amortiguadora y se disminuye el efecto acidificante. A su vez, cualquier fuente de amonio, incluso de origen inorgánico puede incrementar la acidez del suelo, generando valores de pH menores a 7 en la disolución agua-suelo (Kass, 1996).

En cuanto a los niveles de concentración de los metales pesados se infiere lo siguiente:

- a. Los niveles de concentración de Cd, Ni, Pb y Zn en suelos se encuentran todos bajo los límites normativos, por lo que no representan un riesgo para la aptitud de suelos para la agricultura en la zona, en las condiciones en las que se realizó la toma de muestras. Sin embargo, siempre debe mantenerse vigilancia en la zona del relleno sanitario, debido a la posibilidad de falla del sistema de impermeabilidad de la instalación o de la sobrecarga de las lagunas de captación de lixiviados por el volumen de desechos que la instancia soporta, ya que en ese sector se encontró mayor concentración de los metales Zn y Pb. En la zona del exbotadero, el cual no dispone de un sumidero controlado con un material impermeable, estos eventos podrían llegar a ser perjudiciales. Debido a ello se deben tomar acciones preventivas, principalmente para el caso de arrastre de lixiviados por aguas lluvias y posibles infiltraciones que subsecuentemente lleguen a los mantos acuíferos.
- b. Según Kabata-Pendias y Pendias (2001) es posible que los metales Cd, Ni, Pb y Zinc se encuentren concentrados en los depósitos de arcillas en los horizontes superficiales del suelo (donde predomina la fracción de arcilla en los litosoles y grumosoles) y exhiben dependencia en su movilidad con el pH. Las texturas predominantes franco-limosa y franco-arcillo-limosa tienen porcentajes de arcilla menor al 10% (se sienten algunos granos) y del 25-40% (plasticidad baja) respectivamente (FAO, 2009). Con base en esto se puede interpretar que, dada la característica de los suelos en los horizontes superficiales y el rango de acidez de neutro a ligeramente ácido, la acumulación y

movilidad de las especies de Cd, Ni, Pb y Zn en los mismos, es baja y se evidencia en el comportamiento de las concentraciones encontradas en las muestras tomadas a 15 cm, para las que Cd y Ni se encuentran en cantidades mínimas, muy por debajo de los límites máximos permitidos por la norma. Esta afirmación puede respaldarse en la Figura 2.11, que indica tendencias de la movilidad de los metales por la influencia del pH del suelo (en suelos minerales), en la que se observa que las formas iónicas de los metales Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} son de movilidad débil y muy débil en el rango de pH de los suelos de la zona de estudio.

- c. El tipo de suelo de la zona sugiere contenidos de arcilla de bajos a moderados, sobre todo en los estratos intermedios, además posee una permeabilidad estimada que varía entre 2.54×10^{-6} y 8×10^{-4} cm/s directamente proporcional a la profundidad del suelo, según lo informan Meléndez, et al (2011) acerca de las características del subsuelo. Las arcillas son de mediana plasticidad y suelen ser sumideros de metales disueltos y nutrientes elementales. El potencial agrícola también se favorece de ambientes con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC). En los Latosoles arcillo rojizos, la CIC está, por lo general, por encima de 20 meq/100 gramos de suelo (OEA-CONAPLAN, 1974). Se atribuyen a estas características el bajo contenido de metales pesados en la zona, pues disminuyen la movilidad e infiltración de contaminantes a las capas inferiores del suelo y, por ende, al acuífero no confinado que abastece los pozos de la zona. Sin embargo, se debe tener en cuenta para el sector del caserío San Jacinto, que aunque las muestras de suelo se encuentran dentro de la norma para los contenidos de Pb, en las muestras de agua subterránea, se encontraron tres pozos cuyo contenido de Pb en agua sobrepasa el límite normativo según la OMS (2006). Debido a la ubicación, probablemente podría tratarse de injerencia del exbotadero que, aunque está clausurado, no está impermeabilizado ni dispone de medidas de contención de lixiviados, por lo que estos se mueven con la escorrentía en los drenajes naturales de la zona en dirección del caserío San Jacinto.

4.2.3 Resultados obtenidos del análisis de metales pesados en las matrices agua superficial y agua subterránea

4.2.3.1 Cadmio

En la Tabla 4.7 y la Tabla 4.8 se presentan los resultados del análisis de Cd en las muestras de agua recolectadas durante la primera y segunda jornada de muestreo.

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para Cd en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo (octubre, 2019).

Cd		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 0.01 ppm; Uso 2 = 0.03 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE12	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

Tabla 4.8 Resultados obtenidos para Cd en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo (octubre, 2019).

Cd		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 0.01 ppm; Uso 2 = 0.03 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE12	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE17	N/D	0.5	<0.025	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se visualizan los mapas que contienen la georreferenciación de los puntos de muestreo de agua superficial y agua subterránea de la primera y segunda jornada para Cd. Las muestras de agua analizadas para este metal se reportan todas bajo el límite de cuantificación según normas para los usos que se le da al recurso.

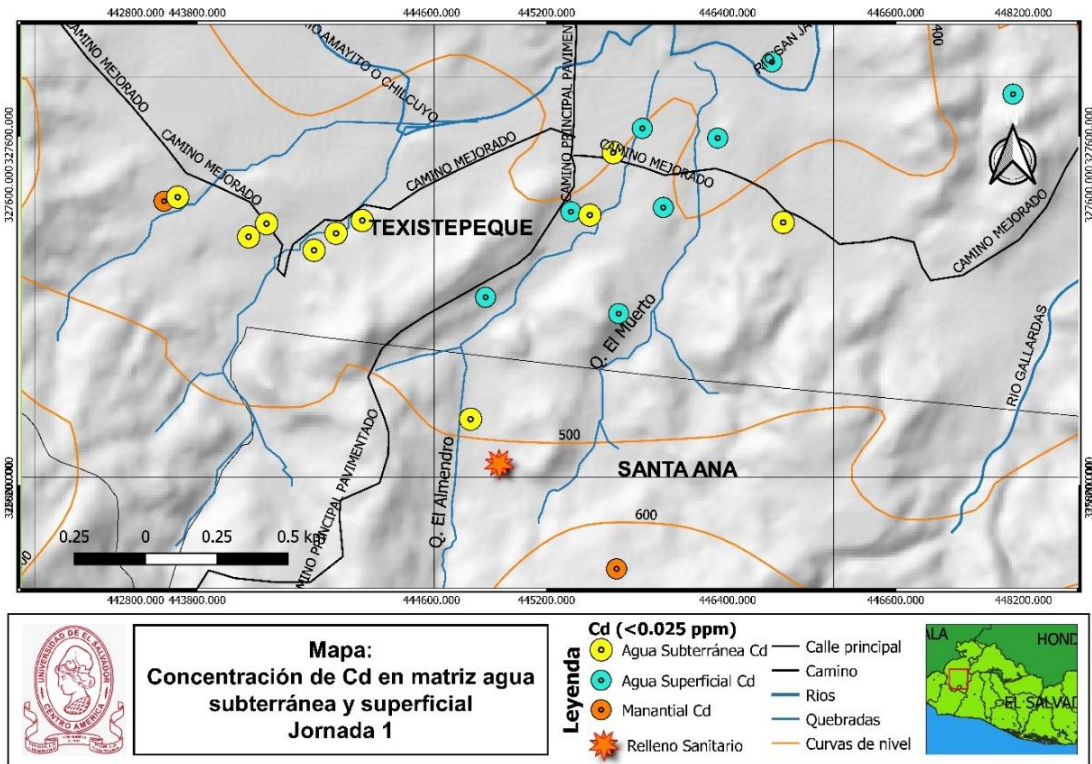


Figura 4.12 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo.

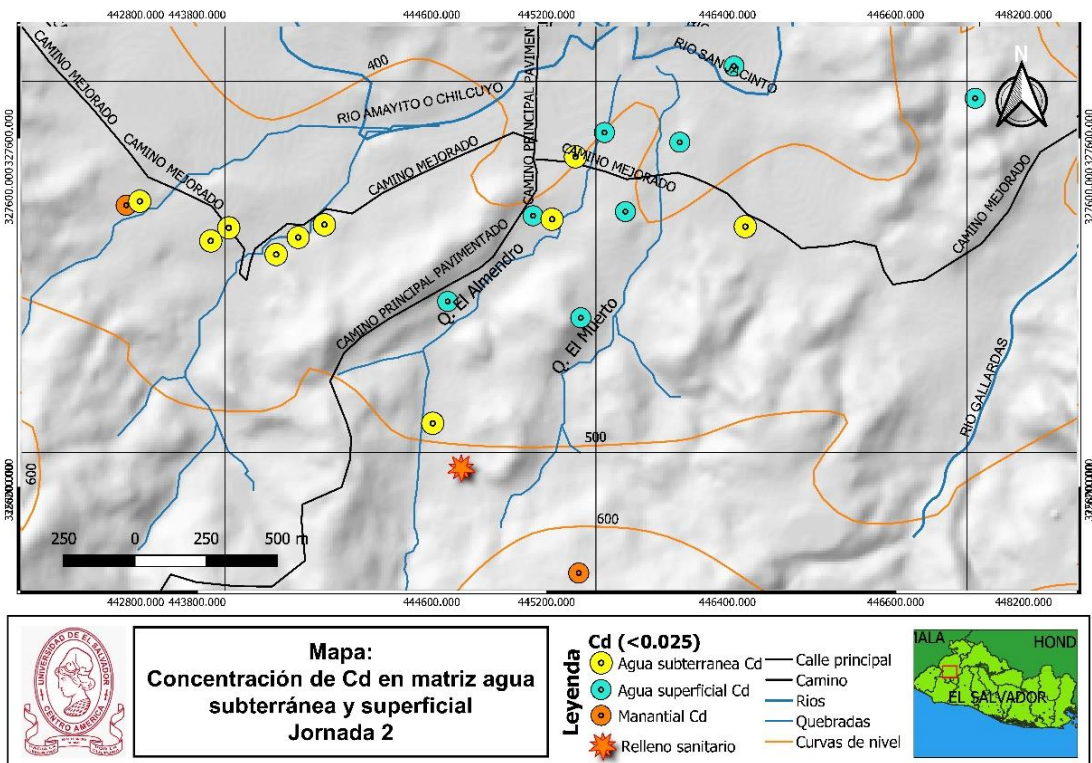


Figura 4.13 Mapa de concentración de Cd en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo.

4.2.3.2 Níquel

En la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 se presentan los resultados del análisis de Níquel en las muestras de agua superficial y agua subterránea recolectadas en la zona de influencia durante la primera y segunda jornada de muestreo, respectivamente.

Tabla 4.9 Resultados obtenidos para Ni en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.

Ni		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 0.2 ppm; Uso 2 = 0.07 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE12	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

Tabla 4.10 Resultados obtenidos para Ni en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo.

Ni		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 0.2 ppm; Uso 2 = 0.07 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE12	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE17	0.1724	0.5	0.0862	No cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

En la Figura 4.14 y la Figura 4.15 se visualizan los mapas que contienen la georreferenciación de los puntos de muestreo de agua superficial y agua subterránea de la primera y segunda jornada para el metal Níquel, respectivamente. Mientras en la Figura 4.16 detalla gráficamente el cumplimiento o no cumplimiento según el límite permitido por la normativa con la que se contrastan los resultados.

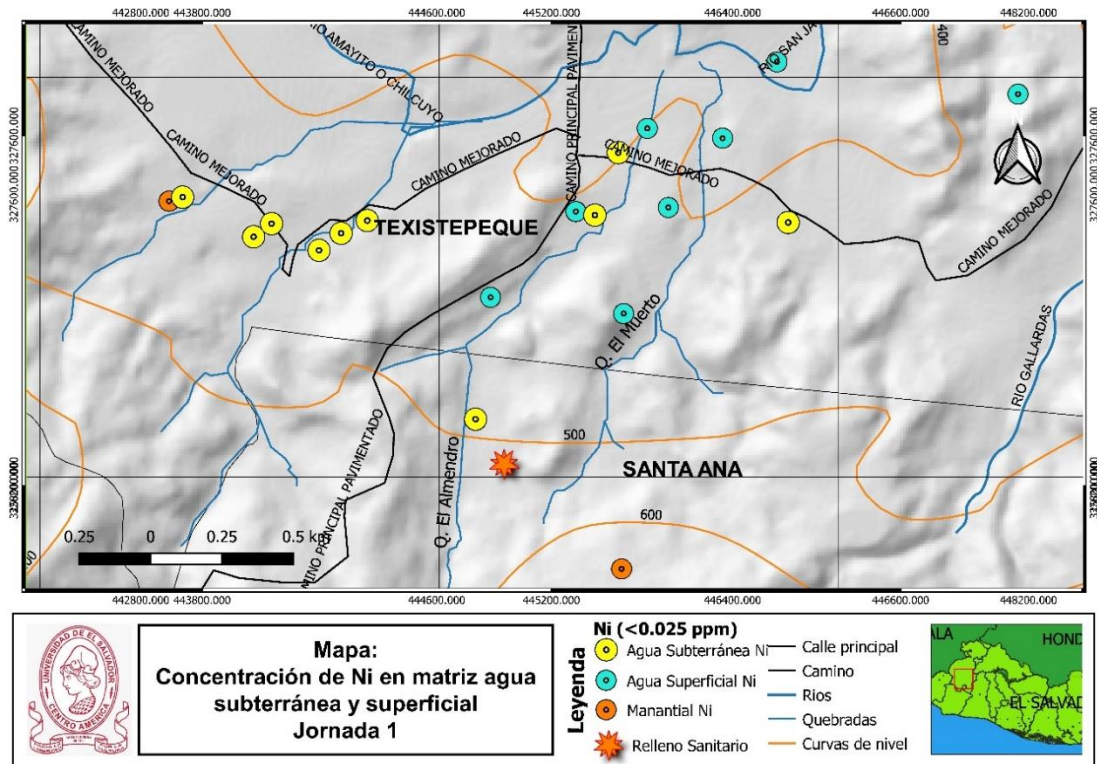


Figura 4.14 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo.

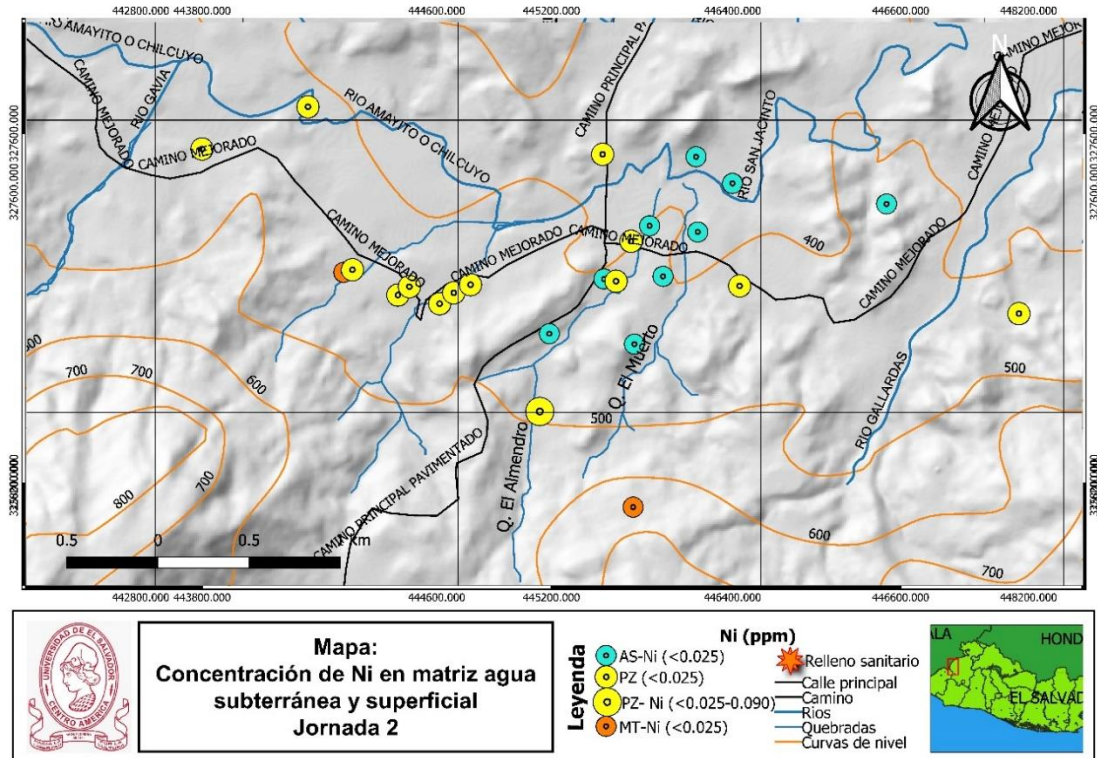


Figura 4.15 Mapa de concentración de Ni en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo.

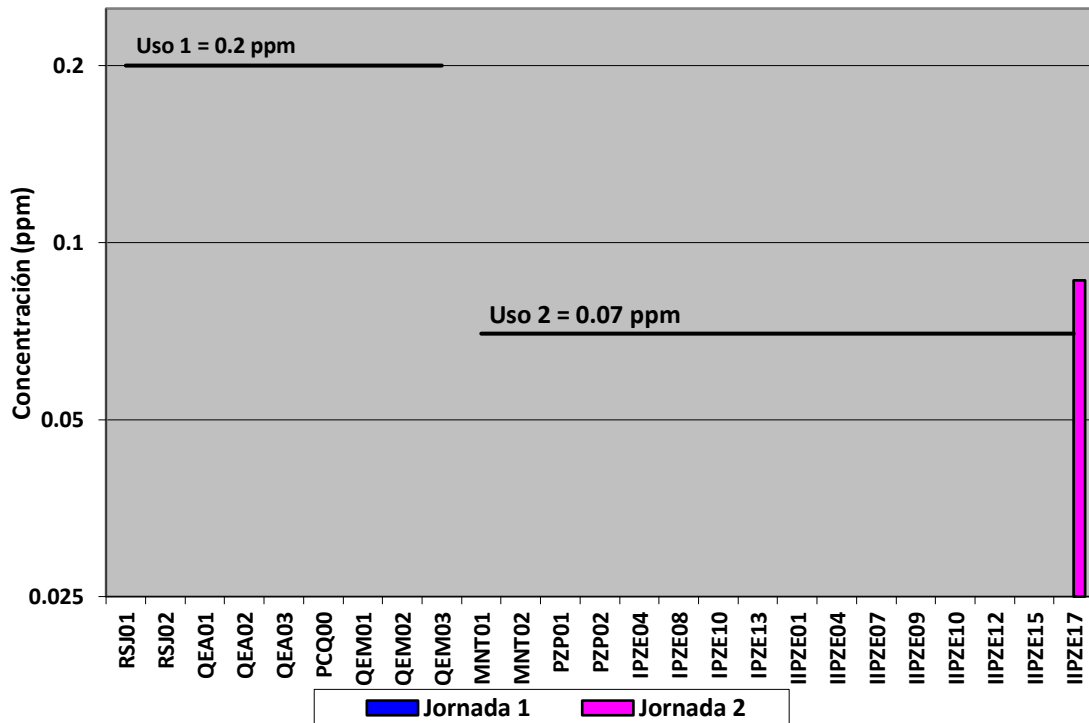


Figura 4.16 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Níquel en aguas superficiales y subterráneas.

El análisis de Níquel en aguas muestra que solamente en la segunda jornada de muestreo se encontró una muestra de agua subterránea cuyo contenido de Ni se encontró por encima del límite establecido por la OMS y el Reglamento Técnico Salvadoreño para agua de consumo. Este punto fue muestreado solamente en la segunda campaña de muestreo y es el más próximo al relleno sanitario (con la CA12 de por medio) muestreado en esa zona. El pozo se ubica en el caserío San Jacinto, considerado zona probable de injerencia principalmente del ex botadero de Camones.

4.2.3.3 Plomo

En la Tabla 4.11 y la Tabla 4.12 se presentan los resultados del análisis de Plomo en las muestras de agua superficial y agua subterránea recolectadas en la zona de influencia durante la primera y segunda jornada de muestreo, respectivamente.

Tabla 4.11 Resultados obtenidos para Pb en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.

Pb		Límite máximo permitido según uso: Usos 1 = 0.05 ppm; Usos 2 = 0.01 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE10	0.1238	0.5	0.0619	No cumple
2		IIPZE12	0.1163	0.5	0.0581	No cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

Tabla 4.12 Resultados obtenidos para Pb en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo.

Pb		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 0.05 ppm; Uso 2 = 0.01 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	RSJ02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEA03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	PCQ00	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	2	MNT02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	N/D	0.5	<0.025
2		PZP02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE08	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE10	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IPZE13	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE01	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE04	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE07	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE09	0.1755	0.5	0.0878	No cumple
2		IIPZE10	0.1297	0.5	0.0648	No cumple
2		IIPZE12	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE15	N/D	0.5	<0.025	Cumple
2		IIPZE17	N/D	0.5	<0.025	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

En la Figura 4.17 y la Figura 4.18 se visualizan los mapas que contienen la georreferenciación de los puntos de muestreo de agua superficial y agua subterránea de la primera y segunda jornada para el metal Plomo, respectivamente. Mientras en la Figura 4.19 detalla gráficamente el cumplimiento o no cumplimiento según el límite permitido por la normativa con la que se contrastan los resultados.

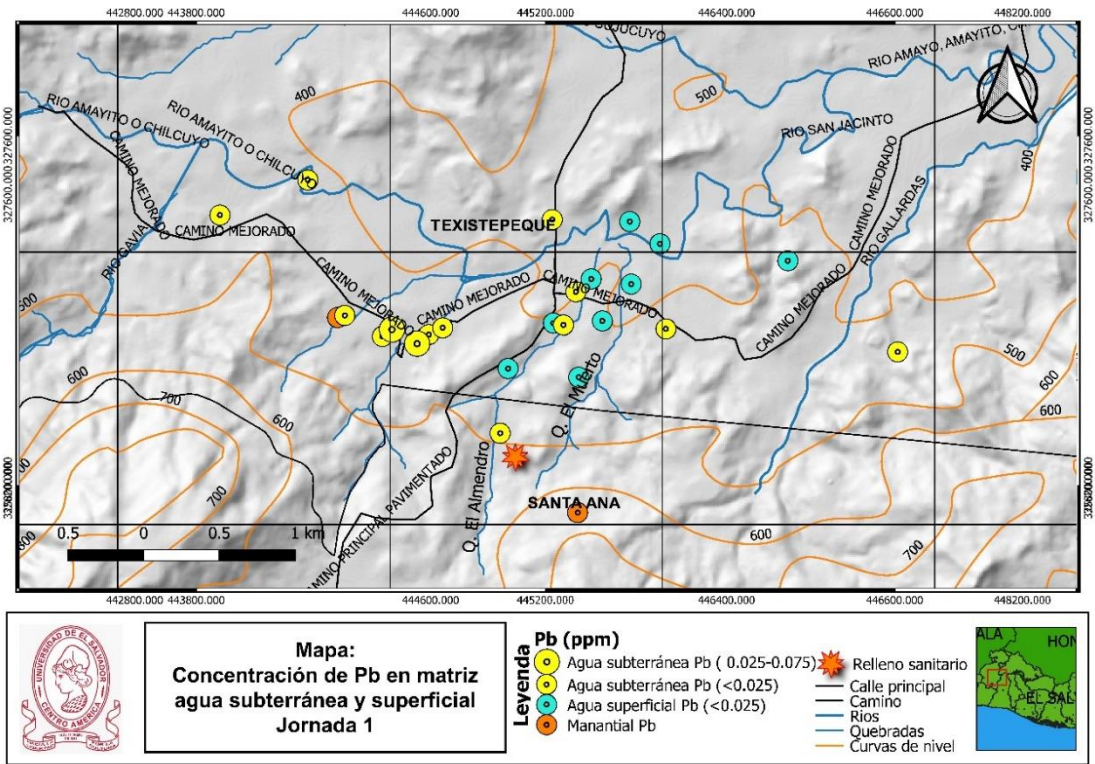


Figura 4.17 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo.

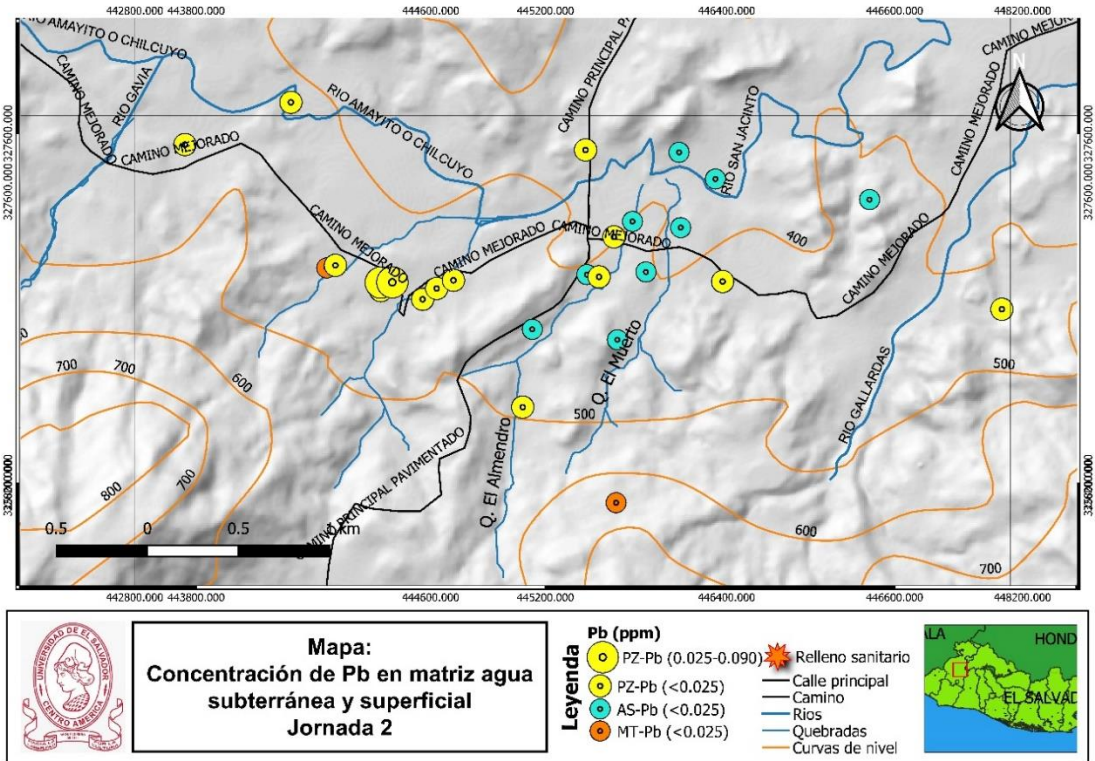


Figura 4.18 Mapa de concentración de Pb en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo.

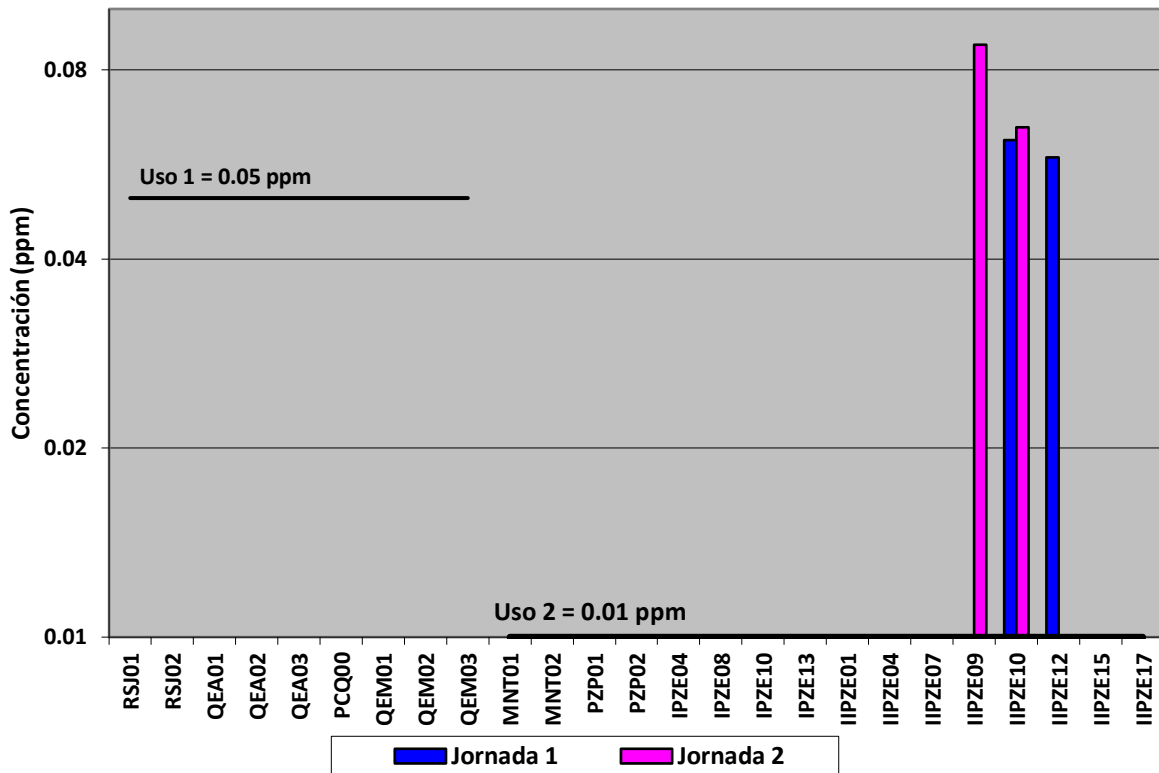


Figura 4.19 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Plomo en aguas superficiales y subterráneas.

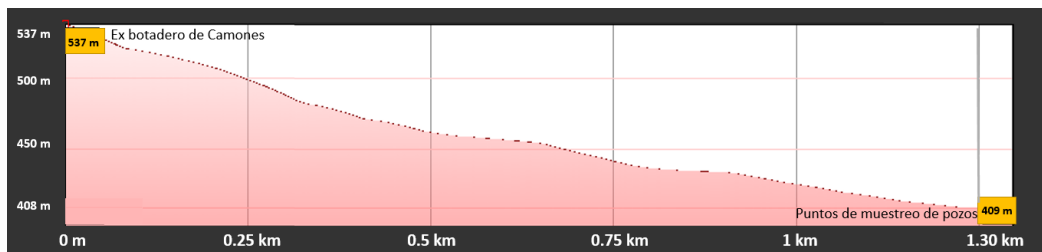


Figura 4.20 Perfil de elevación del ex botadero de Camones con respecto a los pozos excavados IIPZE09, IIPZE10 y IIPZE12 ubicados en el caserío San Jacinto. Fuente: Google Earth.

En cada campaña de muestreo se identificaron dos muestras de agua subterránea cuya concentración de Pb se encontró por encima de los límites establecidos por la OMS y el RTS para agua de consumo. En total, son tres pozos diferentes en los que se encontraron concentraciones fuera de norma, uno de ellos (IIPZ10) repite resultado en los análisis de las dos jornadas, los otros son los pozos adyacentes anterior y posterior a este (IIPZ09 y IIPZ12). Los pozos se ubican en el caserío San Jacinto, considerado zona de probable injerencia del ex botadero de Camones.

4.2.3.4 Zinc

En la Tabla 4.13 y la Tabla 4.14 se presentan los resultados del análisis de Zinc en las muestras de agua superficial y agua subterránea recolectadas en la zona de influencia durante la primera y segunda jornada de muestreo, respectivamente.

Tabla 4.13 Resultados obtenidos para Zn en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la primera jornada de muestreo.

Zn		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 2.0 ppm; Uso 2 = 4.0 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	0.1671	0.5	0.0835	Cumple
	1	RSJ02	0.1220	0.5	0.0610	Cumple
	1	QEA01	0.1634	0.5	0.0817	Cumple
	1	QEA02	0.1038	0.5	0.0519	Cumple
	1	QEA03	0.0741	0.5	0.0370	Cumple
	1	PCQ00	0.0938	0.5	0.0469	Cumple
	1	QEM01	0.1765	0.5	0.0882	Cumple
	1	QEM02	0.1020	0.5	0.0510	Cumple
	1	QEM03	0.2509	0.5	0.1255	Cumple
	2	MNT01	0.1875	0.5	0.0937	Cumple
	2	MNT02	0.1125	0.5	0.0563	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	0.0854	0.5	0.0427
2		PZP02	0.2069	0.5	0.1034	Cumple
2		IPZE04	0.1703	0.5	0.0851	Cumple
2		IPZE08	0.2259	0.5	0.1130	Cumple
2		IPZE10	0.0721	0.5	0.0361	Cumple
2		IPZE13	0.1852	0.5	0.0926	Cumple
2		IIPZE01	0.2527	0.5	0.1264	Cumple
2		IIPZE04	0.1349	0.5	0.0675	Cumple
2		IIPZE07	0.1964	0.5	0.0982	Cumple
2		IIPZE09	0.1019	0.5	0.0510	Cumple
2		IIPZE10	0.1889	0.5	0.0945	Cumple
2		IIPZE12	0.0792	0.5	0.0396	Cumple
2		IIPZE15	0.0973	0.5	0.0486	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

Tabla 4.14 Resultados obtenidos para Zn en las matrices agua superficial y agua subterránea, mediante la técnica de GFAA para la segunda jornada de muestreo.

Zn		Límite máximo permitido según uso: Uso 1 = 2.0 ppm; Uso 2 = 4.0 ppm			Técnica utilizada: GFAA	
	Uso	Código	Lectura de la solución digerida (ppm)	Factor de dilución	Concentración real (ppm)	Aptitud
Aguas superficiales	1	RSJ01	0.1240	0.5	0.0620	Cumple
	1	RSJ02	0.0506	0.5	0.0253	Cumple
	1	QEA01	0.0748	0.5	0.0374	Cumple
	1	QEA02	0.0904	0.5	0.0452	Cumple
	1	QEA03	0.1282	0.5	0.0641	Cumple
	1	PCQ00	0.0980	0.5	0.0490	Cumple
	1	QEM01	0.1208	0.5	0.0604	Cumple
	1	QEM02	N/D	0.5	<0.025	Cumple
	1	QEM03	0.0791	0.5	0.0396	Cumple
	2	MNT01	0.1682	0.5	0.0841	Cumple
	2	MNT02	0.0699	0.5	0.0349	Cumple
	Aguas subterráneas	2	PZP01	0.2525	0.5	0.1263
2		PZP02	0.1116	0.5	0.0558	Cumple
2		IPZE04	0.1001	0.5	0.0501	Cumple
2		IPZE08	0.1140	0.5	0.0570	Cumple
2		IPZE10	0.2525	0.5	0.1263	Cumple
2		IPZE13	0.0844	0.5	0.0422	Cumple
2		IIPZE01	0.2703	0.5	0.1352	Cumple
2		IIPZE04	0.2444	0.5	0.1222	Cumple
2		IIPZE07	0.2703	0.5	0.1352	Cumple
2		IIPZE09	0.1094	0.5	0.0547	Cumple
2		IIPZE10	0.1067	0.5	0.0533	Cumple
2		IIPZE12	0.2511	0.5	0.1256	Cumple
2		IIPZE15	0.4054	0.5	0.2027	Cumple
2		IIPZE17	0.2511	0.5	0.1256	Cumple

N/D = No detectado; <0.025 = Concentración menor al límite de cuantificación (LC=0.025 ppm)

Uso 1: Aptitud para el desarrollo de la vida acuática.

Uso 2: Consumo humano y actividades domésticas.

En la Figura 4.21 y la Figura 4.22 se visualizan los mapas que contienen la georreferenciación de los puntos de muestreo de agua superficial y agua subterránea de la primera y segunda jornada para el metal Zinc, respectivamente. Mientras en la Figura 4.23 detalla gráficamente el cumplimiento o no cumplimiento según el límite permitido por la normativa con la que se contrastan los resultados

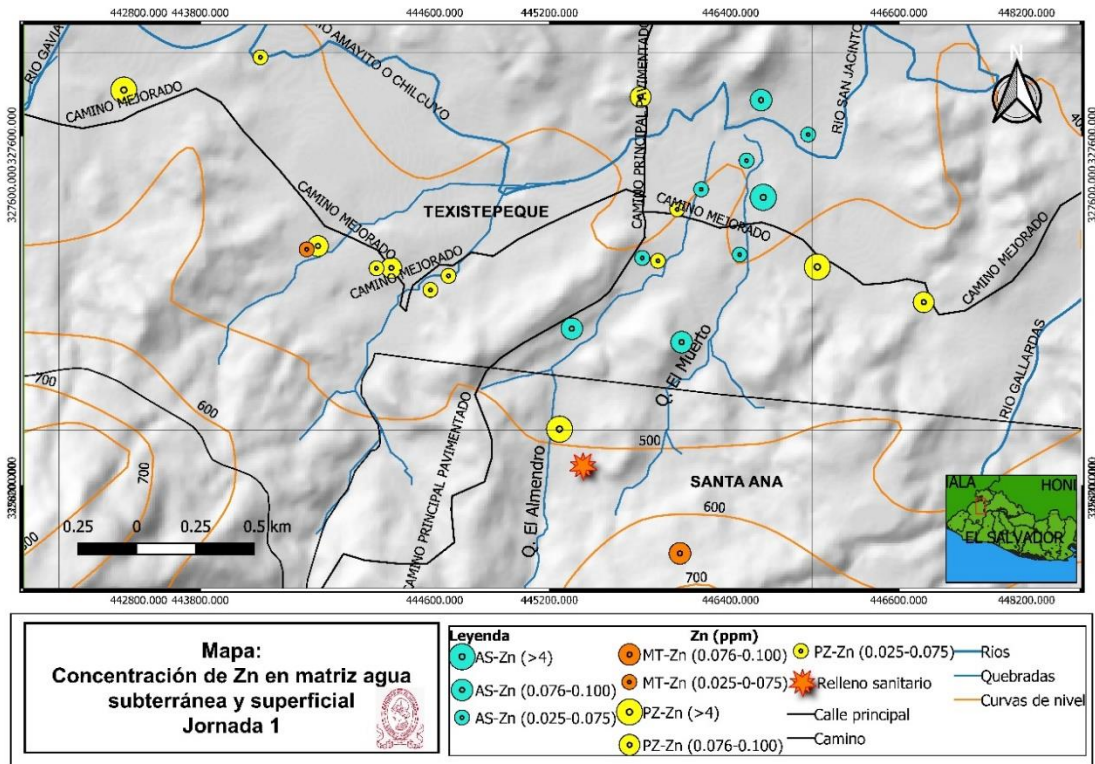


Figura 4.21 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la primera jornada de muestreo.

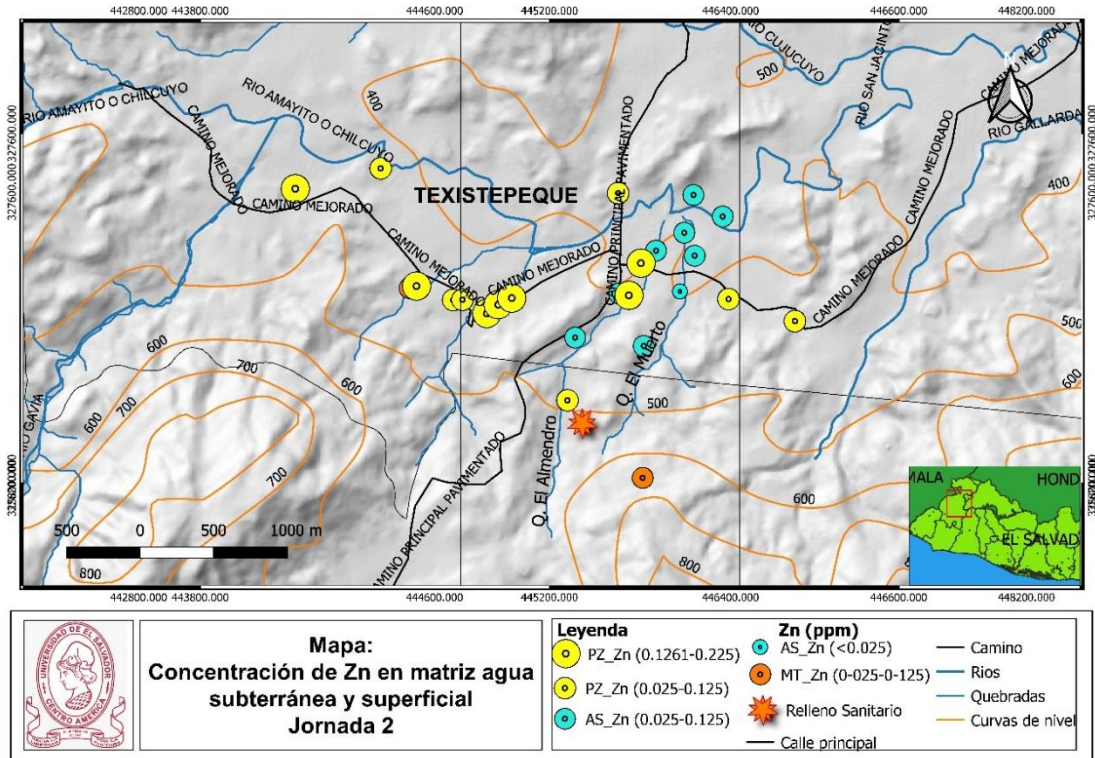


Figura 4.22 Mapa de concentración de Zn en los puntos de muestreo para aguas superficiales y subterráneas correspondientes a la segunda jornada de muestreo.

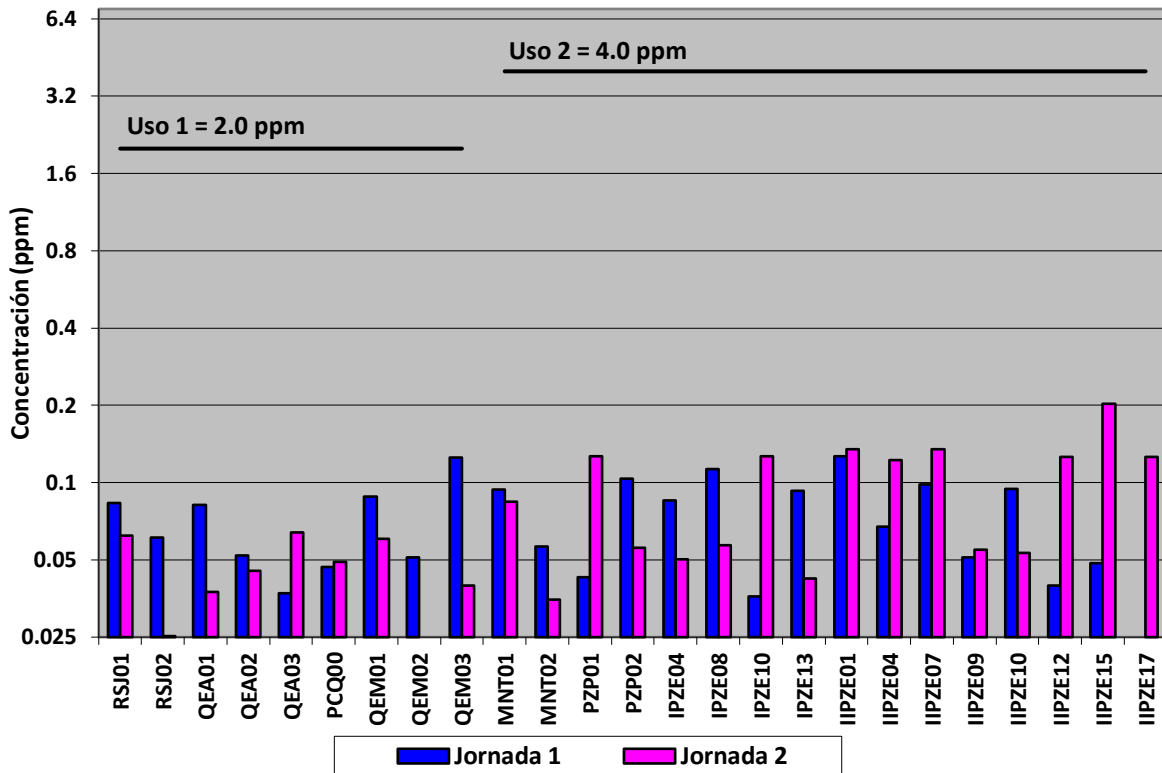


Figura 4.23 Representación gráfica de las concentraciones obtenidas para Zinc en aguas superficiales y subterráneas.

El análisis de Zinc en aguas revela que todas las muestras analizadas se encuentran dentro de los límites permitidos para este elemento por las normas de referencia aplicables según el uso que se le da al agua.

Las concentraciones encontradas para Cd y Zn en todos los puntos muestreados se encuentran dentro de especificación de la norma para el uso al que se somete el recurso en la zona en que fue tomada la muestra. Esto podría deberse a la pobre capacidad de drenaje interno del suelo, que imposibilita en gran medida la infiltración de posibles contaminantes y a una presumiblemente moderada a alta CIC de los suelos de la zona, la cual fija las formas catiónicas de los metales (que son las más móviles) a las arcillas, restándoles disponibilidad ambiental y riesgo de toxicidad a la vegetación de la zona y los cultivos. Para Ni y Pb, se encontraron en el caserío San Jacinto, uno y tres pozos respectivamente, cuyas concentraciones en cada caso sobrepasan los límites máximos permitidos. Estos casos se encuentran en el área de probable influencia del ex botadero de Camones.

4.2.4 Discusión y análisis de resultados de las matrices de aguas

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados obtenidos de la medición de los parámetros fisicoquímicos de importancia en muestras de aguas superficiales y subterráneas. Casi todos los valores obtenidos se encuentran en los rangos normales comparados con los valores de referencia para agua de uso agrícola y consumo animal (véase las Figuras 4.23, 4.25 y 4.26), y el Reglamento Técnico Salvadoreño y la Ley Federal de Derechos (México) para aguas de consumo humano y residencial (véase la Tabla 3.7). Solamente el valor de oxígeno disuelto medido en la muestra de manantial y en un pozo perforado del relleno sanitario (sombreados en rojo claro) sobrepasa el valor máximo permitido para aguas cuyo propósito sea de abastecimiento de redes de distribución de agua potable (véase la Figura 4.25).

Tabla 4.15 Parámetros fisicoquímicos medidos para aguas superficiales y aguas subterráneas.

	Uso	Código	pH (unidades de pH)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	Conductividad Eléctrica (mS/m)
		Valor guía	6.0-8.5	<4.0 (2)	<2000 (1) <1000 (2)	<300 (1)
Aguas superficiales	1	RSJ01	8.11	4.53	195.00	24.50
	1	RSJ02	8.15	4.40	188.50	23.70
	1	QEA01	7.71	4.45	559.00	72.00
	1	QEA02	7.97	5.08	409.50	52.00
	1	QEA03	8.01	4.19	539.50	68.00
	1	PCQ00	7.97	3.80	474.50	63.00
	1	QEM01	7.44	3.31	377.00	52.00
	1	QEM02	8.02	5.65	291.20	36.60
	1	QEM03	8.01	4.10	285.40	37.40
	2	MNT01	7.07	5.94	291.20	45.40
Aguas subterráneas	2	PZP01	7.26	3.69	689.00	92.00
	2	PZP02	7.71	4.26	384.20	49.90
	2	IIPZ01	7.72	3.60	364.60	48.60
	2	IIPZ04	7.65	3.61	308.70	40.80
	2	IIPZ07	7.50	3.35	332.80	44.60
	2	IIPZ09	7.30	3.03	481.00	63.00
	2	IIPZ10	7.55	3.48	383.60	51.00
	2	IIPZ12	7.30	3.14	349.00	48.20
	2	IIPZ15	7.46	2.95	349.70	34.97

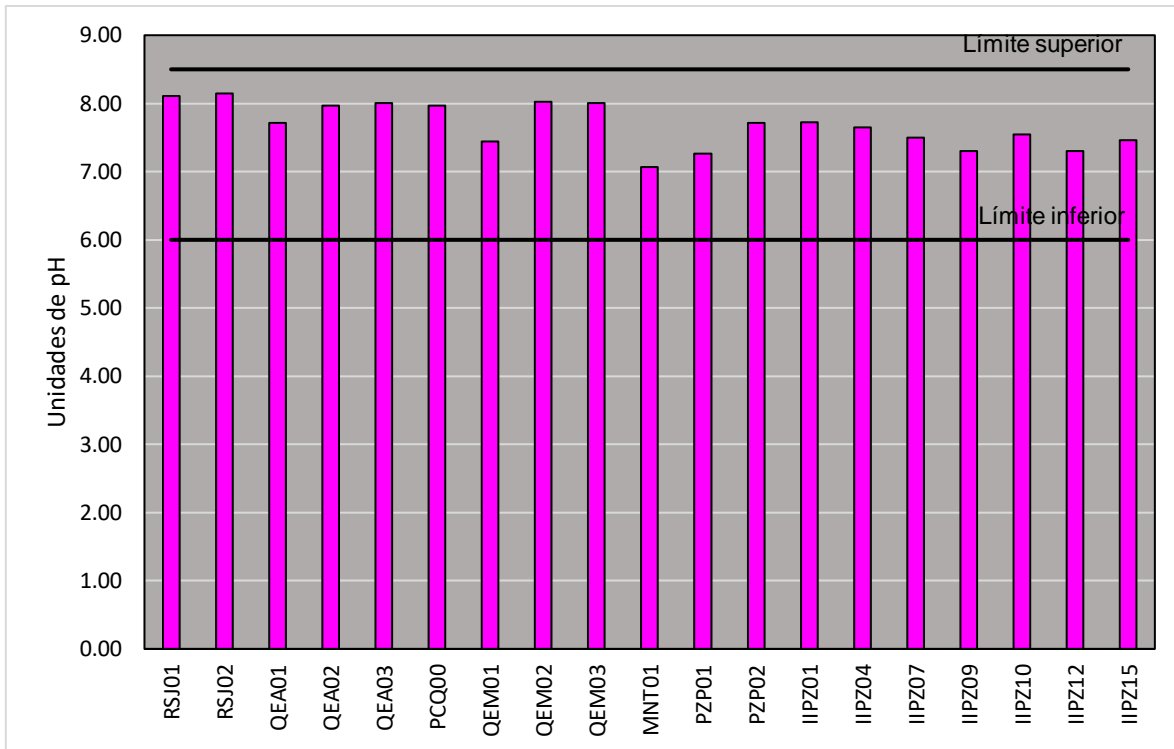


Figura 4.24 Representación gráfica de las mediciones de pH realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.

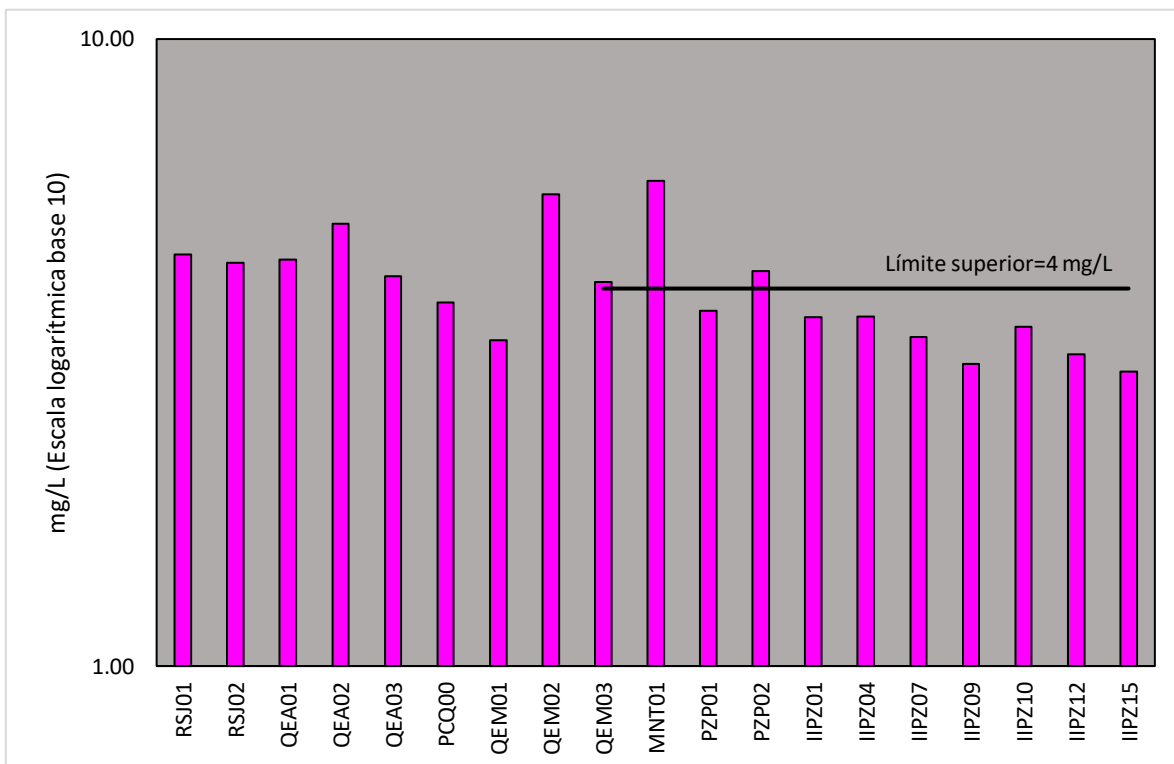


Figura 4.25 Representación gráfica de las mediciones de oxígeno disuelto realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.

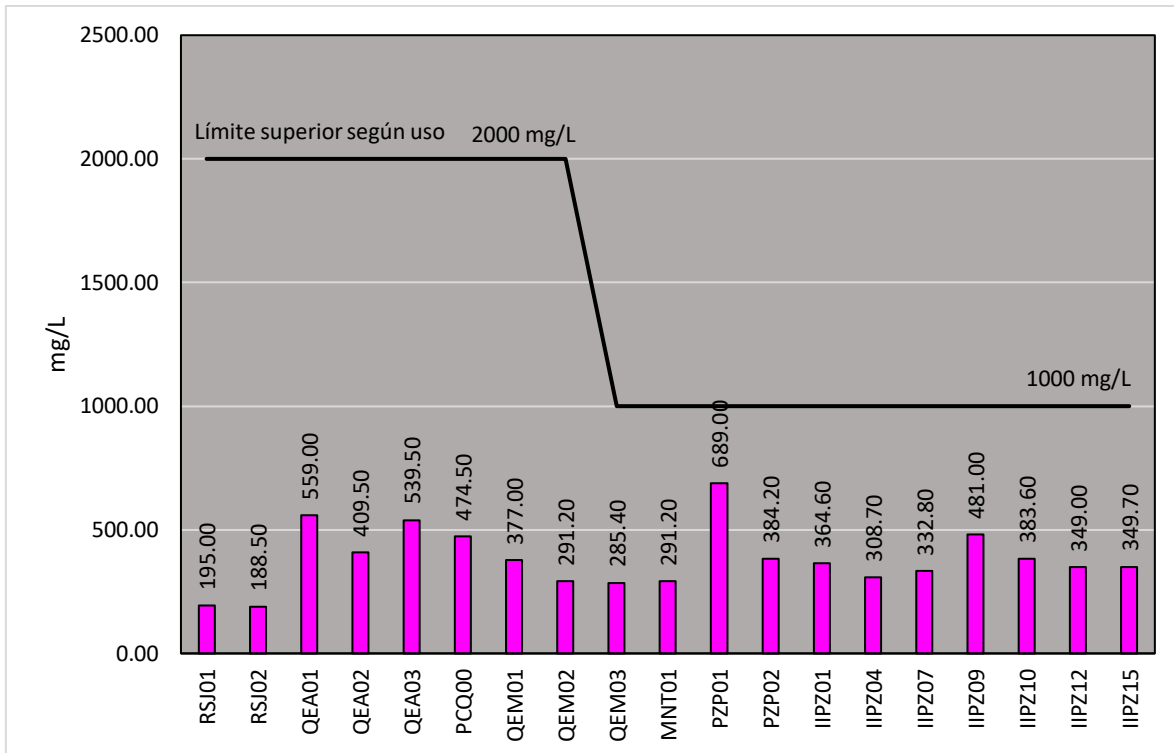


Figura 4.26 Representación gráfica de las mediciones de sólidos totales disueltos realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.

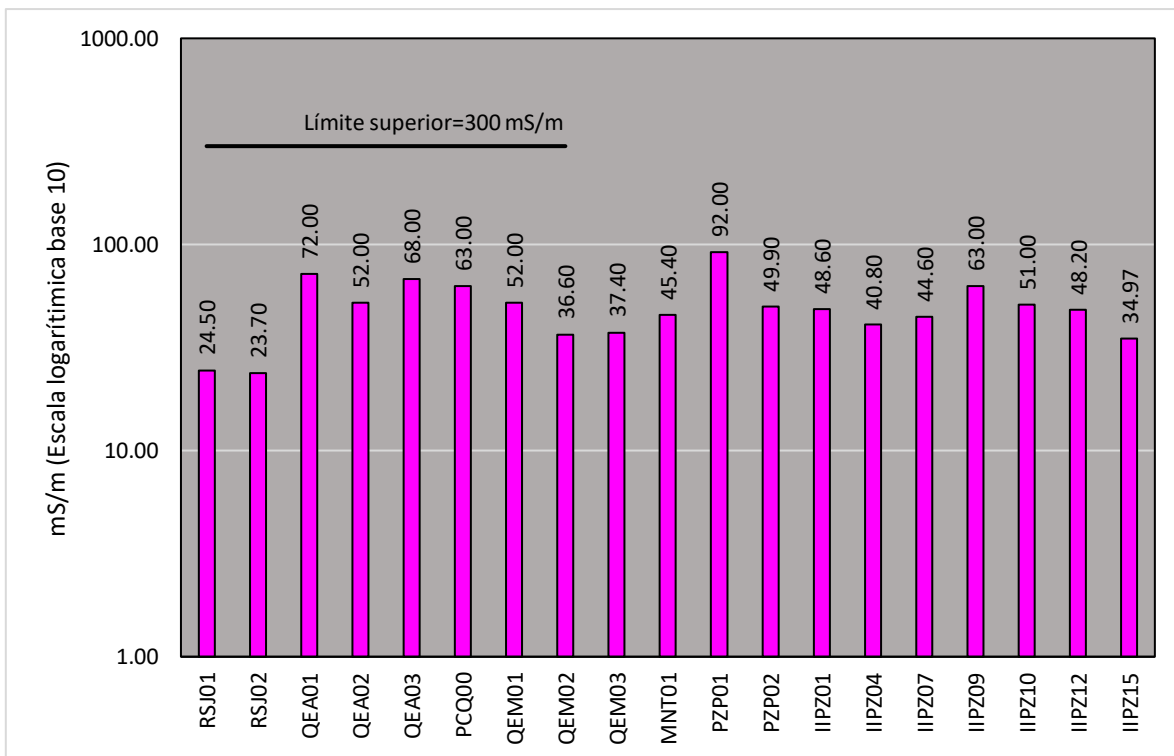


Figura 4.27 Representación gráfica de las mediciones de conductividad eléctrica realizadas en muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.

4.3 Mapeo de cargas contaminantes.

La subcuenca del río San Jacinto está ubicada en la parte alta de la región hidrográfica A, cuenca del río Lempa, en el departamento de Santa Ana según la clasificación del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (véase la Tabla 4.16). Es zona mayormente rural, envuelve los caseríos San Jacinto, Chilcuyo, San José El Zompopo, La Palma, Azacualpa, Elarios, La Noguera, Valle Nuevo 1, Cujucuyo 1, El Amate 2, El Sillón, parte del caserío y cantón Cutumay Camones, cantón Pinalito y cantón Ayuta y en su totalidad, el cantón Cujucuyo. Las actividades más comunes son las relacionadas con la agricultura y la ganadería, ladrilleras y chatarreras, el resto conciernen a actividades normales relacionadas con la vida diaria de los cantones y caseríos. El área está libre de actividad industrial ya que toda se concentra en la zona norte del municipio de Santa Ana, en la subcuenca del río Suquiapa.

Tabla 4.16 Clasificación de ríos según subcuenca hidrográfica en la zona de estudio.

Cuenca	Subcuenca	Río
Lempa	San Jacinto	Chuquezate
		Gavia
		Amayo/Amayito/Chilcuyo/ San Jacinto
		El venado
		El Cujucuyo
		La China
		El Golfo

Fuente: Olano (2012), MAG.

En la Tabla 4.17 y la Figura 4.28 se presenta clasificación, caracterización y ubicación de las fuentes de generación potencial de contaminación encontradas según la metodología propuesta por Foster, et al, (2003) (véase las Tabla 3.8 y Tabla 3.9) y definida en el capítulo anterior en la sección 3.4.1.1. Para efectos de georreferenciación, los puntos de saneamiento sin cloacas que se asocian directamente a los poblados, se indican con un símbolo que señala la ubicación de los mismos. Los datos de precipitación anual requeridos se obtuvieron del estudio de Impacto ambiental del relleno sanitario (2011), en el que se indica que junio y septiembre son los meses más copiosos en la zona de estudio, con un promedio de precipitación anual aproximado de 308 mm y 296 mm. Según Madrigal-Solís, Fonseca-Sánchez, Núñez-Solís, y Gómez-Cruz (2014), los cuerpos superficiales contaminados se

pueden considerar como fuentes de contaminación difusa. Según los resultados presentados en la sección 4.2.3 para análisis de metales pesados en el río San Jacinto, se puede inferir que la calidad de los ríos que convergen en él o se dividen de él es probablemente la misma, pero para propósitos de este inventario, se consideran como fuentes potenciales de contaminación difusa reducida debido a la posibilidad de derrames accidentales que se arrastren directamente con el cauce de los mismos.

Tabla 4.17 Clasificación y caracterización de las posibles fuentes contaminantes identificadas en la subcuenca del río San Jacinto según el método POSH.

Fuente de contaminación	Tipo	Potencial de generación de contaminación		
		Reducido	Moderado	Elevado
Relleno sanitario	Fuente puntual	X		
Botadero a cielo abierto	Fuente puntual		X	
Ladrillera	Fuente puntual		X	
Taller mecánico	Fuente puntual		X	
Agricultura	Fuente difusa	X		
Ganadería	Fuente difusa	X		
Saneamiento sin cloacas	Fuente puntual		X	
CA12	Fuente lineal		X	
Río San Jacinto	Fuente lineal	X		
Río Chuquezate	Fuente lineal	X		
Río Gavia	Fuente lineal	X		
Río El Venado	Fuente lineal	X		
Río Cujucuyo	Fuente lineal	X		
Río La China	Fuente lineal	X		
Río El Golfo	Fuente lineal	X		
Laguna de lixiviados N° 1	Fuente puntual	X		
Laguna de lixiviados N° 2	Fuente puntual	X		
Gasolinera La Joya	Fuente puntual		X	

Considerando el concepto de “riesgo” definido por Payes (2014) como “la amenaza a la salud humana por la contaminación de una fuente específica de suministro de agua subterránea, o amenaza a un ecosistema por la contaminación de una descarga natural específica de un acuífero”, el uso aislado de la metodología POSH no describe por sí misma el riesgo como tal de contaminación de una masa de agua subterránea, si no que evalúa cada actividad individual inventariada como carga contaminante aplicada al subsuelo y le adjudica una valoración al potencial de generación de contaminación según Foster, et al, (2003) como reducido, moderado y elevado, que en este trabajo se presentan en la Tabla 4.17 y en la Figura 4.28.

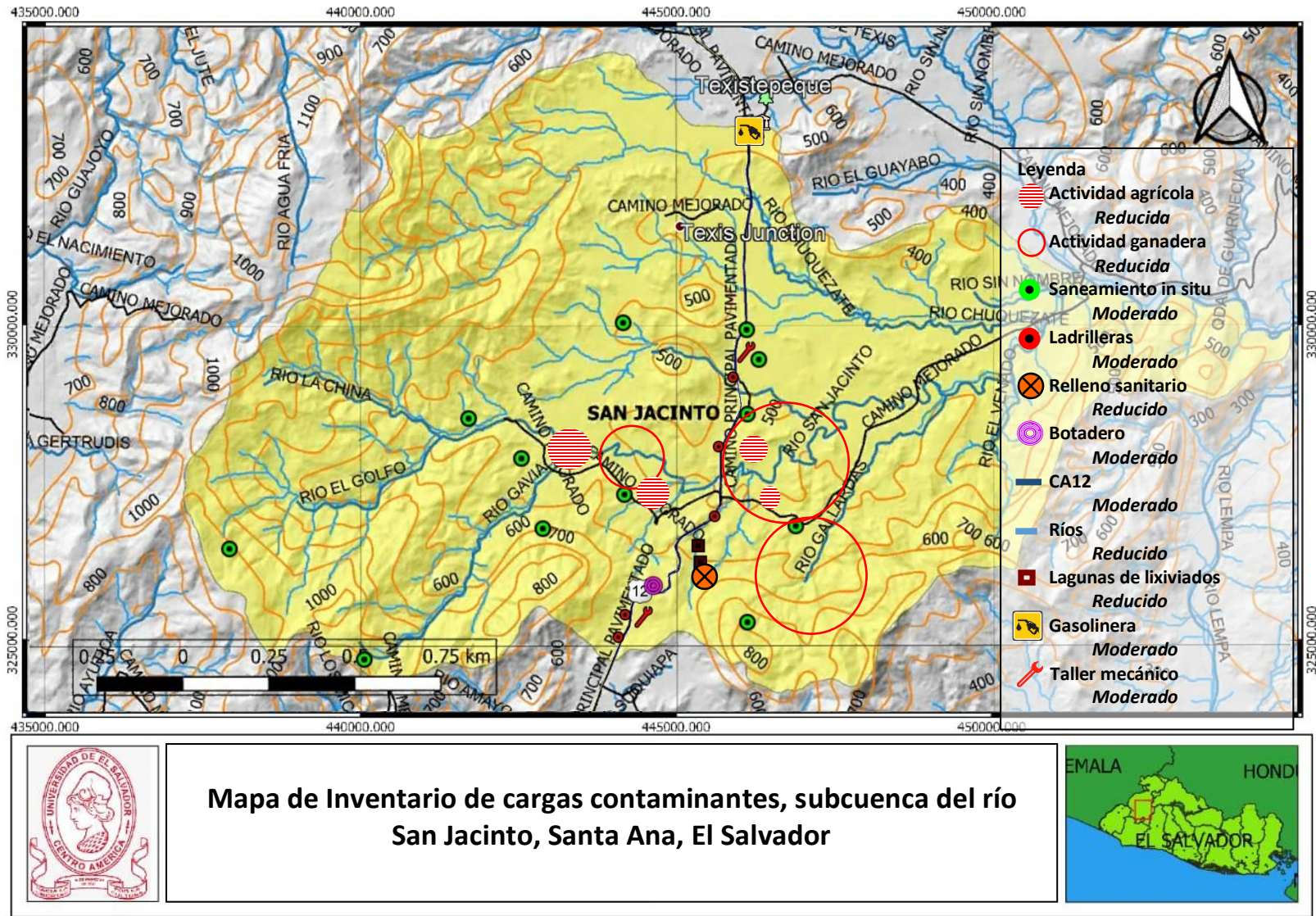


Figura 4.28 Mapeo del inventario de cargas contaminantes identificadas en la subcuenca del río San Jacinto.

CONCLUSIONES

- a. Se rechaza la hipótesis de investigación planteada, ya que los resultados que se obtuvieron al caracterizar las matrices de estudio en las instancias y alrededores del Relleno Sanitario confirman que las concentraciones de Cd, Ni, Pb y Zn encontradas se hallan conforme a la norma tanto para suelos de uso agrícola como para aguas superficiales y aguas subterráneas cuyo fin sea el desarrollo de la vida acuática y consumo humano, por lo que no hay signos de afectación al medio ambiente circundante por causa del relleno sanitario, al momento de realizada la investigación.
- b. Las muestras analizadas con la técnica de GFAA que emitieron resultados cuantificables fueron las obtenidas en la matriz suelo. Para Cadmio se evidencia que todos los resultados cumplen con la normativa mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que indica un límite máximo permisible del metal de 37 mg/kg (base seca). De un total de 13 muestras analizadas, solamente los puntos CEZ-03 (caserío El Zompopo) y CSJ-18 (caserío San Jacinto), fueron cuantificables para Cadmio, reportando valores de 2.3616 y 3.4651 mg/kg, respectivamente.
- c. En cuanto al Níquel en suelos, analizado bajo la técnica de GFAA, se confirma de igual manera el cumplimiento de la Normativa Oficial Mexicana para suelos, en donde se decreta un límite máximo permisible del metal de 1,600 mg/kg (base seca). Los resultados cuantificados se encuentran por debajo de 0.05 mg/kg, alcanzando la mayor concentración en el punto C3-27 (caserío San José El Zompopo) con un valor de 4.7992 mg/kg.

- d. El metal Plomo para la matriz suelo, según lo indica la Normativa Oficial Mexicana, tiene un límite máximo permisible de 400 mg/kg (base seca), para el caso de muestras de suelo analizadas con la técnica de FLAA, se comprueba el cumplimiento de la normativa en todos los puntos muestreados, pues los valores resultantes oscilan entre 7.3590 mg/kg y 15.0368 mg/kg, como valores mínimos y máximos respectivamente.
- e. Los resultados del metal Zinc en la matriz suelo bajo la técnica de análisis de FLAA, cumplen con la normativa española Real Decreto 1310/1990, la cual dispone como límite máximo permitido de Zinc en suelos una concentración de 150 mg/kg (en suelos de pH<7). Las concentraciones varían de un valor mínimo de 17.5813 mg/kg a un máximo de concentración de 36.3871 mg/kg.
- f. Los perfiles de profundidad identificados como horizontes A, B y C correspondientes a 10, 20 y 30 cm respectivamente muestran comportamiento similar en la concentración de Ni, Pb y Zn que por el tipo de suelo arcilloso y la profundidad a la que fueron tomadas las muestras podría deberse probablemente a la interacción natural de las arcillas con los iones metálicos en los horizontes superficiales, que sirve como sumidero de metales disueltos y de nutrientes elementales; así como a la alteración de las capas del suelo por actividad antropogénica, ya que ambos puntos están ubicados dentro de las instalaciones del relleno sanitario.
- g. Todas las muestras de agua superficial tomadas del río San Jacinto y sometidas a cuantificación de los metales Cd, Ni, Pb y Zn mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito, revelaron el cumplimiento normativo del Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM-Perú (2015) para aguas cuyo fin sea el desarrollo de vida acuática (vegetal y animal).

- h. Las muestras de agua cuyo propósito fuera de abastecimiento de redes de agua potable o directamente para consumo humano, como manantiales y agua subterránea extraída de pozos excavados, y sometidas a análisis cuantitativo de Cd, Ni, Pb y Zn mediante la técnica GFAA arrojaron resultados normales para toda el área del caserío San José El Zompopo, mientras que en el caserío San Jacinto se identificaron tres pozos fuera de norma para Pb, y uno para Ni. Los valores obtenidos para Cd y Zn no presentan alteraciones en esa zona tampoco. Los resultados fueron contrastados con las Guías para la calidad del agua potable (OMS, 2006) y RTS 13.02.01:14, El Salvador (2018).

- i. De un total de 19 muestras a las que les midieron parámetros fisicoquímicos, solamente dos valores de oxígeno disuelto, uno en el manantial “El Jute” que abastece a la población de Camones y otro en un pozo perforado situado en las instalaciones del relleno sanitario “ASEMUSA”, sobrepasan el valor máximo permisible para aguas con propósito de abastecimiento de redes de agua potable, que según norma de referencia es 4.0 mg/L. Los otros parámetros medidos pH, STD y CE revelaron resultados normales para todas las muestras analizadas.

- j. De acuerdo a los criterios proveídos por la metodología POSH, se establece una valoración de las potenciales fuentes contaminantes identificadas en la subcuenca del río San Jacinto como de potencial reducido, potencial moderado y potencial elevado, identificándose en el área de estudio, que las actividades más prolíferas son las relacionadas a la agricultura, ganadería, ladrilleras y chatarreras, que varían del potencial reducido a moderado, encontrándose la zona libre de actividades industriales y otras que se puedan catalogar como de potencial de generación elevado de contaminación, mientras el resto de actividades conciernen a las relacionadas al diario vivir de la población de los cantones y caseríos ubicados sobre la subcuenca del río San Jacinto.

RECOMENDACIONES

- a. Por los niveles de concentración de Pb y Ni determinados en algunos pozos ubicados en el caserío San Jacinto, se recomienda a futuras investigaciones centrar el estudio en esa zona, muestreando una mayor cantidad de puntos de suelos y aguas superficiales y subterráneas considerando una probable incidencia del exbotadero de Camones.
- b. A futuras investigaciones se recomienda incorporar mayor cantidad de puntos de muestreo de suelos a profundidad e identificación de las condiciones del pH y óxido reducción de los horizontes, con el propósito de identificar una correlación de avance vertical o estancamiento de las formas metálicas disueltas en el suelo.
- c. Es recomendable realizar ensayos de infiltración en la zona de estudio que expresen un resultado actualizado de la conductividad hidráulica vertical de la zona, con el fin de identificar en conjunto con la textura y la pendiente del terreno, la posibilidad del transporte vertical de los contaminantes.
- d. Se recomienda ampliar la investigación de campo con el objetivo de listar los peligros de contaminación existentes sobre la subcuenca San Jacinto, correspondiente a las casas de la zona, cementerios, talleres mecánicos y los emprendimientos menores y posibles actividades industriales no identificadas.
- e. Realizar un estudio más detallado en los caseríos San Jacinto y San José El Zompopo incluyendo las matrices de sedimento de río y biomasa (muestras de cultivos) debido a la alta actividad agrícola de la zona, incorporando un análisis estadístico que permita inferir con mayor precisión sobre los resultados.

- f. Para evaluar la vulnerabilidad del acuífero y valorar la necesidad de tomar acciones de mitigación y/o remediación se requiere conocer de la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación del suelo, que en conjunto con la base cartográfica propuesta en este trabajo en la que se localizan las zonas más vulnerables a la contaminación y ubica las posibles fuentes contaminantes, podría darse a conocer un análisis detallado del peligro potencial de contaminación de la Subcuenca del río San Jacinto.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle de Mezquital, Hgo.* Tesis de grado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Pachuca de Soto, México.
- Alcaldía Municipal de Santa Ana. (s.f.). Recuperado el 20 de Marzo de 2020, de Portal de Transparencia Alcaldía Municipal de Santa Ana: <https://santaana.gob.sv/>
- APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). Washington, D.C., EE.UU.: American Public Health Association.
- Aparatos Eléctricos y Electrónicos. (s.f.). Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es>.
- Appelo, C., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (Segunda ed.). Amsterdam, Países Bajos: A. A. Balkema Publishers.
- Ayres, R., y Westcot, D. (1985). *Water Quality for Agriculture*. Roma, Italia: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm#TOC>
- Bagchi, A. (1990). *Design, construcción and monitoring of Sanitary Landfill*. EE.UU.: Jonh Wiley & Sons Inc.
- Barrocu, G., y Biallo, G. (1993). Application of GIS for aquifer vulnerability evaluation. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*(211).
- Bruemmer, G., Gerth, J., y Herms, U. (1986). Heavy metal species, mobility and availability in soils. *J. Pant Nutr. Soil Sci./Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.*, 149.
- Carías, B. E., Chacón, E. T., y Martínez, M. Á. (2004). *Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en El Salvador*. Tesis de grado, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Castañé, P. M., Topalián, M. L., Cordero, R. R., y Salibián, A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología*, 20(1), 13-18.
- Chicas Murillo, H. J., y Velásquez, D. A. (2011). *Evaluación y caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas superficiales y subterráneas para consumo humano del sector de influencia de Mazacúa del cantón Cutumay Camones*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- DINAMA. (2003). Dirección Nacional de Medio Ambiente. Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea. Uruguay.

- Easterbrook, D. J. (1999). *Surface Processes and Landforms*. Washington, EE.UU.: Pearson.
- EPA Victoria. (s.f.). Environment Protection Authority Victoria. Sampling and analysis of waters, wastewater, soils and wastes. Australia.
- Escrig, I., y Morell, I. (1996). Origen y comportamiento de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn en el subsistema acuífero de la plana de Castellon. *Estudios Geológicos*(52), 259-268.
- España. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. Boletín Oficial del Estado, núm. 262, de 1 de noviembre de 1990, páginas 32339 a 32340. .
- FAO. (2009). *Food and Agriculture Organization. Guía para la descripción de suelos* (Cuarta ed.). Roma, Italia.
- FAO. (s.f.). *Food and Agriculture Organization. Propiedades físicas del suelo*. Obtenido de Portal de suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/>
- FAO. (s.f.). *Food and Agriculture Organization. Propiedades químicas del suelo*. Obtenido de Portal de suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/>
- Fetter, C. (2014). *Applied Hydrogeology*. New Jersey, EE.UU.: Prentice Hall.
- Foster, y Hirata. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Lima, Perú.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., y Paris, M. (2003). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Banco Mundial. Washington D.C., EE.UU.: Ediciones Mundi-Prensa.
- Galán, E., y Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Conferencia de Contaminación de suelos por metales pesados* (págs. 48-60). Sevilla, España: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.
- González, O., Aguirre, J., Saugar, G., Orozco, L., Álvarez, G., Palacios, K., y Guevara, O. (2007). Diagnóstico de la calidad del agua de consumo en las comunidades del sector rural noreste del municipio de León, Nicaragua. *Universitas*, 1, 7-13.
- Guevara, M., Hernández, W., Rivas, C., y Márquez, E. (2006). Estado de las aguas subterráneas en El Salvador. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 75-88.
- Henríquez, J. (09 de Septiembre de 2019). Alcaldía santaneca renueva el contrato a empresa de recolección de desechos. *El Diario de Hoy (Edición digital)*. Obtenido de <https://www.elsalvador.com>
- Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*(2), 81-90.

- IGME. (2004). Instituto Geológico y Minero de España. Protección de las aguas subterráneas frente a vertidos directos e indirectos. *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas(13)*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. Obtenido de http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/3_1.pdf
- INTA. (2011). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Protocolo de Muestreo, Transporte y Conservación de Muestras de Agua con Fines Múltiples (consumo humano, abrevado animal y riego). Argentina.
- Jarrín, A. E., Salazar, J. G., y Martínez-Fresneda, M. (2017). Evaluación del riesgo a la contaminación de los acuíferos de la Reserva Biológica de Limoncocha, Amazonía Ecuatoriana. *Revista Ambiente y Agua*, 12(4). doi:10.4136/ambiente.2030
- Kabata-Pendias, A., y Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants* (3ra ed.). Boca Ratón, EE.UU.: CRC Press.
- Kass, D. C. (1996). *Fertilidad de suelos*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- La Prensa Gráfica. (20 de Septiembre de 2013). Siguen utilizando botadero a cielo abierto en Camones. *La Prensa Gráfica (Edición digital)*. Obtenido de <https://www.laprensagrafica.com>
- Leiva, C. C. (2000). Consideraciones generales sobre la gestión de residuos sólidos en El Salvador. *Theoretikos: la revista electrónica de la UFG(004)*. Obtenido de <http://www.ufg.edu.sv/ufg/theorethikos/enero2001/cientifico02.htm>
- Ley Federal de Derechos. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 31 de diciembre de 1981.
- López, D. R., y Retana, J. R. (2007). *Reconocimiento hidrogeológico de la zona norte del departamento de Santa Ana y área aledaña del departamento de Chalatenango*. Tesis de grado, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- MacDonald, A. M., y Foster, S. S. (2016). Groundwater Systems. En M. Smith, K. Cross, M. Paden, & P. Laban (Edits.), *Spring : managing groundwater sustainably*. Gland, Suiza: IUCN. doi:10.2305/IUCN.CH.2016.WANI.8.en
- Machuca, E. (4 de Diciembre de 2017). Basura: Un problema en crecimiento. *La Prensa Gráfica (Edición digital)*. Obtenido de www.laprensagrafica.com
- Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., Núñez-Solís, C., y Gómez-Cruz, A. (Noviembre-Diciembre de 2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(6), 103-118.

- MARN. (3 de octubre de 2013). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Residuos sólidos*. Obtenido de <http://www.marn.gob.sv/residuos-solidos/>
- MARN. (2017). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Anuario estadístico 2017. San Salvador, El Salvador.
- MARN. (30 de noviembre de 2017). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía ciudadana para la gestión Responsable de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). San Salvador, El Salvador: Unidad de Comunicaciones MARN. Obtenido de <http://www.marn.gob.sv>
- MARN. (2017). *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe de la calidad del agua de los ríos de El Salvador 2017*. San Salvador, El Salvador.
- Martínez, D. M. (2019). *Determinación de plomo en Lycopersicon esculentum (tomate) por espectrometría de absorción atómica con horno de grafito*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Martínez, R. (2007). *Estudio sobre la concentración de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos en lixiviados del relleno sanitario "San Nicolás" y en agua de pozos aledaños*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Departamento de Fisiología y Farmacología, Aguascalientes, México.
- Meléndez, C. E., Zavala, C. A., Ávalos, E., Estévez, J. A., & Quintanilla, F. M. (2011). *Estudio de Impacto Ambiental del proyecto "Construcción del relleno sanitario"*. Santa Ana, El Salvador.
- Mendoza, L. M., Rivas, J. R., & Villalobos, K. L. (2017). *Determinación de metales pesados cadmio, níquel, plomo y zinc en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, San Salvador, El Salvador.
- Mendoza, R., y Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para Muestreo de Suelos*. Managua, Nicaragua: Complejo Gráfico TMC.
- MINAM. (2014). *Ministerio del Ambiente. Guía para muestreo de suelos*. Perú.
- MINAMBIENTE. (2017). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Política Nacional. Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)*. Obtenido de MINAMBIENTE: <https://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Agricultura. (1963). Levantamiento General de Suelos. El Salvador.
- Mora, R., y Mora, R. (2005). Contaminación por metales pesados en sedimentos de Quebrada Azul. *Revista de Ciencias Ambientales*, 29(1), 63-75.
- Najera, H. A. (Octubre de 2016). Lixiviados ¿Qué son, cómo se clasifican? (Parte 1). *Gaceta ambiental*. Obtenido de <https://www.unicach.mx>

- National Geographic Society. (2013). *National Geographic/ENCYCLOPEDIA*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.org/>
- OEA-CONAPLAN. (1974). *Organización de los Estados Americanos-Consejo Nacional de Planificación y Coordinación Económica. El Salvador - Zonificación Agrícola - Fase I*. Obtenido de <http://www.oas.org>
- Olano, J. A. (2012). *Clasificación de ríos por Cuencas hidrográficas de El Salvador*, C.A. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección general de ordenamiento forestal, cuencas y riego, Soyapango, El Salvador.
- Ordóñez, J. J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* Foro Peruano para el Agua. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- OSARTEC. (2018). Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica. Diario Oficial del República de El Salvador, Tomo N° 419, Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14 AGUA. AGUA DE CONSUMO HUMANO. REQUISITOS DE CALIDAD E INOCUIDAD. San Salvador, El Salvador.
- Passow, H., Rothstein, A., y Clarkson, T. (1961). The general pharmacology of the heavy metals. *Pharmacol. Revs.*, 13.
- Payes, J. (2014). *Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico*. Tesis de maestría, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Unidad de Posgrado, San Salvador, El Salvador.
- Pineda, G. J., y Rivera, E. D. (2016). *Determinación del análisis bromatológico proximal y minerales en pupusas a base de Zea mays (maíz) comercializadas dentro y en los alrededores del Campus Central de la Universidad de El Salvador*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador, Facultad de Química y Farmacia, San Salvador, El Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv>
- PNUD. (2009). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Almanaque 262. *Estado del desarrollo humano en los municipios de El Salvador 2009*. El Salvador.
- PNUD. (2018). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano El Salvador 2018 ¡SOY JOVEN! ¿Y ahora qué?*. El Salvador.
- Quinteros, H., Ramírez, B., y Ramos, J. A. (2013). *Evaluación de contaminación por metales pesados en la cuenca baja del río San Antonio, municipio de Nejapa*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, San Salvador, El Salvador.
- Razmilic, B. (1994). Espectroscopía de absorción atómica. En FAO, *Control de calidad de insumos y dietas acuícolas*. Ciudad de México, México. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ab482s/AB482S04.htm>

- Rico, M. Á. (1974). *Las nuevas clasificaciones y los suelos de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.
- Robles-Martínez, F., Morales-López, Y., Piña-Guzmán, A., Espíndola-Serafín, O., Tovar-Gálvez, L., y Valencia-del Toro, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Universidad y Ciencia*, 27(2), 121-132.
- Romero, B. N. (2012). *Clasificación de suelos por división política de El Salvador*, C.A. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Soyapango, El Salvador: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Rosenberg, E., y Panne, U. (2003). Handbook of Spectroscopy. En G. Gauglitz, & T. Vo-Dinh (Edits.), *Handbook of Spectroscopy* (págs. 421-496). Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sánchez, M. I. (2003). *Determinación de metales pesados en suelos de Medina del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia*. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, Departamento de Química Analítica, Valladolid, España.
- Sánchez, M. S. (2010). *Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín: transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas*. Tesis doctoral, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Química, Bogotá, Colombia.
- Sibrián, W. (8 de Mayo de 2019). Proponen ley que fomenta reducir generación de basura en El Salvador. *La Prensa Gráfica (Edición digital)*. Obtenido de <https://www.laprensagrafica.com>
- SNET. (2005). Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Componente Evaluación de Recursos Hídricos . *Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- Solicitud de Reforma a Artículo 47 de la Ley General de Educación, Asamblea Legislativa de la República de El Salvador, San Salvador, 2019.
- Suárez, A. (1968). *Caracterización Del Estado Del Potasio en Tres Grandes Grupos de Suelos de Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Bib. Orton IICA / CATIE.
- Tablas, J. M. (1986). Clasificación de tierras por su capacidad de uso. *La universidad*(3), 11-44.
- Toledo, D. O. (2017). La influencia de los patrones culturales en la generación de residuos sólidos y su manejo en la ciudad de Santa Ana. *Anuario de Investigación*, 6, 179-201.

- Torres, N. E. (2018). *Evaluación de la concentración de metales pesados como As, Cu, Cd, Hg y Pb en el botadero de Cancharani de la ciudad de Puno*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica, Puno, Perú.
- U.S. EPA. (1994). Environmental Protection Agency. Methods for the determination of metals in environmental samples. EE.UU.
- USACE. (1998). *United States Army Corps of Engineers. Evaluación de Recursos de Agua de La República de El Salvador*. San Salvador, El Salvador.

ANEXOS

A. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RECOLECTADA

ANEXO A.1 Formato de inventario de pozos

Inventario de pozos				
		Fecha:		2019
			Día	Mes
Ubicación:				Año
	Caserío	Cantón	Municipio	
Coordenadas:				
	Latitud	Longitud		
Elevación:			Tipo de pozo:	
Profundidad:			Distancia del relleno:	
Uso:	<input type="checkbox"/> Consumo humano	<input type="checkbox"/> Riego sin restricciones	<input type="checkbox"/> Consumo animal	
	<input type="checkbox"/> Actividades recreativas	<input type="checkbox"/> Sin uso	Comentario:	
Código:	PZ			
	Abreviatura	Tipo de pozo	Correlativo	

ANEXO A.2 Etiqueta de identificación de muestras de aguas superficiales y subterráneas

UES-FIA-EIQA

CÓDIGO: _____

Fecha: ___/___/___

Hora: _____

Ubicación: _____

Matriz: _____

Cantidad de muestra: _____

pH: _____

V. Ácido agregado: _____

B. INFORMACIÓN RECOLECTADA

ANEXO B.1 Información general recopilada de pozos inventariados

Cuadrante	Código	Coordenadas geodésicas		Profundidad	Usos	Observaciones	Tipo	Ubicación
I	PZ01	14°3'51.37"N	89°29'28.95"O	—	En desuso	—	Pozo individual	Caserío San José El Zompopo, Cantón Cujucuyo, Texistepeque
	PZ02	14°3'50.42"N	89°29'30.88"O	—	—	Uso de varias familias	Pozo comunal	
	PZ03	14°3'51.25"N	89°29'30.30"O	9 varas	—	—	Pozo individual	
	PZ04	14°3'51.31"N	89°29'30.76"O	8 varas	Consumo humano y riego	—	Pozo individual	
	PZ05	14°3'53.10"N	89°29'31.24"O	—	En desuso	—	Pozo individual	
	PZ06	14°3'54.25"N	89°29'35.44"O	—	En desuso	—	Pozo individual	
	PZ07	14°3'54.37"N	89°29'39.42"O	16 varas	Uso completo	—	Pozo individual	
	PZ08	14°3'56.16"N	89°29'45.84"O	20 varas	Uso completo	—	Pozo individual	
	PZ09	14°4'3.22"N	89°30'3.07"O	—	En desuso	—	Pozo individual	
	PZ10	14°4'4.08"N	89°30'5.72"O	2 m	Uso doméstico	—	Pozo individual	
	PZ11	14°4'3.90"N	89°30'9.08"O	—	Uso completo	—	Pozo individual	
	PZ12	14°4'5.59"N	89°30'10.51"O	18 varas	Uso completo	—	Pozo individual	
	PZ13	14°4'19.59"N	89°30'10.95"O	15 varas	Uso completo	—	Pozo individual	Caserío San Jacinto, Cantón Cujucuyo, Texistepeque
	PZ14	14°4'20.19"N	89°30'11.09"O	15 varas	Uso completo	—		
PZ20	14° 4'6.71"N	89°30'11.04"O	—	—	—	Pozo individual		

Continúa página siguiente

ANEXO B.1 Información general recopilada de pozos inventariados (continuación)

Cuadrante	Código	Coordenadas geodésicas		Profundidad	Usos	Observaciones	Tipo	Ubicación
II	PZ01	14°4'20.40"N	89°31'24.20"O	15 varas	—	Regadío, siembra de frijol y ganado	Pozo individual	Caserío San Jacinto, Cantón Cujucuyo, Texistepeque
	PZ02	14°4'22.54"N	89°31'23.13"O	—	—	Casa sola al momento de la visita	Pozo individual	
	PZ03	14°4'21.32"N	89°31'22.05"O	—	—	Casa sola al momento de la visita	Pozo individual	
	PZ04	14°4'24.97"N	89°31'4.84"O	8 m	Uso completo	Crianza de ganado	Pozo individual	
	PZ05	14°4'25.24"N	89°31'5.62"O	8 m	Uso completo	Crianza de ganado		
	PZ06	14°4'6.57"N	89°30'57.18"O	—	—	Casa sola al momento de la visita	Pozo individual	
	PZ07	14°3'58.90"N	89°30'56.64"O	18 varas	Uso completo	Letrina cercana en plano más elevado	Pozo individual	Caserío San Jacinto, Cantón Cujucuyo, Texistepeque
	M01	14°3'58.44"N	89°30'58.23"O	4 m	—	Manantial	—	
	PZ08	14°3'57.04"N	89°30'58.06"O	—	—	—	Pozo individual	
	PZ09	14°3'55.84"N	89°30'48.33"O	32 m	—	—	Pozo individual	
	PZ10	14°3'55.90"N	89°30'46.23"O	13 varas	—	—	Pozo individual	
	PZ11	14°3'54.05"N	89°30'43.17"O	—	—	—	Pozo individual	
PZ12	14°3'52.87"N	89°30'40.68"O	18 varas	Consumo humano, actividades domésticas	—	Pozo individual		

Continúa página siguiente

ANEXO B.1 Información general recopilada de pozos inventariados (continuación)

Cuadrante	Código	Coordenadas geodésicas		Profundidad	Usos	Observaciones	Tipo	Ubicación
II	PZ13	14°3'54.99"N	89°30'40.18"O	—	En desuso	—	Pozo individual	Caserío San Jacinto, Cantón Cujucuyo, Texistepeque
	PZ14	14°3'54.00"N	89°30'39.45"O	—	—	—	Pozo individual	
	PZ15	14°3'54.82"N	89°30'38.11"O	10 m	Consumo humano	—	Pozo individual	
	PZ16	14°3'54.08"N	89°30'36.60"O	—	—	—	Pozo individual	
	PZ17	14°3'56.28"N	89°30'35.05"O	20 m	Consumo humano, actividades domésticas	—	Pozo individual	
	PZ18	14°3'57.92"N	89°30'29.85"O	8 m	Consumo humano, actividades domésticas	Siembra de pepino y maíz	Pozo individual	
	PZ19	14° 4'2.12"N	89°30'21.57"O	—	—	—	—	
IV	M02	14°3'16.54"N	89°30'5.23"O	—	—	Manantial	—	Caserío Cutumay Camones, Santa Ana

ANEXO B.2 Información general de los puntos resultantes de la rejilla circular para muestreo de suelos

Código	Coordenadas geográficas		Altura (msnm)	Distancia al relleno (m)	Accesibilidad	Dirección
C0-00	14° 3'36.12"N	89°30'22.72"O	423	0	Si	-
C0-01	14° 3'37.09"N	89°30'27.59"O	446	150.72	No	Oeste
C0-02	14° 3'40.95"N	89°30'26.01"O	430	172.26	No	Noroeste
C0-03	14° 3'42.18"N	89°30'21.72"O	415	177.2	No	Norte
C0-04	14° 3'39.51"N	89°30'18.13"O	423	166.22	Si	Noreste
C0-05	14° 3'35.79"N	89°30'17.89"O	435	144.97	No	Este
C0-06	14° 3'32.98"N	89°30'20.63"O	425	120.22	No	Sureste
C0-07	14° 3'32.45"N	89°30'23.19"O	426	128.01	No	Sur
C0-08	14° 3'33.84"N	89°30'25.90"O	436	409.19	No	Suroeste
C1-09	14° 3'38.31"N	89°30'36.04"O	462	424.08	No	Oeste
C1-10	14° 3'47.82"N	89°30'30.63"O	455	424.29	Si	Noroeste
C1-11	14° 3'50.19"N	89°30'20.52"O	414	419.87	Si	Norte
C1-12	14° 3'44.52"N	89°30'11.38"O	437	406.12	No	Noreste
C1-13	14° 3'34.75"N	89°30'9.41"O	442	375.23	No	Este
C1-14	14° 3'26.07"N	89°30'16.02"O	445	374.61	No	Sureste
C1-15	14° 3'24.43"N	89°30'24.38"O	447	394.7	No	Sur
C1-16	14° 3'28.78"N	89°30'32.78"O	493	597.27	No	Suroeste
C2-17	14° 3'39.23"N	89°30'42.79"O	449	613.4	No	Oeste
C2-18	14° 3'53.34"N	89°30'34.24"O	426	620.07	No	Noroeste
C2-19	14° 3'56.52"N	89°30'19.56"O	437	603.53	Si	Norte
C2-20	14° 3'48.38"N	89°30'6.26"O	441	575.67	No	Noreste
C2-21	14° 3'33.76"N	89°30'2.91"O	446	575.9	No	Este
C2-22	14° 3'20.59"N	89°30'12.43"O	506	586.78	No	Sureste
C2-23	14° 3'17.93"N	89°30'25.40"O	475	592.96	No	Sur
C2-24	14° 3'24.80"N	89°30'38.25"O	497	783.77	No	Suroeste
C3-25	14° 3'21.02"N	89°30'43.31"O	510	825.06	No	Oeste
C3-26	14° 3'40.07"N	89°30'49.24"O	437	830.14	Si	Noroeste
C3-27	14° 3'59.01"N	89°30'38.04"O	402	828.61	No	Norte
C3-28	14° 4'3.25"N	89°30'18.53"O	407	816.16	Si	Noreste
C3-29	14° 3'52.52"N	89°30'0.61"O	403	799.14	No	Este
C3-30	14° 3'32.67"N	89°29'56.09"O	464	778.36	No	Sureste
C3-31	14° 3'15.12"N	89°30'8.71"O	555	778.25	No	Sur
C3-32	14° 3'11.99"N	89°30'26.30"O	512	775.54	No	Suroeste

ANEXO B.3 Calificación de pozos excavados según los parámetros del método de ponderación

Código	Nivel freático	Ubicación con respecto a la CA12	Distancia entre pozos	Uso	Total
IPZ01	1.5	2	1	0.9	5.4
IPZ02	1.5	2	1	0.9	5.4
IPZ03	1.5	2	1	0.9	5.4
IPZ04	1.5	2	1	3	7.5
IPZ05	1.5	2	2	0.9	6.4
IPZ06	1.5	2	2	0.9	6.4
IPZ07	2.1	2	2	3	9.1
IPZ08	2.1	2	2	3	9.1
IPZ09	1.5	2	2	0.9	6.4
IPZ10	1.5	2	2	3	8.5
IPZ11	1.5	0.4	2	3	6.9
IPZ12	2.1	0.4	1	3	6.5
IPZ13	2.1	1.2	1	3	7.3
IPZ14	2.1	1.2	1	3	7.3
IPZ20	1.5	1.2	1	0.9	4.6
IIPZ01	2.1	2	2	0.9	7
IIPZ02	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ03	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ04	1.5	2	1	3	7.5
IIPZ05	1.5	2	1	3	7.5
IIPZ06	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ07	2.1	2	2	3	9.1
IIPZ08	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ09	3	2	2	0.9	7.9
IIPZ10	2.1	2	2	0.9	7
IIPZ11	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ12	2.1	2	2	3	9.1
IIPZ13	1.5	2	1	0.9	5.4
IIPZ14	1.5	2	1	0.9	5.4
IIPZ15	1.5	2	1	3	7.5
IIPZ16	1.5	2	2	0.9	6.4
IIPZ17	2.1	2	2	3	9.1
IIPZ18	1.5	2	2	3	8.5
IIPZ19	1.5	2	2	0.9	6.4
Promedio					7.0

Consideraciones al ANEXO B.3:

- En los pozos cuya información se encuentra incompleta, se asignó un valor de 5 m para la calificación del nivel freático.
- Se ha tomado en cuenta la menor distancia desde el pozo hasta la carretera CA12.
- Para el criterio de proximidad entre pozos, se ha considerado la distancia hasta el pozo más cercano.
- A los pozos cuya información de uso no se tiene, se les ha asignado el valor correspondiente a “en desuso”.

ANEXO B.4 Calificación de los posibles puntos de muestreo de suelos de acuerdo al método de ponderación



Código	Distancia al relleno sanitario	Accesibilidad del relleno	Suelo ocioso	Elevación con respecto al relleno sanitario	Dirección de la posible pluma contaminante (No-reste)	Total ¹⁸
	25%	25%	5%	25%	20%	
PMS-00-00	2.5	2.5	0.5	2.5	1	10
PMS-C0-02	2.5	0	0.5	2.5	1	9
PMS-C0-03	2.5	0	0.5	2.5	1.6	9.6
PMS-C0-04	2.5	2.5	0.5	2.5	2	10
PMS-C0-05	1.25	0	0.5	1.25	1.6	4.6
PMS-C0-06	2.5	0	0.5	2.5	1	6.5
PMS-C0-07	2.5	0	0.5	2.5	0.4	5.9
PMS-C0-08	2.5	0	0.5	2.5	0.4	8.4
PMS-C1-09	0	2.5	0.5	0	1	4
PMS-C1-10	1.875	0	0.5	1.875	1	5.25
PMS-C1-11	2.5	0	0.5	2.5	1.6	7.1
PMS-C1-12	2.5	2.5	0.5	2.5	2	10
PMS-C1-13	1.25	0	0.5	1.25	1.6	4.6
PMS-C1-14	0.625	0	0.5	0.625	1	2.75
PMS-C1-15	1.25	0	0.5	1.25	0.4	3.4
PMS-C1-16	0.625	2.5	0.5	0.625	0.4	4.65
PMS-C2-17	0	2.5	0.5	0	1	4
PMS-C2-18	1.25	2.5	0.5	1.25	1	6.5
PMS-C2-19	2.5	0	0	2.5	1.6	6.6
PMS-C2-20	2.5	2.5	0.5	2.5	2	10
PMS-C2-21	2.5	0	0.5	2.5	1.6	7.1
PMS-C2-22	0	0	0.5	0	1	1.5
PMS-C2-23	0	2.5	0.5	0	0.4	3.4
PMS-C2-24	0	0	0.5	0	0.4	0.9
PMS-C3-25	0	2.5	0.5	0	0.4	3.4
PMS-C3-26	1.25	0	0	1.25	1	3.5
PMS-C3-27	2.5	2.5	0.5	0.625	1.6	7.725
PMS-C3-28	1.875	0	0	1.875	1.6	7.85
PMS-C3-29	1.875	0	0	1.875	2	5.75
PMS-C3-30	0.625	0	0	0.625	1.6	2.85
PMS-C3-31	0	0	0	0	1	1
PMS-C3-32	0	0	0	0	0.4	0.4

¹⁸ Los puntos seleccionados son los sombreados en verde, mientras que los sombreados en amarillo estuvieron sujetos a si las condiciones del terreno lo permiten y el punto sombreado en azul se descartó debido a que se ubica exactamente en una de las lagunas de lixiviados.

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales

ANEXO B.5.1


ANEXO B.5.2

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019								
Correlativo: 1		Fecha:		04	10	2019	Correlativo: 2		Fecha:		04	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	RSJ01	Hora de muestreo:	09:42 am			Código de muestra:	RSJ02	Hora de muestreo:	12:08 pm				
Fuente superficial:	Río San Jacinto					Fuente superficial:	Río San Jacinto						
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San José El Zompopo						
Coordenadas:	14° 4'19.20" N		89°29'53.86" O			Coordenadas:	14° 4'14.45" N		89°29'47.19" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua					Observaciones								
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente						
	Turbidez leve						Turbidez leve						
	Turbidez alta						Turbidez alta						
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía					Fotografía								
													

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.3



ANEXO B.5.4

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019										
Correlativo: 3		Fecha:		01	10	2019	Correlativo: 4		Fecha:		01	10	2019		
Muestreador: Personal del Relleno Sanitario ASEMUSA				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año		
Código de muestra:	QEA01	Hora de muestreo:	11:01 am			Código de muestra:	QEA02	Hora de muestreo:	10:05 am						
Fuente superficial:	Quebrada El Almendro					Fuente superficial:	Quebrada El Almendro								
Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo								
Coordenadas:	14° 3'47.56" N		89°30'20.62" O			Coordenadas:	14° 3'57.35"N		89°30'10.66"O						
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud						
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL						
Características del Agua				Observaciones				Características del agua				Observaciones			
Transparencia del agua:	Transparente		—				Transparencia del agua:	Transparente							
	Turbidez leve							Turbidez leve							
	Turbidez alta							Turbidez alta							
Color del agua:	Incolora						Color del agua:	Incolora							
Olor del agua:	Sin olor						Olor del agua:	Sin olor							
Fotografía						Fotografía									
															

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.5



ANEXO B.5.6

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019				
Correlativo: 5	Fecha:	04	10	2019	Correlativo: 6	Fecha:	04	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo		Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo		Día	Mes	Año
Código de muestra:	QEA03	Hora de muestreo:	10:49 am		Código de muestra:	PCQ00	Hora de muestreo:	10:22 am	
Fuente superficial:	Quebrada El Almendro				Fuente superficial:	Punto de confluencia del cauce de las quebradas El Almendro y El Muerto.			
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14° 4'6.85"N		89°30'2.33"O		Coordenadas:	14° 4'10.84" N		89°29'55.90" O	
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL		Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL	
Características del Agua			Observaciones		Características del agua			Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente		—		Transparencia del agua:	Transparente		—	
	Turbidez leve					Turbidez leve			
	Turbidez alta					Turbidez alta			
Color del agua:	Incolora		Color del agua:	Incolora					
Olor del agua:	Sin olor		Olor del agua:	Sin olor					
Fotografía					Fotografía				
									

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.7



ANEXO B.5.8

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019				
Correlativo: 7	Fecha:	01	10	2019	Correlativo: 8	Fecha:	01	10	2019
Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA		Día	Mes	Año	Muestreador: Personal del Relleno Sanitario ASEMUSA		Día	Mes	Año
Código de muestra:	QEM01	Hora de muestreo:	11:47 am		Código de muestra:	QEM02	Hora de muestreo:	12:16 pm	
Fuente superficial:	Quebrada El Muerto				Fuente superficial:	Quebrada El Muerto			
Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14°7'32.68" N		89°29'43.61" O		Coordenadas:	14°3'53.98" N		89°29'56.86" O	
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL		Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL	
Características del Agua			Observaciones		Características del agua			Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente		—		Transparencia del agua:	Transparente		—	
	Turbidez leve					Turbidez leve			
	Turbidez alta					Turbidez alta			
Color del agua:	Incolora				Color del agua:	Incolora			
Olor del agua:	Sin olor				Olor del agua:	Sin olor			
Fotografía					Fotografía				
									

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.9



ANEXO B.5.10

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019						
Correlativo: 9		Fecha:			Correlativo: 10		Fecha:				
Muestreador: Marta Carrillo		04	10	2019	Muestreador: Marta Carrillo		01	10	2019		
		Día	Mes	Año			Día	Mes	Año		
Código de muestra:	QEM03	Hora de muestreo:			Código de muestra:	MNT01	Hora de muestreo:				
		11:45 am					03:50 pm				
Fuente superficial: Quebrada El Muerto					Fuente superficial: Manantial El Jute						
Ubicación: Caserío San José El Zompopo					Ubicación: Caserío Cutumay Camones						
Coordenadas:		14° 4'5.76"N			Coordenadas:		14°3'13.16" N				
		89°29'53.53"O					89°30'06.00" O				
		Latitud					Longitud				
Volumen recogido:		1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL		
				2 mL					2 mL		
Características del Agua				Observaciones		Características del agua				Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente			—		Transparencia del agua:	Transparente				
	Turbidez leve						Turbidez leve				
	Turbidez alta						Turbidez alta				
Color del agua:	Incolora			Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor			Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía					Fotografía						
											

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.11



ANEXO B.5.12

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019				
Correlativo: 11	Fecha:	04	10	2019	Correlativo: 1	Fecha:	08	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo		Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo		Día	Mes	Año
Código de muestra:	MNT02	Hora de muestreo:	03:08 pm		Código de muestra:	RSJ01	Hora de muestreo:	02:35 pm	
Fuente superficial:	Manantial				Fuente superficial:	Río San Jacinto			
Ubicación:	Caserío San Jacinto				Ubicación:	Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14° 3'58.44" N		89°30'58.23" O		Coordenadas:	14° 4'19.20" N		89°29'53.86" O	
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL		Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL	
Características del Agua			Observaciones		Características del agua			Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente		—		Transparencia del agua:	Transparente		—	
	Turbidez leve					—			
	Turbidez alta					—			
Color del agua:	Incolora		—		Color del agua:	Incolora		—	
Olor del agua:	Sin olor				Olor del agua:	Sin olor			
Fotografía					Fotografía				
									

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.13



B.5.14

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019						
Correlativo: 2		Fecha:			Correlativo: 3		Fecha:				
Muestreador: Marta Carrillo		08	10	2019	Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA		08	10	2019		
		Día	Mes	Año			Día	Mes	Año		
Código de muestra:	RSJ02	Hora de muestreo:			Código de muestra:	QEA01	Hora de muestreo:				
		02:14 pm					10:19 am				
Fuente superficial:	Río San Jacinto				Fuente superficial:	Quebrada El Almendro					
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					
Coordenadas:	14° 4'14.45" N		89°29'47.19" O		Coordenadas:	14° 3'47.56" N		89°30'20.62" O			
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud			
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL	Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL		
Características del Agua				Observaciones		Características del agua				Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente			—	Transparencia del agua:	Transparente			—		
	Turbidez leve					Turbidez leve					
	Turbidez alta					Turbidez alta					
Color del agua:	Incolora			Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor			Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía					Fotografía						
											

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.15



ANEXO B.5.16

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019										
Correlativo: 4		Fecha:		08	10	2019	Correlativo: 5		Fecha:		08	10	2019		
Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año		
Código de muestra:	QEA02	Hora de muestreo:	10:03 am			Código de muestra:	QEA03	Hora de muestreo:	03:21 pm						
Fuente superficial:	Quebrada El Almendro					Fuente superficial:	Quebrada El Almendro								
Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San José El Zompopo								
Coordenadas:	14° 3'57.35" N		89°30'10.66" O			Coordenadas:	14° 4'6.85"N		89°30'2.33"O						
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud						
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL						
Características del Agua				Observaciones				Características del agua				Observaciones			
Transparencia del agua:	Transparente		—				Transparencia del agua:	Transparente		—					
	Turbidez leve							Turbidez leve							
	Turbidez alta							Turbidez alta							
Color del agua:	Incolora						Color del agua:	Incolora							
Olor del agua:	Sin olor						Olor del agua:	Sin olor							
Fotografía						Fotografía									
															

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.17



ANEXO B.5.18

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019						
Correlativo: 6 Muestreador: Marta Carrillo		Fecha:	08	10	2019	Correlativo: 7 Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA		Fecha:	08	10	2019
			Día	Mes	Año				Día	Mes	Año
Código de muestra:	PCQ00	Hora de muestreo:	03:06 pm			Código de muestra:	QEM01	Hora de muestreo:	10:46 am		
Fuente superficial:	Punto de confluencia del cauce de las quebradas El Almendro y El Muerto.				Fuente superficial:	Quebrada El Muerto					
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo					
Coordenadas:	14° 4'10.84" N		89°29'55.90" O			Coordenadas:	14°7'32.68" N		89°29'43.61" O		
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud		
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL		
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones		
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente				
	Turbidez leve						Turbidez leve				
	Turbidez alta						Turbidez alta				
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora				
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor				
Fotografía					Fotografía						
											

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.19



ANEXO B.5.20

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019										
Correlativo: 8		Fecha:		08	10	2019	Correlativo: 9		Fecha:		08	10	2019		
Muestreador: Personal del Relleno Sanitario ASEMUSA				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año		
Código de muestra:	QEM02	Hora de muestreo:	11:05 am			Código de muestra:	QEM03	Hora de muestreo:	01:24 pm						
Fuente superficial:	Quebrada El Muerto					Fuente superficial:	Quebrada El Muerto								
Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San José El Zompopo								
Coordenadas:	14°3'53.98" N		89°29'56.86" O			Coordenadas:	14° 4'6.85"N		89°30'2.33"O						
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud						
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL						
Características del Agua				Observaciones				Características del agua				Observaciones			
Transparencia del agua:	Transparente			—				Transparencia del agua:	Transparente			—			
	Turbidez leve								Turbidez leve						
	Turbidez alta								Turbidez alta						
Color del agua:	Incolora							Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor							Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía									
															

ANEXO B.5 Fichas de recolección de muestras de aguas superficiales (continuación)

ANEXO B.5.21



ANEXO B.5.22

Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua superficial: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 10		Fecha:		08	10	2019	Correlativo: 11		Fecha:		09	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	MNT01	Hora de muestreo:	04:09 pm			Código de muestra:	MNT02	Hora de muestreo:	12:25 pm				
Fuente superficial:	Manantial El Jute					Fuente superficial:	Manantial						
Ubicación:	Caserío Cutumay Camones					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14°3'16.54" N		89°30'5.23" O			Coordenadas:	14° 3'58.44" N		89°30'58.23" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve												
	Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas

ANEXO B.6.1



ANEXO B.6.2

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019				
Correlativo: 1	Fecha:	01	10	2019	Correlativo: 2	Fecha:	01	10	2019
Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA		Día	Mes	Año	Muestreador: Personal del relleno sanitario ASEMUSA		Día	Mes	Año
Código de muestra:	PZP01	Hora de muestreo:	10:16 am		Código de muestra:	PZP02	Hora de muestreo:	11:25 am	
Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14° 3'56.95" N		89°30'8.44" O		Coordenadas:	14° 3'33.67" N		89°30'22.34" O	
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL		Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL	
Características del Agua			Observaciones		Características del agua			Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente		—		Transparencia del agua:	Transparente		—	
	Turbidez leve					Turbidez leve			
	Turbidez alta					Turbidez alta			
Color del agua:	Incolora		Color del agua:	Incolora					
Olor del agua:	Sin olor		Olor del agua:	Sin olor					
Fotografía					Fotografía				
									

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.3




ANEXO B.6.4

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019				
Correlativo: 3		Fecha:			Correlativo: 4		Fecha:		
Muestreador: Marta Carrillo		01	10	2019	Muestreador: Marta Carrillo		01	10	2019
		Día	Mes	Año			Día	Mes	Año
Código de muestra:	IPZ04	Hora de muestreo:			Código de muestra:	IPZ08	Hora de muestreo:		
		1:40 pm					02:04 pm		
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14°3'51.31" N		89°29'30.76" O		Coordenadas:	14°3'56.16" N		89°29'45.84" O	
	Latitud		Longitud			Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL	Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL
Características del Agua					Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente				Pozo con sistema de bombeo	Transparencia del agua:	Transparente		
	Turbidez leve						Turbidez leve		
	Turbidez alta						Turbidez alta		
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora		
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor		
Fotografía					Fotografía				
									

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.5





ANEXO B.6.6

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019									
Correlativo: 5		Fecha:		01	10	2019	Correlativo: 6		Fecha:		01	10	2019	
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	
Código de muestra:	IPZ10	Hora de muestreo:	2:40 pm			Código de muestra:	IPZ13	Hora de muestreo:	03:01 pm					
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San Jacinto							
Coordenadas:	14°4'4.08" N		89°30'5.72" O			Coordenadas:	14°3'55" N		89°29'08.3" O					
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud					
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL					
Características del Agua					Observaciones									
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—					
	Turbidez leve						Turbidez leve							
	Turbidez alta						Turbidez alta							
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora							
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor							
Fotografía					Fotografía									
														

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.7



ANEXO B.6.8

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019														
Correlativo: 7		Fecha:		04	10	2019	Correlativo: 8		Fecha:		04	10	2019						
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año						
Código de muestra:	IIPZ01	Hora de muestreo:	01:59 pm			Código de muestra:	IIPZ04	Hora de muestreo:	02:29 pm										
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto												
Coordenadas:	14°4'20.40" N		89°31'24.20" O			Coordenadas:	14°3'51.31" N		89°29'30.76" O										
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud										
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL										
Características del Agua					Observaciones														
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—										
	Turbidez leve						Turbidez leve												
	Turbidez alta						Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora												
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor												
Fotografía					Fotografía														
																			

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.9


ANEXO B.6.10

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019								
Correlativo: 9		Fecha:		04	10	2019	Correlativo: 10		Fecha:		04	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	IIPZ07	Hora de muestreo:	02:54 pm			Código de muestra:	IIPZ09	Hora de muestreo:	03:21 pm				
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14°3'58.90" N		89°30'56.64" O			Coordenadas:	14°3'55.84" N		89°30'48.33" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		Pozo con sistema de bombeo			Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve						Turbidez leve						
	Turbidez alta						Turbidez alta						
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.11



ANEXO B.6.12

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019										
Correlativo: 11		Fecha:			04	10	2019	Correlativo: 12		Fecha:			04	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo					Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo					Día	Mes	Año
Código de muestra:	IIPZ10	Hora de muestreo:		03:57 pm			Código de muestra:	IIPZ12	Hora de muestreo:		04:05 pm				
Ubicación:		Caserío San Jacinto					Ubicación:		Caserío San Jacinto						
Coordenadas:		14°3'55.90" N		89°30'46.23" O			Coordenadas:		14°3'52.87" N		89°30'40.68" O				
		Latitud		Longitud					Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL				
Características del Agua				Observaciones					Características del agua				Observaciones		
Transparencia del agua:	Transparente		—					Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve								Turbidez leve						
	Turbidez alta								Turbidez alta						
Color del agua:		Incolora						Color del agua:		Incolora					
Olor del agua:		Sin olor						Olor del agua:		Sin olor					
Fotografía							Fotografía								
															

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.13




ANEXO B.6.14

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 1 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					
Correlativo: 11		Fecha:			Correlativo: 1		Fecha:			
Muestreador: Marta Carrillo		04	10	2019	Muestreador: Personal del Relleno Sanitario ASEMUSA		08	10	2019	
		Día	Mes	Año			Día	Mes	Año	
Código de muestra:	IIPZ15	Hora de muestreo:			Código de muestra:	PZP01	Hora de muestreo:			
Ubicación:	Caserío San Jacinto				Ubicación	Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo				
Coordenadas:	14°3'54.82" N		89°30'38.11" O			Coordenadas:	14° 3'56.95" N		89°30'8.44" O	
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL	Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL	
Características del Agua					Observaciones					
Transparencia del agua:	Transparente				—	Transparencia del agua:	Transparente			
	Turbidez leve						Turbidez leve			
	Turbidez alta						Turbidez alta			
Color del agua:	Incolora				Color del agua:	Incolora				
Olor del agua:	Sin olor				Olor del agua:	Sin olor				
Fotografía					Fotografía					
										

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.15



ANEXO B.6.16

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 2		Fecha:			08	10	2019	Correlativo: 3		Fecha:			
Muestreador: Personal del Relleno Sanitario ASEMUSA					Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo					
Código de muestra:		PZP02	Hora de muestreo:		10:30 am			Código de muestra:		IPZ04	Hora de muestreo:		
Ubicación:		Relleno Sanitario ASEMUSA, Caserío San José El Zompopo					Ubicación		Caserío San José El Zompopo				
Coordenadas:		14° 3'33.67" N		89°30'22.34" O			Coordenadas:		14°3'51.31"N		89°29'30.76"O		
		Latitud		Longitud					Latitud		Longitud		
Volumen recogido:		1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL			Volumen recogido:		1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		
Características del Agua				Observaciones				Características del agua				Observaciones	
Transparencia del agua:		Transparente		—				Transparencia del agua:		Transparente		Pozo con sistema de bombeo	
		Turbidez leve								Turbidez leve			
		Turbidez alta								Turbidez alta			
Color del agua:		Incolora		Color del agua:		Incolora		Color del agua:		Incolora			
Olor del agua:		Sin olor		Olor del agua:		Sin olor		Olor del agua:		Sin olor			
Fotografía						Fotografía							
						 							

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.17



ANEXO B.6.18

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 4		Fecha:		09	10	2019	Correlativo: 5		Fecha:		09	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	IPZ08	Hora de muestreo:	10:00 am			Código de muestra:	IPZ10	Hora de muestreo:	10:18 am				
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San José El Zompopo						
Coordenadas:	14°3'56.16" N		89°29'45.84" O			Coordenadas:	14°4'4.08" N		89°30'5.72" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve												
	Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.19



ANEXO B.6.20

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 6		Fecha:		09	10	2019	Correlativo: 7		Fecha:		09	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	IPZ13	Hora de muestreo:	10:43 am			Código de muestra:	IIPZ01	Hora de muestreo:	11:19 am				
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14°3'55" N		89°29'08.3" O			Coordenadas:	14°4'20.40" N		89°31'24.20" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve												
	Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.21



ANEXO B.6.22

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 8		Fecha:		09	10	2019	Correlativo: 9		Fecha:		09	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	IIPZ04	Hora de muestreo:	11:45 am			Código de muestra:	IIPZ07	Hora de muestreo:	12:17 pm				
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14°3'51.31" N		89°29'30.76" O			Coordenadas:	14°3'58.90" N		89°30'56.64" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		Pozo con sistema de bombeo				
	Turbidez leve												
	Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora		Color del agua:	Incolora									
Olor del agua:	Sin olor		Olor del agua:	Sin olor									
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.23


ANEXO B.6.24

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 10		Fecha:			09	10	2019	Correlativo: 11		Fecha:			
Muestreador: Marta Carrillo					Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo					
Código de muestra:		IIPZ09	Hora de muestreo:		01:29 pm			Código de muestra:		IIPZ10	Hora de muestreo:		
Ubicación:		Caserío San Jacinto					Ubicación:		Caserío San Jacinto				
Coordenadas:		14°3'55.84" N		89°30'48.33" O			Coordenadas:		14°3'55.90" N		89°30'46.23" O		
		Latitud		Longitud					Latitud		Longitud		
Volumen recogido:		1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		2 mL			Volumen recogido:		1 L	Volumen de HNO₃ agregado:		
Características del Agua					Observaciones								
Transparencia del agua:		Transparente			—			Transparencia del agua:		Transparente			
		Turbidez leve						Transparencia del agua:		Turbidez leve			
		Turbidez alta						Transparencia del agua:		Turbidez alta			
Color del agua:		Incolora			Color del agua:		Incolora						
Olor del agua:		Sin olor			Olor del agua:		Sin olor						
Fotografía					Fotografía								
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)


ANEXO B.6.25

ANEXO B.6.26



Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019					Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019								
Correlativo: 12		Fecha:		09	10	2019	Correlativo: 13		Fecha:		09	10	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año
Código de muestra:	IIPZ12	Hora de muestreo:	01:55 pm			Código de muestra:	IIPZ15	Hora de muestreo:	02:12 pm				
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14°3'52.87"N		89°30'40.68"O			Coordenadas:	14°3'54.82" N		89°30'38.11" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL			Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL				
Características del Agua			Observaciones			Características del agua			Observaciones				
Transparencia del agua:	Transparente		—			Transparencia del agua:	Transparente		—				
	Turbidez leve												
	Turbidez alta												
Color del agua:	Incolora					Color del agua:	Incolora						
Olor del agua:	Sin olor					Olor del agua:	Sin olor						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.6 Fichas de recolección de muestras de aguas subterráneas (continuación)

ANEXO B.6.27

Toma de muestra de agua subterránea: JORNADA 2 — Octubre, 2019				
Correlativo: 14		Fecha:		09
Muestreador: Marta Carrillo				10
				2019
		Día		Mes
		Año		
Código de muestra:	IIPZ17	Hora de muestreo:	02:30 pm	
Ubicación:	Caserío San Jacinto			
Coordenadas:	14° 3'56.28" N		89°30'35.05" O	
	Latitud		Longitud	
Volumen recogido:	1 L	Volumen de HNO₃ agregado:	2 mL	
Características del Agua			Observaciones	
Transparencia del agua:	Transparente		Pozo con sistema de bombeo	
	Turbidez leve			
	Turbidez alta			
Color del agua:	Incolora			
Olor del agua:	Sin olor			
Fotografía				
				



ANEXO B.7 Fichas de muestreo de suelos

ANEXO B.7.1					ANEXO B.7.2							
Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019					Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019							
Correlativo: 1		Fecha:			20	09	2019	Correlativo: 2		Fecha:		
Muestreador: Lic. Ramiro Rodríguez Carpio					Día	Mes	Año	Muestreador: Lic. Ramiro Rodríguez Carpio				
Código de muestra:	CEZ-01	Hora de muestreo:	10:51 am			Código de muestra:	CEZ-02	Hora de muestreo:	10:13 am			
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo				Ubicación:	Caserío San José El Zompopo						
Coordenadas:	14° 3'57.98" N		89°29'43.98" O			Coordenadas:	14° 4'2.29" N		89°29'50.91" O			
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud			
Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			
Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			
Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			
Altura (msnm):		Color:	Café oscuro			Altura (msnm):		Color:	Café oscuro			
Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo				Observaciones:	Textura chiclosa y húmeda a momento del muestreo						
Fotografía					Fotografía							
												

ANEXO B.7 Fichas de muestreo de suelos (continuación)

ANEXO B.7.3


ANEXO B.7.4

Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019					Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019								
Correlativo: 3		Fecha:		20	09	2019	Correlativo: 4		Fecha:		20	09	2019
Muestreador: Marta Carrillo				Día	Mes	Año	Muestreador: Lic. Ramiro Rodríguez Carpio				Día	Mes	Año
Código de muestra:	CEZ-03	Hora de muestreo:	11:47 am			Código de muestra:	CSJ-18	Hora de muestreo:	01:13 pm				
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San Jacinto						
Coordenadas:	14° 4'11.53" N		89°29'58.10" O			Coordenadas:	14° 4'1.05" N		89°30'41.11" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg				
Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—				
Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—				
Altura (msnm):		Color:	Café oscuro			Altura (msnm):		Color:	Café oscuro				
Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo					Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo						
Fotografía						Fotografía							
													

ANEXO B.7 Fichas de muestreo de suelos (continuación)

ANEXO B.7.5



ANEXO B.7.6

Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019					Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019										
Correlativo: 5		Fecha:			20	09	2019	Correlativo: 6		Fecha:			20	09	2019
Muestreador: Marta Carrillo					Día	Mes	Año	Muestreador: Marta Carrillo					Día	Mes	Año
Código de muestra:	C3-27	Hora de muestreo:	02:14 pm			Código de muestra:	CSJ-EXB	Hora de muestreo:	03:07 pm						
Ubicación:	Caserío San Jacinto					Ubicación:	Caserío San Jacinto								
Coordenadas:	14° 3'59.01" N		89°30'38.04" O			Coordenadas:	14° 3'14.93" N		89°30'58.23" O						
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud						
Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg						
Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—						
Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—			Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—						
Altura (msnm):		Color:	Café oscuro			Altura (msnm):		Color:	Café claro						
Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo					Observaciones:	Textura suelta, seca al momento del muestreo								
Fotografía					Fotografía										
															

ANEXO B.7 Fichas de muestreo de suelos (continuación)

ANEXO B.7.7

ANEXO B.7.8

Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019					Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019								
Correlativo: 7		Fecha:		01	10	2019	Correlativo: 8		Fecha:		01	10	2019
Muestreador: Lic. Ramiro Rodríguez Carpio				Día	Mes	Año	Muestreador: Lic. Ramiro Rodríguez Carpio				Día	Mes	Año
Código de muestra:	PF-01	Hora de muestreo:	10:30 am			Código de muestra:	PF-02	Hora de muestreo:	10:40 am				
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo					Ubicación:	Caserío San José El Zompopo						
Coordenadas:	14° 3'58.50" N		89°30'6.50" O			Coordenadas:	14° 4'0.14" N		89°30'7.51" O				
	Latitud		Longitud				Latitud		Longitud				
Horizonte A:	10 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte A:	10 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg				
Horizonte B:	20 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte B:	20 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg				
Horizonte C:	30 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg			Horizonte C:	30 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg				
Altura (msnm):		Color:	Café oscuro			Altura (msnm):		Color:	Café oscuro				
Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo					Observaciones:	Húmeda al momento del muestreo						
Fotografía						Fotografía							
													

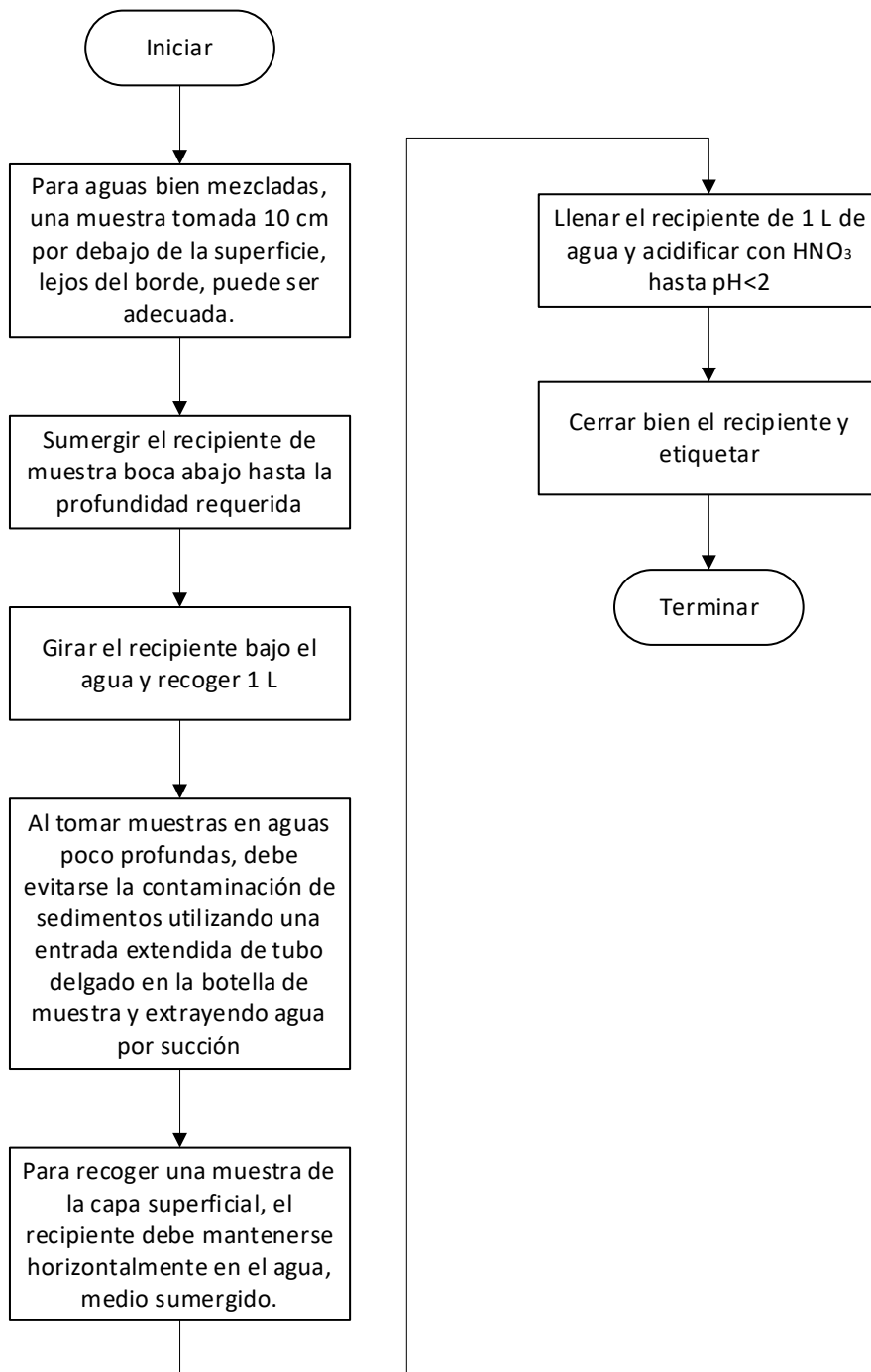
ANEXO B.7 Fichas de muestreo de suelos (continuación)

ANEXO B.7.9

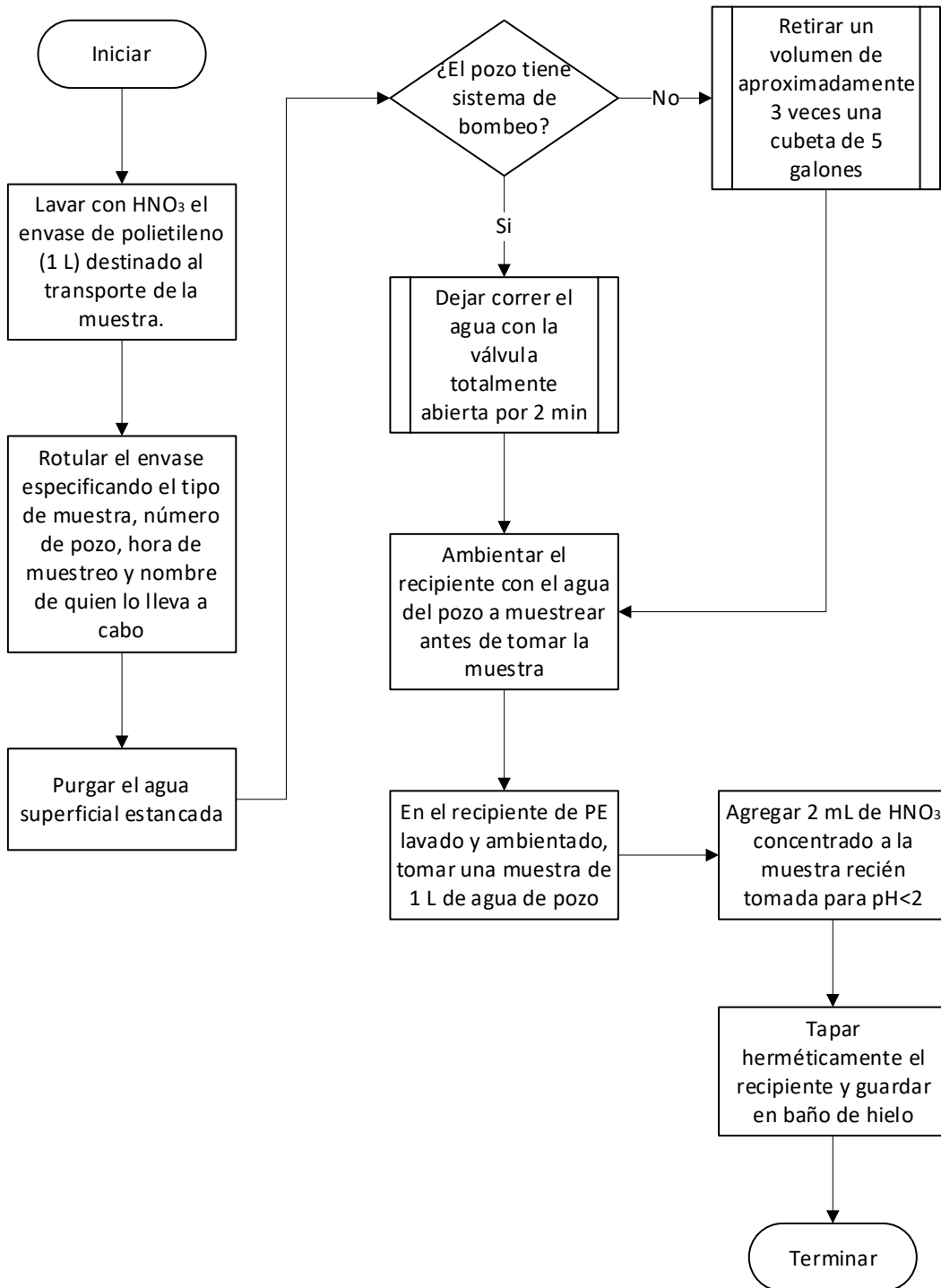
Toma de muestra de suelos: Septiembre — Octubre, 2019				
Correlativo: 9		Fecha:		
Muestreador: Marta Carrillo		01	10	2019
		Día	Mes	Año
Código de muestra:	C0-00	Hora de muestreo:	10:53 am	
Ubicación:	Caserío San José El Zompopo			
Coordenadas:	14° 3'47.41" N		89°30'20.46" O	
	Latitud		Longitud	
Horizonte A:	15 cm	Cantidad recolectada (Kg):	1.0 kg	
Horizonte B:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—	
Horizonte C:	—	Cantidad recolectada (Kg):	—	
Altura (msnm):		Color:	Café claro	
Observaciones:	Textura suelta, semi húmeda al momento de la toma.			
Fotografía				

C. PROCEDIMIENTOS DE TOMA DE MUESTRAS

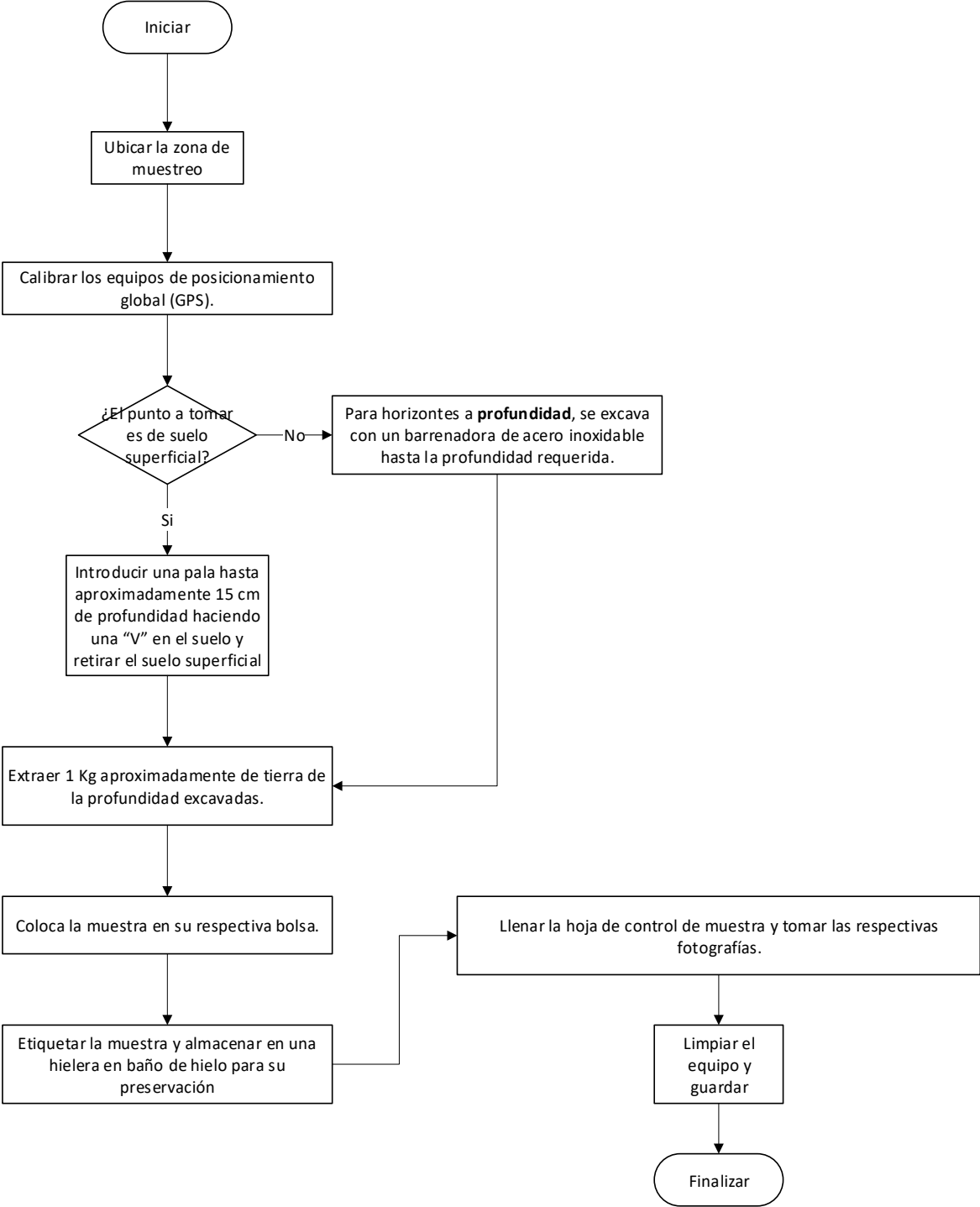
ANEXO C.1 Procedimiento de toma de muestra de agua superficial



ANEXO C.2 Procedimiento de toma de muestras de agua subterránea

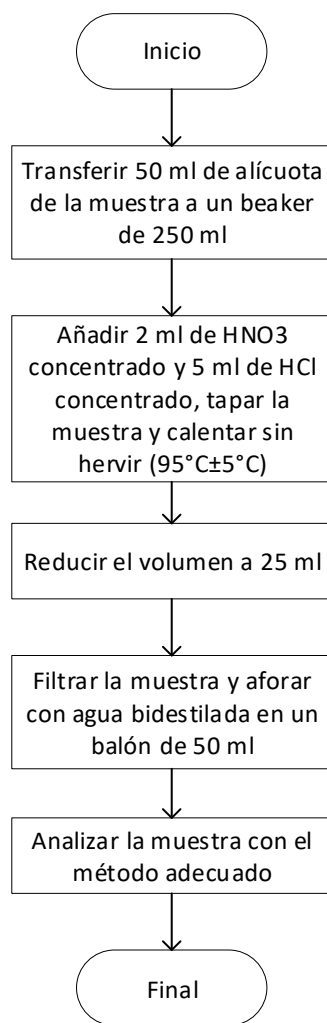


ANEXO C.3 Procedimiento de toma de muestras de suelo



D. METODOLOGÍAS DE DIGESTIÓN DE MUESTRAS

ANEXO D.1 Digestión ácida de muestras de agua (3005A, US EPA)



**ANEXO D.2 Digestión ácida de muestras de suelo vía seca (Procedimiento
propuesto por Pineda & Rivera, 2016)**

