



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Modelado del transporte hídrico y de la dispersión superficial
de Pb, a partir de un sitio de disposición final de residuos
sólidos urbanos en una zona semiárida**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Marcos Benjamín Cruz Jiménez

Asesor:

Dr. Alfredo Ávila Galarza

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2021





Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Modelado del transporte hídrico y de la dispersión superficial
de Pb, a partir de un sitio de disposición final de residuos
sólidos urbanos en una zona semiárida**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Marcos Benjamín Cruz Jiménez

Comité Tutelar:

Director: Dr. Alfredo Ávila Galarza

Asesor: Dr. Antonio Cardona Benavides

Asesor: Dr. Israel Razo Soto

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2021





UASLP

Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

18 de junio de 2020

ING. MARCOS BENJAMÍN CRUZ JIMÉNEZ
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Alfredo Ávila Galarza**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Modelado del transporte hídrico y de la dispersión superficial de Pb, a partir de un sitio de disposición final de residuos urbanos en una zona semiárida"

Introducción.

1. Problemática ambiental de la disposición final de los residuos sólidos urbanos.
 2. Descripción del caso de estudio.
 3. Modelos de transporte hídrico y medición de contaminantes en suelo y agua.
 4. Modelado del transporte hídrico de contaminantes en un arroyo intermitente.
 5. Medición de contaminantes en campo y su análisis.
 6. Análisis de resultados y propuestas para la prevención de la contaminación.
- Conclusiones y recomendaciones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

Copia. Archivo.
*etn.

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería"

PROYECTO REALIZADO EN:

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

CON FINANCIAMIENTO DE:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

AGRADEZCO A CONACYT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA:

Becario No. 758286

LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA RECIBE APOYO A
TRAVÉS DEL PADRÓN NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)

AGRADECIMIENTOS

- Ante todo, agradezco a mi Dios Jehová, por guiarme en cada momento de mi vida, por protegerme y darme la bendición de estar con bien día con día.
- A mis padres, Ricardo y Martha por forjar mi camino y dirigirme por el sendero correcto, ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez. Son quienes han guiado el destino de mi vida junto con el de mis hermanos Abigail, Berenice, Eunice y Ricardo, a ellos también gracias por todo su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.
- A Miriam, por confiar y brindarme todo su apoyo incondicional en esta etapa durante estos años. ¡Muchas gracias!
- Al Doctor Alfredo Ávila por todo su tiempo dedicado y su paciencia con este servidor para lograr sacar este proyecto adelante. ¡Muchísimas gracias Doctor!
- A los Doctores Antonio Cardona e Israel Razo por sus atinadas sugerencias para lograr conducir a buen término esta investigación.
- Al Doctor Isidro Montes Ávila por su invaluable apoyo en la etapa del muestreo en campo. ¡Muchas gracias!
- Al Doctor Roberto Briones Gallardo por su apoyo y asesoría para realizar el análisis con el MEB y el EFRX. ¡Muchas gracias!
- Al Ingeniero Miguel Cortina Rangel por su ayuda en la realización de los análisis con el ICP-MS.
- Al Doctor Clemente Rodríguez Cuevas y al M.C. Luis Fernando Robles por su apoyo en la realización del modelo de flujo hidrodinámico.
- Al Doctor Alfredo Aguillón Robles por facilitar las instalaciones del laboratorio de geoquímica del Instituto de Geología.
- Al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UASLP por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

- Por último...se debe decir que: esta tesis no la escribió su autor, más bien, la escribió ese profesor que la corrigió versión tras versión (y tras horas y horas de revisión). La escribió el amigo que dijo que podías lograrlo. La escribió la madre que te sirvió café en la madrugada cuando se daba cuenta que seguías despierto, la escribió tu padre que escuchó el problema y te ofreció soluciones cuando querías renunciar; la escribió tu pareja que te recordaba lo brillante que eres, (aunque después de un comité no te sientas así). Esta tesis se escribió por el apoyo de muchísimas personas, al fin, ¡gracias a todas!

A Jehová Dios

A mis padres Ricardo Cruz y
Martha Rosa Jiménez Solares

RESUMEN

La disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) ha sido uno de los problemas ambientales más importantes que se presenta tanto en las grandes urbes como en los pequeños centros poblacionales de todo el mundo. De manera general, los RSU se disponen de forma irregular en tiraderos a cielo abierto, generando contaminación paisajística, al suelo, subsuelo y cuerpos de agua superficial y subterráneos (Adriano & Elrashidi, 1994), emisiones de gases y partículas a la atmósfera, malos olores y fauna nociva, entre otros problemas (Sáez & Urdaneta, 2014).

En este documento se presenta un estudio sobre el modelado, muestreo, medición, análisis e interpretación del transporte de contaminantes en un arroyo intermitente, a partir de un relleno sanitario en un municipio del altiplano mexicano. Debido a una mala ubicación, diseño y operación deficiente del sitio de disposición final, se presume la fuga de lixiviados de éste y la consecuente contaminación del suelo y sedimentos aguas abajo del arroyo.

A través de un modelado de flujo hidrodinámico del arroyo afectado y principios de deposición de sedimentos en cauces meándricos, se pudieron identificar aquellos sitios de muestreo con mayor probabilidad de depósito de contaminantes. En la campaña de recolección de muestras realizada, se encontró la presencia de Pb metálico en concentraciones que van de 30,450.1 a 51,551.6 ppm en la fuente de contaminación y de 724.8 a 10,540.2 ppm en sedimentos aguas abajo. Los análisis se realizaron con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (EFRX), un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) y un microscopio electrónico de barrido (MEB).

El desarrollo de esta investigación permite una mejor comprensión del transporte y comportamiento de los contaminantes generados en un relleno sanitario, sus afectaciones al medio ambiente y las posibles formas de prevención de contaminación por metales pesados.

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos, Transporte, Contaminantes, Metales Pesados, Pb.

ÍNDICE DE LA TESIS

INTRODUCCIÓN.	1
1. PROBLEMATICA AMBIENTAL DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	4
1.1 GENERALIDADES DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).	4
1.1.1 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	4
1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.	5
1.1.3 ALMACENAMIENTO TEMPORAL.	6
1.1.4 RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE.	7
1.1.5 TRANSFERENCIA.	8
1.1.6 TRATAMIENTO DE RESIDUOS.	8
1.1.7 VALORACIÓN DE RESIDUOS Y DISPOSICIÓN FINAL.	8
1.1.7.1 Compostaje.	9
1.1.7.2 Reutilización y Reciclaje.	9
1.1.7.3 Incineración.	10
1.1.7.4 Disposición final.	11
1.2 GENERALIDADES DE LOS RELLENOS SANITARIOS.	11
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS.	11
1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO.	12
1.2.3 ASPECTOS OPERATIVOS DE UN RELLENO SANITARIO.	13
1.3 CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.	14
1.3.1 BIOGÁS.	14
1.3.2 LIXIVIADOS.	15
1.3.2.1 Generación de los lixiviados.	16
1.3.2.2 Clasificación de lixiviados.	18
1.3.2.3 Composición estándar de un lixiviado.	18

1.3.3	PARTÍCULAS.	19
1.3.4	CONTAMINACIÓN VISUAL.	20
1.4	CONTAMINACIÓN POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.	20
1.4.1	EN LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.	20
1.4.2	EN LOS SUELOS.	21
1.4.3	EN EL AIRE.	21
1.5	MARCO LEGAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	22
1.5.1	NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.	22
1.5.1.1	Normatividad en la Unión Europea.	22
1.5.1.1.1	<i>Directiva 1999/31/CE.</i>	22
1.5.1.2	Normatividad en Canadá.	23
1.5.1.3	Normatividad en Estados Unidos de América (E.U.A.).	24
1.5.1.4	Normatividad en América Latina y El Caribe.	24
1.5.2	NORMATIVIDAD EN LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.	25
1.5.2.1	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	25
1.5.2.2	Reglamento de la LGPGIR	26
1.5.2.3	Leyes Ambientales Estatales.	26
1.5.2.4	Reglamentos de Ecología Municipales.	27
1.5.2.5	Normas Oficiales Mexicanas aplicables a los RSU y RME	27
1.5.2.5.1	<i>NOM-161-SEMARNAT-2011</i>	27
1.5.2.5.2	<i>NOM-098-SEMARNAT-2002.</i>	28
1.5.2.5.3	<i>NOM-083-SEMARNAT-2003.</i>	28
1.5.2.6	Normas Mexicanas (NMX) aplicables.	29
1.6	RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU EN MÉXICO.	29
2.	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.	31
2.1	UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.	32
2.2	EL RELLENO SANITARIO ESTUDIADO Y SU CONDICIÓN ACTUAL.	32
2.2.1	MEDIDAS CORRECTIVAS DURANTE LA CLAUSURA DEL SITIO.	36

2.2.2	COLOCACIÓN DE POZOS DE VENTEO DE BIOGÁS.	37
2.2.3	CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.	37
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS BIÓTICOS.	39
2.3.1	FLORA.	39
2.3.2	FAUNA.	40
2.3.2.1	Fauna local.	40
2.3.2.2	Fauna nociva.	40
2.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS.	41
2.4.1	GEOLOGÍA DEL ÁREA.	42
2.4.2	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DEL ÁREA.	44
2.4.2.1	Propiedades físicas de la cuenca hidrológica.	45
2.4.2.2	Cuerpos de agua superficiales cercanos.	46
2.4.3	HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA.	47
2.4.4	GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA.	48
2.4.5	EDAFOLOGÍA.	49
2.4.6	CLIMA.	50
2.4.6.1	Climograma local.	50
2.4.6.2	Índice de Martonne.	51
2.4.6.3	Índice de Dantín-Revenga.	52
2.5	CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS LEGALES LOCALES APLICABLES.	53
2.5.1	LEY AMBIENTAL DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.	53
2.5.2	REGLAMENTO PARA LA PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGÍA MUNICIPAL.	54
2.5.3	BANDO DE POLICÍA Y BUEN GOBIERNO.	55

3.	MODELOS DE TRANSPORTE HÍDRICO Y MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELO Y AGUA.	56
----	---	----

3.1	MODELADO HIDRODINÁMICO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.	56
3.1.1	ANTECEDENTES.	56
3.1.2	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS.	57
3.1.3	FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS.	60
3.1.3.1	Sistemas fluviales.	60
3.1.3.1.1	<i>Cauces meándricos y depósito de sedimentos y contaminantes.</i>	61
3.2	CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS HIDRODINÁMICOS.	62
3.2.1	TIPOS DE MODELOS HIDRODINÁMICOS.	62
3.2.2	SOFTWARES PARA EL MODELADO HIDRODINÁMICO.	63
3.2.3	CALIBRACIÓN DE UN MODELO.	64
3.3	NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL AGUA.	65
3.3.1	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA DE DESCARGA.	65
3.4	EL SUELO Y SU COMPOSICIÓN.	66
3.5	NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL SUELO.	68
3.5.1	CONTAMINANTES EN SUELO.	69
3.5.1.1	Efectos de los metales pesados en la salud humana.	70

4.	MODELADO DEL TRANSPORTE HÍDRICO DE CONTAMINANTES EN UN ARROYO INTERMITENTE.	71
4.1	SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA MODELADO DE FLUJO HIDRODINÁMICO.	71
4.1.1	FUNCIONAMIENTO DE EFDC EXPLORER.	72
4.1.1.1	Ecuaciones utilizadas por el modelo hidrodinámico.	72
4.2	DATOS REQUERIDOS POR EL SOFTWARE PARA REALIZAR EL MODELADO.	74
4.2.1	DATOS PARA EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.	75
4.3	INGRESO DE LOS DATOS EN EL MODELO EFDC EXPLORER.	77
4.4	MODELADO HIDRODINÁMICO DEL ARROYO ESTUDIADO.	79

5.	<i>MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN CAMPO Y SU ANÁLISIS.</i>	80
5.1	MUESTREO DE SEDIMENTOS Y SUELO EN EL SITIO DE ESTUDIO.	80
5.1.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE MUESTREO DE SUELO Y SEDIMENTOS.	81
5.1.2	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO Y OBJETIVO DE ÉSTE.	82
5.1.3	METODOLOGÍA DE MUESTREO SEGÚN LA NMX-AA-132-SCFI2006.	84
5.1.4	METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES.	84
5.1.5	METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DEL SUBSUELO.	85
5.1.6	MUESTREO DE SEDIMENTOS DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.	86
5.1.7	MUESTREO DE LIXIVIADOS.	87
5.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE SEDIMENTOS, SUELO Y LIXIVIADOS.	87
5.2.1	ANÁLISIS EN CAMPO DE SEDIMENTOS Y SUELO CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX).	88
5.2.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE LIXIVIADOS CON Sonda MULTIPARÁMETRO.	88
5.3	ANÁLISIS EN LABORATORIO DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y SEDIMENTO.	89
5.3.1	ANÁLISIS CON ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).	89
5.3.2	ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB).	92
5.3.2.1	Formación de las imágenes en el MEB.	92
5.3.2.2	Preparación de las muestras antes de ingresarlas al MEB.	93
6	<i>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTAS PARA LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.</i>	95

6.1	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO.	95
6.1.1	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE LIXIVIADOS.	95
6.1.2	ANÁLISIS EN CAMPO DE SUELO Y SEDIMENTOS CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.	96
6.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO.	98
6.2.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).	99
6.2.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).	101
6.2.2.1	Análisis de la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01.	102
6.2.2.2	Análisis de la muestra de suelo subsuperficial.	107
6.3	INTERPRETACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS,	108
6.3.1	ANÁLISIS EN CAMPO CON EL EFRX.	109
6.3.2	ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL ICP-MS.	109
6.3.3	ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL MEB.	111
6.4	RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS COMO PROPUESTA PARA SU TRATAMIENTO.	113
6.5	RECOMENDACIONES PARA EL SELLADO DE LA CELDA Y EVACUACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.	114
6.5.1	CONDICIÓN ACTUAL DE LA CELDA DE CONTENCIÓN DE RSU.	115
6.5.2	SELLADO Y MANTENIMIENTO DE LA CELDA.	116
6.5.3	REINSERCIÓN AL PAISAJE LOCAL.	118
6.6	MONITOREO DEL RELLENO SANITARIO MUNICIPAL.	120

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
---------------------------------------	------------

REFERENCIAS	124
--------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diseño general de un relleno sanitario con sus elementos tales como; pozos de venteo de biogás, celda de contención de residuos, cubierta de sellado y la fosa de captación de lixiviados	13
Figura 1.2 Balance de aguas en un relleno sanitario.	17
Figura 2.1 Ubicación del sitio de estudio de disposición final de RSU.	33
Figura 2.2 Acceso y vías de comunicación al sitio de estudio de disposición final de RSU.	34
Figura 2.3 Delimitación de las celdas de contención de residuos sólidos urbanos en el sitio de estudio.	35
Figura 2.4 Residuos sólidos urbanos arrastrados por la corriente del arroyo intermitente que atraviesa al sitio de disposición final de RSU.	35
Figura 2.5 Corte longitudinal de la celda de contención de RSU en el sitio de estudio.	36
Figura 2.6 Canal de encausamiento para desviar la corriente intermitente que pasa por las celdas	36
Figura 2.7 a) Esquema de la construcción de un pozo de venteo de biogás. b) Condición actual de los pozos de venteo de biogás en el sitio de estudio.	37
Figura 2.8 Características de diseño de la fosa de lixiviados y su estado actual.	38
Figura 2.9 Geología local del sitio de estudio.	42
Figura 2.10 Sección geológica de B-B´.	43
Figura 2.11 Columna estratigráfica del sitio de estudio.	44
Figura 2.12 Cuenca del área de estudio en donde se encuentra el relleno sanitario.	46
Figura 2.13 Cuerpos de agua superficiales.	47
Figura 2.14 Hidrología subterránea del sitio de estudio. Pozos cercanos, elevación del nivel estático y dirección de flujo del acuífero.	48
Figura 2.15 Topografía del área de estudio.	49
Figura 2.16 Plano edafológico del sitio de estudio.	50
Figura 2.17 Climograma local del sitio de estudio, municipio de Cerritos, S.L.P.	51
Figura 3.1 Esquema de un meandro.	61
Figura 4.1 Caminamientos de transectos con GPS en el sitio de estudio.	76
Figura 4.2 Ajuste de los datos obtenidos con el GPS (marca Garmin) y comparación con puntos de la Red Geodésica Nacional Pasiva del INEGI	77
Figura 4.3 Modelo Digital de Elevación del sitio de estudio complementado por trabajo de campo y datos vectoriales del INEGI.	77
Figura 4.4 Interface gráfica del modelo EFDC Explorer (Villota -López, 2018).	78
Figura 4.5 Modelo de Flujo hidrodinámico generado con EFDC Explorer.	79

Figura 5.1 Principios de depósito de sedimentos en medios fluviales en los que se basó la selección de los puntos de muestreo.	82
Figura 5.2 Selección de puntos de muestreo de suelo y sedimentos en el sitio de estudio, a partir del modelado hidrodinámico.	83
Figura 5.3 Muestreo superficial de sedimentos en el cauce del arroyo.	85
Figura 5.4 Muestreo de suelo con barrenador a 1.5 m de profundidad.	86
Figura 5.5 Muestreo de sedimentos de la fosa de lixiviados	86
Figura 5.6 Muestreo de lixiviados en campo.	87
Figura 5.7 Análisis en campo de las muestras en campo en las muestras de sedimentos y suelo con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil.	88
Figura 5.8 Análisis en campo de lixiviados con sonda multiparámetro	89
Figura 5.9 Preparación de muestras antes de ingresar al ICP-MS	90
Figura 5.10 a) Bitácora con el registro del peso de muestra e identificación de viales. b). Montana I Soil utilizado como material de referencia.	90
Figura 5.11 Tratamiento químico de las muestras.	91
Figura 5.12 Microscopio electrónico de barrido.	93
Figura 5.13 Proceso de preparación de la muestra FLX-01 para ingresarla al MEB. a) tamizado de la muestra, b) transferencia de la muestra al mortero, c) molienda de la muestra en el mortero	94
Figura 6.1 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a una escala de 20 μm . b) firma espectral en la banda 1, para la zona brillante marcada en rojo.	102
Figura 6.2 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 2 μm . b) Firma espectral en la banda 1 (marcada en rojo), para la zona brillante con acercamiento.	103
Figura 6.3 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 20 μm . b) firma espectral en la banda 2, para la zona no brillante marcada en rojo.	104
Figura 6.4 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 10 μm en una partícula distinta. b) Firma espectral en la banda 1, para la zona brillante marcada en rojo.	105
Figura 6.5 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 2 μm en una partícula distinta. b) Firma espectral en la banda 1 para la zona brillante marcada en rojo.	106
Figura 6.6 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra A-10 a 10 μm . b) Firma espectral en la banda 1 para la zona brillante marcada en rojo.	107
Figura 6.7 Modelado de flujo hidrodinámico y sitios de muestreo con mayor concentración de Pb.	110

Figura 6.8 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01. Se observa la partícula de Pb en las zonas brillantes con materia orgánica adherida a ésta. b) Firma espectral en la banda 1 (Acoplamiento EDS) en la que sobresale el pico de Pb acompañado de Sn.	112
Figura 6.9 Condiciones actuales de la celda de contención de residuos en el sitio de estudio.	115
Figura 6.10 Grietas ocasionadas por la acción de agentes hídricos en la celda de contención de residuos	116
Figura 6.11 Propuesta de sellado de la celda en el sitio de estudio	118
Figura 6.12 Vista en corte de una celda de contención de residuos que altera el paisaje y una celda de contención de residuos que armoniza con el paisaje.	119
Figura 6.13 Especies propuestas para la rehabilitación paisajística del relleno sanitario.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de los RSU de acuerdo con su origen.	5
Tabla 1.2 Categorías de los sitios de disposición final.	11
Tabla 1.3 Requerimientos de compactación de los residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario.	13
Tabla 1.4 Componentes principales del biogás.	15
Tabla 1.5 Clasificación de lixiviados.	18
Tabla 1.6 Rangos de referencia en la composición de un lixiviado.	19
Tabla 1.7 Normas Mexicanas (NMX) aplicables a los RSU.	29
Tabla 2.1 Propiedades físicas principales de la cuenca hidrológica en donde se sitúa el relleno sanitario estudiado.	45
Tabla 2.2 Rangos de clasificación del Índice de Martonne.	52
Tabla 2.3 Rangos de clasificación para el índice de Dantin-Revenga.	53
Tabla 3.1 Normatividad aplicable a la calidad del agua.	65
Tabla 3.2 Tipos de silicatos, su fórmula general y mineral formador.	67
Tabla 3.3 Composición de la fase gaseosa del suelo.	68
Tabla 3.4 Normatividad aplicable a la calidad del suelo.	68
Tabla 5.1 Ubicación de puntos de muestreo de suelo y sedimentos en el sitio de estudio.	83
Tabla 6.1 Resultados del análisis en campo de los lixiviados con la sonda multiparámetro.	95
Tabla 6.2 Resultados de los análisis en campo de los sedimentos de los sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado (muestras FLX-01 a A-10), con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X (EFRX).	97
Tabla 6.3 Comparación de los resultados de los análisis obtenidos por EFRX en la muestra de suelo A-10 con los límites máximos permisibles para concentraciones de As, Ba, Ni y Pb en suelos, establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1- 2004.	98
Tabla 6.4 Resultados del análisis en el laboratorio de las muestras de sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado (muestras FLX-01 a A-10), con el ICP-MS.	100
Tabla 6.5. Límites máximos permisibles para concentración de As, Ba, Ni y Pb en suelos, establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1- 2004 y su comparación con los resultados obtenidos por ICP-MS en la muestra de suelo A-10. (a 1.2 m de profundidad).	101

Tabla 6.6 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 20 μm en la banda de espectro 1 (%Wt = Porcentaje en peso y %At= Porcentaje de la masa atómica).	102
Tabla 6.7 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01, a 2 μm en la banda de espectro 1	103
Tabla 6.8 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 20 μm la banda de espectro 2 para la zona no brillante.	104
Tabla 6.9. Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 10 μm en la banda de espectro 1 para la zona no brillante.	105
Tabla 6.10 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 2 μm , en la banda de espectro 1 para la zona brillante.	106
Tabla 6.11 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra A-10 a 10 μm la banda de espectro 1 para la zona no brillante	108
Tabla 6.12 Comparación de las concentraciones de Pb obtenidas en los análisis en campo y en el laboratorio con EXRF e ICP-MS, respectivamente.	111

INTRODUCCIÓN.

Los problemas ambientales asociados a la mala disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) son una constante en las ciudades de muchas partes del mundo. Los RSU son aquéllos producidos en las casas habitación, que resultan de las actividades de consumo de la población (LGPGIR, 2007).

Estudios varios se han hecho sobre la contaminación producida por los tiraderos a cielo abierto y tiraderos controlados que, entre otros, afecta a las aguas superficiales, aguas subterráneas y suelos. Niño-Carvajal y Colaboradores (2016) identificaron la influencia de los lixiviados del relleno sanitario de Bucaramanga (Colombia) en las aguas del acuífero local, al medir concentraciones considerables de As. Por otra parte, en el relleno sanitario de Río Azul (Costa Rica), Chinchilla y Amador (2003) señalaron cómo la ausencia de selección de los desechos sólidos que ingresaron al sitio, propiciaron la presencia de metales pesados (Ag, Zn, Cu, Cd, Hg y Pb) en cuerpos de agua superficial y en sedimentos, por adsorción o precipitación.

En México, León-Gómez y Colaboradores (2015) encontraron concentraciones altas de Pb, Mn y Fe, en suelo y aguas superficiales y subterráneas, derivadas de los escurrimientos de lixiviados del relleno sanitario municipal, de la ciudad de Linares.

De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), para el año 2014, de los 2,407 municipios existentes en el país, el 94% (2,266) contaban con servicios de recolección, transporte y disposición final de residuos. Sin embargo, de estos municipios, el 87% (1643) disponía de sus residuos en un tiradero a cielo abierto, y sólo el 13% (238) lo hacía en un relleno sanitario. De acuerdo con estas cifras se puede inferir que los impactos ambientales negativos, asociados a la disposición final de residuos son un problema general en todo el país.

En el caso del estado de San Luis Potosí, de los 58 municipios que lo conforman, sólo la capital del estado dispone sus residuos en un relleno sanitario. En diferentes municipios potosinos, se han hecho estudios y proyectos para la construcción de rellenos sanitarios; sin embargo, luego de un buen inicio, los gobiernos locales descuidan la operación y el mantenimiento de estos sitios, por lo que terminan convirtiéndose en tiraderos a cielo abierto, con las consecuencias ambientales negativas que esto implica.

Es pues necesario conocer el impacto ambiental que generan los sitios de disposición final de residuos, y proponer las medidas correctivas y de remediación pertinentes. Más aún, se requiere mejorar la gestión y el manejo de los residuos sólidos urbanos y que, en el caso de la disposición final, las autoridades municipales construyan y operen verdaderos rellenos sanitarios.

El estudio que se presenta en esta tesis tiene como caso el sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos del municipio de Cerritos, San Luis Potosí, a 9.5 km al noreste de la ciudad. Desde hace 20 años, la Dirección de Ecología atiende a la población urbana que actualmente es de 22,075 personas (INEGI, 2020), con una descarga diaria de 13 toneladas de residuos.

Durante sus primeros 6 años, el sitio operó como tiradero a cielo abierto, por lo que no contó sistemas de captación de lixiviados, control de biogás, cubierta de los residuos, canales de desviación de flujo pluvial, cercado del sitio, vigilancia respecto a los residuos que eran depositados en el lugar, etc.

En el año 2006, el sitio se transformó luego en un relleno sanitario, mediante la construcción de dos celdas para la contención de los residuos, con medidas de 120 m de largo por 60 m de ancho. En la parte inferior de éstas se construyó una fosa de lixiviados, cuyo mal diseño y localización provocó el desbordamiento frecuente de lixiviados hacia un arroyo intermitente.

La mala operación y la falta de mantenimiento del sitio, lo regresaron a su estatus inicial de tiradero. La población vecina del lugar presionó a las autoridades municipales para que lo clausurara, dando así, término a contaminación visual, a los malos olores y a la fauna nociva que ahí se producían, así como a la dispersión de materiales arrastrados por el viento y agua, principalmente plásticos.

Descripción del problema.

Las dos celdas de contención y la fosa colectora de lixiviados del sitio de disposición final de RSU fueron construidas sobre un arroyo intermitente que tiene escorrentías abundantes en temporada de lluvia. Desde su clausura, el sitio no ha recibido mantenimiento y en uno de sus flancos, los RSU están expuestos al ambiente.

El arroyo que pasa por el sitio alimenta a dos cuerpos de agua superficiales, de los cuales la población de localidades cercanas abastece a sus hatos, principalmente caprinos. Los dueños de éstos indican que cuando sus animales consumen de esta agua suelen enfermar y morir.

Justificación.

El sitio de disposición final estudiado, requiere de una caracterización de sus elementos físicos y bióticos para determinar el origen de los contaminantes distribuidos (metales pesados) en el arroyo intermitente afectado derivados de un mal manejo de residuos sólidos urbanos y de esta manera, proponer medidas de prevención de la contaminación.

Objetivo general.

Evaluar la contaminación por metales pesados en sedimentos de un arroyo intermitente, a partir de un tiradero controlado de residuos sólidos urbanos.

Objetivos particulares.

- a) Caracterizar los elementos ambientales del sitio de disposición final del municipio de Cerritos, San Luis Potosí.
- b) Identificar la contaminación ambiental por Pb (de suelos y cuerpos de agua), producida por un tiradero controlado, mediante el modelado y el muestreo de suelo, sedimentos y lixiviados.
- c) Proponer acciones para prevenir la contaminación ambiental proveniente del deficiente mantenimiento de las celdas de contención de residuos.

En la presente investigación se realizó la caracterización ambiental del sitio, el plan de muestreo acorde a los resultados del modelado de flujo hidrodinámico del arroyo afectado y el análisis de sedimentos y suelo en la desembocadura del arroyo afectado, para identificar metales pesados, a partir de la fuente de contaminación.

1. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

En la medida en que aumenta el crecimiento poblacional alrededor del mundo, la problemática ambiental asociada a la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) tiende a agravarse. La concentración poblacional no planificada, los cambios en los hábitos de consumo, la industrialización y su consecuente desarrollo económico, son algunos de los factores que impactan directamente en el volumen y la composición de los RSU producidos por la sociedad. Si los RSU se manejan de manera inadecuada, pueden producir efectos negativos en la salud de las personas y en los ecosistemas (García *et al*, 2014).

1.1 GENERALIDADES DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).

El manejo de residuos sólidos urbanos (RSU) es el proceso que involucra a un conjunto de acciones para evitar o prevenir la generación de residuos; almacenarlos in situ de manera segregada y segura; recogerlos, transportarlos y entregarlos para su tratamiento, reciclaje o eliminación, limitando o evitando su contaminación ambiental (Tchobanoglous *et al*, 1994).

En los párrafos siguientes se presenta una breve descripción de cada una de estas etapas en un modelo ideal de gestión de RSU, con el fin de comprender el problema ambiental general, en el sitio de estudio.

1.1.1 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Los RSU se generan cuando los materiales utilizados por el hombre cumplen su periodo de vida útil, no se les tribuye valor para conservarlos y dejan de ser necesarios para los fines con los que se adquirieron (Jaramillo, 2002).

La generación de RSU de una población depende de factores múltiples como: la tasa de crecimiento demográfico, el poder adquisitivo y los patrones de consumo de la gente; la

época del año, el clima, la ubicación geográfica de la población y las actividades económicas principales de la zona; así como la aplicación de la normativa ambiental (Sáez y Urdaneta, 2014)¹.

De acuerdo con Hoornweg y Bhada–Tata (2012), la producción mundial de RSU llegó a 1300 millones de toneladas por año en el 2012, y para el año 2025 se prevé una generación de 2200 millones de toneladas por año. Los países con mayor producción de RSU pertenecen a la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, con un 44% de generación de RSU; les siguen los países de Asia Oriental y el Pacífico con el 21%; Latinoamérica y el Caribe con el 12%; los países de Europa y Asia Central con el 7%, y el 16% restante se reparte entre Medio Oriente y África.

En México, de los años 2012 a 2020, la generación diaria promedio de RSU por persona pasó de 0.852 kg a 0.994 kg (INEGI, 2015).

1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.

Tchobanoglous y colaboradores (1994) proporcionan una clasificación de acuerdo con su origen, y especifican que el término residuos sólidos urbanos normalmente incluye los residuos generados por una comunidad, exceptuando los residuos de las industrias y los de las actividades agrícolas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Clasificación de los RSU de acuerdo con su origen (Modif. de Tchobanoglous *et al*, 1994).

	Lugar o actividad generadora	Tipo de residuos
Doméstica	Viviendas aisladas y bloques de baja, mediana y elevada altura, unifamiliares, etc.	Residuos de comida, papel, cartón, plástico, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, latas de hojalata, aluminio, otros metales y cenizas.
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, moteles, imprentas, gasolineras, talleres mecánicos, etc.	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de comida, vidrio, metales, residuos especiales, etc.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales, etc.	(Como en comercial).
Servicios municipales	Limpieza de calles, cuencas, parques, playas y otras zonas de recreo.	Residuos especiales, recortes en gran volumen de árboles y plantas, residuos generales de parques y playas.

¹ En México, como en la mayoría de los países con cierto grado de industrialización, el aumento en la generación de RSU se relaciona de manera directa con el aumento del PIB nacional y el consumo final privado.

I	Lugar o actividad generadora	Tipo de residuos
Construcción y demolición	Lugares nuevos de construcción, lugares de reparación/renovación de carreteras, etc. derribos de edificios, pavimentos rotos.	Madera, acero, hormigón, suciedad,

Echeverri (2004) indica que los RSU pueden clasificarse también de acuerdo con su grado de descomposición en degradables o no degradables. Los primeros pueden ser transformados en micronutrientes por microorganismos descomponedores; en su mayoría estos residuos se forman a partir de elementos orgánicos. En tanto, los residuos no degradables son aquellos que los microorganismos descomponedores no pueden degradar, ya que están formados en su mayoría por materia inorgánica.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2007) clasifica a los residuos en función de su origen, en tres grupos principales:

- a) Residuos sólidos urbanos (RSU): Los generados en las casas habitación, producto de la eliminación de materiales usados en actividades domésticas, o dentro de establecimientos con características domiciliarias.
- b) Residuos de manejo especial (RME): Son aquellos generados en procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o residuos peligrosos; o bien, pueden ser RSU en grandes cantidades.
- c) Residuos peligrosos (RP): Se aquéllos que pueden poner en riesgo la salud de las personas o del medio ambiente. Por lo general son considerados peligrosos cualquier residuo que posea alguna característica CRETIB (corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable, biológico infeccioso).

1.1.3 ALMACENAMIENTO TEMPORAL.

Desde su generación, cualquier residuo comienza a formar parte de una serie de operaciones secuenciales que conforman su sistema de manejo; la primera de ellas es el almacenamiento temporal. Según la SEDESOL (2005), el almacenamiento se define

como: *“La acción de retener temporalmente los residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección o se dispone de ellos.”*

Una vez que se generan, los residuos sólidos urbanos no se pueden eliminar de manera inmediata; se requiere de un periodo de tiempo en el cual son almacenados por el generador, mientras son evacuados por el servicio de recolección autorizado. Esta operación es exclusiva del generador y es su responsabilidad mantenerlos en un lugar apropiado.

La segregación de los residuos generados, de acuerdo con sus características físicas y químicas, es una acción fundamental para favorecer su valorización, a través de la reutilización o el reciclaje. Además, disminuye el volumen final de residuos que se colocará en los sitios de disposición final (Barradas-Rebolledo, 2009).

En contraparte, si los residuos se almacenan de manera inadecuada pueden causar rezagos en las operaciones subsecuentes; por ejemplo: el aumento en el tiempo de recolección eleva el riesgo de trabajo del personal de recolección y afecta a la salud pública, al propiciar condiciones para la reproducción de fauna nociva (SEDESOL, 2005).

1.1.4 RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE.

El servicio de recolección y transporte de RSU se realiza normalmente por medio de camiones que hacen recorridos por las calles de los núcleos urbanos (previamente trazados en rutas). Este servicio debe organizarse, tomando en cuenta estudios previos acerca de la tasa de generación de residuos en las distintas épocas del año, densidad demográfica, usos de suelo, etc.; ya que la cantidad de residuos generados en el verano o en el invierno suele ser distinta. De la misma forma, es importante conocer a detalle el núcleo urbano en el que se hará la recogida, lo que implica saber los puntos de recolección y planos de las rutas a seguir.

Respecto al transporte, es necesario determinar el tipo y el número de vehículos que darán servicio a la población; la capacidad de almacenamiento de éstos, si serán cubiertos o no, si tendrán compactadora, si segregarán los residuos; su costo de compra y de mantenimiento, la disponibilidad de refacciones, etc. (Garrido *et al*, 1980).

1.1.5 TRANSFERENCIA.

En las grandes ciudades, se dispone normalmente de una estación de transferencia; que es un sitio en el que se reciben los residuos sólidos urbanos recolectados por los vehículos que brindan este servicio, para su posterior transporte a un centro de valorización o sitio de disposición final, distante del sitio de recolección. La estación de transferencia generalmente se ubica en las afueras de la población en la que se recolectaron los residuos. Ahí también se realiza la separación de los materiales valorizables, respecto de los que irán a disposición final (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

1.1.6 TRATAMIENTO DE RESIDUOS.

El tratamiento, previo a la disposición final de los RSU, tiene como objetivo reducir el volumen y las características contaminantes de éstos (Martínez *et al.*, 2005). Para ello se emplean procesos distintos con características particulares. Los más empleados son:

- a) **Fisicoquímicos:** Modifican las propiedades físicas o químicas de los RSU. Permiten su valorización, recuperando compuestos para su utilización como materia prima. Modifican ciertas propiedades para que puedan ingresar a un sitio de disposición final (por ejemplo: se reduce su contenido de agua, en el caso de los lodos).
- b) **Biológicos:** Estos tratamientos buscan la descomposición de los contaminantes de los residuos por la acción de microorganismos. En el caso de residuos tóxicos su aplicación suele ser limitada por la sensibilidad de los organismos a este tipo de compuestos. Sin embargo, se pueden seleccionar y desarrollar cepas adecuadas para la degradación de ciertas sustancias consideradas residuos.
- c) **Térmicos:** Pueden ser de dos tipos: el co-procesamiento en hornos cementeros y la incineración. Esta última es la más empleada y consiste en oxidar la materia orgánica con el oxígeno del aire, por medio de altas temperaturas (entre 850° a 1600°C).

1.1.7 VALORACIÓN DE RESIDUOS Y DISPOSICIÓN FINAL.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su Reglamento señalan la necesidad de valorizar los residuos que se producen, antes de

disponerlos en un sitio de disposición final. Es decir, que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular. La reutilización, el reciclaje o el co-procesamiento deben anteceder a la colocación de residuos en rellenos sanitarios.

1.1.7.1 Compostaje.

El compostaje es un proceso biológico aerobio que necesita de condiciones óptimas para que los microorganismos puedan proliferar y degradar la materia orgánica (SEDESOL, 2005). La presencia de oxígeno es indispensable para obtener una composta de calidad. Depende de factores como: la naturaleza química de los residuos orgánicos, la temperatura, el contenido de humedad y el pH (Delgado-Rodríguez, 2012).

El proceso de compostaje pasa por una etapa termófila exotérmica en la que inicia la producción metabólica de fitotoxinas en la materia orgánica fresca, alcanzando temperaturas de hasta 70°C, y decrece gradualmente hasta los 35°C, cuando inicia la etapa de estabilización. Si las temperaturas de este proceso no son controladas adecuadamente, el desarrollo de la composta no será favorable. El producto final debe ser un material orgánico estabilizado con alto valor nutricional para ser utilizado en la agricultura como fertilizante (Delgado-Rodríguez, 2012).

Hasta el año 2012, en México se registraron 98 plantas de composta a partir de RSU. Sin embargo, el poco uso y seguimiento de estas plantas se debe a que, para su operación, se necesita de infraestructura especializada y costosa (biodigestores) que, en la mayoría de los casos, no es posible adquirir con los recursos limitados de las administraciones de los gobiernos municipales o de particulares (INECC-SEMARNAT, 2012).

1.1.7.2 Reutilización y Reciclaje.

La **reutilización** consiste en emplear un material o residuo previamente usado, sin que medie un proceso de transformación. Por su parte, el **reciclado** es la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final (LGPGIR, 2007).

La reutilización y el reciclado contribuyen a la disminución del consumo de materias primas, agua y energía; alargan la vida útil de los sitios de disposición final, lo que representa ahorros significativos en los gastos de operación de un relleno sanitario (INECC-SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con datos del INEGI (2015), solamente el 5% de los residuos sólidos generados en el país son reciclados (aluminio, chatarra, plásticos, papel y cartón, principalmente). Este porcentaje no contempla a los pepenadores que recolectan materiales, en su mayoría plásticos, en las inmediaciones de los sitios de disposición final o en lugares de almacenamiento temporal.

1.1.7.3 Incineración.

El objetivo de la incineración es reducir el volumen y las características contaminantes de los residuos. Las sustancias orgánicas de los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria, entrando en contacto con el oxígeno (Camacho *et al*, 2011).

En el caso de la incineración de los RSU, éstos se someten a un proceso riguroso de selección en el que, la mayor parte de los residuos valorizables se separa, por lo que el volumen resultante a incinerar se reduce (Rosas-Domínguez *et al.*, 2003).

La incineración no controlada de RSU puede generar problemas ambientales muy serios como son las emisiones a la atmósfera de dioxinas y furanos (sustancias potencialmente muy cancerígenas). La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos establece que la incineración sólo se aplicará a los residuos que no puedan ser valorizados mediante otros procesos, y siempre y cuando no liberen contaminantes orgánicos persistentes al ambiente.

En el año 2002 se emitió la Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental, incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

1.1.7.4 Disposición final.

La disposición final de los RSU en rellenos sanitarios tiene como objeto el confinamiento de éstos para evitar que su exposición al ambiente y minimizar sus impactos ambientales. El confinamiento en rellenos sanitarios es una técnica empleada en casi todo el mundo, en especial en aquellos países con extensión territorial suficiente, como para dedicar espacios considerables para este fin (Romero-Paredes, 2013).

1.2 GENERALIDADES DE LOS RELLENOS SANITARIOS.

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, un relleno sanitario se define como: *“Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales”* (SEMARNAT, 2003).

Su funcionamiento adecuado depende: de una buena ubicación, además de un diseño y construcción acordes a las características físicas del sitio seleccionado para su localización; así como de una operación y monitoreo óptimos (Reinhart y Townsend, 1998).

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS.

La NOM-083-SEMARNAT-2003 clasifica a los rellenos sanitarios de acuerdo con la cantidad (en toneladas) de RSU y/o residuos de manejo especial (RdME) que éstos reciben diariamente (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Categorías de los sitios de disposición final (SEMARNAT, 2003).

Tipo	Toneladas de residuos recibidas por día (t/día)
A	>100
B	50 - 100
C	10 < 50
D	<10

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO.

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, las características de diseño, construcción, equipamiento y operación de un relleno sanitario municipal (RSM), deben corresponder a alguno de los tipos propuestos por ésta: A, B, C o D. Esto se debe, por ejemplo, a que un sitio que recibirá más de 100 ton/día de RSU generará más biogás y lixiviados, lo que representa un riesgo mayor de impacto ambiental negativo, que otro sitio que recibirá menos de 10 ton/día. La norma requiere los estudios siguientes:

Sitio tipo A: estudios y análisis previos de: Geología y geohidrología regional, evaluación geológica y geohidrológica, hidrología, topografía, geotecnia, generación y composición de los RSU y de manejo especial, generación de biogás, generación de lixiviados.

Sitio tipo B: estudios y análisis previos de: Evaluación geológica y geohidrológica, hidrología, topografía, geotecnia, generación y composición de los RSU y de manejo especial, generación de biogás, generación de lixiviados.

Sitios tipo C y D estudios y análisis previos de: Topografía, geotecnia, generación y composición de los RSU y de manejo especial.

Las características de construcción que las celdas de disposición final de los residuos de todos los tipos de relleno sanitario deben cumplir en su proyecto ejecutivo son (Figura 1.1): Contar con una barrera geológica natural (o en su caso, acondicionarla) de un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica mínimo de 1×10^{-7} cm/s. Debe contar con un sistema para la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en las celdas, y un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado. El lixiviado debe recircularse en las celdas de residuos confinados para la descomposición de los residuos, o bien ser tratado.

Deben diseñarse canales de desviación de escurrimientos pluviales, minimizando la infiltración de agua en las celdas; y contar con un área especial de emergencias para recibir los RSU y RdME cuando por algún evento fortuito no se puedan recibir en el área destinada para ello.

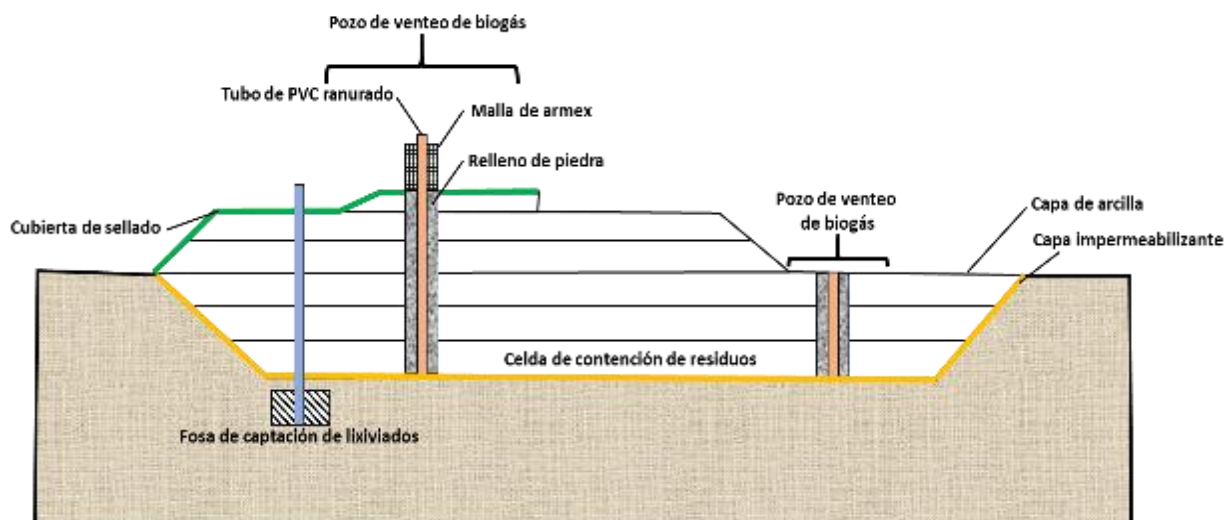


Figura 1.1 Diseño general de un relleno sanitario con sus elementos tales como; pozos de venteo de biogás, celda de contención de residuos, cubierta de sellado y la fosa de captación de lixiviados (Quiroz, 2015).

1.2.3 ASPECTOS OPERATIVOS DE UN RELLENO SANITARIO.

Uno de los aspectos operativos más importantes de un relleno sanitario es el nivel de compactación que debe darse a los RSU. Si la compactación de éstos no es adecuada, ocuparán un volumen mayor y acortarán el tiempo de vida útil del sitio, lo que representa pérdidas considerables en las inversiones ya hechas y la necesidad de realizar nuevos gastos para adecuar, antes de tiempo, un nuevo sitio. La NOM-083-SEMARNAT-2003 señala la compactación que debe darse a los RSU, según el tipo de relleno sanitario que se opere (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Requerimientos de compactación de los residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario.

Clase del sitio	Recepción de los residuos sólidos ton/día	Densidad de los residuos kg/m ³
A1	Mayor de 750	Mayor de 700
A2	100-750	Mayor de 600
B	50-100	Mayor de 500
C	10-50	Mayor de 400

Durante la operación de los rellenos sanitarios, para evitar la dispersión de los materiales ligeros, la fauna nociva (insectos, roedores, aves, etc.) y la infiltración pluvial, los RSU deben cubrirse con capas de material arcilloso, compactado en lapsos menores a 24 horas, que comienzan a contarse a partir de su depósito.

En un relleno sanitario municipal no deben admitirse residuos como:

1. Aguas residuales, líquidos industriales de proceso o sus lodos hidratados con más de 85% de humedad. Antes de depositarse, los lodos deben tratarse previamente para disminuir sus propiedades patógenas.
2. Residuos con aceites minerales.
3. Cualquiera de los residuos peligrosos enlistados en la NOM-052-SEMARNAT-2011.

El sitio de disposición final debe contar con un manual de operación.

1.3 CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.

La degradación natural de los materiales presentes en los RSU dispuestos en un tiradero a cielo abierto o un relleno sanitario, genera subproductos que, de no manejarse bien, contaminarán el ambiente (agua, aire y suelo), a través de la liberación al ambiente de: biogás, lixiviados, agentes biológico-infecciosos, partículas suspendidas, olores, etc. Estos elementos provocarán fauna nociva y enfermedades en los organismos, así como pérdida de biodiversidad y otros daños ambientales.

México, al igual que muchos países en el mundo, debe poner mayor atención en el manejo y la disposición final de sus RSU, debido a los problemas ambientales que éstos generan (Sumathi et al., 2008).

1.3.1 BIOGÁS.

En los rellenos sanitarios, la degradación de la materia orgánica presente en los RSU da lugar a la generación de biogás. Éste es una mezcla de gases compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), en porcentajes variables, dependiendo de factores como: la composición de los propios residuos y su grado de compactación, el clima y la precipitación pluvial (Tabla 1.4). La descomposición de la materia orgánica sucede en dos fases también llamadas digestiones aerobia y anaerobia (Cuenca, 2017).

Digestión aerobia. Ocurre en condiciones con niveles altos de oxígeno, similares al momento del depósito de los residuos. La acción descomponedora de los microorganismos, principalmente bacterias y protozoos, fermentan la materia orgánica

contenida en los residuos. Al inicio del proceso, el crecimiento de los microorganismos es logarítmico, por el contenido alto de oxígeno y nutrientes disponibles, pero conforme éstos se van consumiendo, dan como resultado materia rica en minerales (Cuesta-López, 2015).

Digestión anaerobia. En esta fase, los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. El resultado de esta digestión genera: biogás, digesto (materia orgánica digerida con valores altos de Ca, K, P y N) y lixiviados (Cuesta-López, 2015).

Tabla 1.4 Componentes principales del biogás (Cuesta López, 2015).

Componente	Cantidad
CH ₄	45-65 %
CO ₂	34-55 %
CO	Trazas
N ₂	0-20 %
O ₂	0-5%
H ₂	0-1 %
H ₂ S	100-5000 ppm
NH ₃	Trazas
Vapor de agua	Saturación
Compuestos orgánicos volátiles	5 ppm

El gas metano que se genera por la descomposición de los RSU debe controlarse debido a su alto poder explosivo y a que es un gas de efecto invernadero. Los rellenos sanitarios deben contar con sistemas de extracción de biogás para conducir y controlar su emisión (Aguilar-Virgen, 2011).

1.3.2 LIXIVIADOS.

En términos generales, los lixiviados son residuos en estado líquido que se producen a partir del agua que se genera en el proceso de degradación de los residuos y del agua que proviene de la percolación de la lluvia que se infiltra en las celdas de contención de los RSU. El líquido al fluir entre los residuos disuelve algunas sustancias y arrastra otras en forma de partículas (Luna, 2008).

La Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos, artículo 5, fracción 16, define al lixiviado como el: *“Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en*

suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”.

1.3.2.1 Generación de los lixiviados.

De acuerdo con Roben (2002), la generación y cantidad de lixiviados que se formen en un relleno sanitario municipal depende de los factores siguientes:

1. *Grado de compactación de los RSU.* Si la compactación no es la adecuada, quedarán más huecos en los que habrá aire, y del que las bacterias aerobias obtendrán el oxígeno necesario para sus procesos bioquímicos en los que uno de los productos es el agua. Además, poca compactación propicia la formación de huecos en los cuales puede albergarse el agua proveniente de la infiltración por precipitación pluvial.
2. *Grado de humedad inicial de los RSU.* Si la humedad de la basura al momento de su depósito es alta, ésta se condensará dentro de las celdas de contención, generando más lixiviados.
3. *Tipo de material de cubierta de las celdas de contención de los RSU.* Si el material de cubierta de las celdas de contención es permeable, la precipitación pluvial se infiltrará.
4. *Precipitación pluvial.* Si la precipitación pluvial en la región es alta, habrá una mayor humedad e infiltración de agua en las celdas de contención de RSU.
5. *Humedad atmosférica.* La humedad atmosférica aumenta el contenido de agua en los residuos, ya que se condensa al momento de su depósito.
6. *Temperatura promedio de la región.* Si la temperatura promedio de la región en donde se localiza un relleno sanitario es alta, la tasa de generación de lixiviados aumentará debido a la proliferación de microorganismos que realizan la descomposición de residuos y producen metano y agua.
7. *Evaporación.* Si la tasa de evapotranspiración es elevada en la región donde se localiza el relleno sanitario, la cantidad de agua que logre infiltrarse a las celdas de

contención de residuos será mínima, ya que, será evaporada de la cubierta de material arcilloso.

8. *Escorrimento*. Si el escurrimiento en la superficie de las celdas de contención de residuos es alto y no genera encharcamientos, será poca la cantidad de líquido que logre entrar en contacto con los residuos a través de las capas de sellado. Sin embargo, un diseño de celdas que propicie un escurrimiento de alta velocidad, favorece la erosión de las celdas, lo que, a largo plazo, provoca grietas en el sellado y expone los residuos a la atmósfera (Corena-Luna, 2008).

De todos estos factores, si la región donde se encuentra el relleno sanitario municipal se caracteriza por un clima húmedo o subhúmedo, la fuente de la cual provendrá la mayor parte del agua que se percola y que genera lixiviados, será la precipitación.

Hickman (1999) propuso un balance de agua para un relleno sanitario, en el que el lixiviado generado provendrá del agua sobrante de la precipitación pluvial, a la cual se le restará el porcentaje de agua que no percole por el escurrimiento superficial y el agua que sea evapotranspirada al ambiente (Figura 1.2).

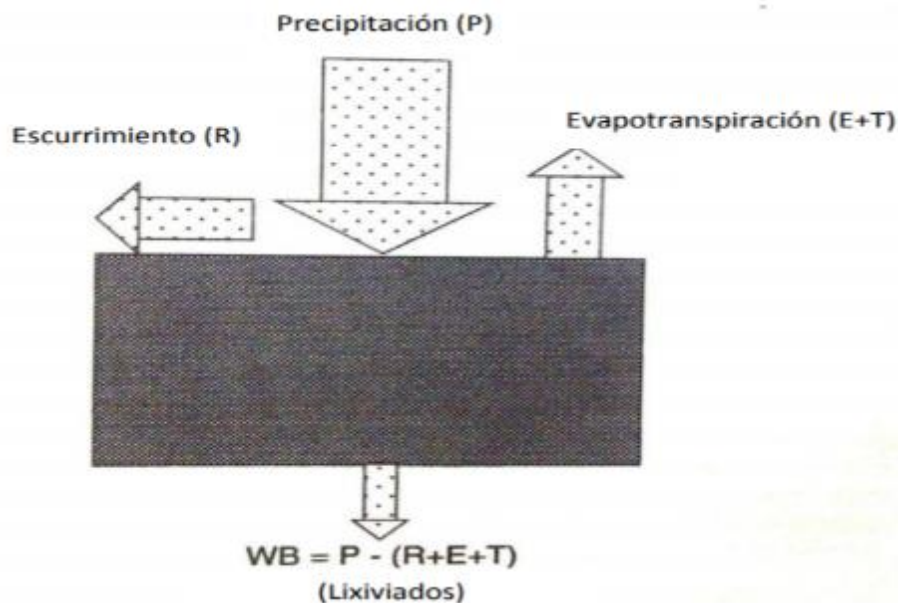


Figura 1.2 Balance de aguas en un relleno sanitario (Hickman, 1999).

1.3.2.2 Clasificación de lixiviados.

Bagchi (1990) propone clasificar a los lixiviados en tres tipos, ordenados de acuerdo con su edad y los compuestos presentes. Propone parámetros muy generales pero indispensables, que dan mucha información acerca del tipo de lixiviado con el que se trata: pH, demanda química de oxígeno (DQO en mg/L), demanda química de oxígeno/carbono orgánico total, demanda bioquímica de oxígeno (tras 5 días de reacción/demanda química de oxígeno), ácidos grasos volátiles, y metales pesados (g/L), en general. Acorde a la edad del lixiviado se dará una clasificación con valores de referencia, lo que resulta en que un lixiviado generado en un relleno sanitario con menos de 5 años se clasifica como: joven, tipo I biodegradable; un lixiviado de un relleno sanitario de entre 5 y 10 años se clasifica como: medio, tipo II intermedio; y un lixiviado de un relleno sanitario con más de 10 años, se clasifica como: viejo, tipo III estabilizado (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Clasificación de lixiviados (Bagchi, 1990).

Parámetro	Lixiviado joven, tipo I Biodegradable (de un relleno sanitario < 5 años)	Lixiviado medio, tipo II Intermedio (de un relleno sanitario de 5 – 10 años)	Lixiviado viejo, tipo III Estabilizado (de un relleno sanitario de >10 años)
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
DBO5/DQO	>0.5	0.1-0.5	<0.1
Ácidos grasos (%)	>70	5-70	<5
Metales pesados (g/L)	2	2 -0.5	<0.5

1.3.2.3 COMPOSICIÓN ESTÁNDAR DE UN LIXIVIADO.

Dados los factores múltiples que influyen en su génesis es difícil considerar una clasificación y composición estándar de un lixiviado. La Tabla 1.6 muestra diversos parámetros fisicoquímicos presentes en los lixiviados y sus concentraciones en las que éstos se han encontrado, sin considerar la edad del lixiviado.

Tabla 1.6 Rangos de referencia en la composición de un lixiviado (Bagchi, 1990).

Parámetro	Concentración (mg/L)	Parámetro	Concentración (mg/L)
Sólidos disueltos	584-55000	Fósforo total	ND-234
totales			
Sólidos suspendidos	2-140900	Boro	0.87-13
totales			
Nitrógeno total	2.0-3320	Arsénico	ND-70.2
Hierro	ND-40000	Molibdeno	0.001-1.43
Potasio	ND-3200	Estaño	ND-0.16
Magnesio	4.0-780	Selenio	ND-1.85
Nitrógeno amoniacal	ND-1200	Cadmio	ND-0.4
Sulfato	ND-1850	Plata	ND-1.96
Aluminio	ND-85	Berilio	ND-0.36
Zinc	ND-731	Mercurio	ND-3
Manganeso	ND-4000	Turbiedad	40-500 UTJ
Conductividad	480-72500 $\mu\Omega/\text{cm}$	Bario	ND-12.5
DBO	6.6-99000	Níquel	ND-7.5
DQO	10.0-195000	Nitrógeno de nitratos	ND-250
Carbono orgánico		Nitrógeno de nitritos	ND-1.46
total	ND-40000		
pH	3.7-8.9	Plomo	ND-14.2
Alcalinidad total	ND-15050	Cromo	ND-5.6
Dureza	0.1-225000	Antimonio	ND-3.19
Cloruros	2.0-11375	Cobre	ND-9
Calcio	3.0-2500	Talio	ND-0.78
Sodio	12.0-6010	Cianuro	ND-6.0

1.3.3 PARTÍCULAS.

Las partículas derivadas de los RSU contenidos en un relleno sanitario pueden consistir en compuestos tóxicos inorgánicos u orgánicos, a las que también se adhieren microorganismos patógenos, que tienen como medio de transporte el viento (Morales-Soto *et al.*, 2016).

Una vez que ingresan a un ser vivo y dependiendo de su composición, las partículas contaminantes pueden generar diversos efectos sobre la salud humana y fauna local. Por lo general, provocan obstrucciones en las vías respiratorias, conjuntivitis, irritación de las mucosas y tos; en el sistema cardiovascular causan exacerbaciones de enfermedades y alteraciones del ritmo cardíaco (Méndez *et al.*, 2006).

1.3.4 CONTAMINACIÓN VISUAL.

La contaminación visual se puede definir como todo elemento que perturbe o rompa la estética de un paisaje determinado. La estética de un sitio se interrumpe cuando se le añaden elementos que no le son propios (Gaitán, 2009). Los RSU constituyen un contaminante visual cuando se disponen de manera inadecuada y quedan expuestos al sentido de la vista. Al no ser naturales y por lo general, sinónimo de suciedad, el ser humano suele considerarlos poco estéticos al punto de causar incomodidad. Esta situación se extiende en las grandes ciudades y zonas rurales del mundo (Abril-Menéndez, 2016).

1.4 CONTAMINACIÓN POR LA MALA DISPOSICIÓN DE LOS RSU.

La contaminación ambiental causada por la mala disposición de RSU es uno de los emblemas más significativos de la civilización contemporánea. En una primera instancia afecta a los cuerpos de agua, al suelo y al aire (Guzmán-Chávez et al., 2012).

1.4.1 EN LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.

Uno de los problemas ambientales menos notorio, pero de mayor gravedad, es la contaminación de los recursos hídricos, por el manejo inadecuado de RSU. En el caso de las aguas superficiales, la contaminación presente en los RSU origina un proceso llamado *eutrofización*, el cual consiste en que el oxígeno disuelto en el agua disminuye, y la concentración de nutrientes como N y P, aumenta. En el caso de los elementos y compuestos inorgánicos, la contaminación se da porque muchos de los RSU están mezclados con residuos peligrosos o de manejo especial, que pueden liberar sustancias tóxicas al ambiente (Acurio et al., 1997).

Ambos tipos de contaminantes, orgánicos e inorgánicos, son transportados por los lixiviados que se generan. Si los lixiviados no son contenidos y manejados de manera correcta, pueden llegar a través del suelo y subsuelo a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Un caso de este tipo fue descrito por Israde y colaboradores (1999, 2005) en la ciudad de Morelia, Michoacán, en donde se llevaron a cabo estudios geohidrológicos para identificar el impacto de la contaminación por lixiviados en el acuífero al poniente de la ciudad. Los resultados de los diversos análisis mostraron que

los lixiviados llegaban al acuífero e identificaron la presencia de metales pesados como Cd, Pb, Cr, Ni y As en el agua de los pozos de abastecimiento de la ciudad.

En el caso de la contaminación de cuerpos de agua superficial por RSU, se tiene el estudio realizado por León-Gómez y colaboradores (2015) quienes investigaron la calidad del agua subterránea y superficial, por la contaminación producida por los lixiviados generados en el relleno sanitario municipal de la ciudad de Linares, Nuevo León, México. Detectaron concentraciones altas de NO₃, Pb, Mn y Fe en los escurrimientos superficiales y que, de no existir un control sobre los contaminantes, puede ocasionar efectos nocivos a la salud de la población que hiciera uso de esa agua.

1.4.2 EN LOS SUELOS.

Cuando los RSU son dispuestos de manera inadecuada, la primera etapa de contaminación del suelo se da con la presencia de materiales como trozos de vidrio, plásticos, metales y una variedad de materiales no biodegradables. La contaminación por lixiviados (con concentraciones de metales pesados o compuestos orgánicos nocivos), se da cuando éstos son transportados y depositados en suelos y sedimentos, provocando afectaciones a la flora y fauna local (Kaoser *et al*, 2000).

El impacto ambiental negativo es mayor en suelos destinados a uso agrícola, ya que los sembradíos pueden absorber contaminantes bioacumulables, que pueden dañar la salud de los organismos que los usen como alimento, incluido el ser humano (Ocampo y Gullosa, 2006).

1.4.3 EN EL AIRE.

La contaminación al aire a causa de los RSU se produce debido:

1. Al transporte por el viento de las partículas que resultan de la fragmentación de los RSU. Las partículas contienen sustancias tóxicas o microorganismos patógenos que afectan, entre otros, al sistema respiratorio de los individuos expuestos.
2. A los gases liberados a la atmósfera, que resultan del proceso de descomposición de la parte orgánica de los RSU; o incluso, por la combustión espontánea de dichos gases que producen contaminantes orgánicos persistentes, con efectos nocivos para la salud (Colomina, 2005).

3. Las repercusiones que tienen los gases liberados en el cambio climático. El metano, por ejemplo, tiene un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor que el dióxido de carbono (Cuesta-López, 2015).

1.5 MARCO LEGAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

La normatividad ambiental tiene como objeto la preservación del ambiente, promoviendo el uso sostenible de los recursos naturales y su conservación para ofrecer condiciones adecuadas de calidad de vida (López *et al.*, 2018). En el caso de la disposición final de los RSU, la reglamentación se enfoca en el confinamiento adecuado de éstos para evitar la contaminación de los elementos naturales.

1.5.1 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.

Los marcos normativos ambientales de distintos países inician con la Constitución, seguida de acuerdos internacionales, leyes, normas y reglamentos locales. A continuación, se indican algunas características de la normativa en materia de RSU, en algunas regiones del mundo con mayor influencia en el sistema económico actual.

1.5.1.1 Normatividad en la Unión Europea.

La Unión Europea destaca por promover políticas ambientales basadas en los principios de cautela, prevención y corrección. Su política se remonta a la reunión del Consejo Europeo, celebrada en 1972, en la que se reconoció la necesidad de establecer políticas ambientales adecuadas, debido al desarrollo económico y a los impactos ambientales que la región venía experimentando.

1.5.1.1.1 Directiva 1999/31/CE.

La Directiva 1999/31/CE es una directriz cuyo objetivo es la protección del ambiente por impactos negativos de residuos en vertederos (confinamientos de residuos). Se aplica en todos los países miembros de la Unión Europea, designando Directivas Comunitarias en cada país miembro, los cuales emiten decretos u ordenamientos locales. Por ejemplo, en

España, la Directiva fue trasladada al país por medio del ordenamiento en el Real Decreto 1481/2001 (García-Piñón *et al.*, 2008). La Directiva hace referencia a tres tipos de vertederos:

- a) *Vertedero para residuos peligrosos*: Dentro de este tipo de vertedero, se disponen aquéllos que figuren en la lista de residuos peligrosos de cada país miembro de la Unión Europea. Estos listados son propuestos por los organismos reguladores locales, de conformidad con la normativa europea o convenios internacionales, de los que el país miembro sea signatario. Por ejemplo, en el caso de España, corresponde a los residuos enlistados en el Real Decreto 952/1997.
- b) *Vertedero para residuos no peligrosos*: En estos sitios se disponen aquéllos que no figuran en los listados de residuos peligrosos de cada país miembro de la UE. Se incluyen los residuos sólidos urbanos que se generan en la limpieza de vías y parques públicos, casas habitación, comercios, oficinas, restaurantes y, en general, los que por su naturaleza y composición no se clasifiquen como peligrosos.
- c) *Vertedero para residuos inertes*: Son residuos inertes aquéllos que no son solubles ni combustibles; no tienen características que los hacen peligrosos y no experimentan transformaciones físicas químicas o biológicas significativas. La mayor parte de los residuos que son dispuestos en este tipo de vertederos son los restos de la construcción y demolición como: escombros, arenas, gravas, restos de hormigón, pedazos de ladrillos, azulejos, tejas, cerámicos y fragmentos de vidrio.

1.5.1.2 Normatividad en Canadá.

En Canadá, los residuos sólidos urbanos son gestionados a través del gobierno federal, provincial y municipal. Para minimizar la cantidad de RSU que llegarán a un sitio de disposición final se promueve el compostaje de la parte orgánica de los residuos. La recolección, transporte y disposición final (o en su caso compostaje), son responsabilidad de los gobiernos municipales, bajo la supervisión del gobierno provincial (Villalpando, 2016). El gobierno federal promueve el desarrollo sustentable en materia de RSU, la gestión de residuos peligrosos y su movimiento transfronterizo.

Las obras de ingeniería y requerimientos necesarios en un sitio de disposición final son propuestas por la federación (CEPA, 1999). La industria es responsable de la recolección, gestión y reciclado de envases de vidrio, plástico, y latas.

1.5.1.3 *Normatividad en Estados Unidos de América (E.U.A.).*

La normatividad ambiental en los E.U.A., es aplicada por la *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), y define a un Relleno Sanitario Municipal (RSM) como un área discreta o excavación en el suelo, que recibe desechos domésticos, y que también puede ser apto para recibir otro tipo de desechos como residuos industriales inertes y lodos no peligrosos en pequeñas cantidades. Según la EPA (2017), para el 2009, en E.U.A. se registraron 1,908 rellenos sanitarios municipales, los cuales son administrados por los estados en los que se ubican. Los residuos no peligrosos están regulados por la sección D del Reglamento de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA). Los estados desempeñan un papel fundamental para asegurar la aplicación de este reglamento federal.

Los RSU, su manejo e instalaciones son regulados por requerimientos establecidos en programas estatales. En caso de no contar con éstos, los estados deben cumplir con los requerimientos federales propuestos por la EPA. En el Título 40 del Código de Regulaciones Federales, artículo 258, se señalan los requerimientos técnicos para la ubicación y construcción de un sitio que será utilizado como relleno sanitario: características geológicas del sitio propuesto, el aislamiento con geomembrana, capas de arcilla compactada, el sistema de captación de lixiviados, aspectos operacionales del relleno, monitoreo de la calidad del agua subterránea en pozos cercanos, la clausura y remediación ambiental del sitio, etc. (EPA, 2017).

1.5.1.4 *Normatividad en América Latina y El Caribe.*

Los niveles organizacionales de gobierno que rigen a los países de América Latina, normalmente corresponden a los ámbitos: nacional o federal, estatal o provincial, y local o municipal. En los temas: ambiental, de salud, desarrollo urbano y territorial, la expedición de leyes, reglamentos y normas, así como la supervisión y evaluación de su cumplimiento, son responsabilidad de la federación, quien los supervisa, a través de los ministerios federales correspondientes.

En el caso de los RSU, la federación es la encargada de proveer la normatividad correspondiente para su gestión; así como el diseño, equipamiento, operación clausura y monitoreo adecuados de un relleno sanitario. Las entidades estatales o provinciales se encargan de verificar su cumplimiento en las distintas localidades o municipios bajo su jurisdicción (Acurio *et al*, 1997). Finalmente, la operación, administración y financiamiento del manejo de los residuos sólidos urbanos son responsabilidad de los gobiernos municipales, quienes, a su vez pueden concesionar estos servicios al sector privado.

La normatividad en los países que componen el Caribe es similar. La gestión, tratamiento y disposición final de los residuos, está a cargo de los organismos gubernamentales nacionales o federales directamente, los cuales administran y financian los servicios, además de encargarse de generar la normatividad aplicable para planificar y regular la disposición de los residuos. Debido a su población y tamaño, considerablemente menor en comparación a los demás países de América Latina, se facilita la gestión de los residuos, a cargo de los Ministerios de salud o medio ambiente, correspondientes (Acurio *et al*, 1997).

1.5.2 *NORMATIVIDAD EN LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.*

En México, la normatividad ambiental para la gestión de los residuos se basa en la Constitución Política, de la cual emanan las leyes, reglamentos y normas aplicables. El gobierno federal delegó la gestión de los RdME a los gobiernos estatales; quienes, a su vez, verifican el cumplimiento de la normatividad para el manejo de los RSU, a cargo de los gobiernos municipales.

1.5.2.1 *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*

La LGPGIR se aplica en todo el territorio nacional y tiene como objeto: *“Garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de [...] la gestión integral [...], de los residuos sólidos urbanos [...]; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.”* (PROFEPA, 2016; LGPGIR, 2007).

En su Título Segundo, Capítulo Único, Artículo 7, fracción IV, indica que es facultad de la Federación expedir las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), referentes al desempeño ambiental y manejo integral de los Residuos Sólidos Urbanos.

1.5.2.2 *Reglamento de la LGPGIR*

El reglamento de la LGPGIR tiene como objeto: *“Reglamentar la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y rige en todo el territorio nacional y las zonas donde la Nación ejerce su jurisdicción y su aplicación corresponde al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.”* (PROFEPA, 2016).

El Artículo 15, fracción III, indica que las autoridades de los tres órdenes de gobierno podrán coordinarse para el ejercicio de sus atribuciones, con el fin de fomentar la aplicación de instrumentos como auditorías ambientales, certificaciones de procesos u otros convenios que permitan reducir la generación y buscar el aprovechamiento de los RSU, así como evitar la contaminación que ocasionan (PROFEPA, 2016).

1.5.2.3 *Leyes Ambientales Estatales.*

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en su artículo 7, fracción 5, indica que los gobiernos estatales son responsables de la regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.

Por su parte la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en su artículo 9, dicta que las facultades de los estados son:

1. Formular, conducir y evaluar la política estatal en materia de residuos.
2. Establecer el registro de planes de manejo de residuos y programas para la instalación de sistemas destinados a su recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, valorización y disposición final.
3. Promover la creación de infraestructura para el manejo integral de residuos sólidos urbanos.
4. Someter a consideración de la Secretaría, los programas para la construcción y operación de rellenos sanitarios.

1.5.2.4 *Reglamentos de Ecología Municipales.*

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en su artículo 8 fracción 5, establece que corresponde a los municipios la facultad de aplicar las disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de los efectos sobre el ambiente, ocasionados por la generación transporte, almacenamiento manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.

De igual manera, la LGEEPA en su artículo 10 señala que las autoridades municipales tienen a su cargo las funciones del manejo integral de los residuos sólidos urbanos, que consisten en las etapas de recolección, traslado, tratamiento y disposición final, acorde a los lineamientos contenidos en las fracciones I – XII:

- Formular en conjunto con las entidades estatales, Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos.
- Emitir reglamentos locales, a fin de verificar y dar cumplimiento a lo contenido en la LGPGIR.
- Controlar los RSU.
- Brindar o, si así lo requieren, concesionar el servicio público de manejo integral de RSU.
- Llevar un registro actualizado de los grandes generadores de RSU.
- Coadyuvar en la prevención de la contaminación de sitios y su remediación.

1.5.2.5 *Normas Oficiales Mexicanas aplicables a los RSU y RME*

Las Normas Oficiales Mexicanas aplicables a los RSU son disposiciones emitidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, que dictan especificaciones técnicas respecto a las distintas etapas de la gestión de los residuos, desde su clasificación hasta su disposición final en rellenos sanitarios. Las normas señalan también las especificaciones técnicas que deben cumplir estos sitios.

1.5.2.5.1 *NOM-161-SEMARNAT-2011*

Esta norma establece: los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial (RdME) y determinar cuáles están sujetos a Planes de Manejo; el listado de éstos; el

procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. Aplica para los grandes generadores de RSU. Gran parte de los residuos generados en la industria y servicios comerciales son Residuos de Manejo Especial. Junto a estas actividades se generan residuos derivados del consumo, operación y mantenimiento de las demás áreas, que forman parte de las instalaciones dentro de la industria. Éstos, por sus características son considerados RSU; sin embargo, por su alto volumen de generación mayor a 10 toneladas por año, se convierten en Residuos de Manejo Especial (SEMARNAT, 2011).

1.5.2.5.2 NOM-098-SEMARNAT-2002.

Esta norma trata de la protección ambiental por la incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. En cumplimiento del Convenio de Estocolmo, del cual México es signatario, la norma establece los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera por incineradores existentes y condiciones de operación adecuadas para instalaciones incineradoras nuevas. Indica que la incineración de residuos sólo aplicará para aquellos que no sean susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos que no liberen contaminantes orgánicos persistentes al ambiente y que contribuyan a la minimización de residuos de manera ambientalmente efectiva (SEMARNAT, 2002).

1.5.2.5.3 NOM-083-SEMARNAT-2003.

Esta norma brinda las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Aquellos RSU que no hayan sido aprovechados o tratados deben ser dispuestos en un sitio adecuado, siguiendo los lineamientos de esta norma. Indica las características geológicas, hidrológicas, topográficas y geotécnicas que debe cumplir el sitio considerado para preparar un relleno sanitario. También indica aspectos de construcción que debe cumplir como: el acondicionamiento adecuado de permeabilidad de las celdas, el sistema de captación de lixiviados y la clausura del sitio, una vez llegado al fin de su vida útil (SEMARNAT, 2003).

1.5.2.6 Normas Mexicanas (NMX) aplicables.

Las NMX a diferencia de las NOM, son regulaciones cuya implementación es voluntaria; sin embargo, una NMX puede ser de observancia obligatoria, en caso de que una NOM así lo indique. Las NMX aplicables al manejo adecuado de RSU se listan en la Tabla 1.8.

Tabla 1.7 Normas Mexicanas (NMX) aplicables a los RSU.

Norma NMX	Aplicación
NMX-AA-015-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.
NMX-AA-019-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico "in situ".
NMX-AA-021-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de materia orgánica.

1.6 RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU EN MÉXICO.

De acuerdo con datos del INEGI, en el año 2014, de un total de 2456 municipios que hay en el país, en los temas de recolección, transporte y disposición final de RSU, se tenían los datos siguientes (INEGI, 2015):

1. 2,266 municipios contaban con estos servicios.
2. 141 municipios carecían de estos servicios.
3. 1881 municipios tenían sitios de disposición final de RSU.
 - a. Sólo 238 sitios son rellenos sanitarios.
 - b. 1643 son tiraderos a cielo abierto.

En el año 2010, la cantidad promedio diaria de RSU recolectados por día fue de 86,342 ton/día; mientras que, en el año 2014, la cantidad ascendió a 102,887 ton/día, lo que representó un aumento anual de 4,136 ton/día de RSU recolectados.

Un *tiradero a cielo abierto* es un sitio de disposición final de RSU que no fue planeado y que no cumple con las especificaciones técnicas que establece la NOM-083-SEMARNAT-2003. En contraparte, un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de RSU, cumple con los requisitos establecidos por la normatividad aplicable y su fin es minimizar el impacto ambiental producido por la disposición de RSU.

Los municipios de México que disponen sus RSU en tiraderos a cielo abierto, suelen tener problemas ambientales como: la dispersión, por la acción del viento, de partículas y polvos con agentes patógenos; la contaminación del suelo y de cuerpos de agua por la acción de los lixiviados; los daños a la flora y fauna local, así como a las poblaciones vecinas a esas fuentes contaminantes (SEMARNAT, 2015).

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

En la presente tesis de maestría se analizará la posible contaminación ambiental, generada por un sitio de disposición final de RSU, ubicado en el municipio de Cerritos, San Luis Potosí, México.

El sitio de estudio se localiza en el municipio de Cerritos, San Luis Potosí, en el cual según datos del INEGI (2020) la población se ha mantenido sin variaciones importantes, en los últimos 50 años, pasando de 19,865 habitantes, en 1970, a 21,400 en el año 2015 y a 22,075 en el 2020. Gran parte de la economía local se mantiene del comercio generado por las remesas enviadas por migrantes desde los Estados Unidos de América.

Según datos de la Dirección de Ecología municipal, actualmente se recolectan (y se depositan en un tiradero a cielo abierto) unas 13 t/día de residuos sólidos urbanos (RSU), generadas por unos 16,000 habitantes de la cabecera municipal y de seis comunidades cercanas, a las que se les brinda este servicio. Esto representa una tasa de generación de 0.81 kg/día/hab de RSU.

Los residuos generados por unas 2,500 personas dispersas en distintas comunidades de este municipio, por lo general son incinerados en los domicilios.

De acuerdo con la información proporcionada por la Dirección de Ecología del municipio de Cerritos, SLP, en el año 2006, se realizaron adecuaciones al sitio de disposición final de RSU ubicado en la comunidad de Manzanillas, para convertirlo en un relleno sanitario. Éste operó de manera adecuada los primeros años, pero luego se descuidó su manejo adecuado: los residuos dejaron de cubrirse con tierra, ya no hubo vigilancia, no se dio limpieza ni mantenimiento al camino de acceso, etc. El paisaje se contaminó con residuos expuestos a la intemperie y aparecieron olores nauseabundos y fauna nociva. Esta situación provocó molestias a la población vecina y sus habitantes cerraron el acceso al relleno sanitario para los vehículos de recolección y descarga de RSU. Finalmente, las autoridades municipales clausuraron el sitio.

Desde entonces, la población ha ejercido presión sobre las autoridades municipales, señalando que el arroyo que pasa por el tiradero clausurado se contamina, y que el agua que se almacena en los bordos, enferma a sus animales, llegando, incluso, a provocarles la muerte.

De acuerdo con lo anterior, las autoridades del H. Ayuntamiento de Cerritos, S.L.P., solicitaron apoyo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para realizar un estudio de caracterización de la posible contaminación ambiental, producida por el tiradero clausurado de RSU, a fin de determinar las posibles medidas de intervención que resulten necesarias.

En el presente capítulo, se describen de los elementos ambientales físicos y bióticos del sitio de estudio, con el fin de ofrecer un panorama general del ecosistema en el cual se desarrolló este trabajo de investigación, y de generar la información necesaria para los modelos de transporte hídrico de contaminantes, que se utilizaron.

2.1 UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.

El sitio de estudio en donde se encuentra el relleno sanitario municipal clausurado (RSM) se ubica en el municipio de Cerritos, San Luis Potosí. Éste se localiza a 82 km al noroeste de la capital del estado del mismo nombre. Para llegar a Cerritos se sigue hacia el norte la carretera federal número 57, en dirección a Matehuala, durante 57 km; posteriormente se toma la desviación hacia el este, con dirección a Rioverde. Se recorren así 32 km de la carretera estatal número 75; se continua hasta llegar a la desviación y a la caseta de cobro “Cerritos” (Figura 2.1).

De la caseta, se continúa hasta la cabecera municipal. Una vez en el poblado, se atraviesa la mancha urbana hacia el Este para llegar a la calle Adalberto De Ávila. Esta calle termina en el camino pavimentado que conduce a la comunidad de San Pedro. Se sigue esta carretera en dirección S32°E, por 5.41 km, y luego se toma un camino de terracería de 3.9 km en dirección N22°E, hasta llegar al cercado que delimita la propiedad municipal, en la cual se encuentra el relleno sanitario clausurado, en las coordenadas 14Q, 377322 E, 2478854 N (Figuras 2.1 y 2.2).

2.2 EL RELLENO SANITARIO ESTUDIADO Y SU CONDICIÓN ACTUAL.

La fuente de contaminación estudiada es un relleno sanitario de residuos sólidos urbanos (RSU) abandonado y su fosa de lixiviados, que se encuentran en medio del curso de un arroyo intermitente que, a lo largo de su cauce, alimenta a un afluente de mayor rango y

a dos bordos de contención de agua. El sitio de disposición final de RSU se ubica en las coordenadas 14Q 377280 E, 2478942 N, con una altitud de 1200 m.s.n.m. (Figura 2.3).

Actualmente, el sitio de disposición final de RSU se encuentra inactivo; no se le brinda ningún tipo de mantenimiento para conservar en buen estado la capa de sellado superficial de las celdas de contención de RSU, a las que la erosión hídrica ha dañado considerablemente. La celda de contención de RSU es de forma rectangular, mide 120 m de largo por 60 m de ancho y cubre una superficie de 0.72 hectáreas (Figura 2.3).

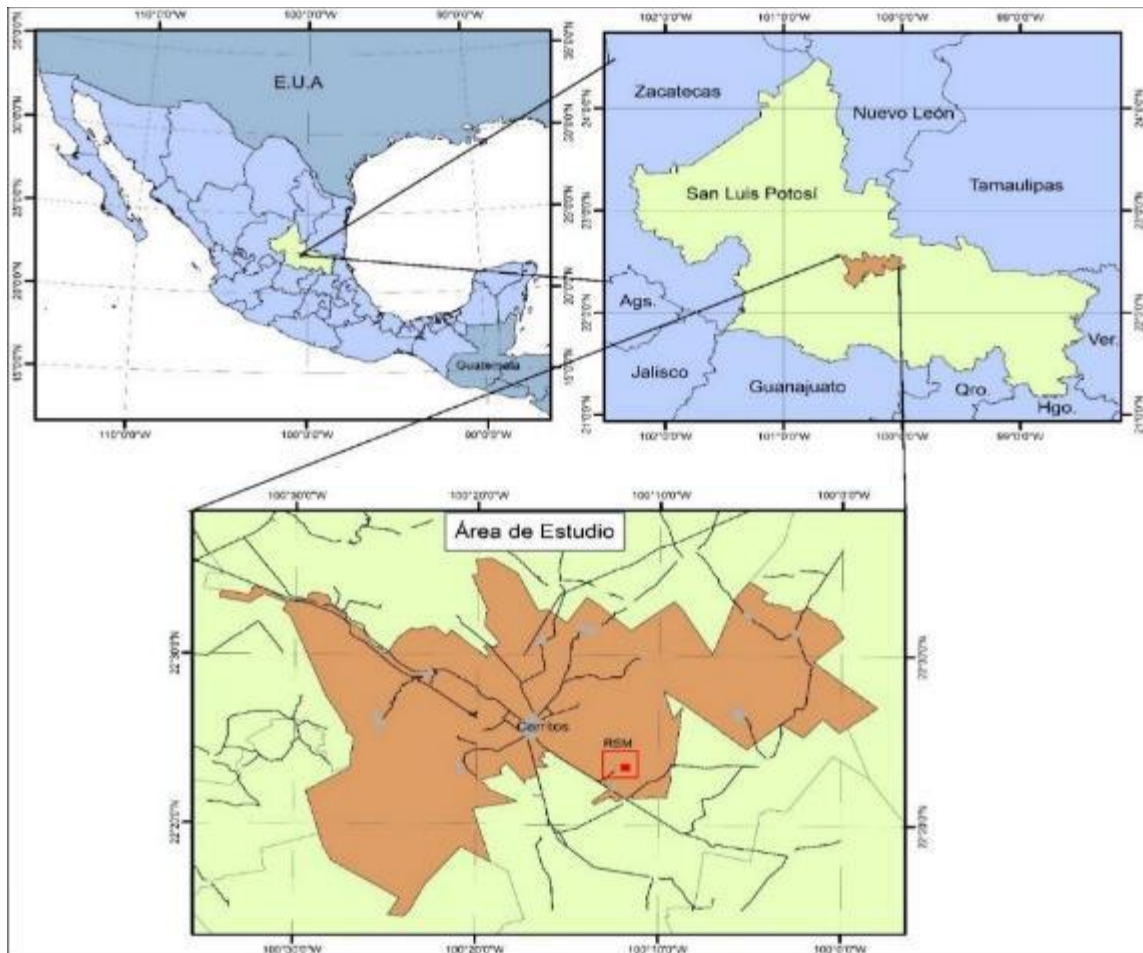


Figura 2.1 Ubicación del sitio de estudio de disposición final de RSU.

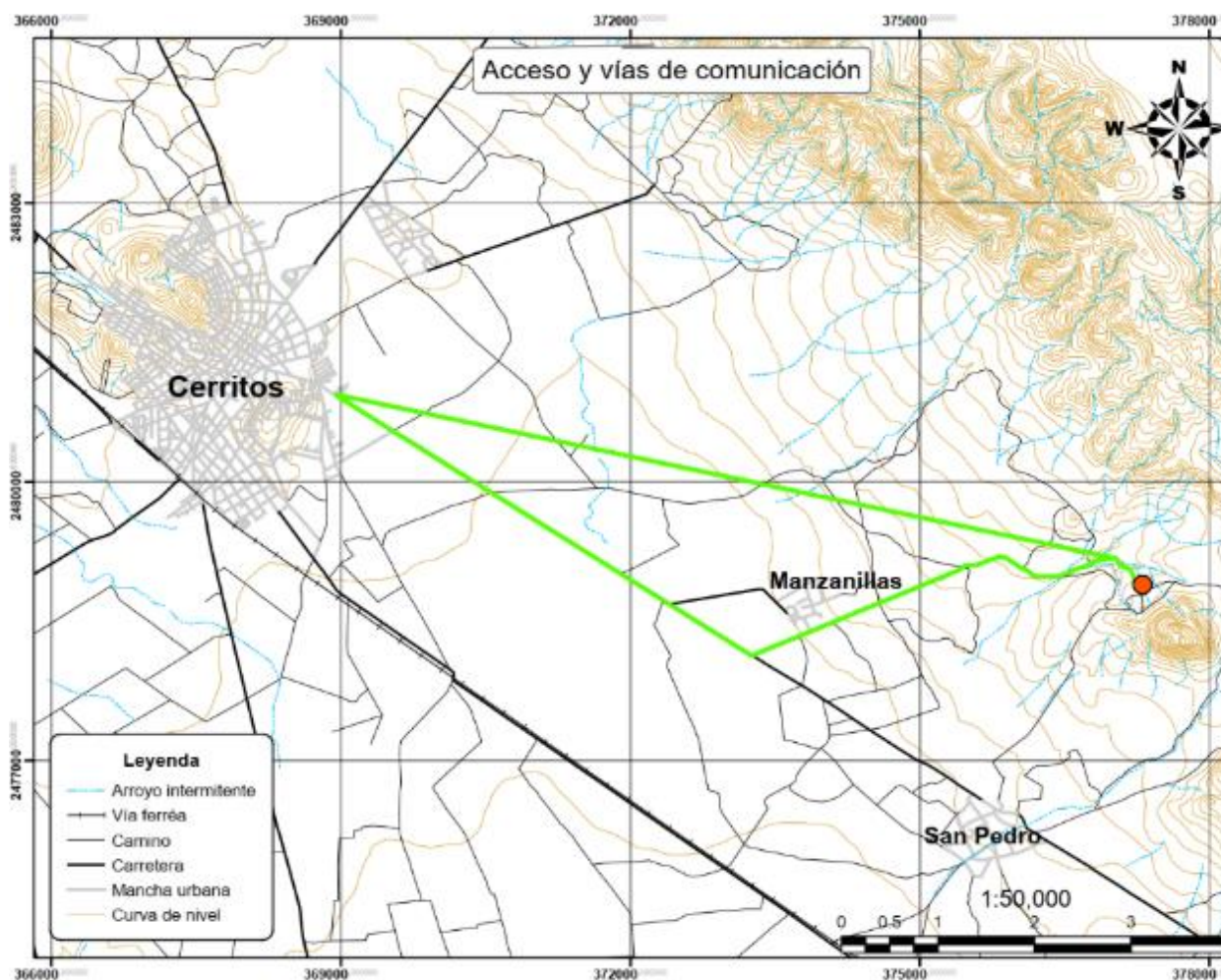
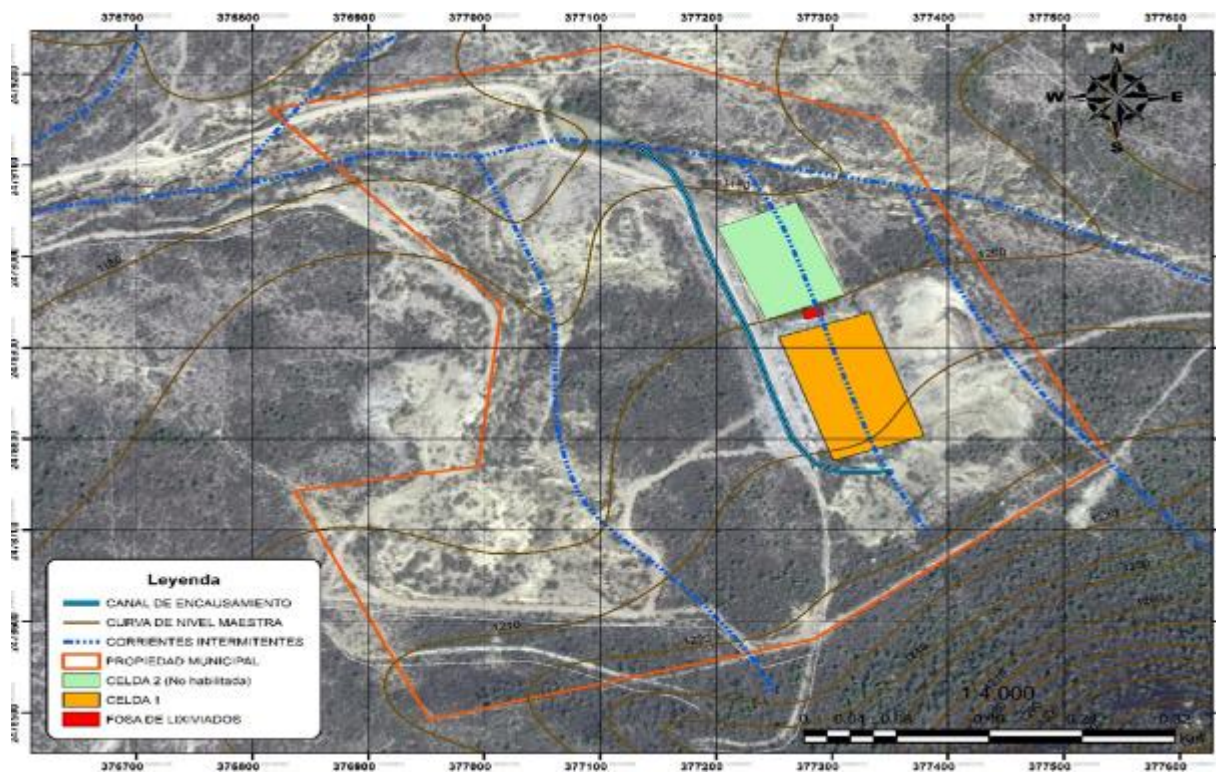


Figura 2.2 Acceso y vías de comunicación al sitio de estudio de disposición final de RSU.

El sitio de disposición final tiene RSU expuestos por el desgaste hídrico que se presenta en la capa de sellado de material arcilloso. Como resultado, en los alrededores del sitio se han esparcido residuos (principalmente plásticos) que fueron transportados por la acción del viento y de las corrientes de agua, generando contaminación paisajística (Figura 2.4)



2.2.1 MEDIDAS CORRECTIVAS DURANTE LA CLAUSURA DEL SITIO.

De acuerdo con la información proporcionada por la Dirección de Ecología, con la finalidad de evitar el encharcamiento de agua pluvial en la cubierta de los RSU, durante la clausura del tiradero, se consideró aumentar la pendiente natural de la topografía del sitio, a un máximo del 2% en el sentido transversal de la celda y de 1.5% a 2% en sentido longitudinal (Figura 2.5).

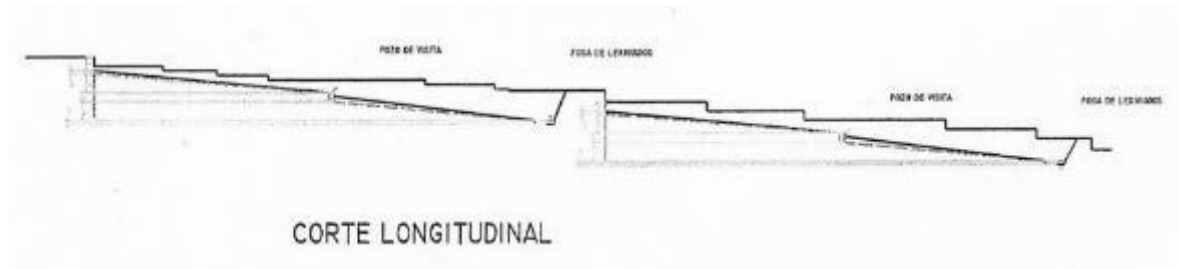


Figura 2.5 Corte longitudinal de la celda de contención de RSU en el sitio de estudio.

Además, dada la hidrología superficial del sitio que incluye una corriente intermitente que pasa por la celda, se construyó un canal de encausamiento para desviar este arroyo, con una longitud de 600 m, por 5 m de ancho y 2 m de profundidad. Actualmente, este canal está muy azolvado (Figura 2.6).

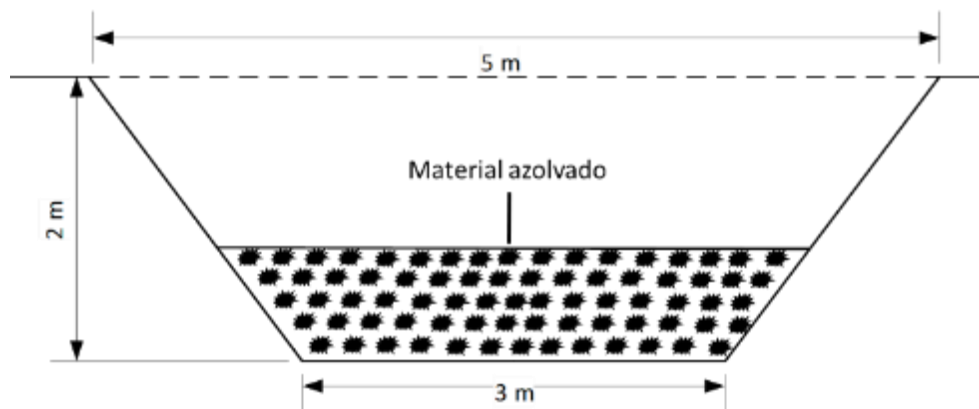


Figura 2.6 Canal de encausamiento para desviar la corriente intermitente que pasa por las celdas.

2.2.2 COLOCACIÓN DE POZOS DE VENTEO DE BIOGÁS.

Durante su conversión de tiradero a cielo abierto a relleno sanitario, el sitio de estudio se equipó con 6 pozos de venteo de biogás, construidos sobre un piso de concreto de armado de malla, con un ademe de tubo perforado de PVC de 4", dentro de un mallado de armex con relleno de "piedra bola", este último con radio de 27 cm (Figura 2.7).

Los pozos de venteo de biogás en el sitio de estudio son de tipo pasivo; su función es la liberación conducida de los gases generados por la descomposición de la materia orgánica contenida en las capas de RSU. Al estar considerablemente alejados de las comunidades, sus emisiones no representan un riesgo local.

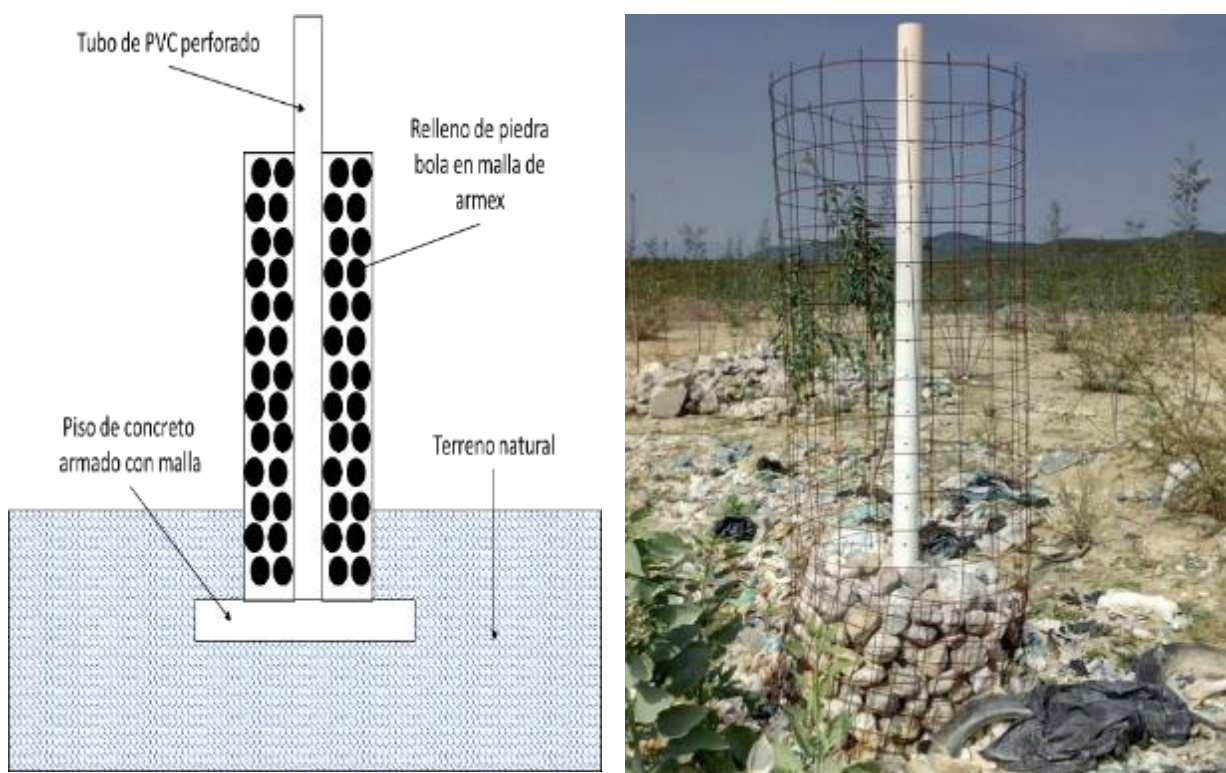


Figura 2.7 a) Esquema de la construcción de un pozo de venteo de biogás. **b)** Condición actual de los pozos de venteo de biogás en el sitio de estudio.

2.2.3 CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.

Para almacenar los lixiviados que se generan por la descomposición de los RSU y la entrada de agua pluvial, al pie de la celda de contención se construyó una fosa, sobre un piso firme de concreto armado (sin ningún tipo de impermeabilización) con malla sobre

un cimientado de piedra, ambos ajustados por dalas de desplante hechas de armex de 8", en un perímetro de dados o cadenas de concreto armado (Figuras 2.8).

Sus medidas iniciales eran de 4.15 m de ancho por 6.15 m de largo y 1 m de profundidad. Debido a las dimensiones reducidas de la fosa y al agua pluvial que ingresaba a ésta, ocurrieron desbordamientos de lixiviados hacia el arroyo que "atraviesa" al sitio (Figura 2.3).

Tiempo más tarde, las paredes de la fosa de contención de lixiviados se elevaron 3 metros más para aumentar la capacidad de contención de ésta hasta un volumen total de 102.2 m³. En fechas recientes, no se han reportado nuevos derrames de lixiviados.

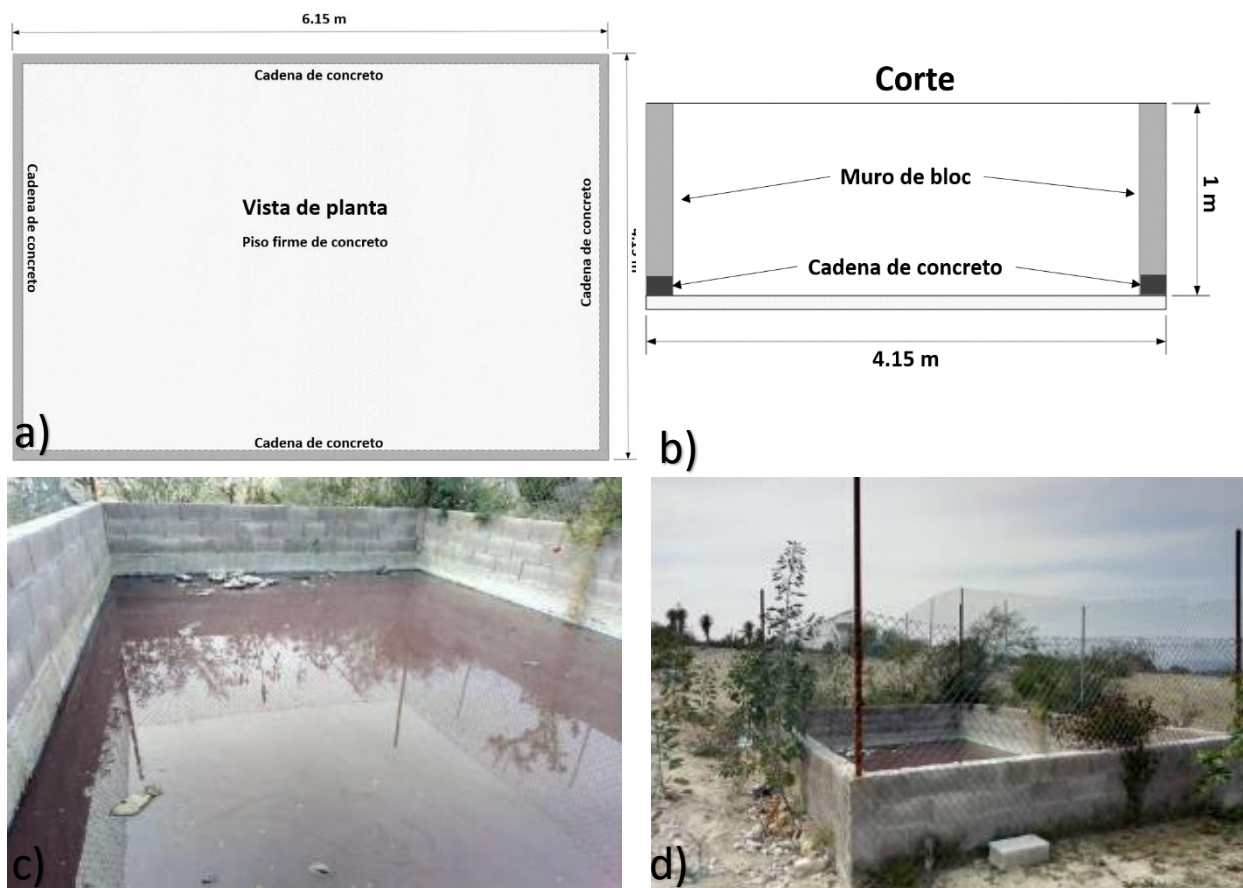


Figura 2.8 Características de diseño de la fosa de lixiviados y su estado actual. a) y b) Planos de diseño y construcción de la fosa de lixiviados con sus dimensiones propuestas inicialmente c) Fosa de lixiviados con sus niveles actuales y d) Vista general de la fosa de lixiviados.

A fin de evitar que el ganado de las comunidades cercanas y la fauna local bebieran los lixiviados, en cada vértice de la fosa se colocaron tubos de metal de 3" y se rodeó el perímetro de la fosa con 20.6 metros de malla ciclónica (Figura 2.8).

De manera esporádica (2 – 4 veces al año) y sin un programa de monitoreo definido, se revisa el nivel de los lixiviados y la ausencia de fugas de la fosa. Los lixiviados no se someten a tratamiento alguno; sólo se dejan en la fosa esperando su evaporación natural. Por lo que se refiere al material sedimentado en el fondo de la fosa, éste nunca se ha extraído, lo que disminuye su capacidad de almacenamiento.

De acuerdo con las mediciones realizadas durante el trabajo de campo (en invierno y primavera del 2020), la columna promedio de lixiviados almacenados en la fosa fue de 3 m de altura; lo que resulta en un volumen de 76.5 m³ de lixiviados (el 76.3% de su capacidad).

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS BIÓTICOS.

Los elementos bióticos son constituyentes esenciales para el equilibrio de los ecosistemas, por lo que es indispensable hacer una caracterización de éstos en el sitio de estudio, a fin de conocer sus relaciones con los otros elementos del ambiente y evaluar el posible impacto ambiental, producido por el relleno sanitario clausurado.

El área del proyecto está desprovista de vegetación y de fauna nativas. La flora fue sepultada o retirada, mientras que la fauna local emigró a superficies vecinas, cuando se construyó y operó el tiradero de RSU y luego el relleno sanitario municipal.

La flora y fauna nativas que se describirán a continuación se observan sólo en las áreas de la región, no impactadas por las actividades humanas de: urbanización, vías de comunicación, actividades agrícolas y pecuarias, obras de infraestructura, etc.

2.3.1 FLORA.

El área de estudio se clasifica de manera regional como un matorral subinerme. En estas comunidades vegetales dominan los arbustos, cactáceas y árboles con follaje de altura inferior a 4 m. Se caracterizan por distribuirse en un clima árido, semiárido y hasta subhúmedo que puede variar de muy caluroso en zonas costeras, a muy fresco en partes altas.

En la zona de estudio se observan especies de cactáceas, conocidas localmente como “Garambullo” (*Myrtillocactus geometrizans*), “Nopal de Tuna” (*Opuntia ficus indica*), “Choya” (*Corynopuntia bulbispina*) y “Biznaga” (*Echinocactus visnaga*), especies de agave conocida como “Maguey de peña” (*Agave mitis*). La especie de hesperaloe conocida como “Lechuguilla” (*Esperaloe chianguii*), la especie de hechtia conocida como “Huapilla” (*Hechtia glomerata*). Especies arbustivas conocidas como “Granjeno” (*Celtis laevigata*), el “Palo Blanco” (*Condalia velutina*), y la especie arbórea: “Mezquite” (*Prosopis juliflora*).

2.3.2 FAUNA.

La fauna es otro de los elementos importantes en la descripción del ambiente del sitio de estudio. Dado el caso de estudio, se tienen dos tipos de fauna: la local (que es propia de la zona) y la nociva (que es atraída por los residuos ahí acumulados y se reproduce en el sitio).

2.3.2.1 Fauna local.

La fauna local, al igual que la flora, se encuentra determinada por factores diversos del área de estudio como son: el tipo de suelo presente, la altitud, los recursos hídricos, el clima y la vegetación. La flora presente en la zona determina también el hábitat de muchas especies de animales nativos.

El matorral subinerme que se extiende en la región del área de estudio determina la fauna dominante constituida por: víbora de cascabel (*Crotalus durissus*), coyote (*Canis latrans*), liebre (*Lepus flavigularis*), tlacuache o marsupial (*Didelphis marsupialis*), tejón (*Nasua narica*), zorrillo (*Spilogale pygmaea*), mapache (*Procyon lotor*), ardilla gris (*Sciurus aureogaster*) y diversos reptiles del género *Podarcis*.

2.3.2.2 Fauna nociva.

La NOM-083-SEMARNAT-2003 define a la fauna nociva como el: “conjunto de especies animales potencialmente dañinas para la salud y los bienes, cuyo ciclo biológico se encuentra asociado a los residuos orgánicos”.

Dado que el sitio de estudio fue clausurado en el año 2013, la materia orgánica ya fue consumida y/o degradada. Los insectos descomponedores son escasos y ya no se observan perros o aves, sólo roedores.

Durante la operación del tiradero y del relleno sanitario, las poblaciones aledañas (como Manzanillas y San Pedro De Los Hernández), sufrieron problemas de salud por la proliferación de fauna nociva que fue atraída y se reproducía en el sitio, al haber residuos orgánicos en descomposición, provenientes de los RSU, pero también residuos provenientes del rastro municipal de Cerritos. Insectos como moscas, moscos, zancudos y cucarachas, se esparcieron por la zona de estudio. Jaurías y aves de rapiña como buitres, aguilillas y halcones fueron la fauna mayor que dominó en el tiradero, durante su operación, clausura y abandono, hasta que se terminó o degradó la materia orgánica existente.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS.

Los elementos físicos son la parte inanimada del ecosistema que proveen componentes necesarios para sostener a la biota en un ambiente natural.

En el caso de estudio, los elementos abióticos como el agua y aire han sido los medios principales para el transporte de sustancias y microorganismos no deseados, a partir de la fuente contaminante del sitio de disposición final de RSU.

El suelo puede ser el medio receptor principal de los contaminantes transportados y también la vía a través de la cual, éstos se integren a las cadenas alimenticias naturales o pasen a los vegetales y animales de los que el hombre y otros organismos se alimentarán más tarde.

En esta tesis de maestría, una parte central de la investigación descansa en el estudio del posible transporte de contaminantes a través de la escorrentía del agua de lluvia, de un arroyo intermitente, que atraviesa a un relleno sanitario clausurado y a su fosa de lixiviados. El conocimiento de las características geológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas son esenciales para la caracterización de la problemática ambiental.

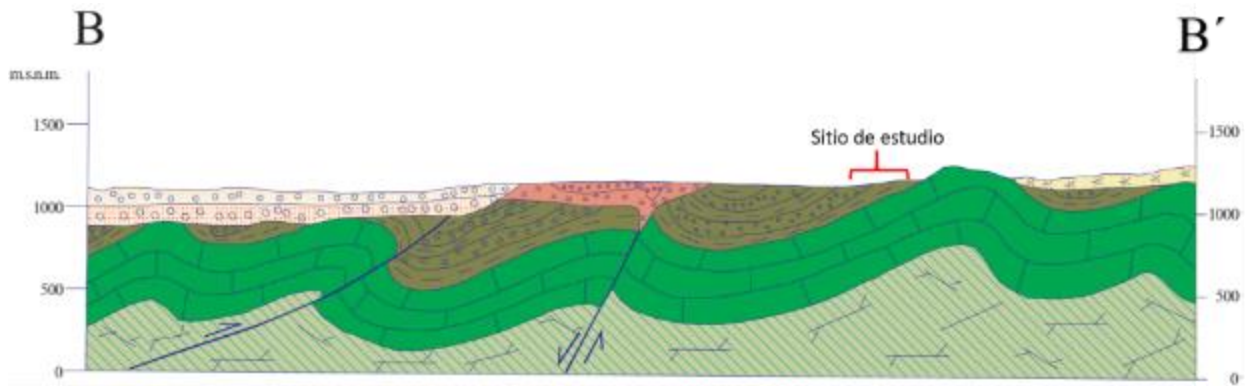


Figura 2.10 Sección geológica de B-B' (Modificado de SGM, 2006)

La Formación El Abra subyace concordantemente a la Formación Cárdenas. Ambas unidades están cubiertas por un conglomerado basal. La cima de la Formación Cárdenas generalmente está erosionada, y con frecuencia se halla cubierta discordantemente por sedimentos recientes (conglomerado y aluvión). Ocasionalmente es posible encontrar derrames ígneos, descansando sobre esta unidad litológica (Rocha-Rocha, 2008) (Figura 2.11).

A 150 m al SE del relleno sanitario, aflora una loma compuesta por calizas de la Formación El Abra, y se presenta como una secuencia calcárea de estratos gruesos con contenido abundante de biógenos (Figura 2.10). Ocasionalmente se presentan horizontes con nódulos y lentes de pedernal de color gris claro y morado oscuro, además de dolomitización y un notable fracturamiento estructural. El espesor de la Formación El Abra, medido y reportado sobre las diferentes localidades en las que ha sido motivo de estudio por distintos autores, fluctúa entre los 1100 m a 2720 m. A 100 m al sureste del sitio de estudio, se encuentran aflorando derrames riolíticos del oligoceno (Figura 2.10).

Sobreyaciendo a todas las unidades se encuentra un relleno de aluvión, que consiste en depósitos aluviales, coluviales, escombros y abanicos de material desintegrado de las rocas preexistentes y que están rellenando los sinclinales (Figura 2.10).

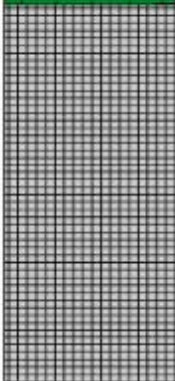
	KcmLu-Ar Lutita-Arenisca		Formación Cárdenas	Lutita color café con areniscas de estratificación delgada.	Cuaternario Superior-Campaniano
	KassCz Caliza		Formación El Abra	Calizas con abundantes fracturas e intercalaciones de lutitas. Son consideradas como un depósito lagunar o post-arrecife.	Cretacico Inferior
	KnapY-Ah Yeso-Anhidrita		Formación Guaxcamá	Secuencia evaporítica constituida por yeso y anhidrita.	Cretacico Inferior-Aptiano

Figura 2.11 Columna estratigráfica del sitio de estudio (Modificado de SGM, 2006).

2.4.2 **HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DEL ÁREA.**

El área de estudio está dentro de los límites administrativos del acuífero Cerritos-Villa Juárez, y a sus alrededores hay 5 cuerpos de agua, de los cuales 2 se encuentran directamente afectados. En cuanto a los afluentes, hay dos arroyos: uno al SE, conocido como Arroyo San Pedro, y otro al noreste, conocido como Arroyo Manzanillas; de este último, una ramificación atraviesa justo por la mitad el relleno sanitario (Figura 2.3). Tiene su vertiente en dos bordos: uno a 300 m y el otro a 2400 m aguas abajo. Ambos son de carácter intermitente y de gran caudal en temporada de lluvias (Figuras 2.12).

2.4.2.1 *Propiedades físicas de la cuenca hidrológica.*

Las propiedades físicas de una cuenca hidrológica tienen una relación estrecha con sus afluentes, el flujo del agua y el caudal que la atraviesan, por lo que es necesario especificar sus diferentes variables y delimitarlas, a través de un plano que muestre sus parteaguas (Tabla 2.1 y Figura 2.12).

En el caso de estudio de esta tesis es fundamental conocer las propiedades físicas de la cuenca hidrológica ya que su análisis permite conocer el alcance de agentes contaminantes transportados por el agua.

Tabla 2.1 Propiedades físicas principales de la cuenca hidrológica en donde se sitúa el relleno sanitario estudiado.

Propiedad	Valor
Cota de elevación máxima	1,341 m
Elevación media	1,229 m
Elevación mínima	1,117 m
Longitud del cauce	9,346 m
Pendiente media	2.3%
Área de drenaje	9.03 km ²

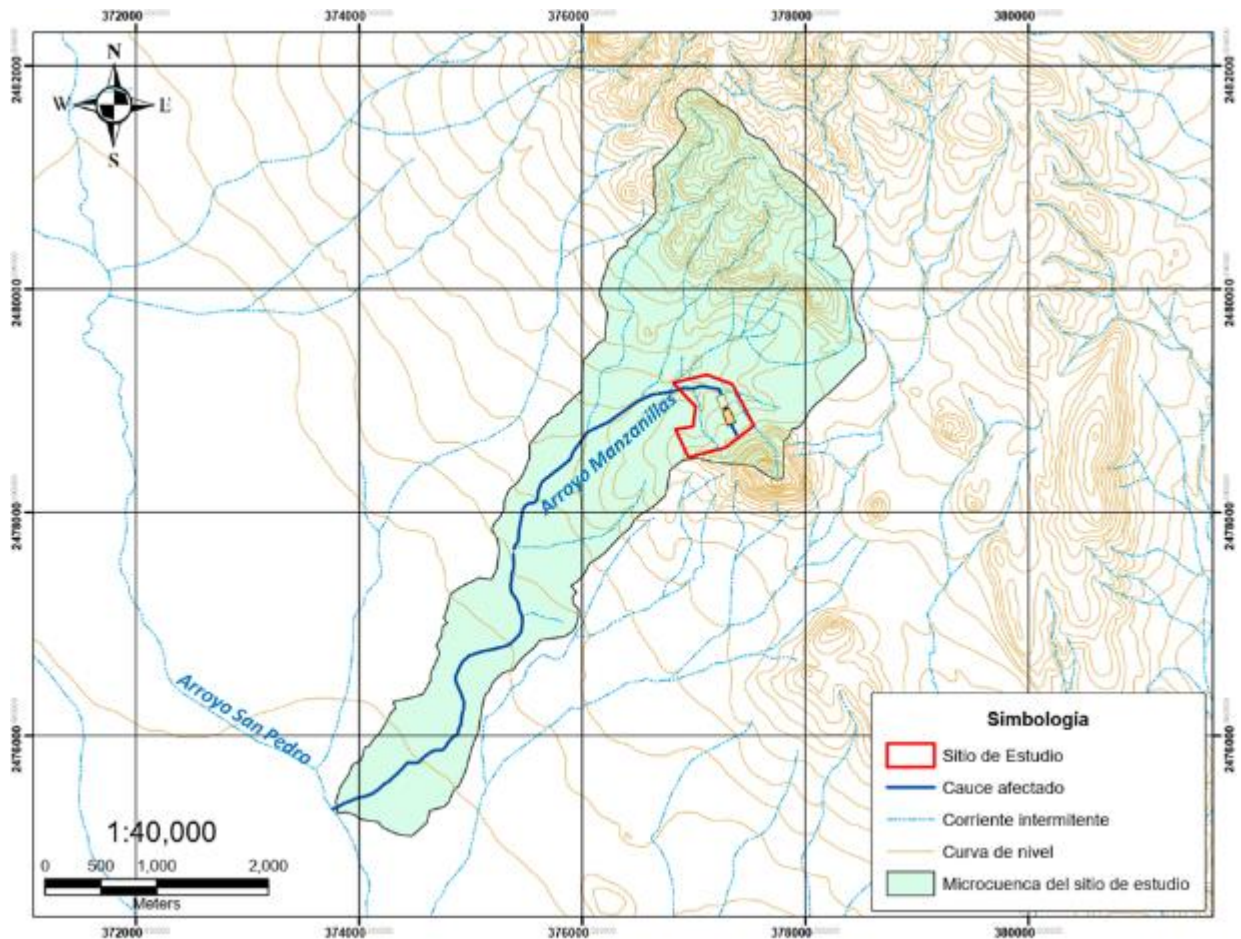


Figura 2.12 Cuenca del área de estudio en donde se encuentra el relleno sanitario (INEGI, 2016).

2.4.2.2 *Cuerpos de agua superficiales cercanos.*

Aguas abajo del sitio de estudio hay cinco cuerpos de agua superficiales, de los cuales dos tienen relación directa con el cauce principal del arroyo que atraviesa el relleno sanitario estudiado. Éstos son de carácter intermitente y al igual que los afluentes, tienen almacenamiento de agua en temporada de lluvia y tienden a secarse en verano. El primero (bordo 1) se encuentra a 0.3 km y el segundo (bordo 2) a 2.4 km del sitio de estudio (Figura 2.13). El agua almacenada en ellos se utiliza principalmente para el consumo de ganado caprino, ovino y bovino, que pastorea en la zona de las comunidades cercanas.



Figura 2.13 Cuerpos de agua superficiales (INEGI, 2016).

2.4.3 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA.

En cuanto al agua subterránea, el 13 de diciembre de 2017, las poblaciones vecinas al sitio de estudio y las autoridades municipales realizaron una solicitud ante la Comisión Nacional del Agua, para obtener los datos respecto al nivel estático y a la dirección de flujo. La dependencia entregó un mapa de ubicación del área del relleno sanitario con la ubicación de los aprovechamientos subterráneos y las líneas de flujo subterráneo (Figura 2.14). También proporcionó las isolíneas del nivel estático, y los datos de los puntos en los que se encuentran los pozos en el área, estos archivos en formato SHP.

A partir de la información anterior se determinó que el nivel estático en el área de estudio se encuentra entre los 1104 m.s.n.m. y 1096 m.s.n.m., y que la dirección del flujo subterráneo es SE 45°.

En general, el uso que se da al agua subterránea extraída en las inmediaciones es para fines de riego agrícola y doméstico. Los pozos más próximos al sitio de disposición final de RSU clausurado son un total de cuatro. El más cercano es el pozo 1 que se encuentra aguas arriba del acuífero, a 3 km, al oeste del sitio, un paradero conocido como Las Maravillas (Figura 2.14).

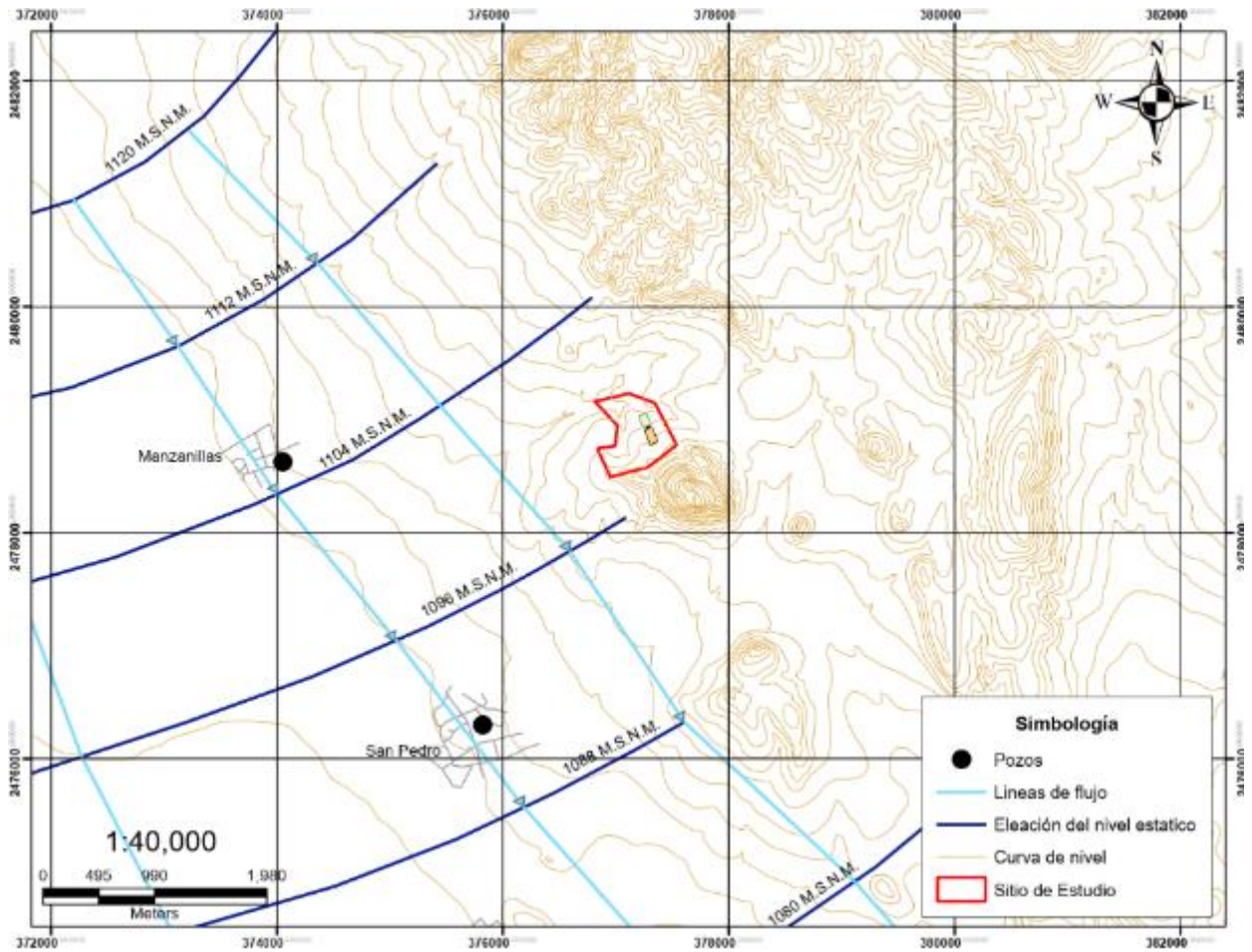


Figura 2.14 Hidrología subterránea del sitio de estudio. Pozos cercanos, elevación del nivel estático y dirección de flujo del acuífero (CONAGUA, 2008).

2.4.4 GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA.

El sitio de estudio se encuentra en la ladera noroccidental de un conjunto de lomeríos suaves, agrupados al sur, en el pie de la sierra conocida como: “El Rincón”. Esta serranía tiene una orientación de sureste a noroeste, con altitudes que van de los 1030 a los 1660 m.s.n.m. Su estado geomorfológico se considera de juventud avanzada (Figura 2.15).

Al sureste del sitio de disposición final se encuentra una elevación, denominada por los habitantes como “Loma Verde”, la cual tiene una altitud que va de los 1187 a los 1345 m.s.n.m. En la misma dirección se encuentra un cerro pequeño llamado “Cerro de San Pedro” que tiene una altitud que va de los 1187 a los 1266 m.s.n.m.

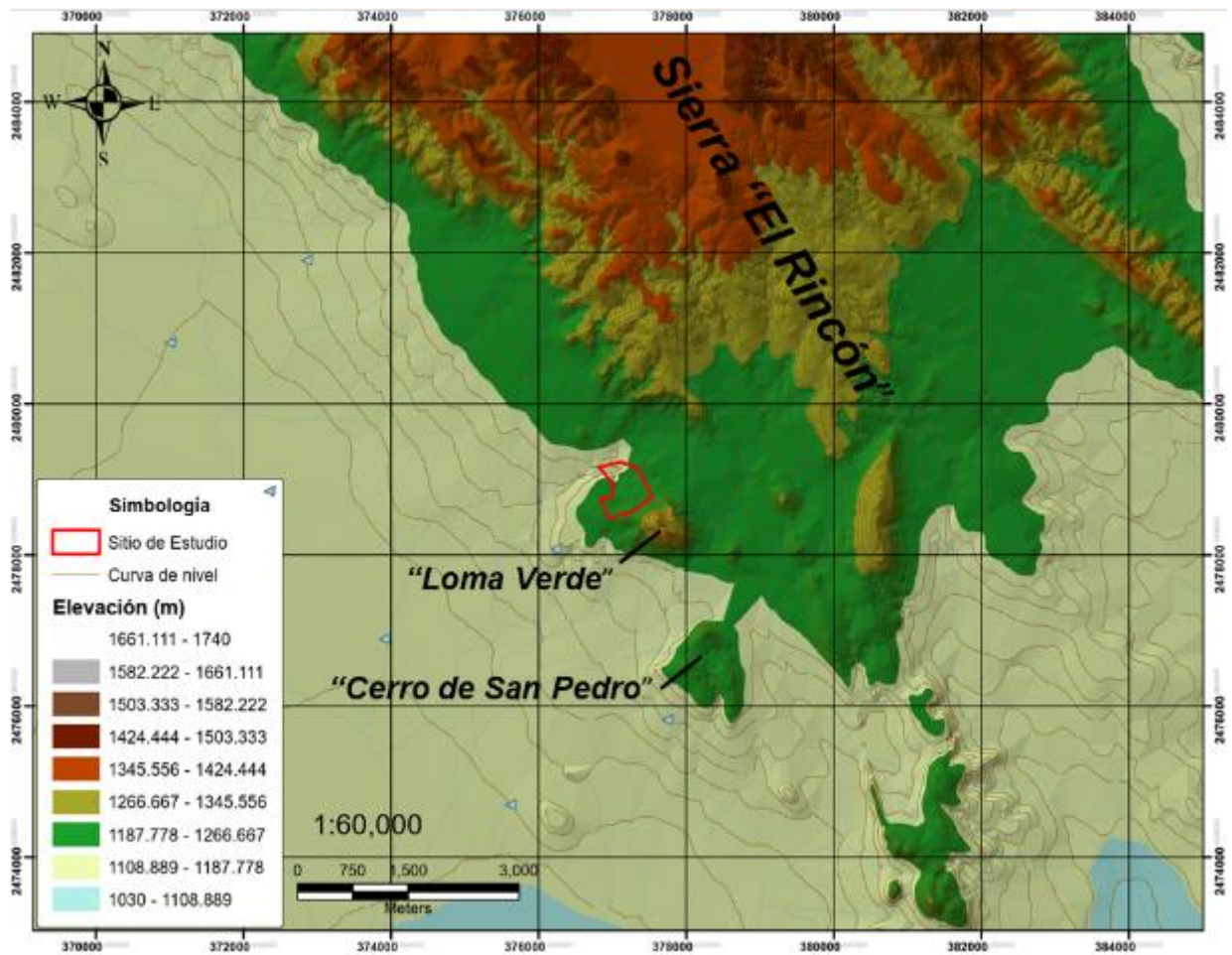


Figura 2.15 Topografía del área de estudio (INEGI, 2014).

2.4.5 EDAFOLOGÍA.

En la parte centro oriental del sitio de estudio se encuentra una capa de Kastañozem cálcico de más de 15 cm de espesor, con concentraciones de carbonatos secundarios, de color pardo oscuro, debido al alto contenido de materia orgánica. Se compone por un rango amplio de materiales no consolidados (Figura 2.16).

En la parte norte del área también se encuentra litosol, que se caracteriza por tener un espesor menor de 10 cm, y que descansa sobre un estrato de alta dureza. Así mismo, se halla un vertisol pélico con un suelo muy arcilloso.

En la parte oeste aflora abundantemente un xerosol gypsico, que es común en zonas áridas o semiáridas y que presenta una capa de yeso acumulado.

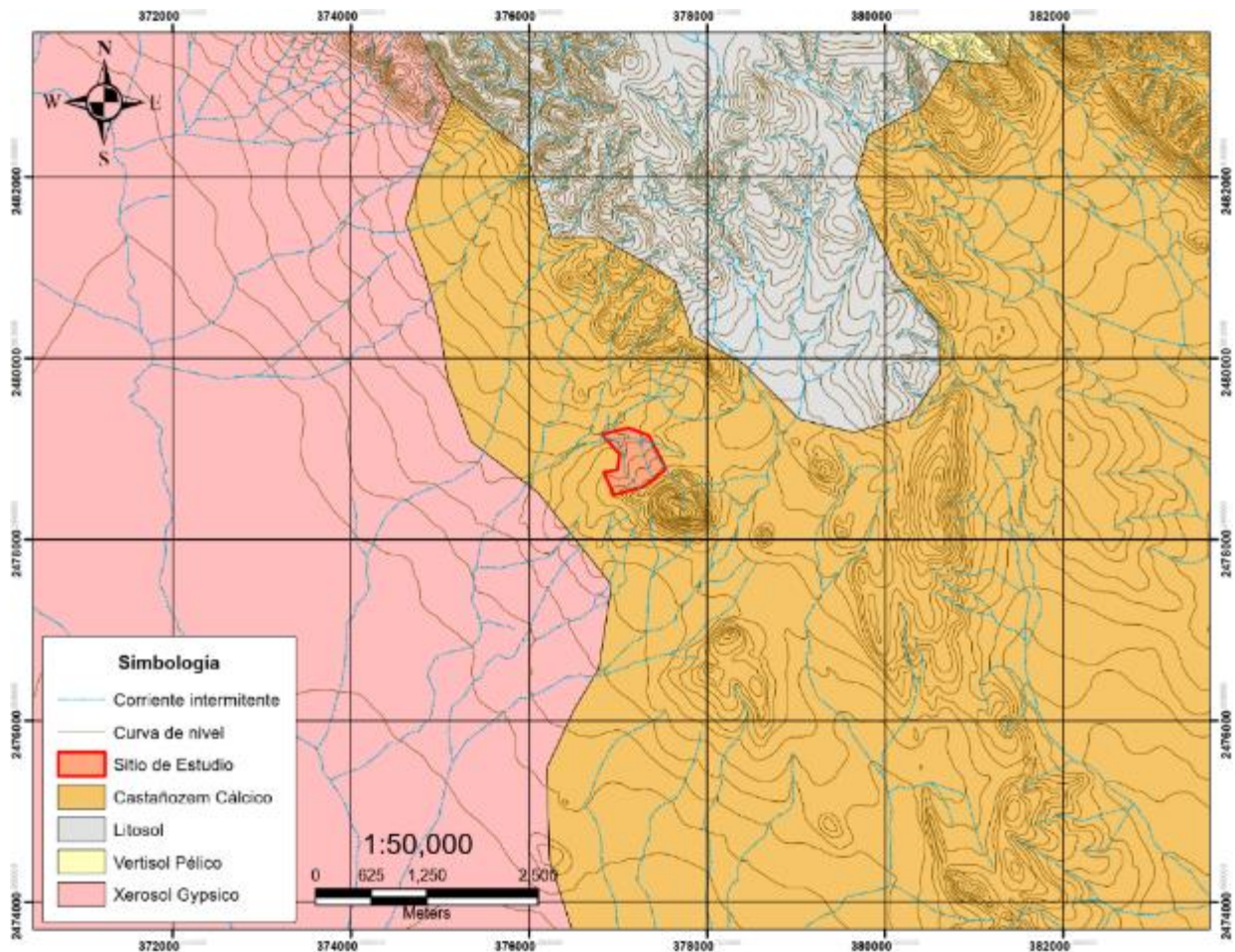


Figura 2.16 Plano edafológico del sitio de estudio (INEGI, 2014).

2.4.6 CLIMA.

De acuerdo con información proporcionada por el INEGI, la zona se caracteriza por tener un clima cálido a semicálido subhúmedo. Esto concuerda con los resultados de los análisis realizados con los datos de precipitación y temperatura, obtenidos de la estación meteorológica del municipio de Cerritos.

2.4.6.1 Climograma local.

En el municipio de Cerritos, S.L.P., en las coordenadas 22.4319° N de latitud, 100.2711° W de longitud y a 1250 m de altitud, desde 1960, se encuentra una estación meteorológica administrada por la Comisión Nacional del Agua. Los datos disponibles, de dominio público, abarcan un periodo del año 1962 al año 2015.

Para la elaboración del climograma local se tomaron los datos de los últimos 30 años disponibles (1975 – 2015) por ser los más consistentes y uniformes en el registro. El promedio de la temperatura media anual obtenido fue de 19.8° C; mientras que el promedio de precipitación total media anual fue de 617.7 mm. La figura 2.17 muestra que las temperaturas máximas se registran en el mes de junio, disminuyen en julio y vuelven a aumentar en agosto. Las precipitaciones suelen aumentar de manera progresiva en los meses de abril a julio y registran su máximo en este último mes; luego disminuyen en el mes de agosto y vuelven a aumentar considerablemente en el mes de septiembre.

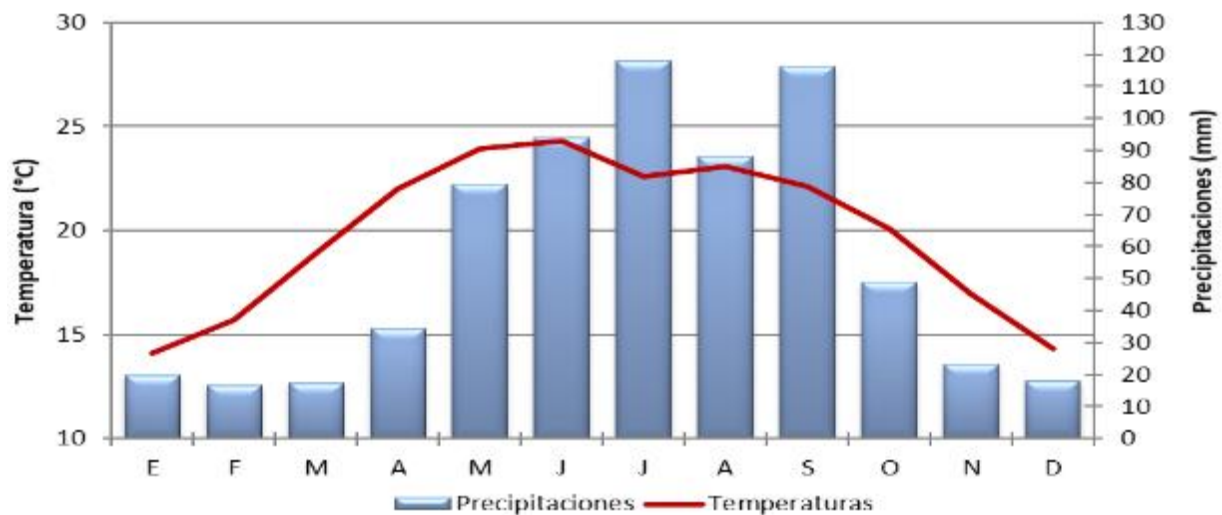


Figura 2.17 Climograma local del sitio de estudio, municipio de Cerritos, S.L.P.

2.4.6.2 Índice de Martonne.

Para llevar a cabo estudios hidrológicos, el geógrafo francés Martonne estableció el llamado índice de aridez. Este índice bioclimático clasifica el grado de aridez de un sitio, de acuerdo con rangos ya definidos (Tabla 2.2), permitiendo plantear una relación posterior con la desertificación del suelo. Se representa por la ecuación 2.1:

$$IM = \frac{pp}{t + 10}$$

Ecuación 2.1

Donde:

pp = Precipitación media anual (mm)

t = temperatura media anual (°C)

Sustituyendo con los valores dados para la zona de estudio:

$$IM = \frac{617.7 \text{ mm}}{19.8^\circ \text{C} + 10}$$

$$IM = 20.7$$

Tabla 2.2 Rangos de clasificación del Índice de Martonne.

I_M	Clima
$I_M > 60$	Per-húmedo
60-31	Húmedo
30-21	Subhúmedo
20-15	Semiárido
15-6	Árido
5-0	Árido extremo

El índice de Martonne para la zona de estudio resultó en un cociente de 20.72, por lo tanto, se clasifica como un clima semiárido.

2.4.6.3 Índice de Dantín-Revenge.

El índice de Dantin-Revenge (Tabla 2.3) sirve también para clasificar el clima local de un sitio, basándose en la temperatura promedio anual y en la precipitación promedio total de un sitio. Se define de la ecuación 2.2:

$$IDR = \frac{100 * T}{P}$$

Ecuación 2.2

Donde:

T = Temperatura promedio anual ($^\circ\text{C}$)

P = Promedio de la precipitación anual total (mm)

Sustituyendo con los valores dados para la zona de estudio:

$$IDR = \frac{100 * 19.8^\circ\text{C}}{617.7 \text{ mm}}$$
$$IDR = 3.2$$

Tabla 2.3 Rangos de clasificación para el índice de Dantin-Revenge

IDR	Clima
IDR>4	Árido
2.1-4	Semiárido
0-2	Húmedo y Subhúmedo

El índice de Dantin-Revenge para la zona de estudio resultó en un cociente de 3.2, por lo tanto, le corresponde un clima semiárido.

2.5 CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS LEGALES LOCALES APLICABLES.

Con el objeto de identificar aspectos legales aplicables, relacionados con la disposición final de los RSU en los ámbitos estatal y municipal, a continuación, se indica lo señalado en la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí, el Reglamento de Ecología y el Bando de Policía y Buen Gobierno del municipio de Cerritos.

2.5.1 LEY AMBIENTAL DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.

La Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí en su artículo 91, establece que para prevenir la contaminación del suelo y subsuelo es responsabilidad de la Secretaría ambiental estatal, en conjunto con las autoridades municipales, evitar la acumulación, depósito e infiltración de residuos o sustancias en el suelo o subsuelo que no sean tratadas de manera adecuada para evitar su contaminación y que los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, reciclaje, tratamiento y disposición final de los RSU, funcionen de acuerdo a los lineamientos emitidos por las autoridades municipales y la normatividad ambiental correspondiente.

A su vez, el artículo 103 indica que es responsabilidad de la Secretaría estatal, la regulación, selección y autorización de los sitios aptos para la disposición final de residuos sólidos urbanos. También faculta a la Secretaría para supervisar, vigilar y dar la sanción correspondiente por el depósito de residuos de particulares en la vía pública, terrenos baldíos y áreas verdes.

El artículo 106 ordena que los terrenos que pretendan utilizarse como sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, deben apegarse a la normatividad ambiental correspondiente (de nivel federal) y a los planes de desarrollo urbano estatales y municipales. En la misma corriente, el artículo 107 prohíbe la habilitación de tiraderos de residuos a cielo abierto, así como su incineración en terrenos baldíos y áreas verdes.

2.5.2 *REGLAMENTO PARA LA PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGÍA MUNICIPAL.*

A nivel local, el H. Ayuntamiento de Cerritos, San Luis Potosí tiene un Reglamento para la Protección al Medio Ambiente y Ecología Municipal que, en su artículo 11, marca la responsabilidad de la autoridad municipal de establecer los criterios y medidas necesarias para regular y controlar los residuos sólidos urbanos.

En su artículo 47 indica que la protección del suelo contra la contaminación por agentes externos de origen humano corresponde al Ayuntamiento por medio de la Dirección de Ecología. Para cumplirlo, ejecutará las actividades siguientes:

- a) Formular políticas municipales en materia de prevención y control de la contaminación del suelo.
- b) Operar o concesionar el servicio municipal de recolección de residuos.
- c) Integrar y actualizar el Registro Municipal de Generadores de Residuos Sólidos.
- d) Prevenir que los residuos sólidos de cualquier procedencia y sus contaminantes se acumulen, depositen o infiltren en el suelo o subsuelo.

De manera similar, el artículo 49 indica que, dentro de la jurisdicción del municipio, las industrias serán responsables de la gestión de sus residuos y de los daños que pudiesen ocasionar a la salud, al ambiente o al paisaje.

2.5.3 BANDO DE POLICÍA Y BUEN GOBIERNO.

El municipio de cerritos, S.L.P., cuenta con un Bando de Policía y Buen Gobierno en el cual, su artículo 59 indica que es obligación de los vecinos y habitantes del municipio recolectar los residuos de basura generados en los edificios, casas y frentes de esto, entregándolos al servicio de limpia. Queda prohibido el depósito de basura en la vía pública.

En el artículo 60 indica que se sancionará a las personas físicas o morales que descarguen residuos con contaminantes y que dañen la salud de las personas, la flora, la fauna o los bienes, en ríos, cuencas, vados y demás corrientes de agua.

3. *MODELOS DE TRANSPORTE HÍDRICO Y MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELO Y AGUA.*

Dado el incremento del consumo de agua por la población creciente en el planeta y la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en los últimos años se ha acentuado la preocupación por el cuidado de los recursos hídricos.

La representación numérica de un sistema de flujo hídrico (a través de modelos hidrodinámicos) permite una comprensión más amplia del transporte de contaminantes en un sistema natural. Los modelos son pues una herramienta poderosa que permite, entre otros, identificar fuentes contaminantes o las posibles concentraciones de éstos en diferentes sitios, luego de que son arrastrados, disueltos y/o depositados por las corrientes de aguas superficiales o subterráneas.

En este capítulo se presenta la parte teórica de los modelos hidrodinámicos, que comprende: los principios matemáticos, las ecuaciones gobernantes de su funcionamiento y los fundamentos hidrológicos en cuerpos de agua superficiales de tipo meándricos. Se aborda también el tema de la normatividad aplicable a la calidad ambiental del agua y el suelo. Estos contenidos permitirán una mejor comprensión de los estudios técnicos que se exponen en los capítulos 4 al 6.

3.1 *MODELADO HIDRODINÁMICO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.*

La modelación hidrodinámica es una herramienta que brinda información cualitativa y/o cuantitativa y puntual sobre el comportamiento de un cuerpo de agua superficial (un río, un lago, una represa). Los modelos numéricos predicen el comportamiento del flujo hidrodinámico y proporcionan información de variables como: la forma y profundidad de la lámina de agua, la concentración de contaminantes, etc.

3.1.1 *ANTECEDENTES.*

La hidrodinámica estudia el movimiento de los fluidos incompresibles como el agua. Las variables principales que considera son: la velocidad, presión, flujo y gasto (Del Ángel,

2004). La hidrodinámica considera también los mecanismos mediante los cuales se da el transporte de sedimentos en el agua, y con ellos el movimiento de contaminantes (Zheng-Gang Ji, 2008).

3.1.2 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS.

El esquema numérico que se emplea para la solución de las ecuaciones de movimiento, como fundamento matemático de la modelación hidrodinámica, se utilizan las ecuaciones de mecánica de fluidos, propuestas por George Stokes y Claude Navier, mejor conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Éstas determinan el movimiento futuro de un fluido, a partir de su estado inicial (Mora, 2017).

Las ecuaciones de Navier-Stokes toman en cuenta las leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento; constituyen así un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales en tres dimensiones (Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3). A continuación, se presentan estas ecuaciones y modelos numéricos modificados por Robles-Aguilar (2018).

Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= 1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= 1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v - f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= 1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - \frac{\rho}{\rho_0} g\end{aligned}$$

Donde:

u = Componente de velocidad x (m/s)

v = Componente de velocidad y (m/s)

w = Componente de velocidad z (m/s)

ρ = Densidad (g/cm³)

ρ_0 = Densidad de referencia (ρ_{Agua})

p = Presión (atm)

ν = Viscosidad cinemática (Stoke)

f_x y f_y = Componentes de fuerza del efecto Coriolis (N)

Un flujo turbulento genera comportamiento errático de la fluctuación, por lo que es necesario simplificar las expresiones anteriores con un promedio, según se indica en la Ecuación 3.4.

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) dt$$

Ecuación 3.4

La ecuación promediada 3.4 se sustituye en las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, dando como resultado las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7:

Ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial u' u'}{\partial x} + \frac{\partial u' v'}{\partial y} + \frac{\partial u' w'}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{f}_x \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial v' u'}{\partial x} + \frac{\partial v' v'}{\partial y} + \frac{\partial v' w'}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \bar{f}_y \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial w' u'}{\partial x} + \frac{\partial w' v'}{\partial y} + \frac{\partial w' w'}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_0} g \end{aligned}$$

Estos términos con variables promedio de Reynolds son conocidas como “RANS”, por su acrónimo en inglés (Reynolds Averaged Navier Stokes). Las correlaciones son los llamados esfuerzos de Reynolds; responsables de la pérdida de *momentum* en la dirección del flujo. Éstos se expresan por la ecuación 3.8.

$$\overline{u'v'} = -v_t \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)$$

Ecuación 3.8

Donde v_t = Viscosidad turbulenta (m^2/s)

Ahora bien, en el caso del estudio de la dinámica de las aguas superficiales, se considera que el flujo del agua en el sentido de las “x” es mucho mayor que el que se presenta en las direcciones “y” y “z”, por lo que estos últimos pueden ser despreciables.

Por otra parte, la integración de la ecuación en la que se da una distribución en la presión hidrostática se expresa por la Ecuación 3.9.

$$\bar{p}(x, y, z, t) = g \int_z^\eta \rho dz + p_a$$

Ecuación 3.9

Donde:

$\eta = \eta(x, y, z, t)$ se trata del nivel de la superficie libre con $z=0$

P_a = Presión atmosférica (*atm*)

Si la ecuación 3.9 se sustituye en la ecuación 3.5 en su termino de presión, se obtiene la ecuación 3.10:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

Ecuación 3.10

Si las ecuaciones 3.8 y 3.9 se sustituyen en las expresiones 3.5 y 3.6, a densidad constante y sin considerar el gradiente de presión atmosférica, se obtienen las ecuaciones 3.11 y 3.12:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_v + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t^H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_u + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t^H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Ecuaciones 3.11 y 3.12

Donde:

$f_u = 2\Omega \sin(\Phi)$

Ω = Velocidad angular de la Tierra (*rad/s*)

Φ = Altitud (*m*)

El sistema de ecuaciones de aguas superficiales 3.11 y 3.12 no tienen soluciones analíticas, por lo que se usan aproximaciones numéricas para su solución.

Estas ecuaciones son la base de los modelos matemáticos que estiman la hidrodinámica del transporte de los contaminantes. El modelo utilizado en esta tesis (capítulo 4) tiene como sustento teórico, la solución numérica de estas ecuaciones, que son aplicables a cuerpos de agua superficiales de tipo perenne o intermitente.

3.1.3 FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS.

Según Batalla y Sala (1994), la hidrogeología de un lugar está dominada por la dinámica de flujo de las corrientes de agua que, a su vez, dependen de las características siguientes:

- a) *Longitud del canal*: Es la distancia que mide el afluente estudiado desde su inicio hasta su desembocadura y/o unión con un afluente adyacente, formando uno de mayor grado.
- b) *Pendiente de canal*: Son los metros de altura desde un punto de referencia del canal (por lo general el punto más bajo), por metro de longitud del canal. Suele expresarse en porcentaje.
- c) *Densidad de drenaje*: Es la cantidad de afluentes dentro de la cuenca del sitio de estudio.
- d) *Sección transversal*: Incluye las medidas de ancho, altura y perímetro de una sección transversal en un punto del afluente, además del área transversal de la posible superficie de inundación.
- e) *Forma en planta del afluente*: La forma en planta del afluente es la forma de los meandros desde una vista superior y hace posible identificar los sitios con mayor deposición de sedimentos.

Estas características de las cuencas hidrológicas son de suma importancia porque de ellas depende la tasa de erosión y la tasa de transporte y deposición de sedimentos, aguas abajo en un medio fluvial.

3.1.3.1 Sistemas fluviales.

El movimiento del agua en un sistema fluvial es indispensable ya que es el medio que provee el trabajo mecánico para que partículas de sedimentos, incluyendo posibles contaminantes, sean transportadas a lo largo del canal fluvial estudiado.

En los estudios de evaluación ambiental, la dinámica que predomina en los procesos de transporte de sedimentos en sistemas fluviales es muy importante, ya que es el agente principal de retención y transporte de contaminantes. De acuerdo con Wolman y Miller (1960), el transporte de sedimentos en un medio fluvial está determinado por dos factores: la magnitud del cauce y su frecuencia de ocurrencia. El lecho de corrientes de

aguas superficiales puede ser el receptáculo principal de contaminantes que son depositados con los sedimentos transportados por las corrientes fluviales naturales.

3.1.3.1.1 Cauces meándricos y depósito de sedimentos y contaminantes.

Los cauces meándricos tienen una configuración sinuosa en su recorrido; vista en planta, se trata de una serie de tramos curvos unidos por tramos relativamente rectos y cortos (Figura 3.1). La longitud total de un cauce meándrico puede ser de decenas de metros a kilómetros.

En el curso medio de los cauces, el mecanismo de depósito de sedimentos se da cuando el flujo rectilíneo de agua de mayor velocidad es interceptado de manera perpendicular con la curva externa del cauce; de esta manera, la energía mecánica del flujo es concentrada en zonas de erosión que provocan cárcavas. La deposición de sedimentos y de las posibles partículas de contaminantes que han sido arrastradas por el flujo de agua se da en el ángulo interno de los codos del cauce, lejos de las zonas de erosión y de mayor energía.

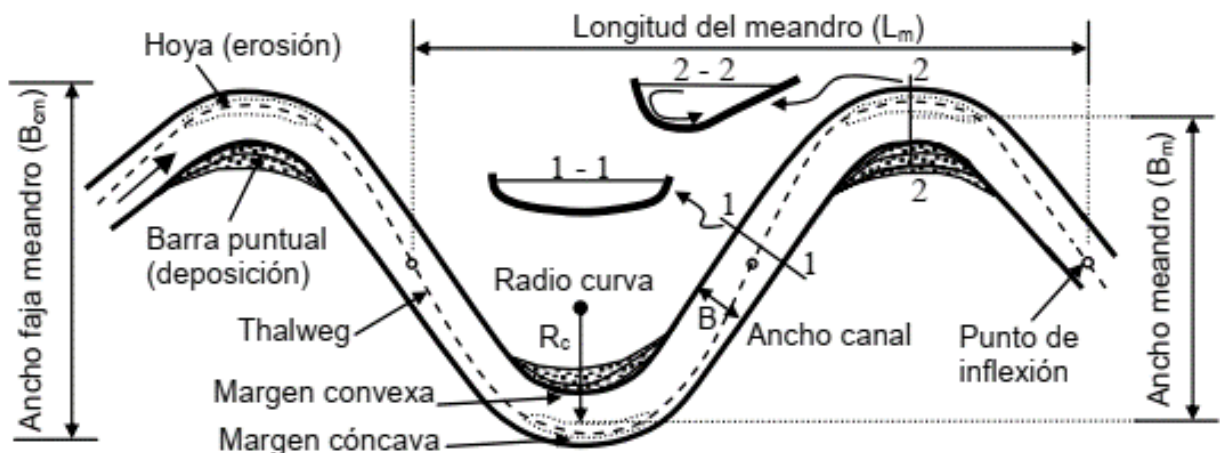


Figura 3.1 Esquema de un meandro (Wolman y Miller, 1960).

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS HIDRODINÁMICOS.

De acuerdo con Rangel (2016), un modelo hidrodinámico es un conjunto de conceptos y ecuaciones que representan una aproximación del comportamiento dinámico de un sistema fluvial. Este tipo de modelos pueden simular posibles escenarios futuros, para la toma de decisiones en diferentes áreas del conocimiento; por ejemplo: la identificación de la amplitud, longitud y profundidad de cauces para determinar zonas de inundación, de depósito de sedimentos, etc.

Los modelos hidrodinámicos pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, y se les pueden agregar variables que representen: 1) elementos o partículas contaminantes para predecir su dispersión en un cuerpo de agua superficial o subterráneo; o 2) propiedades fisicoquímicas del agua, para determinar su evolución espacial, etc.

3.2.1 TIPOS DE MODELOS HIDRODINÁMICOS.

De acuerdo con sus características, los modelos hidrodinámicos se pueden agrupar en cuatro tipos (Sámano, 2011):

- a) *Modelos de escritorio*: Son los de menor complejidad; calculan condiciones de movimiento e incluso concentraciones de contaminantes, a partir en un estado estacionario.
- b) *Modelos estacionarios*: Su red de trabajo se basa en cajas o compartimentos de procesamiento y se caracterizan por su complejidad de nivel medio.
- c) *Modelos dinámicos unidimensionales*: Su característica principal es la capacidad para realizar simulaciones de variaciones de niveles y velocidades de marea.
- d) *Modelos dinámicos bidimensionales y tridimensionales*: Son los modelos de mayor complejidad, pero de mayor realismo para el estudio de medios fluviales; se pueden simular fenómenos físicos y químicos como: mezclas, dispersiones, disoluciones, reacciones químicas, etc.

De acuerdo con el método numérico utilizado para resolver las ecuaciones gobernantes, los modelos hidrodinámicos pueden ser de tres tipos:

- a) *Modelos de diferencias finitas*: Son aquéllos en los que la malla de cálculo tiene celdas de las mismas dimensiones. Si se requiere de una precisión mayor, el tamaño de la malla en el área de interés debe disminuirse. De este modo, se resuelven primero las zonas con celdas de mayor dimensión y posteriormente las celdas de tamaño menor; es decir, de mayor resolución.
- b) *Modelos de elementos finitos*: Estos modelos subdividen el área de interés en una malla de triángulos de distinta forma y tamaño, por lo que pueden seguir la forma del cauce fluvial con su batimetría, y proporcionan una exactitud mayor en las zonas con más energía hidrodinámica. Estos modelos son usados ampliamente para describir la hidrodinámica en zonas costeras y lagunares.
- c) *Modelos de volúmenes finitos*: En estos modelos se realiza un proceso de discretización que integra una ecuación diferencial sobre un volumen finito; es decir, un intervalo definido que depende de la malla y del sistema de coordenadas empleado.

3.2.2 SOFTWARES PARA EL MODELADO HIDRODINÁMICO.

Existen dos tipos de softwares para realizar el modelado hidrodinámico: el de licencia comercial y el de licencia de dominio público o de uso libre. A continuación, se señalan las características principales de ambos:

Softwares de licencia comercial:

MIKE 21 (Instituto Hidráulico Danés): Este modelo se utiliza para simular procesos físicos, químicos y biológicos en áreas de costa. Se aplica en la evaluación de diseños para estructuras y obras de ingeniería civil, en regiones costeras y marítimas (MIKE Powered by DHI, 2018).

DELFT 3D (Instituto Independiente DELTARES de Holanda): Este modelo emplea un conjunto de modelos numéricos para la simulación de flujo de agua, transporte de

sedimentos y calidad del agua en ambientes estacionarios y no estacionarios como zonas costeras, lagos y ríos.

RMA-4 (Ingenieros de Estados Unidos, King, Water Resources Engineers). Se aplica al modelado del transporte de contaminantes e intrusiones salinas en acuíferos.

Softwares de licencia de uso libre:

1. *FVCOM*: Es un modelo de volúmenes finitos que simula la circulación de cuerpos de agua de superficies libres (zonas costeras y oceánicas), a partir de las ecuaciones primitivas tridimensionales (Ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3).
2. *EFDC Explorer*: Este modelo fue desarrollado por el Instituto de Ciencias Marinas de Virginia y finalmente adoptado y financiado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Este modelo puede adaptarse a distintos tipos de estudios en cuerpos de agua estacionarios y no estacionarios.
3. *MOHID*: Se trata de un software que utiliza modelos numéricos tridimensionales para simular el movimiento de cuerpos de agua en superficie. Se aplica a zonas costeras y estuarios. Tiene un módulo para la simulación de la calidad del agua (*MOHID Water Modeling System*, 2018).

En el desarrollo de la investigación se seleccionó el modelo *Environmental Fluid Dynamics Code* (EFDC) por su robustez numérica, la disponibilidad de los datos de entrada que requiere, y su alto rendimiento computacional, que se adapta al hardware disponible (Torres-Bejarano *et al*, 2016).

3.2.3 CALIBRACIÓN DE UN MODELO.

La calibración de un modelo tiene por objeto reproducir el movimiento de la masa acuosa, mediante la variación de los valores de los parámetros físicos considerados (dentro de rangos aceptables), de acuerdo con los elementos ambientales de cada sitio de estudio. Los resultados del modelo, calculados para diferentes puntos seleccionados, se comparan con los valores medidos de diferentes parámetros físicos en esos puntos,

procurando la mejor representatividad posible del fenómeno simulado (Palacio *et al*, 2010).

3.3 *NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL AGUA.*

Los parámetros de calidad del agua y sus valores máximos permisibles se señalan en las normas indicadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Normatividad aplicable a la calidad del agua.

Norma	Aplicación
NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público.
NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

3.3.1 *PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA DE DESCARGA.*

Algunos de los parámetros utilizados para determinar la calidad del agua son los siguientes:

1. *Conductividad*: El agua de alta pureza no es conductora de electricidad, por tanto, presenta una alta conductividad cuando disuelve compuestos iónicos.
2. *pH*: Este parámetro mide la concentración de iones hidrógeno en el agua. Por sí mismo no es un contaminante, pero sí es una variable que indica el rango de acidez

o alcalinidad que tiene el agua y dependiendo de éste, afectará la interacción que tendrán entre sí, otras moléculas y compuestos orgánicos e inorgánicos.

3. *Temperatura*: Indica la cantidad de energía calórica que tiene el agua. La variación en la temperatura afecta la cinética de la reacción de algunos compuestos orgánicos e inorgánicos. De igual manera, afecta el desarrollo de microorganismos.
4. *Oxígeno disuelto*: Es un parámetro que indica si el desarrollo de las distintas formas de vida es posible o no. Se considera un elemento soluble en agua que depende de factores como la desoxigenación atmosférica, demanda bioquímica, etc.
5. *Alcalinidad total*: Es la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos. La alcalinidad es necesaria para conocer la capacidad de un cuerpo de agua para mantener procesos biológicos.

Los valores de los parámetros contenidos en esta norma pueden usarse como referencia para compararlos con los que se observan en los lixiviados de un sitio de disposición final de RSU, a fin de identificar sus posibles efectos contaminantes, en caso de entrar en contacto con el suelo o cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

3.4 EL SUELO Y SU COMPOSICIÓN.

A lo largo de la historia, la definición de suelo ha tenido varios matices, dependiendo del autor, la época y la rama de la ciencia que se encargue de estudiarlo. Así, desde el punto de vista de la agricultura, su definición tendrá un enfoque distinto que, en los casos de la geología, la construcción, la química e inclusive, la antropología y la arqueología. Sin embargo, se puede acotar la definición a la propuesta por Tarbuck y Lutgens (1999), en la que indican que el suelo es una interfase en la que interactúa la biosfera en conjunto con la litosfera y la hidrosfera. Por tanto, se le considera un lugar en constante cambio y sensible a cualquier alteración en su entorno.

Una de las características del suelo es su porosidad, que corresponde a los espacios que quedan entre la fase sólida del suelo y que están ocupados por gases y líquidos. El volumen de estas fases es directamente proporcional al volumen total de los poros. En términos generales, se puede decir que, a mayor contenido de partículas limosas y arcillosas, menor será el tamaño de los poros (Hernández *et al*, 2008).

La composición del suelo dependerá de los elementos de cada una de sus fases y a su vez, éstas dependerán de su ubicación geográfica, geología local, material parental, clima, etc. Sin embargo, se puede hablar de valores típicos de referencia, propuestos para cada una de las fases:

1. **Fase Sólida.** Está compuesta en su mayoría por partículas inorgánicas (minerales provenientes de rocas parentales) y por partículas orgánicas. En general, el componente inorgánico de un suelo representa el 90%, y el componente orgánico el 10% restante.

En la parte inorgánica, el grupo más importante de minerales que componen el suelo son los silicatos; los cuales están constituidos por una unidad estructural común, que es el Si-O. El silicato que se forma depende del número de átomos de oxígeno que se acoplan al silicio (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Tipos de silicatos, su fórmula general y mineral formador.

Tipo de silicato	Fórmula general	Mineral formado
Nesosilicato	SiO ₄	Olivino, circón, granate.
Sorosilicato	SiO ₇	Epidota
Ciclosilicato	SiO ₃	Turmalina y berilio
Inosilicato	Si ₄ O ₁₁	Piroxenos y anfíboles
Filosilicato	Si ₄ O ₁₀	Micas, clorita, caolinita
Tectosilicato	SiO ₂	Feldespatos (Ortoclases y plagioclasas)

El componente orgánico en los suelos está formado por un 95% de materia orgánica inerte y un 5% de organismos vivos (principalmente algas, bacterias, hongos, protozoos, nemátodos, etc.).

2. **Fase líquida:** Está compuesta por agua y solutos. Adquiere los iones en disolución que provienen de los minerales de la fase sólida. Su composición y concentración de iones será variable, dependiendo de los cambios en la precipitación local, la temperatura, la humedad del ambiente y la actividad biótica. En términos generales, se puede decir que la concentración de los iones se diluirá y será menor en los periodos húmedos (debido a las precipitaciones pluviales) y aumentará en la temporada de sequía. En esta fase predominan los iones Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Si⁴⁺, F⁻, NH⁴⁺, NO³⁻, NO²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, HPO₄²⁻, H₂PO₄⁻, y en menores cantidades Al³⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺ y As³⁺ y ⁵⁺. Respecto a los componentes orgánicos, se encuentran

disueltos: polisacáridos, monosacáridos, ácidos orgánicos, bencenos, aldehídos, polifenoles y aminoácidos.

3. Fase gaseosa: Está formada por compuestos gaseosos importantes para la respiración de los organismos aerobios; además de ser responsable de las reacciones de oxidación que se dan en ella. Se encuentra en los poros formados por la fase sólida que no estén ocupados por la fase líquida. Generalmente, su composición es muy parecida a la del aire atmosférico en la zona, principalmente: oxígeno, nitrógeno, CO₂ y vapor de agua (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Composición de la fase gaseosa del suelo.

Compuesto o elemento	Aire atmosférico (%)	Aire del suelo (%)
Oxígeno	21	10 - 20
Nitrógeno	78	78.5 - 80
CO ₂	0.38	0.2 - 3
Vapor de agua	Variable	En saturación

3.5 **NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL SUELO.**

En México, las normas aplicables a prevenir la contaminación del suelo por hidrocarburos o metales pesados establecen también la metodología para el muestreo de éstos (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Normatividad aplicable a la calidad del suelo.

Norma	Aplicación
NOM-147-SEMARNAT/SS-2004	Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
NMX-AA-132-SCFI-2016	Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (Cancela a la NMX-AA-132-SCFI-2006).

En esta investigación, se utilizaron los valores de la concentración de remediación de suelos contaminados por metales pesados propuestos por la NOM-147-SEMARNAT/SS-2004, como referencia para comparar los valores de concentración obtenidos en el sitio de estudio. Además, se siguieron los lineamientos técnicos indicados por la NMX-AA-132-SCFI-2016 para realizar los muestreos de suelo y sedimentos.

3.5.1 CONTAMINANTES EN SUELO.

La investigación realizada en esta tesis de maestría se enfoca en la identificación de los metales pesados como contaminantes de suelo, por su toxicidad y bioacumulación en los elementos bióticos de un sistema (Angelova et al., 2004; Lucho et al., 2005). Teniendo como posible fuente emisora de contaminantes a un sitio de disposición final de RSU, se buscará identificar la presencia en el suelo de metales pesados como: Pb, Cu, Cd, Ag, Cr, Hg, Zn y Co.

De manera natural, los metales pesados se encuentran en el suelo derivados de la geología local. Dichos metales provienen de una gran variedad de minerales que pueden aflorar en la zona (Abollino et al., 2002). En ambientes naturales, los procesos de meteorización que desgastan a las formaciones geológicas son la fuente principal que aporta metales pesados al suelo.

Las actividades antropogénicas (por ejemplo: la minería) pueden ser también una fuente importante de metales pesados a los suelos (Pineda, 2004). De acuerdo con García y Dorronsoro (2005), una vez en el suelo, cualquiera que sea su origen, los metales pesados pueden seguir una de las cuatro vías siguientes:

1. Quedar retenidos en el suelo en fase acuosa u ocupando sitios de intercambio.
2. Adsorberse sobre constituyentes orgánicos presentes en el suelo.
3. Asociarse con la materia orgánica del suelo.
4. Precipitarse en fase sólida o mixta.

Los factores que influyen en la movilización de los metales pesados en el suelo son: Potencial redox, pH, composición iónica de la solución del suelo, presencia de carbonatos, contenido de materia orgánica, textura, etc. (Sauquillo et al., 2003).

3.5.1.1 *Efectos de los metales pesados en la salud humana.*

Los efectos nocivos de los metales pesados en la salud humana dependen del metal, su concentración, el tiempo de exposición y, en algunos casos, de la edad del individuo expuesto. Su ingesta puede darse cuando los metales entran en los ecosistemas y se distribuyen al agua y al suelo. Posteriormente, se distribuyen entre varias especies fisicoquímicas como material particulado y/o coloidal, y especies disueltas que llegan al contacto con el hombre, a través de la ingesta de agua y comida contaminada con estos elementos (Manrique et al, 2007).

Los metales pesados representan riesgos a la salud al provocar, dependiendo de la dosis y del tipo de exposición:

- Retraso en el desarrollo mental e intelectual de niños.
- Esterilidad y muerte neonatal.
- Distintos tipos de cáncer.
- Necrosis hepática.
- Hipertrofia de tiroides.
- Taquicardia.
- Gingivitis.
- Pérdida de memoria.
- Depresión severa.
- Delirios y alucinaciones.
- Daño renal.
- Perdida de la visión y audición.
- Coma y muerte.

4. MODELADO DEL TRANSPORTE HÍDRICO DE CONTAMINANTES EN UN ARROYO INTERMITENTE.

En este capítulo se describe el proceso de selección del modelo de flujo hidrodinámico, empleado para representar el posible transporte de contaminantes a partir del sitio de disposición final de RSU estudiado, en el municipio de Cerritos, S.L.P.

Dados sus fundamentos matemáticos, se seleccionó el software EFDC Explorer. Se indican los parámetros de entrada (necesarios para su funcionamiento) y se discuten los resultados obtenidos.

A partir de los resultados del modelo hidrodinámico se identificaron las superficies del área de estudio con más posibilidades de que en ellas se hubieran depositado partículas contaminantes, que fueron arrastradas por las corrientes intermitentes del arroyo que cruza el sitio de disposición final. En estas superficies se ubicaron los puntos de muestreo de suelo y sedimentos que se describen en el capítulo 5.

4.1 SOFTWARE PARA MODELADO DE FLUJO HIDRODINÁMICO.

El *Environmental Fluid Dynamics Code* (EFDC) es un modelo hidrodinámico de celdas de elementos finitos (capítulo 3.2.1), que posee módulos de procesamiento que le brindan una adaptabilidad numérica considerable hacia los cuerpos de agua superficiales (Torres-Bejarano *et al*, 2016).

El EFDC puede simular el comportamiento de sistemas acuáticos en una, dos y tres dimensiones; tiene un conjunto de módulos acoplados de calidad del agua, transporte de sedimentos e hidrodinámica. A su vez, el módulo hidrodinámico se compone de otros seis bloques (profundidad del agua, velocidad, mezclado, trazadores, temperatura, salinidad y vertidos de campo cercano y lejano). Actualmente, es uno de los modelos de flujo más utilizados en el mundo.

Este modelo fue aplicado con éxito en el río Yangtsé, en China, para simular la elevación diaria del cauce y predecir la superficie de inundación del agua y la concentración de sedimentos en el lecho suroccidental del río (Martínez-Salcedo, 2012). Así mismo, Xia y colaboradores (2011), lo utilizaron en la Bahía De Perdido, en Estados Unidos, para

simular la hidrodinámica del estuario y los parámetros de calidad del agua: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fosfatos.

4.1.1 FUNCIONAMIENTO DE EFDC EXPLORER.

El esquema numérico que se usa en el modelo EFDC para resolver las ecuaciones de movimiento (ver capítulo 3.1.2), utiliza diferencias finitas de segundo orden, y provee una solución numérica externa semi-implícita, que se completa con el cálculo de profundidad promedio y velocidad de flujo. Simultáneamente, calcula la elevación de la superficie de inundación en forma bidimensional.

El modelo utiliza una coordenada vertical denominada “sigma”, y coordenadas horizontales (que representan las características de velocidad de flujo y dimensiones del cuerpo de agua simulado). A su vez, soluciona ecuaciones en tres dimensiones y ecuaciones hidrostáticas, para la variable de densidad de fluido.

4.1.1.1 Ecuaciones utilizadas por el modelo hidrodinámico.

El modelo hidrodinámico generado en EFDC Explorer, se basa en ecuaciones hidrostáticas de tres dimensiones, formuladas en coordenadas horizontales curvilíneas-ortogonales y una coordenada vertical. Por tanto, la ecuación de movimiento hidrostático está dada por la ecuación 4.1

Ecuación 4.1

$$\begin{aligned} & \partial_t (m_x m_y H u) + \partial_x (m_y H u u) + \partial_y (m_x H v u) + \partial_z (m_x m_y w u) - f_e m_x m_y H v \\ & = -m_y H \partial_x (p + p_{atm} + \phi) + m_y (\partial_x z_b^* + z \partial_x H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z u \right) \\ & + \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x u \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} u \end{aligned}$$

Donde:

u y v = Componentes horizontales de velocidad (m/s)

m_x y m_y = Factor de escala de las coordenadas horizontales (Adimensional)

H = Profundidad de la columna de agua (m)

ϕ = Potencial de la superficie libre (kPa)

z_s y z_b = Coordenadas verticales físicas de la superficie libre y el lecho inferior (m)

La aceleración del efecto Coriolis no está considerada en las ecuaciones de movimiento, por tanto, se agrega al modelo y se representa como f_e en la Ecuación 4.2:

Ecuación 4.2

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y$$

La viscosidad turbulenta vertical está representada por A en la Ecuación 4.3. Ésta relaciona los esfuerzos cortantes con el eje vertical de los componentes de velocidad horizontal:

Ecuación 4.3

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = A_v H^{-1} \partial_z (u, v)$$

En la Ecuación 4.4, la densidad del agua es afectada por la presión atmosférica (p). En esta expresión, ρ y ρ_o son las densidades del agua real y de referencia y b es la flotabilidad:

Ecuación 4.4

$$\partial_z p = -gHb = -gH(\rho - \rho_o)\rho_o^{-1}$$

Una vez que el modelo resuelve las expresiones anteriores, continúa con la ecuación de continuidad tridimensional en el sistema de coordenadas horizontal ortogonal y curvilíneo vertical (Ecuación 4.5):

Ecuación 4.5

$$\partial_t (m_x m_y H) + \partial_x (m_y H u) + \partial_y (m_x H v) + \partial_z (m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{SS} + Q_{SW})$$

En esta expresión, Q_h es el volumen que representan las fuentes de aportación y salidas del sistema, incluida la lluvia y la evaporación. Los términos Q_{ss} y Q_{sw} son los flujos volumétricos netos de sedimentos y agua entre el lecho del cauce y la superficie de la columna de agua. Integrando la Ecuación 4.5, respecto a la profundidad, se obtiene la Ecuación 4.6:

$$\partial_t (m_x m_y H) + \partial_x (m_y H \bar{u}) + \partial_y (m_x H \bar{v}) = \bar{Q}_H + Q_{SS} + Q_{SW}$$

Ecuación 4.6

El modelo EFDC resuelve la ecuación de continuidad modo externo implícito estándar. El primer paso de este procedimiento es la solución de la hidrodinámica indicada en la ecuación de continuidad 4.7:

Ecuación 4.7

$$\begin{aligned} (m_x m_y \zeta)^* - (m_x m_y \zeta)^n + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^{n+1} + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^n \\ + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^{n+1} + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^n = \theta \bar{Q}_H^{n+1/2} \end{aligned}$$

En esta expresión, θ es el intervalo de tiempo entre n y $n + 1$. El intervalo de tiempo intermedio $n + \frac{1}{2}$, da como resultado un promedio entre los dos intervalos. La ecuación de continuidad volumétrica se actualiza al nivel de tiempo $n + \frac{1}{2}$ y está dada por la Ecuación 4.8:

Ecuación 4.8

$$(m_x m_y \zeta)^{n+1} - (m_x m_y \zeta)^* = \theta \bar{Q}_G^{n+1/2}$$

Ahora bien, combinando las ecuaciones 4.7 y 4.8 se obtiene la solución completa a la ecuación de continuidad dada en la Ecuación 4.9:

Ecuación 4.9

$$\begin{aligned} (m_x m_y \zeta)^{n+1} - (m_x m_y \zeta)^n + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^{n+1} + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^n \\ + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^{n+1} + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^n = \theta \bar{Q}_H^{n+1/2} + \theta \bar{Q}_G^{n+1/2} \end{aligned}$$

4.2 DATOS REQUERIDOS POR EL SOFTWARE PARA REALIZAR EL MODELADO.

Para realizar el modelado hidrodinámico en el sitio de estudio y estudiar el posible transporte de los contaminantes a partir del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), el software EFDC requirió de los datos siguientes:

1. Datos de la topografía de la zona (generalmente un modelo digital de elevación MDE).

2. El caudal de entrada en el arroyo a modelar. En el sitio de estudio se utilizó un caudal medio de 67 l/s (este caudal es representativo de zonas con clima semiárido). El objeto principal fue conocer el comportamiento del flujo de agua que pasa por el arroyo intermitente afectado.

Se utilizó, además, una imagen satelital georreferenciada para brindar una mejor visualización espacial del fenómeno de transporte.

4.2.1 DATOS PARA EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.

El primer conjunto de datos requeridos por el modelo hidrodinámico EFDC, se obtiene del Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual representa la diferencia de la altitud del terreno del sitio a modelar, con respecto de un datum, y genera valores absolutos de altitud para una nube de puntos. En el caso de estudio de esta tesis, el datum de referencia en el que se basó el MDE, fue el *World Geodetic System* de 1984 (WGS-84).

El MDE describe arreglos de geometría del terreno (de forma rectangular o hexagonal) con puntos que tienen valores de elevación, obtenidos por medios fotogramétricos o cartográficos (Fallas, 2007). Aunque para el modelado hidrodinámico no se indica una resolución específica del MDE, lo recomendable es que ésta sea de un tamaño de celda lo más pequeña posible (preferentemente, de 1 m de resolución como mínimo).

La zona de estudio cuenta con un MDE, generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el cual deriva de la carta topográfica “Cerritos F14-A76”. Sin embargo, este modelo es regional y tiene un tamaño de celda de 30 m por píxel. También se encontró un MDE del satélite ALOS PALSAR que, si bien cuenta con una resolución espacial mucho menor que el MDE provisto por el INEGI (12.5 m por píxel), sigue siendo demasiado grande para un modelado de flujo efectivo. La resolución de ambos MDE es baja para generar un modelado fiel a la topografía del sitio estudiado.

Para solventar la deficiencia de los MDE disponibles, se optó por generarlo a través de medidas propias y curvas de nivel. Para esto se descargaron las curvas de nivel del INEGI en formato vectorial con una resolución altimétrica de 10 m. Las medidas adicionales a estas curvas fueron completadas por trabajo de campo, utilizando un GPS marca Garmin, modelo 76C5x, con una resolución espacial de 3 m en la coordenada horizontal (Figura 4.2).

En el levantamiento de campo (Figura 4.1) se realizaron caminamientos en forma serpenteante y perpendicular a las curvas de nivel, lo que permitió obtener un mejor detalle altimétrico de la zona. Para minimizar los errores de medición y ajustar los puntos obtenidos con el GPS, se utilizaron los datos de la Red Geodésica Nacional Pasiva del INEGI.

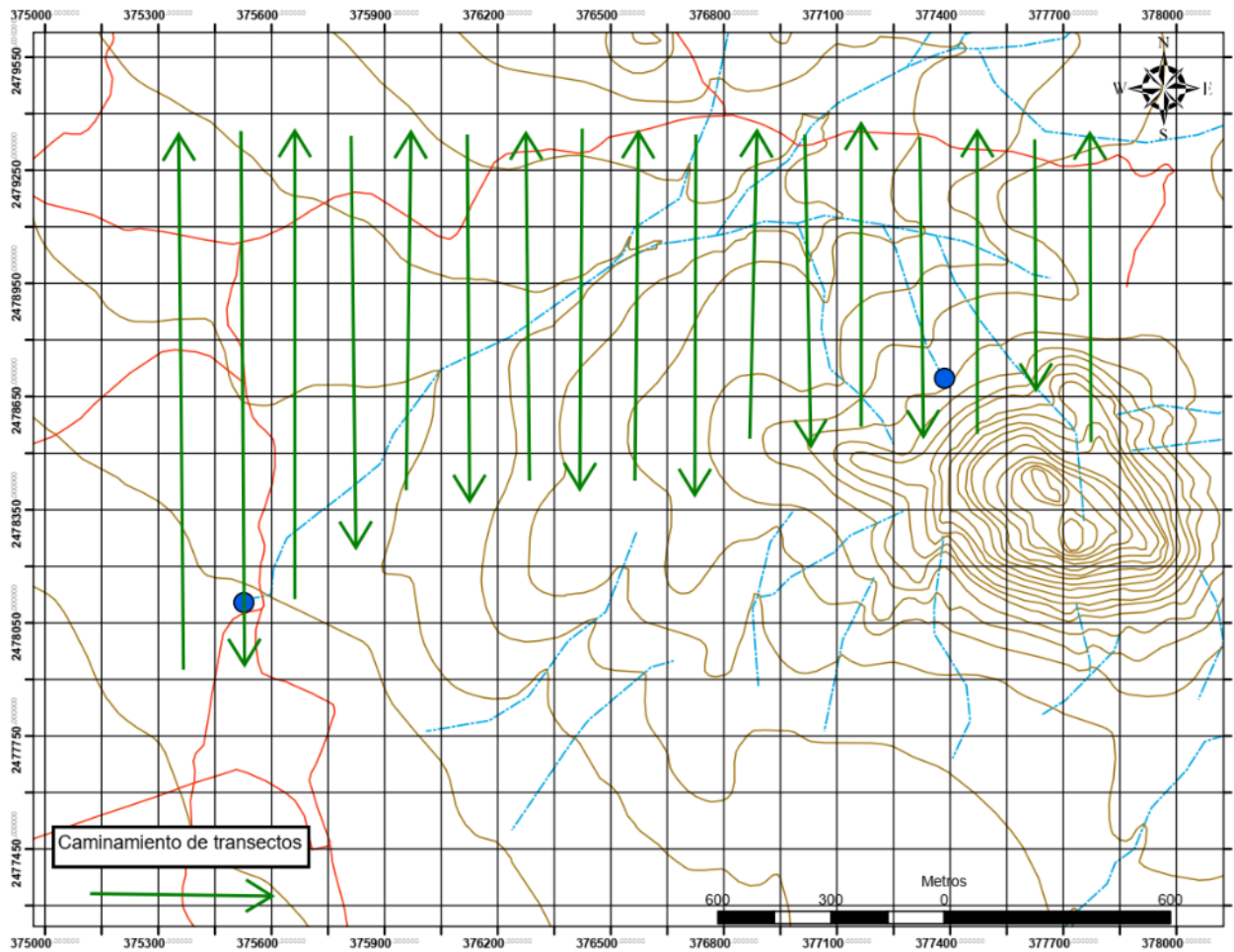


Figura 4.1 Caminamientos de transectos con GPS en el sitio de estudio.



Figura 4.2 Ajuste de los datos obtenidos con el GPS (marca Garmin) y comparación con puntos de la Red Geodésica Nacional Pasiva del INEGI.

Para generar un MDE con una resolución espacial de 1 m, se interpolaron los valores de las curvas del INEGI y los de los puntos obtenidos en campo (Figura 4.3). Con esta resolución fue posible modelar el flujo hidrodinámico con mayor precisión.

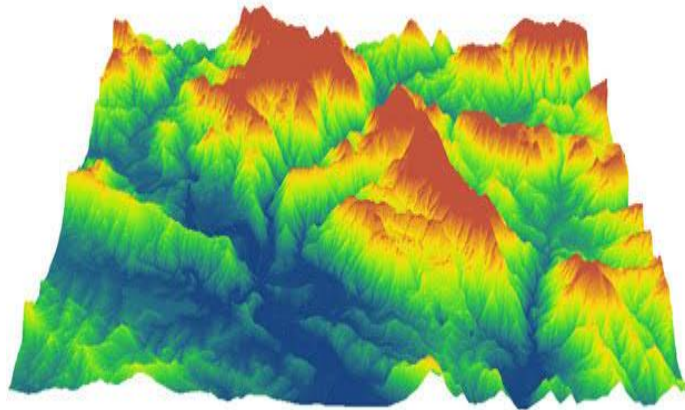


Figura 4.3 Modelo Digital de Elevación del sitio de estudio, complementado por trabajo de campo y datos vectoriales del INEGI.

4.3 INGRESO DE LOS DATOS EN EL MODELO EFDC EXPLORER.

Las acciones que se deben realizar para correr el modelo EFDC Explorer son las siguientes:

1. Indicar la dirección (o carpeta) en la que se encuentran los archivos con los datos de entrada,

2. Señalar la dirección (o carpeta) en la que el modelo guardará los resultados de salida (es una carpeta única).
3. Darle un nombre único al archivo de salida que contendrá el resultado del modelado del flujo hidrodinámico. Este archivo corresponde a un video en formato MP4, que contendrá, además, la fecha y la hora en que se corrió el modelo.
4. En la carpeta de trabajo se selecciona el Modelo Digital de Elevación (capítulo 4.2.1, Figura 4.3) Nota: También se puede utilizar una imagen satelital georreferenciada para apreciar una mejor visualización de los resultados.
5. Los datos del punto anterior se ingresan en la pestaña de “*Hydrodynamics*”, ubicada en la barra lateral izquierda de la interface del modelo EFDC. La zona superior de la interface se divide en dos partes: la primera es el procesador de funciones, y la segunda es el acceso a funciones de post-procesadores (Figura 4.7).

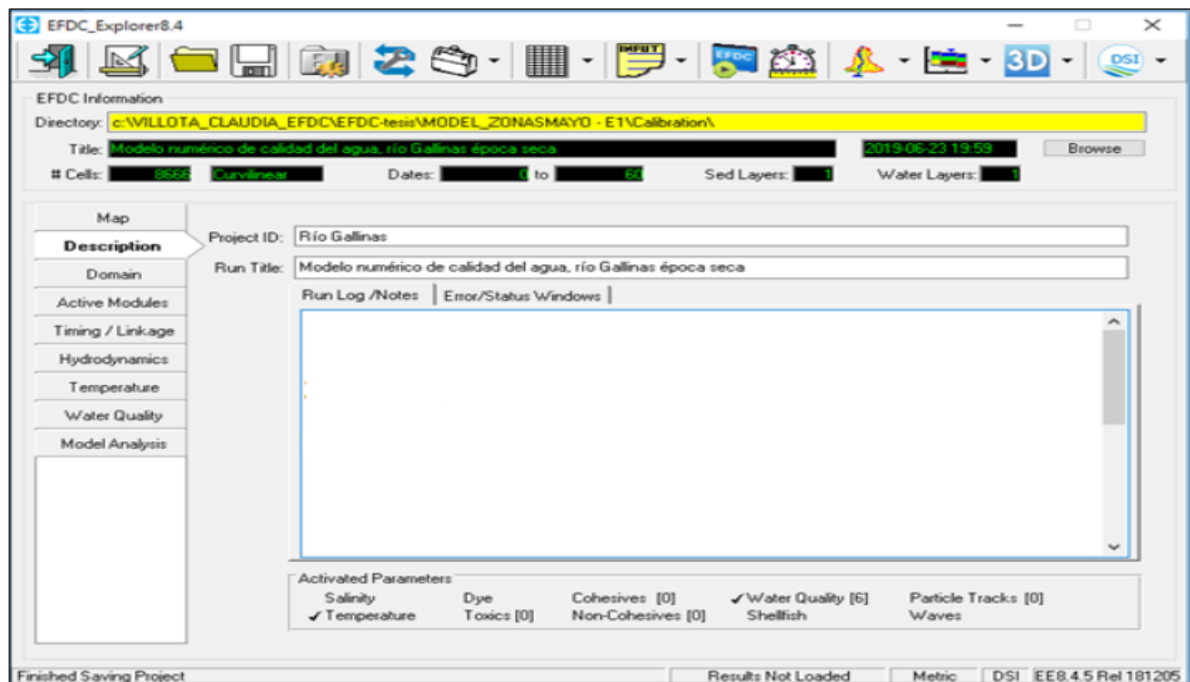


Figura 4.4 Interface gráfica del modelo EFDC Explorer (Villota -López, 2018).

6. Por último, se selecciona la opción “Run” (correr) dentro de la pestaña “*Hydrodynamics*”, luego se da clic en aceptar y el modelo comenzará a ser ejecutado con los datos de entrada y parámetros seleccionados anteriormente. Una vez que el proceso ha terminado, de manera automática nos indica que el archivo generado se guardó con éxito en la carpeta previamente indicada en el software. En ella se encuentra un video en formato AVI que es la modelación hidrodinámica.

4.4 MODELADO HIDRODINÁMICO DEL ARROYO ESTUDIADO.

El resultado final que arroja el modelo EFDC Explorer es un archivo de video en formato MP4 que representa el comportamiento del agua en el arroyo intermitente en el sitio de estudio. El modelo muestra los sitios con menor profundidad del tirante de agua en una escala de color azul (< 0.5 m); en tanto que los de coloración naranja-rojiza son los de profundidad del tirante de agua mayor a 0.5 m y menor a 4.6 m. Estos últimos sitios tienen una energía hidrodinámica mayor en los codos meándricos del arroyo, en donde el impacto constante del agua genera cárcavas profundas en el cauce (Figura 4.7 y figuras de funcionamiento de los meandros).

Con el resultado obtenido del modelo EFDC Explorer es posible visualizar el comportamiento del flujo de agua y tomando como base con lo expuesto en el párrafo 3.1.3.1.1, se pueden proponer los sitios con mayores probabilidades de depósito de contaminantes, transportados por la fuerza hídrica del arroyo intermitente que atraviesa el relleno sanitario estudiado. El arroyo, al perder energía, sedimenta el material transportado en su lecho, preferentemente en los codos meándricos.

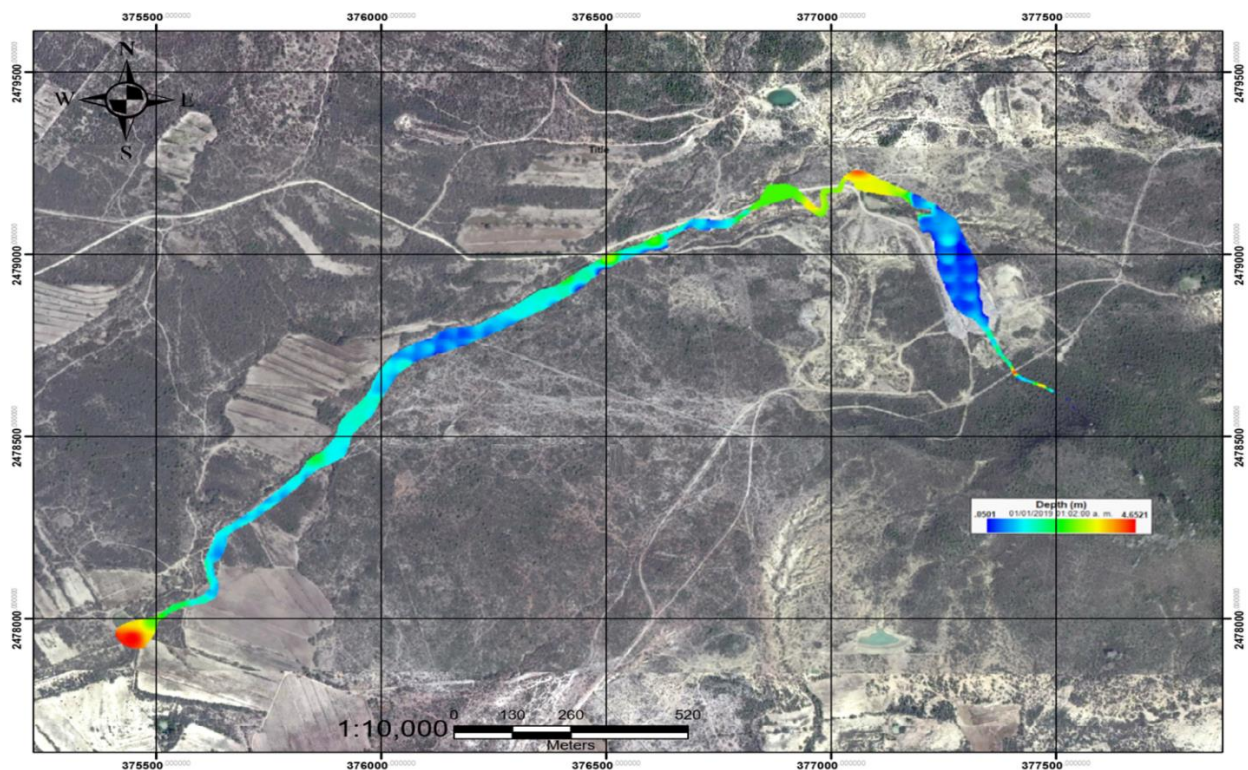


Figura 4.5 Modelo de Flujo hidrodinámico generado con EFDC Explorer.

5. MEDICIÓN DE CONTAMINANTES EN CAMPO Y SU ANÁLISIS.

En el presente capítulo se describen las metodologías usadas para los muestreos de suelo y sedimentos, realizados en el lecho del arroyo intermitente afectado. Además, se describen los procedimientos llevados a cabo para preparar las muestras en el laboratorio y efectuar los análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), con el objeto de identificar la presencia de contaminantes, relacionados con los residuos almacenados en el relleno sanitario estudiado.

La metodología de muestreo en campo fue la misma en todos puntos seleccionados para obtener resultados comparables y confiables. La variabilidad natural de los sistemas que se muestrean, sumada a la de la metodología de muestreo, suele ser muy grande, por lo que se debe establecer y seguir un sistema de calidad que disminuya lo más posible, los errores en todas sus fases. La recolección de muestras en campo, su análisis detallado en el laboratorio y la interpretación conjunta de los resultados, tienen por objeto conocer la composición del suelo y/o los sedimentos del sitio de estudio, para identificar la presencia y concentración de posibles contaminantes.

5.1 MUESTREO DE SEDIMENTOS Y SUELO EN EL SITIO DE ESTUDIO.

Para el muestreo de sedimentos y suelo en el área de estudio se tomaron en cuenta las recomendaciones propuestas por Sepúlveda (2005), quien sugiere diseñar el plan de muestreo en función de los objetivos a cumplir; esto es: plantear el muestreo según el tamaño del fenómeno que se pretende identificar en el sitio de estudio. A continuación, se describe la metodología seguida para la recolección de muestras, el objetivo del muestreo, los parámetros principales que fueron medidos y los análisis realizados en el laboratorio.

5.1.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE MUESTREO DE SUELO Y SEDIMENTOS.

Existen cuatro metodologías principales de muestreo de suelo y sedimentos según el objetivo y los fenómenos que se buscan identificar (Ministerio del Ambiente, 2004). Los resultados de los análisis de las muestras se comparan con la normatividad aplicable y/o estándares de calidad ambiental. A continuación, se brinda una descripción breve de cada uno de ellos y se justifica la selección de método empleado en el sitio de estudio.

- 1. Muestreo de identificación:** Su objetivo es corroborar la presencia de contaminantes en el suelo, obteniendo muestras representativas de los estratos. Se establece previamente el área de potencial interés y se definen las sustancias químicas tóxicas a identificar. Cuando no se tiene un conocimiento previo de la distribución del contaminante, el muestreo se hace de manera sistemática, sin puntos focalizados. La profundidad de éste se definirá por el tipo de suelo y el (o los) contaminante(s) a estudiar.
- 2. Muestreo a detalle:** El objetivo de este tipo de muestreo es cuantificar el área y el volumen de la distribución del contaminante presente en el suelo. Se enfoca, además, en las plumas de propagación de contaminantes en el agua subterránea y provee estimaciones de distribución de espacio-tiempo. Este muestreo apoya estudios que identifican las rutas posibles de migración de contaminantes, para evaluar los riesgos a la salud y al equilibrio ecológico.
- 3. Muestreo a nivel de fondo:** El objetivo de este muestreo es identificar la concentración de sustancias tóxicas, cercanas al área contaminada de interés, y que fueron depositadas de manera natural en el ambiente o por actividades antropogénicas, ajenas a la fuente de contaminación estudiada. Se enfoca principalmente a metales y metaloides. Específicamente, los puntos de muestreo deben estar fuera del sitio afectado, pero no muy alejados de la fuente contaminante.
- 4. Muestreo de comprobación de la remediación:** Su objetivo es demostrar que las acciones correctivas y de remediación, utilizadas en un sitio contaminado, dejaron en el suelo concentraciones menores a las establecidas por la normatividad aplicable.

Dadas las características del estudio de caso, en esta investigación se seleccionó y aplicó el muestreo de identificación.

5.1.2 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO Y OBJETIVO DE ÉSTE.

Un punto de muestreo es un sitio representativo en la zona de estudio; se elige para extraer una muestra y se define por coordenadas de longitud, latitud y altitud. En esta investigación, los puntos de muestreo se seleccionaron de acuerdo con los principios de depósito de sedimentos expuestos en el subcapítulo 3.1.3.1.1 (Cauces meándricos y depósito de sedimentos y contaminantes); es decir, en los lugares en donde existe una probabilidad mayor de depósito de contaminantes transportados por el agua. Así, se definieron los sitios con profundidad mayor del tirante de agua y aquéllos en los que el cauce del arroyo toma una forma de meandro y tiene zonas con erosión alta en los codos interiores del meandro y deposita sus sedimentos en el remanso menos profundo de la cárcava (Figura 5.1, 5.2 y Tabla 5.1).

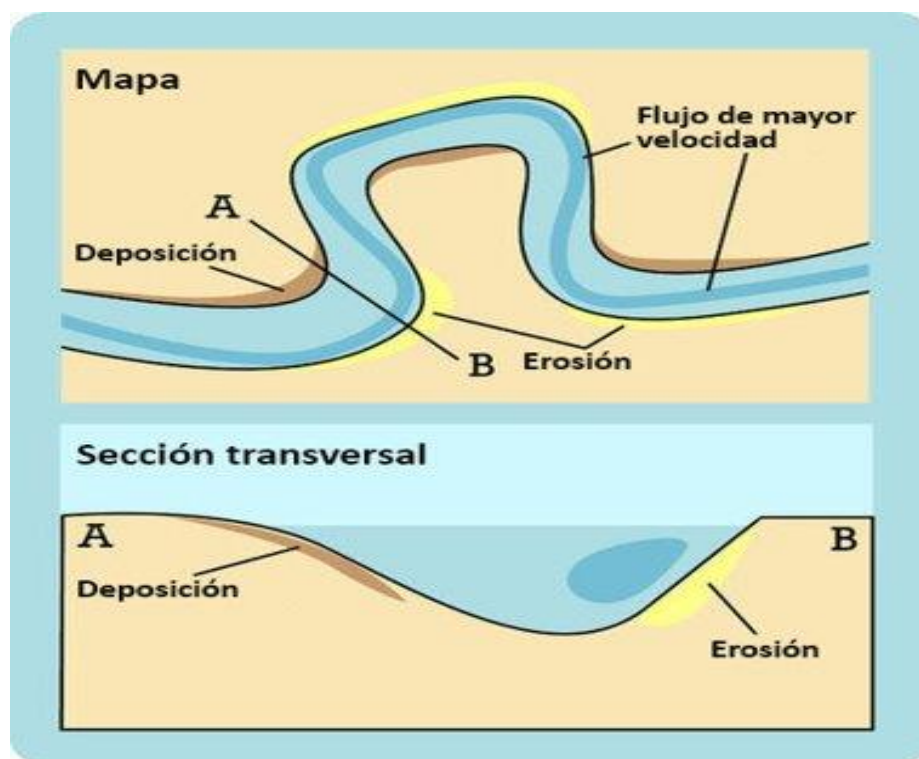


Figura 5.1 Principios de depósito de sedimentos en medios fluviales en los que se basó la selección de los puntos de muestreo (Wolman y Miller, 1960).

En campo, estos sitios se localizaron con un GPS de mano marca Garmin, Modelo eTrex-10. Las coordenadas de los sitios propuestos se ingresaron previamente en formato UTM.

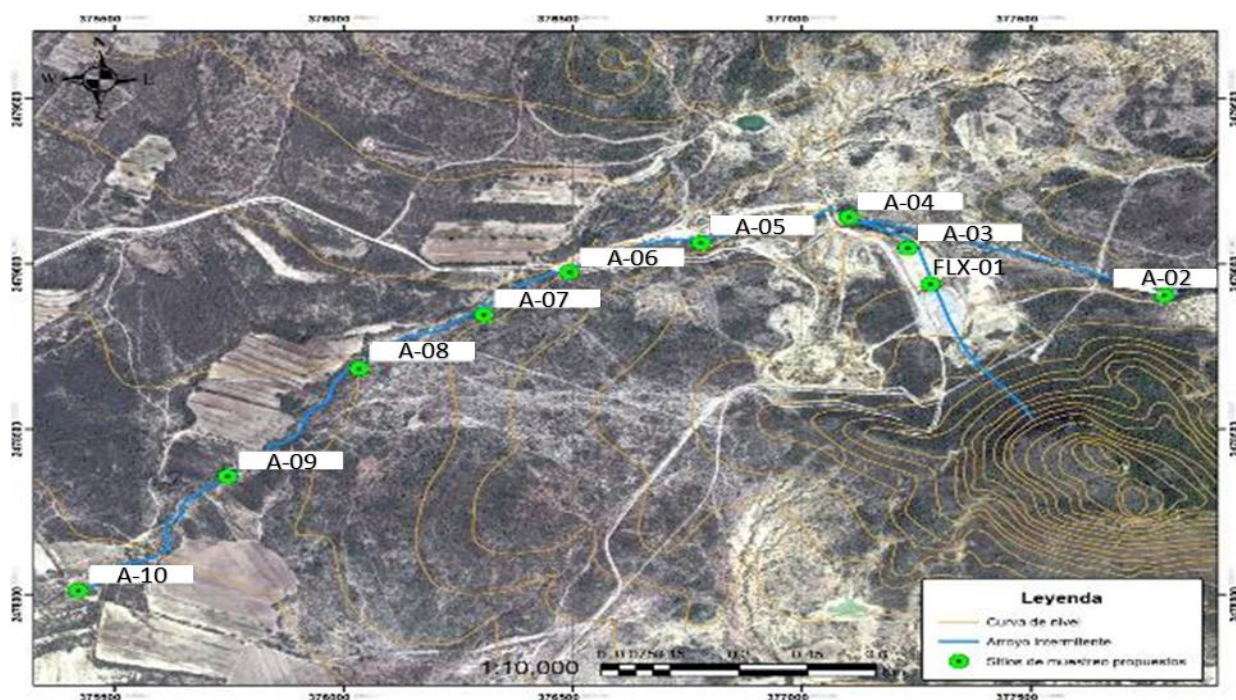


Figura 5.2 Selección de puntos de muestreo de suelo y sedimentos en el sitio de estudio, a partir de los principios de depósito de sedimentos y el modelado hidrodinámico.

Tabla 5.1 Ubicación de puntos de muestreo de suelo y sedimentos en el sitio de estudio.

No.	Clave	Coordenadas		Descripción general
		X	Y	
1	FLX-01	377289 m E	2478940 m N	Sedimento procedente de la fosa de lixiviados
2	A-02	377791 m E	2478905 m N	Sedimento procedente de un cuerpo de agua superficial aguas arriba de la fuente de contaminación
3	A-03	377231 m E	2479048 m N	Sedimento procedente de un cuerpo de agua superficial aguas abajo de la fuente de contaminación
4	A-04	377103 m E	2479142 m N	Sedimento superficial del arroyo
5	A-05	376780 m E	2479064 m N	Sedimento superficial del arroyo
6	A-06	376493 m E	2478975 m N	Sedimento superficial del arroyo
7	A-07	376306 m E	2478846 m N	Sedimento superficial del arroyo
8	A-08	376034 m E	2478683 m N	Sedimento superficial del arroyo
9	A-09	375747 m E	2478357 m N	Sedimento superficial del arroyo
10	A-10	375421 m E	2478011 m N	Sedimento superficial del arroyo y suelo a 1.2 m de profundidad

El objetivo del plan de muestreo fue conocer la posible distribución y concentración de metales pesados en suelo y sedimentos, a lo largo del cauce de un arroyo intermitente, aguas abajo de la fuente de contaminación estudiada (el sitio de disposición final de RSU del municipio de Cerritos, S.L.P.).

5.1.3 *METODOLOGÍA DE MUESTREO SEGÚN LA NMX-AA-132-SCFI2006.*

La metodología utilizada para realizar el muestreo de suelo y sedimentos fue la indicada en la Norma Mexicana: NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación de metales y metaloides y manejo de la muestra, que establece los elementos siguientes:

- a) **Plan de muestreo.** Se deben definir previamente la ubicación y el número de los sitios a muestrear. La selección de éstos debe justificarse.
- b) **Técnica de muestreo.** Establece cómo realizar el muestreo (de tipo superficial o subsuperficial). En este último se indica la manera de realizar los pozos para tomar las muestras y se dan instrucciones para garantizar que la muestra no se contamine.

5.1.4 *METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES.*

Para la realización del muestreo de sedimentos superficiales en el arroyo afectado se utilizaron herramientas como: pala, cucharón y mallas de acero inoxidable. Al llegar a cada punto de muestreo se realizó una excavación de 0.5 m ancho x 0.5 m de largo y 0.10 m de profundidad (Figura 5.3). De acuerdo con el método de cuarteo, el material se homogeneizó, mezclándolo de manera uniforme, para luego constituir un pequeño montículo en forma de cono, que se aplanó y se dividió en cuatro cuartos (denominados: A, B, C y D). Enseguida, la muestra se recolectó, juntando las porciones A+C o B+D.

Finalmente, en cada punto de muestreo, la mezcla obtenida se tamizó con una malla de tamaño 14, y se introdujo en una bolsa estéril de polietileno de calibre 150; ésta se etiquetó y se resguardó en un contenedor libre de humedad y luz solar.



Figura 5.3 Muestreo superficial de sedimentos en el cauce del arroyo.

5.1.5 METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DEL SUBSUELO.

El muestreo en el subsuelo necesitó de equipo especializado que para extraer la muestra inalterada. En el caso de estudio se utilizó un barreno estándar para muestreo en suelos duros, de hasta 1.5 m de profundidad. Este barreno tiene una cámara cilíndrica con un extremo abierto, que recolecta el material a medida que se perfora, con la ayuda de un mazo de acero con cabezales de nylon (Figura 5.3).

Para tomar la muestra, el primer paso fue retirar los detritos orgánicos del suelo a perforar. Luego se insertó el barreno de manera vertical en la superficie limpia, hasta que su parte superior quedó al mismo nivel que la superficie del suelo. Para que el descenso del barrenador no incrementara la compactación de la muestra de suelo, los golpes que se le dieron con el mazo fueron continuos pero con fuerza medida (Figura 5.4).

Una vez que se alcanzó la profundidad deseada, el barrenador se giró de manera suave a la izquierda y a la derecha mientras se extraía. Al momento de su extracción se identificaron dos estratos. El primero, de color café claro y un espesor de 35 cm se encontró en la parte superior. El segundo, de espesor de 85 cm de color claro se encontró en la parte inferior. Ambos estratos fueron resguardados en bolsas de polietileno distintas y etiquetadas para su identificación.

Posteriormente, las muestras fueron envasadas y etiquetadas en bolsas estériles de polietileno de calibre 150 y se resguardaron en un contenedor libre de humedad y luz solar.



Figura 5.4 Muestreo de suelo con barrenador a 1.5 m de profundidad.

5.1.6 MUESTREO DE SEDIMENTOS DE LA FOSA DE LIXIVIADOS.

Para muestrear el material sedimentado en la fosa de lixiviados se utilizó un palo de madera de 4.5 m de largo, al final del cual se fijó un bote de plástico, que se sumergió en la fosa para realizar la colecta. Posteriormente, para retener las partículas que pudiesen estar precipitadas en el lixiviado, la mezcla recolectada se hizo pasar por un filtro de papel marca Whatman (Figura 5.5).



Figura 5.5 Muestreo de sedimentos de la fosa de lixiviados.

5.1.7 MUESTREO DE LIXIVIADOS.

Para recuperar las muestras de los lixiviados, se utilizó una cuerda a la que se le amarró un bote de plástico, para sumergirlo en la fosa (Figura 5.6). Los líquidos recolectados se almacenaron en dos contenedores de plástico de 4.2 L (previamente esterilizados).



Figura 5.6 Muestreo de lixiviados en campo.

5.2 ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE SEDIMENTOS, SUELO Y LIXIVIADOS.

Con el objeto de realizar un trabajo de campo más efectivo y disponer de información rápida de ciertos parámetros físicos y químicos de las muestras recolectadas de los sedimentos, suelo y lixiviados en el sitio de estudio, se utilizaron diferentes analizadores móviles.

Los resultados de estas mediciones en campo permitieron también redefinir la ubicación de ciertos puntos de muestreo, diferentes a los contemplados en el programa original.

5.2.1 ANÁLISIS EN CAMPO DE SEDIMENTOS Y SUELO CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX).

A fin de identificar la presencia y concentración de metales pesados en las muestras de sedimentos y suelo, se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil, modelo Delta Professional, marca Olympus Scientific Solutions.

Para el análisis en campo de las muestras de sedimento y suelo, contenidas en las bolsas de polietileno de calibre 150 (capítulos 5.1.4 y 5.1.5), a cada una se le realizaron varios disparos con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, hasta obtener resultados con poca variabilidad en las concentraciones de los metales pesados identificados, lo que elevó el nivel de confianza en estos resultados, en campo (Figura 5.7). Los resultados obtenidos se muestran y analizan en el capítulo 6.1.2.



Figura 5.7 Medición el análisis en campo de las muestras en campo en las muestras de sedimentos y suelo con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil.

5.2.2 ANÁLISIS EN CAMPO DE LIXIVIADOS CON Sonda MULTIPARÁMETRO.

Los parámetros fisicoquímicos que se midieron a la muestra de lixiviados extraída de la fosa fueron: temperatura (en °C), oxígeno disuelto (%), conductividad eléctrica ($\mu\Omega/\text{cm}$), pH y potencial redox (ORP) (Capítulo 5.1.7; Figura 5.8). Los resultados obtenidos se muestran y analizan en el capítulo 6.1.1.



Figura 5.8 Análisis *en campo* de lixiviados con sonda multiparámetro.

5.3 ANÁLISIS EN LABORATORIO DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y SEDIMENTO.

Con el objeto de validar los resultados de los análisis realizados en campo y de obtener una mayor precisión en la información, las muestras obtenidas de suelo y sedimento se analizaron también por medio de equipos e instrumentos de medición más sofisticados.

5.3.1 ANÁLISIS CON ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).

En el laboratorio, para el análisis detallado de las muestras de suelo y sedimentos, se utilizó un equipo de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS por sus siglas en inglés), marca Thermo Scientific modelo X Series 2.

La preparación de las muestras de suelo y sedimentos, antes de ingresarlas al ICP-MS, inició mediante la homogenización y cuarteo del material recolectado. Se seleccionó la combinación de los cuartos A+D (Figura 5.9 a) y la mezcla se ingresó al mortero de ágata durante 5 minutos, hasta conseguir que la molienda tuviera el tamaño de talco (Figura 5.9c y d).



Figura 5.9. Preparación de muestras antes de ingresar al ICP-MS, a) Cuarteo del material recolectado, b) Ingreso del material al molino en un mortero de ágata, c) Material molido al tamaño de talco.

Finalizada la molienda, el control de las muestras se llevó en una bitácora, en la que se registró su número de vial, clave de muestra, peso y aforo (Figura 5.10a). De las muestras molidas (con un aforo de 50 gr) sólo se analizaron 0.10 gr de material. Como material de referencia se utilizaron 0.10 gr de Montana I Soil (Figura 5.10b).



Figura 5.10 a) Bitácora con el registro del peso de muestra e identificación de viales. **b).** Montana I Soil utilizado como material de referencia.

El paso siguiente para preparar las muestras fue un pretratamiento en frío. A los viales se les añadió una mezcla de 1 ml de HNO_3 y HF, y se les dejó reposar durante 48 horas (Figura 5.11a). Posteriormente, los viales se colocaron sobre placas metálicas calentadas a 100°C . Ahí permanecieron por 8 horas, tiempo en el cual los ácidos HNO_3 y HF se evaporaron. También se añadió 1 ml de HCl para evitar sequedad de la muestra y continuar con su calentamiento en los viales (Figura 5.11b).

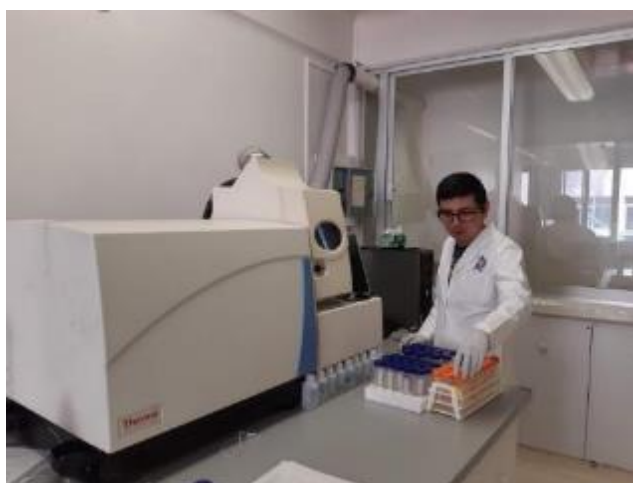
A continuación, los viales se colocaron en una campana y se destaparon para favorecer la evaporación del HCl y lograr muestras completamente secas.

La preparación de las muestras (viales) continuó mediante la adición de una mezcla de 1 ml de agua biodestilada y HNO_3 . Los viales se colocaron nuevamente sobre placas metálicas calentadas a 100°C , en las que permanecieron por 8 horas. Luego de ser retirados de las placas, los viales se dejaron reposar en frío durante 8 horas.

Finalmente, los viales se introdujeron al ICP-MS para que éste realizara la identificación y cuantificación de metales pesados que contenían las muestras (Figuras 5.11a, b y c).



Figura 5.11 Tratamiento químico de las muestras. **a)** Adición de una mezcla de 1 ml de HNO_3 y HF, **b)** Reflujo de los viales con el encendido de las placas a 100°C .



c) Ingreso de las muestras preparadas para realizar la cuantificación de metales pesados con ICP-MS.

Los resultados obtenidos se muestran y analizan en el capítulo 6.2.1.

5.3.2 ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB).

Los microscopios ópticos magnifican la distancia de observación para distinguir detalladamente objetos mucho menores a 0.1 mm. El límite del alcance de detección del microscopio óptico está dado por la naturaleza de onda de la luz visible, ya que ningún instrumento puede tener una resolución mayor que la longitud de onda de la radiación con la que se está observando. Para sobrepasar este límite es necesario emplear un microscopio electrónico de barrido, que utiliza radiaciones diferentes a la luz visible, para formar una imagen con una resolución adecuada Según Ipohorski y Bozzano (2013),

5.3.2.1 Formación de las imágenes en el MEB.

En el MEB, la imagen se obtiene a partir del reflejo de un haz de electrones que se desplaza sobre una porción de la superficie del material ingresado. A medida que el haz de electrones explora la superficie de la muestra, la intensidad de la señal generada varía según la composición del punto analizado. El haz de electrones reflejado se visualiza en un tubo de rayos catódicos, donde están las bobinas de deflexión (también llamadas bobinas de barrido) (figura 5.12).

A través del modulado la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos se obtiene un registro punto a punto que es la imagen electrónica, proporcionada por el microscopio. La señal detectada puede amplificarse en su forma analógica (similar a los microscopios ópticos) y digital. Al barrido del haz de electrones se le denomina “scanning”, y se realiza línea por línea sobre una pequeña zona de forma rectangular (llamada raster). Ésta es la que se visualiza, ampliada en la imagen final (Caneiro et al, 2010).



Figura 5.12 Microscopio electrónico de barrido y su funcionamiento (Caneiro *et al*, 2010).

5.3.2.2 *Preparación de las muestras antes de ingresarlas al MEB.*

Antes de ingresarlas al MEB, las muestras de suelo y sedimentos se sometieron a un proceso de preparación que consistió de las acciones siguientes (Figuras 5.13 a, b y c):

1. Secado durante 360 horas a temperatura ambiente, bajo sombra y en una zona sin corrientes de aire.
2. Esterilizado del material por medio de vapor y presiones altas, mediante su ingreso en una autoclave, durante 4 horas. Ahí se dio el fenómeno llamado desnaturalización, en el cual se destruyeron las proteínas dentro de los microorganismos patógenos.
3. Tamizado con una criba de acero inoxidable, con una malla de tamaño 400. El material aglomerado en terrones se disgregó, con ayuda de una mano de cerámica.
4. Reducción de la muestra por el método de cuarteo y manto hasta obtener 1.5 g de material.
5. Molienda de la muestra hasta el tamaño de talco, en un mortero de ágata para evitar su contaminación.



Figura 5.13 Proceso de preparación de la muestra FLX-01 para ingresarla al MEB. **a)** tamizado de la muestra, **b)** transferencia de la muestra al mortero, **c)** molienda de la muestra en el mortero.

Los resultados obtenidos se muestran y analizan en el capítulo 6.2.2.

6 ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTAS PARA LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.

En el presente capítulo se exponen los resultados de los análisis de las muestras de lixiviados, suelo y sedimentos, obtenidos a partir de mediciones realizadas en campo y en el laboratorio. Los datos logrados brindan información necesaria para proponer acciones preventivas de la contaminación en el sitio de estudio. Se describen técnicas para: 1) Prevenir la contaminación por los lixiviados; 2) Sellar la celda de contención de RSU; 3) Incorporar el relleno sanitario al paisaje local; y 4) Evacuar las aguas pluviales del sitio de estudio. Se propone también el monitoreo de diferentes elementos del relleno sanitario para evitar la contaminación.

6.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO.

En el sitio de estudio se realizaron análisis de las muestras de lixiviados, suelo y sedimentos con una sonda multiparámetro y un espectrómetro de fluorescencia de rayos (Figura 5.7 y 5.8).

6.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS EN CAMPO DE LAS MUESTRAS DE LIXIVIADOS.

En el sitio, los lixiviados se analizaron mediante una **sonda multiparámetro**, a través de la cual se determinaron propiedades fisicoquímicas como: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y potencial óxido reducción (Capítulo 5.2.2).

La sonda se introdujo en el lixiviado y se realizaron 4 mediciones luego de transcurrir 1, 3, 5 y 7 minutos, respectivamente (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Resultados del análisis en campo de los lixiviados con la sonda multiparámetro.

Parámetro	1 min	3 min	5 min	7 min
T (°C)	15.5	15.4	15.3	15.3
O.D. (%)	10.6	10.4	10.2	9.7
O.D. (mg/L)	.92	.92	.90	.85

Parámetro	1 min	3 min	5 min	7 min
C.E (μS/cm),	28052	28051	27998	27995
pH	8.41	8.43	8.44	8.43
ORP (mV)	193.7	195.4	196.2	196.2

Una vez estabilizadas las lecturas, en la tabla 6.1 se observa que:

1. La temperatura de los lixiviados fue de 15.3°C
2. El oxígeno disuelto fue de 9.7%
3. La conductividad eléctrica llegó a los 27,995 μS/cm
4. El potencial de iones hidrógeno (pH, adimensional) manifestó una lectura de 8.43. El pH de este rango valores es alcalino.
5. El potencial óxido-reducción mostró un valor de 196.2 mV

Además, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996: se puede decir que el valor del pH se encuentra dentro del rango permisible para la descarga de aguas residuales a bienes nacionales (que es de 5 a 10 unidades).

6.1.2 ANÁLISIS EN CAMPO DE SUELO Y SEDIMENTOS CON ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

Para los estudios en el laboratorio se utilizó un **espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil (EFRX)**, con el que se analizó la composición química de las muestras de sedimento y del suelo (Subcapítulos 5.1.4, 5.1.5, 5.1.6 y 5.2.1).

1) Sedimentos de la fosa de lixiviados:

El análisis de la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados (FLX-01) (Capítulo 5.1.6) reveló la presencia de metales pesados en concentraciones elevadas. Algunos de los elementos detectados fueron: Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Sn, Ba y Pb. Los elementos que tuvieron las concentraciones más altas fueron: el Pb (30551.6 ppm), el Sn (8980.2 ppm) y el Cu (8544.2 ppm) (Tabla 6.2).

2) Sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado:

Los análisis de las muestras de sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado (Capítulo 5.1.4) (muestras A-02 a A-09), indicaron concentraciones promedio de Pb de 18.4 ppm. Es valor está dentro del rango considerado normal en la naturaleza (Tabla 6.2).

3) Suelo subsuperficial en la desembocadura del arroyo estudiado.

El análisis de la muestra de suelo, a 1.2 m de profundidad en la desembocadura del arroyo afectado (Capítulo 5.1.5) (muestra A-10), reveló concentraciones bajas de Zn (13.7 ppm), As (28 ppm) y Ni (30). Nuevamente, de entre los metales pesados identificados, las concentraciones de Pb y Sn fueron las más significativas, alcanzando valores de 724 ppm y el 452 ppm, respectivamente (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Resultados de los análisis en campo de los sedimentos de los sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado (muestras FLX-01 a A-10), con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X (EFRX).

Muestra	Elementos detectados con EFRX y su concentración en ppm							
	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As
FLX-01	660	97	7780	10178	36	8544.2	2652	170
A-02	1020	40	192	14068	ND	16	62	5.6
A-03	1072	45	198	13965	ND	ND	63	ND
A-04	1360	41	207	19835	ND	ND	111	6
A-05	1312	39	222	19921	ND	ND	116	ND
A-06	2678	ND	81	33789	35	ND	83	ND
A-07	2169	ND	145	22910	ND	ND	57	10
A-08	2776	22	215	20065	34	25	61	ND
A-09	2736	ND	193	25257	38	16	86	8
A-10	977.5	22	195	8983	30	34	13	28

Tabla 6.2 (continuación)

Muestra	Elementos detectados con EFRX y su concentración en ppm							
	Rb	Sr	Zr	Mo	Ag	Sn	Ba	Pb
FIX-01	42	2,929	77	20	50	8,980	124	30,551
A-02	55	208	122	ND	ND	ND	170	26
A-03	53	207	114	ND	ND	ND	127	15
A-04	63	721	139	ND	ND	ND	189	18
A-05	67	786	142	ND	ND	ND	203	13
A-06	98	506	130	23	ND	ND	383	16
A-07	69	599	155	ND	ND	ND	276	21
A-08	69	502	189	ND	ND	ND	171	11
A-09	80	370	146	ND	ND	ND	251	23
A-10	20	55	60.4	315	0.1	452	132	724

Al comparar las concentraciones medidas de Pb y Sn en los resultados de las muestras de sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado y del suelo subsuperficial en la desembocadura del arroyo estudiado (Tabla 6.2), se observa una diferencia notable entre ambos valores. La concentración más alta de Pb se presentó en la desembocadura del arroyo afectado.

En México no existen normas que establezcan límites máximos permisibles (LMP) para la concentración de metales pesados en sedimentos; por lo tanto, los resultados de este estudio se compararon con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Ta y/o Va (Tabla 6.3), de acuerdo con los elementos identificados por el EFRX y que se encuentran en la norma fueron As Ba Ni y Pb.

Tabla 6.3. Comparación de los resultados de los análisis obtenidos por EFRX en la muestra de suelo A-10 con los límites máximos permisibles para concentraciones de As, Ba, Ni y Pb en suelos, establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1- 2004.

Parámetro	Elemento químico y su concentración en ppm			
	As	Ba	Ni	Pb
LMP NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004	22	5,400	1,600	400
Resultado de la muestra A-10 con EFRX	28	132	30	724

En la tabla 6.3 se observa que las concentraciones de Ba y Ni se encuentran muy por debajo del LPM. En cambio, la concentración de As es ligeramente superior al LMP, mientras que la concentración medida de Pb rebasa en un 80% el valor del LMP, establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

6.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO.

Los análisis en el laboratorio de las muestras de suelo y sedimentos se realizaron utilizando un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) (Subcapítulo 5.3.1) y un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Subcapítulo 5.3.2).

6.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO DE MASAS CON PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (ICP-MS).

Los resultados de las muestras de suelo y sedimentos analizados en campo con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X (Tabla 6.2) se compararon con las concentraciones obtenidas en los análisis de laboratorio con el espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) (Tabla 6.4).

1) Sedimentos de la fosa de lixiviados:

Los resultados del análisis realizado con el espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) de la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados (FLX-01) (Tabla 6.4), revelaron una concentración de Pb de 54,441 ppm. Este valor es superior al obtenido en campo, a través de la medición con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, que fue de 30,551.6 ppm (Tabla 6.4). Ambos valores indican la concentración elevada de Pb, en la fosa de lixiviados del relleno sanitario estudiado.

2) Sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado:

Los resultados del análisis realizado con el ICP-MS de la muestra de sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado revelaron concentraciones de Pb y Sn de 11 ppm y 2.5 ppm, dentro del rango considerado normal en la naturaleza (Pb <25 ppm y Sn <10 ppm) (Tabla 6.4). Los valores obtenidos en campo, a través de la medición con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, también presentaron valores bajos de 18.4 ppm y <0.01 ppm, respectivamente (Tabla 6.4). Hay así coincidencia entre ambos análisis en la medición de valores de concentración bajos, encontrados normalmente en la naturaleza.

3) Suelo subsuperficial en la desembocadura del arroyo estudiado.

Los resultados del análisis realizado con el ICP-MS de la muestra de suelo subsuperficial, en la desembocadura del arroyo estudiado (muestra A-10, obtenida de un perfil de suelo a 1.2 m de profundidad, con la ayuda de un barrenador), reportaron valores elevados de concentración de Pb (10504 ppm) y Sn (401 ppm) (Tabla 6.4). Estos valores son superiores a los obtenidos en campo, a través de la medición con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, que fue de 724.8 ppm y 452.4 ppm, respectivamente (Tabla 6.2). Ambos análisis coinciden en la identificación de valores elevados de concentración tanto para el Pb como para el Sn, ya que en ambos casos se rebasa su rango de concentración considerado normal en la naturaleza que es menor a 25 ppm para el Pb y menor a 10 ppm para el Sn.

Tabla 6.4 Resultados del análisis en el laboratorio de las muestras de sedimentos superficiales del lecho del arroyo afectado (muestras FLX-01 a A-10), con el ICP-MS.

Muestra	Elementos detectados con ICP-MS y su concentración en ppm							
	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As
FLX-01	7.16	<0.01	130.3	48.5	<0.01	27.6	22	<0.01
A-02	1,952	35	274	29,743	16.	11	56	3
A-03	1,852	30	322	28,263	16	11	56	12
A-04	2,385	41	306	38,523	19	17	69	12.
A-05	1,633	29	348	37,756	15	12	61	28
A-06	1,832	41	433	3,797	19	14	63	5
A-07	1,611	28	330	35,760	14	12	58	17
A-08	1,835.	30	319	27,706	15	11	59	19
A-09	1,956	34	378	42,007	17	15	68	13
A-10	92.6	<0.01	16.3	1534.9	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Tabla 6.4 (continuación)

Muestra	Elementos detectados con ICP-MS y su concentración en ppm							
	Rb	Sr	Zr	Mo	Ag	Sn	Ba	Pb
FLX-01	<0.01	27	<0.01	<0.01	45.43	1640	59	54,441
A-02	70	288	84	0.04	3.21	2	202	10
A-03	73	333	75	0.65	4.21	1	219	7
A-04	75	984	65	0.68	1.95	3	337	14
A-05	64	534	48	0.21	2.64	2	187	11
A-06	76	496	60	0.65	ND	4	314	13
A-07	62	522	40	0.47	ND	2	1,286	12
A-08	60	333	78	0.83	ND	1	228	8
A-09	74	546	60	0.74	1.21	1	420	11
A-10	2	16	2	<0.01	ND	401	79	10,540

Tabla 6.5 Límites máximos permisibles para concentración de As, Ba, Ni y Pb en suelos, establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1- 2004 y su comparación con los resultados obtenidos por ICP-MS en la muestra de suelo A-10. (a 1.2 m de profundidad).

Parámetro	Elemento químico y su concentración en ppm			
	As	Ba	Ni	Pb
LMP	22	5400	1600	400
Resultado de la muestra A-10 con ICP-MS	<0.01	79	<0.01	10540

En la tabla 6.5 se observa que las concentraciones de Ba y Ni son inferiores al LPM señalado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. En cambio, la concentración de medida de Pb es 26 veces mayor que el valor del LMP, establecido por esta norma.

Con base en los resultados anteriores que indican la importancia de las concentraciones medidas de Pb en:

- 1) los sedimentos de la fosa de lixiviados del relleno sanitario,
- 2) la muestra de suelo subsuperficial (en la desembocadura del arroyo afectado por esta fuente), a 1.2m de profundidad
- 3) la muestra de suelo

se decidió enfocar esta investigación en el estudio de las concentraciones de Pb en las muestras de sedimentos y suelo, con el análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB).

6.2.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

Una vez seleccionado como elemento de interés la concentración de Pb en el sitio de estudio, se realizó un análisis con microscopia electrónica de barrido (MEB) con el fin de identificar la fase mineral en la que se encuentra este metal, y determinar su origen: natural o antropogénico (Capítulo 5.3.2).

Se analizaron dos muestras de material (Figura 5-1, Tabla 5-1):

- 1) Muestra FLX-01 que corresponde a sedimentos de la fosa de lixiviados.
- 2) Muestra A-10 que corresponde a suelo subsuperficial a 1.2 m de profundidad, en la desembocadura del arroyo afectado.

6.2.2.1 Análisis de la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01.

Análisis de partícula 1.

El análisis realizado a la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01 indicó una morfología irregular en la partícula analizada en la micrografía. En este grano, la existencia de zonas más claras y oscuras da la sensación de relieve y brinda una mejor visualización (Figura 6.1 a).

En la banda 1 se observa la firma espectral que, en la micrografía, corresponde a las zonas encerradas en rojo (Figura 6.1 a y b). Esta firma indica la medida de longitud de onda que permite determinar los elementos presentes en la muestra (Pb y Sn). La tabla 6.6 contiene los resultados de la firma espectral y revela un porcentaje en peso alto de Pb, acompañado de O, Sn y Cl (Figura 6.1) (Tabla 6.6).

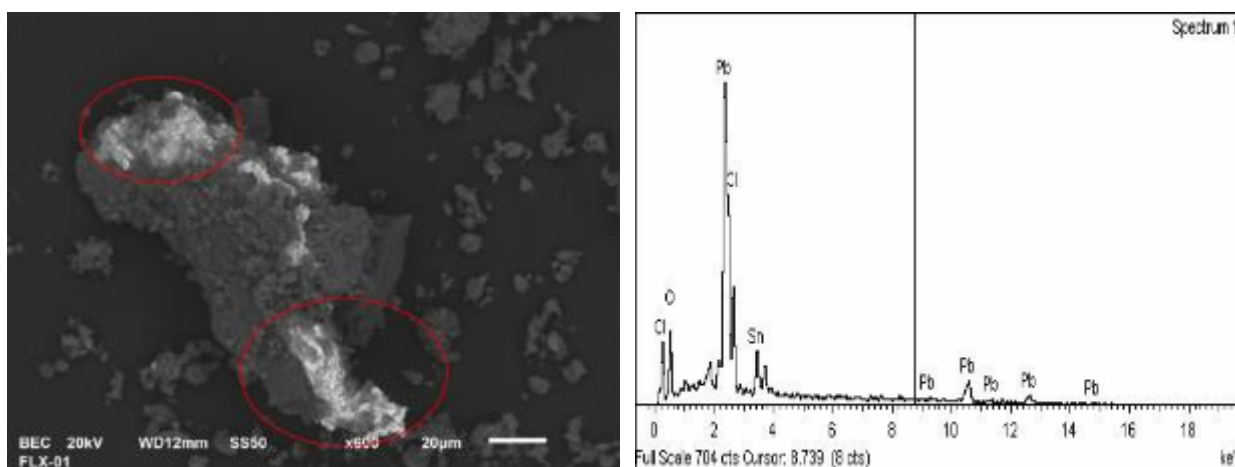


Figura 6.1 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a una escala de 20 μm . **b)** firma espectral en la banda 1, para la zona brillante marcada en rojo.

Tabla 6.6 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 20 μm en la banda de espectro 1 (%Wt = Porcentaje en peso y %At= Porcentaje de la masa atómica).

Elemento	%Wt	%At
O	20.67	66.49
Cl	9.41	13.67
Sn	13.38	5.8
Pb	56.54	14.1

Un segundo análisis con el MEB realizado a la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01, con un aumento a una escala de 2 μm , indicó un relieve áspero en la

zona de la partícula analizada en la micrografía. En este grano, la existencia de zonas más claras y oscuras da la sensación de relieve y brinda una mejor visualización (Figura 6.2 a).

En la banda 1 se observa también la firma espectral que, en la micrografía, corresponde a la zona encerrada en rojo (Figuras 6.2 a y b). Ésta tiene un relieve de picos suaves que se debe a su preparación previa a la molienda del material en un mortero. El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV, con un aumento de x7,500. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 12 mm/s.

La firma espectral indica la medida de longitud de onda que señala la presencia de Pb, O, Sn, Ca y Si. En la tabla 6.7 se observa que el Pb se encuentra en un porcentaje en peso de la muestra del 77.2%.

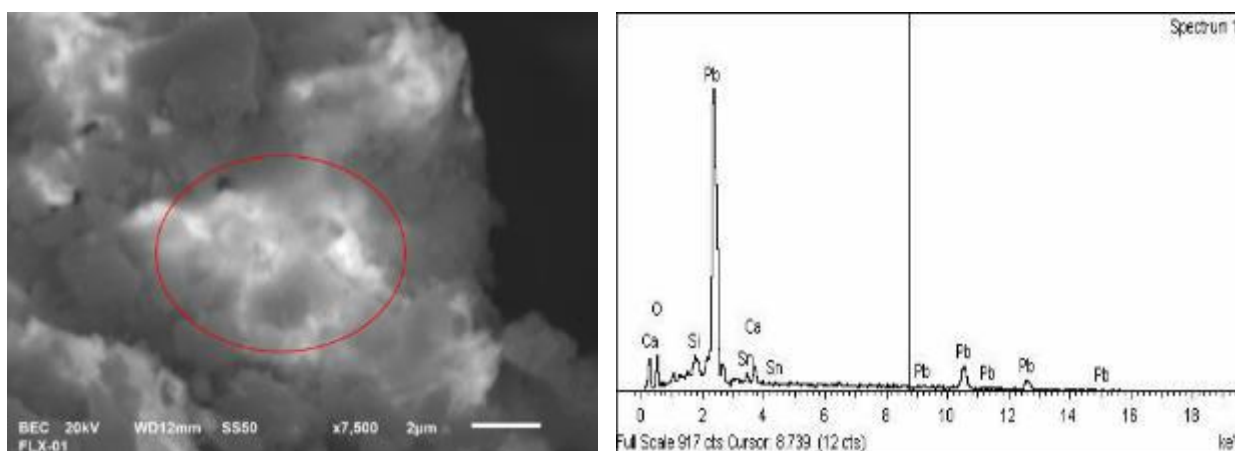


Figura 6.2 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 2 μm. **b)** Firma espectral en la banda 1 (marcada en rojo), para la zona brillante con acercamiento.

Tabla 6.7 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01, a 2 μm en la banda de espectro 1

Elemento	%Wt	%At
O	15.2	65.1
Si	1.4	3.6
Ca	1.9	3.2
Sn	4.2	2.4
Pb	77.2	25.5

La muestra FLX-01 fue sometida a un tercer análisis con el MEB, pero en esta ocasión se estudió la zona no brillante, con el objeto de identificar la composición de la materia

adherida a la partícula de Pb. La micrografía indicó una morfología irregular de la partícula analizada (Figura 6.3 a).

En la banda 2 se observa la firma espectral que, en la micrografía, corresponde a la zona no brillante, encerrada en rojo (Figuras 6.3 a y b). Ésta tiene un relieve áspero que se debe a la adhesión de material arcilloso en la partícula analizada. El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV, con un aumento de x600. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 12 mm/s.

La firma espectral revela la medida de longitud de onda que corresponde a la presencia de: O, Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca y Mn. La tabla 6.8 contiene los resultados de la firma espectral e indica la composición natural de la materia orgánica adherida a la partícula, con los elementos antes señalados.

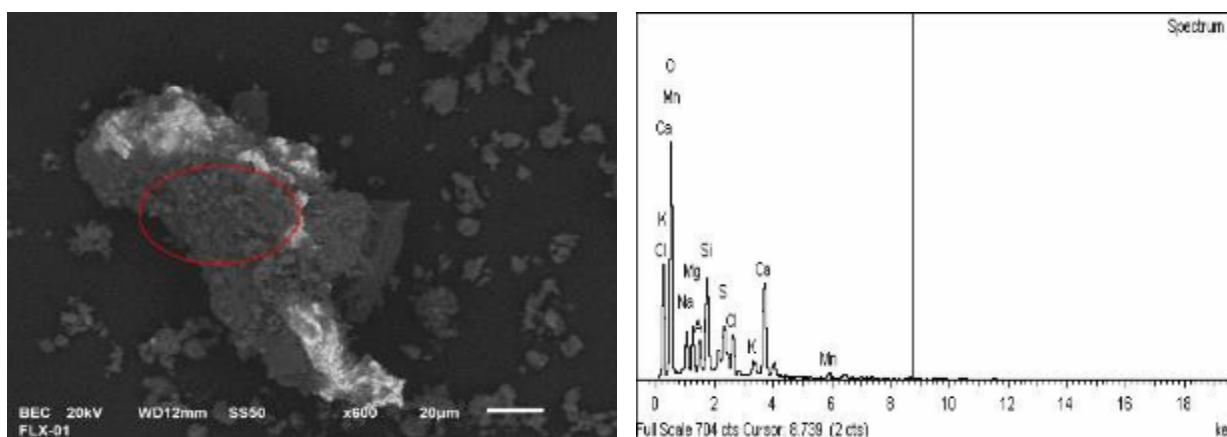


Figura 6.3 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 20 μm . **b)** firma espectral en la banda 2, para la zona no brillante marcada en rojo.

Tabla 6.8 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 20 μm la banda de espectro 2 para la zona no brillante.

Elemento	%Wt	%At
O	62.49	76.55
Na	4.33	3.69
Mg	3.69	2.97
Al	2.11	1.54
Si	6.88	4.80
S	2.68	1.64
Cl	3.81	2.10
K	1.01	0.51
Ca	11.76	5.75
Mn	1.25	0.44

Análisis de partícula 2.

Para otra partícula de la misma muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados (FLX-01) se realizó el análisis con MEB. La micrografía indicó una morfología irregular (Figura 6.4 a).

En la banda 1 se observa la firma espectral que, en la micrografía, corresponde a la zona encerrada en rojo (Figuras 6.4 a y b). Ésta tiene un relieve áspero y textura grumosa, propia del material precipitado. El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV con un aumento de x1,300. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 12 mm/s.

La firma espectral indica la medida de longitud de onda que determina los elementos presentes en la muestra: Pb, Sn, O y Cl. La tabla 6.9 señala los resultados de la firma espectral en donde se observa un porcentaje de Pb del 42.36 % y de Sn, del 38.07%.

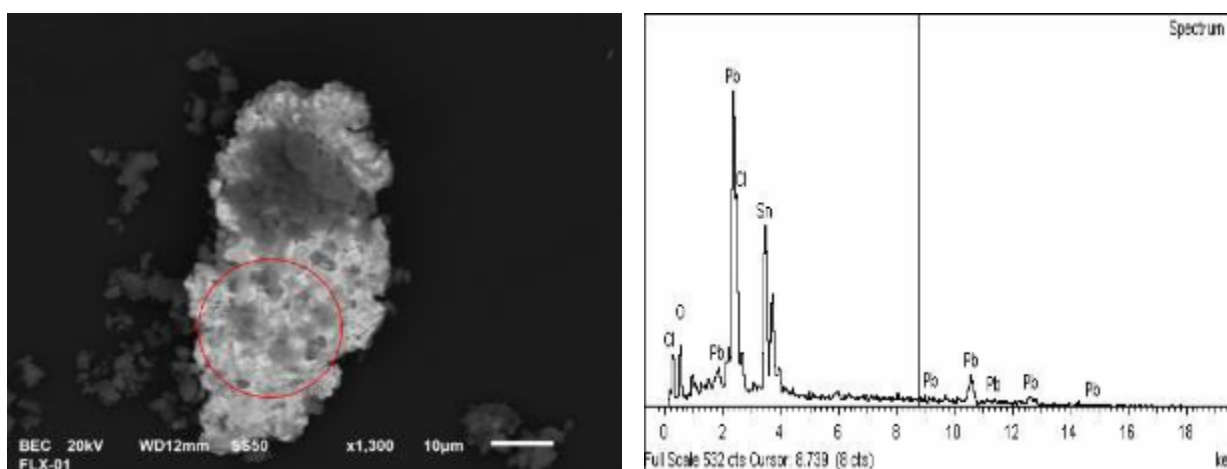


Figura 6.4 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 10 µm en una partícula distinta.

b) Firma espectral en la banda 1, para la zona brillante marcada en rojo.

Tabla 6.9 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 10 µm en la banda de espectro 1 para la zona no brillante.

Elemento	%Wt	%At
O	17.73	65.77
Cl	1.83	3.07
Sn	38.07	19.03
Pb	42.36	12.13

Análisis de partícula 3.

Con el fin de obtener más valores que confirmaran el porcentaje de Pb y Sn en la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados FLX-01, se obtuvo una micrografía de una tercera partícula, encerrada en rojo (Figura 6.5 a). Ésta tiene un relieve áspero subredondeado y textura compactada, debida al alto vacío al que fue sometida en el microscopio. El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV, con un aumento de x5,500. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 12 mm/s.

La firma espectral reveló la medida de longitud de onda que corresponde a la presencia de: Pb, O, Sn y Ca (Figura 6.5 b). La tabla 6.14 señala los resultados de la firma espectral, observándose un porcentaje en peso del Pb del 74.44% (Tabla 6.10).

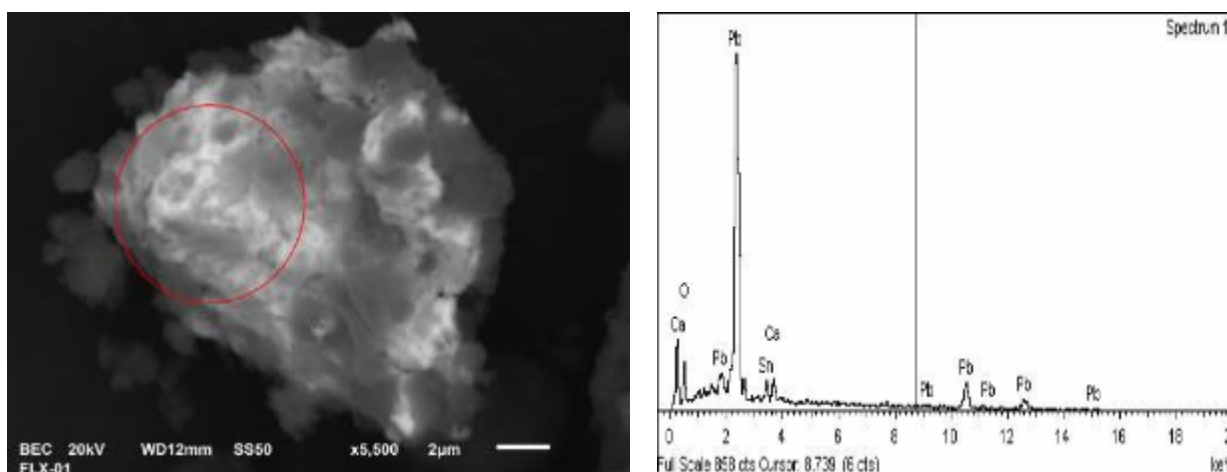


Figura 6.5 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01 a 2 µm en una partícula distinta.

b) Firma espectral en la banda 1 para la zona brillante marcada en rojo.

Tabla 6.10 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra FLX-01 a 2 µm, en la banda de espectro 1 para la zona brillante.

Elemento	%Wt	%At
O	16.19	68.22
Ca	2.00	3.37
Sn	7.37	4.19
Pb	74.44	24.23

6.2.2.2 *Análisis de la muestra de suelo subsuperficial.*

Una vez realizada la caracterización del Pb de la fosa de lixiviados, se procedió a analizar una muestra de suelo subsuperficial, proveniente de la desembocadura del arroyo afectado, a 1.2 m de profundidad (A-10), en el MEB (Figura 5-1, Tabla 5-1).

La micrografía de la muestra A-10 indicó una morfología irregular en la partícula analizada (Figura 6.6 a). Ésta tiene un relieve suave subredondeado y textura disgregada (debida al alto vacío al que fue sometida en el microscopio, a su composición distinta y al tamaño de grano arcilloso). El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV con un aumento de x1,500. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 13 mm/s.

En la banda 1 se observa la firma espectral que corresponde a la zona encerrada en rojo en la micrografía y que revela la presencia de: O, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe. Resalta el hecho de la no identificación de Pb (Figuras 6.6 a y b).

La tabla 6.11 contiene los resultados de la firma espectral y brinda un panorama de la composición del suelo, en el cual se detectaron elementos químicos antes señalados.

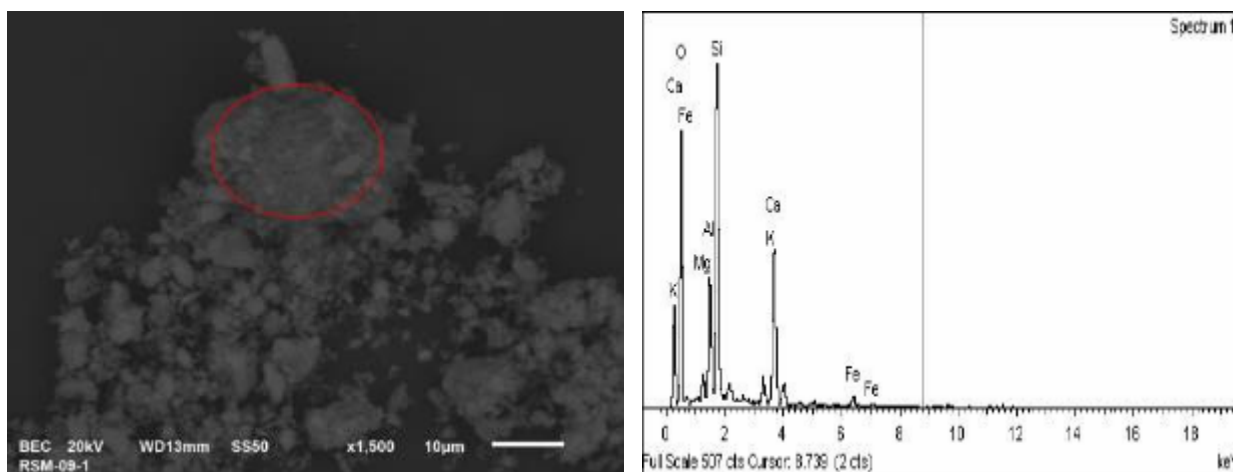


Figura 6.6 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra A-10 a 10 μm. **b)** Firma espectral en la banda 1 para la zona brillante marcada en rojo.

Tabla 6.11 Resultados obtenidos por el MEB para la muestra A-10 a 10 μm la banda de espectro 1 para la zona no brillante.

Elemento	%Wt	%At
O	58.29	73.60
Mg	1.34	1.11
Al	5.87	4.40
Si	17.46	12.56
K	1.73	0.89
Ca	13.29	6.70
Fe	2.03	0.73

La no detección de Pb y Sn en la muestra de suelo subsuperficial A-10 (a 1.2 m de profundidad), pudo deberse a diversos factores, dependientes de la técnica empleada. La microscopía electrónica de barrido realiza la identificación positiva de un elemento por la composición y reconocimiento de los picos que componen la firma espectral analizada (Figura 6.6b). En un espectro aparecen picos a diferentes energías, y cada elemento químico se caracteriza por un conjunto de picos con una configuración específica, determina la composición de la muestra. La altura de los picos depende de la concentración de un elemento presente en la muestra y de la probabilidad de que se produzca el pico, realizando la medición en la porción apropiada del material ingresado.

De igual manera, la detección de uno elemento químico depende de la resistencia del material y de su capacidad de resistir el cambio de presión al alto vacío, de manera que su morfología no sea alterada. La muestra de suelo subsuperficial A-10 (a 1.2 m de profundidad), al tratarse de material arcilloso (de tamaño de talco considerablemente más frágil), pudo no ser apta y no resistir el cambio de presión a la que fue sometida.

6.3 INTERPRETACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A manera de síntesis, a continuación, se presentan los resultados de los análisis de las muestras de campo, tanto de las mediciones en campo, como de los estudios realizados en el laboratorio.

6.3.1 ANÁLISIS EN CAMPO CON EL EFRX.

Las muestras de suelo y sedimento recolectadas en los puntos sugeridos por los principios de depósito de sedimentos en medios fluviales y apoyadas en los resultados del modelo de flujo hidrodinámico (figura 6.7) y que fueron analizadas en campo con el EFRX (párrafo 5.2.1), mostraron: una concentración de Pb de 30,551.6 ppm (en los sedimentos de la fosa de lixiviados, Muestra FLX-01) (capítulo 6.1.2) y de 724.8 ppm de Pb (en la muestra de suelo recolectada en la desembocadura del arroyo afectado, a una distancia de 2.43 km y 1.2 m de profundidad, Muestra A-10). Estos valores contrastan con la concentración de referencia (de 26 ppm de Pb), obtenida en un punto aguas arriba de la fuente de contaminación (Muestra A-02). Análogamente, en los sedimentos superficiales del arroyo afectado (Muestras A-03 a A-09), la concentración promedio de Pb fue de 16.7 ppm (Tabla 6.12).

6.3.2 ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL ICP-MS.

De manera similar, la muestra analizada con el ICP-MS para el sedimento de la fosa de lixiviados FLX-01, mostró una concentración de 54,441 ppm de Pb (Capítulo 6.2.1). Por lo que se refiere a la muestra de suelo subsuperficial A-10, la concentración fue de 10,540 ppm de Pb. Para la muestra A-02 una concentración de 10.25 ppm de Pb, y para las muestras A-03 a A-09 una concentración promedio de 10.8 ppm de Pb (Tabla 6.12).

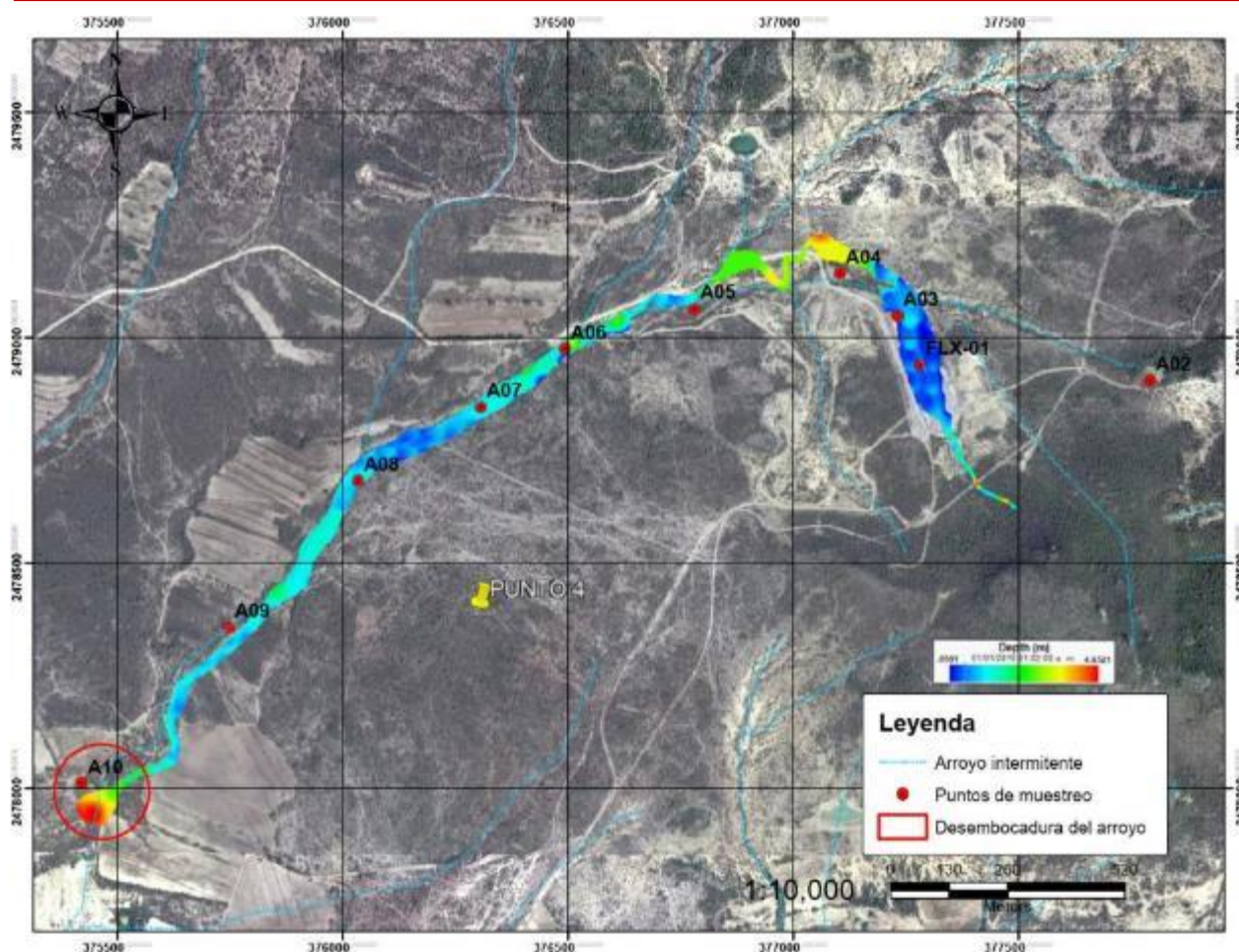


Figura 6.7 Modelado de flujo hidrodinámico y sitios de muestreo con mayor concentración de Pb.

A fin de comparar los resultados de las concentraciones obtenidas en los análisis en campo y en el laboratorio, la tabla 6.12 muestra los valores de las concentraciones de Pb en las muestras de suelo y sedimentos (FLX-01, A-02 a A-10).

Así mismo, los resultados se comparan con los datos obtenidos por Chapa-Arce (2015), quien realizó la determinación de la concentración de fondo total de metales pesados (Cd, Pb y Va) en suelos de la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León, con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil (Tabla 6.12).

Se realizó también una comparación con los datos obtenidos por Siebe (1994), quien estudió las tendencias de acumulación de metales pesados (Cd, Pb, y Zn) en suelos agrícolas de Tula, Hidalgo, regados con aguas residuales (Tabla 6.12).

Finalmente, los valores obtenidos se cotejaron con los resultados de la investigación realizada por Pulido y colaboradores (2015), quienes estudiaron el contenido de metales

pesados (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr) en suelos agrícolas de la región de Ariari, en Colombia (Tabla 6.12).

Tabla 6.12 Comparación de las concentraciones de Pb obtenidas en los análisis en campo y en el laboratorio con EXRF e ICP-MS, respectivamente.

Muestra	Análisis EXRF Pb (ppm)	Análisis ICP-MS Pb (ppm)
FLX-01	30,551	54,441
A-02	26	10
A-03	15	7
A-04	18	15
A-05	13	11
A-06	16	14
A-07	21	22
A-08	11	12
A-09	23	18
A-10	724	10,540
Chapa-Arce (2015)	Mínimo: 32, máximo: 321	
Pulido, <i>et al</i> (2015)	16	
Siebe (1994)	Mínimo: 6, máximo: 50	

Los resultados de la concentración de Pb en la muestra de sedimentos de la fosa de lixiviados (FLX-01) y la muestra de suelo (A-10) son muy elevados en comparación con los valores medidos por Siebe (1994), Pulido y colaboradores, e incluso más elevados que los encontrados por Chapa-Arce (2015) en suelos de la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León. Sin embargo, en las muestras obtenidas de los sedimentos superficiales del arroyo intermitente afectado (A-02 a A-09), los resultados de la concentración de Pb son bajos en comparación con los estudios citados.

6.3.3 ANÁLISIS EN EL LABORATORIO CON EL MEB.

Los resultados obtenidos en los análisis anteriores pusieron de manifiesto la presencia de Pb en concentraciones altas, por lo que se procedió a identificar la fase mineral en la que se encuentra este metal.

Las muestras de sedimentos de la fosa de lixiviados (FLX-01) y de la desembocadura del arroyo afectado (Muestra A-10), fueron analizadas con el microscopio electrónico de barrido (MEB). Los resultados obtenidos en la banda de espectro 1, mostraron la presencia de Pb metálico en la fosa de lixiviados, pero no pudo ser detectado en la

muestra de suelo A-10. Los porcentajes en peso del Pb varían de acuerdo con la escala y el área vista en el microscopio, y van de un 42.36% a un 77.2% de Pb (Tabla 6.7 y 6.9).

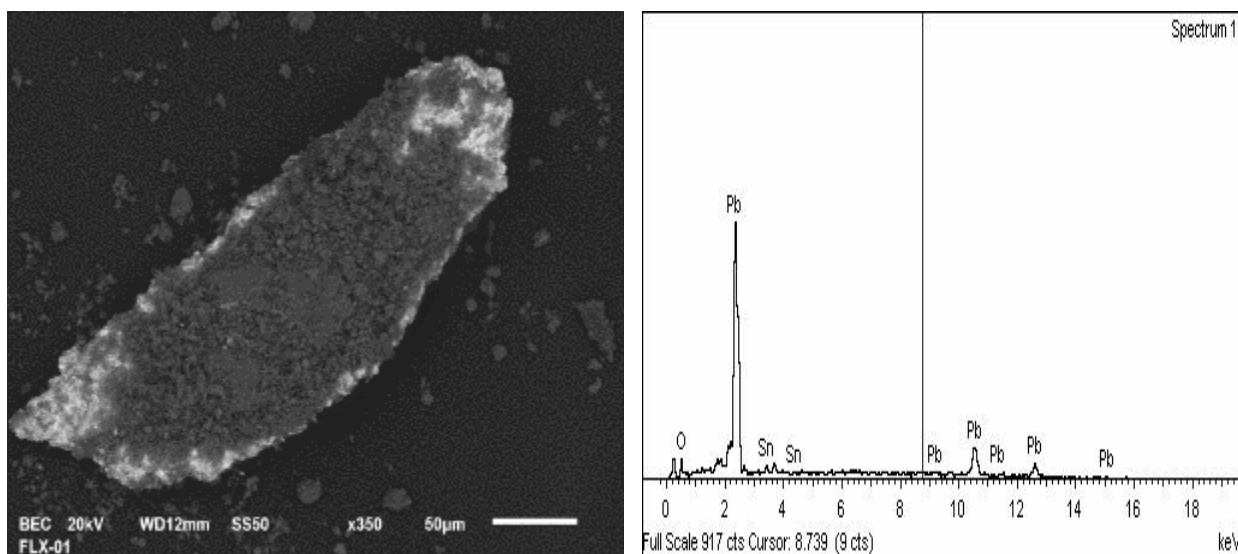


Figura 6.8 a) Micrografía obtenida con el MEB de la muestra FLX-01. Se observa la partícula de Pb en las zonas brillantes con materia orgánica adherida a ésta. **b)** Firma espectral en la banda 1 (Acoplamiento EDS) en la que sobresale el pico de Pb acompañado de Sn.

La figura 6.8 corresponde a una partícula de Pb con abundante material arcilloso adherido, que pertenece a la muestra FLX-01 (Fosa de lixiviados). Ésta tiene un relieve áspero y una forma tabular alargada. El voltaje de aceleración que se utilizó en la muestra (que determina la energía del haz de electrones), corresponde 20kV con un aumento de x350. La velocidad del barrido o “scanning” fue de 12 mm/s a una escala de 50 µm. La firma espectral de esta partícula reveló la medida de longitud de onda que corresponde a su porcentaje en peso con una composición de: Pb (72%), O (16%) y Sn (12%) (Figura 6.9 b). **Los porcentajes elevados corresponden a Pb metálico.**

Cabe señalar que es poco común encontrar el Pb en estado elemental de manera natural. Los minerales más comunes en los que se presenta son los sulfuros, como la galena, cerusita, anglesita y/o sulfatos. Sin embargo, estos minerales contienen cantidades de Pb en porcentajes en peso de entre 3% y 10%, por lo que el Pb se puede presentar de manera natural (en fase mineral) en el ambiente en concentraciones promedio de 25 a 30 ppm. **De presentarse el Pb en concentraciones mayores (>25-30 ppm) en estado metálico, puede deducirse que éstas sean el resultado de actividades humanas** (García *et al*, 2002).

En las muestras analizadas A-10 y FLX-01, la concentración alta de Pb (Tabla 6.2 y 6.4) está acompañada de un aumento en la concentración de Sn. Lo anterior sugiere que el Pb presente en los sedimentos de las muestras FLX-01 y A-10 es una aleación de Pb y Sn, similar al que proviene de la fabricación de acumuladores, forros de cables y elementos de construcción (como tuberías, pigmentos, soldadura e incluso municiones). Estos materiales suelen estar compuestos por aleaciones de Pb y Sn, en distintos porcentajes (Miniussi *et al*, 1975). **Sin embargo, no puede establecerse una relación directa entre los resultados de la muestra FLX-01 y los resultados de la muestra A-10 por ser valores puntuales, estar muy alejados uno del otro y poseer un tamaño de partícula de hasta 50 μm** (el cual se considera relativamente “grande” para ser transportado por medios fluviales). No puede descartarse que los resultados obtenidos en la muestra A-10 sean el resultado de un sitio contaminado por fuentes ajenas al relleno sanitario municipal.

Así mismo, al encontrar en este estudio concentraciones bajas de Pb, en las muestras de sedimentos superficiales del cauce del arroyo afectado (Muestras A-03 a A-09) (Tablas 6.3 y 6.7), e inferiores a los límites máximos permisibles (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) se puede inferir que, al menos en fechas recientes, no han ocurrido eventos en los que el tiradero de RSU y su fosa de lixiviados aporten estos contaminantes al cauce del arroyo y que, **actualmente no existe contaminación en el arroyo estudiado.**

6.4 RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS COMO PROPUESTA PARA SU TRATAMIENTO.

De acuerdo con los resultados obtenidos (párrafo 6.3) que indican el alto contenido de Pb en la fosa de lixiviados del relleno sanitario, se propone la recirculación de este líquido residual hacia la celda de contención de residuos, como medida de tratamiento para su depuración. Las ventajas de este método son su costo bajo de implementación y el control efectivo de la contaminación que producen.

Para su implementación es recomendable utilizar una motobomba autocebante marca Swedish Husky, con motor a 4 tiempos de 6.5 HP, que tiene una capacidad de hasta 30 m de altura de bombeo y una succión máxima de 7 m y puede bombear un caudal de 500 l/min, con un consumo de gasolina de 0.92 l/h. Se recomienda para uso ligero en irrigación de campos, llenado y vaciado de cisternas, pipas o albercas, en las cuales no se requiere de mucha presión, pero sí de un caudal alto.

A la motobomba se conectaría una manguera de 2" de diámetro que se introduce en el relleno de piedra bola (entre el tubo de PVC ranurado y la malla de armex) de los pozos de venteo de biogás (Figura 2.7a y 2.7b).

Con la motobomba mencionada, se necesitaría aproximadamente 153 minutos (poco más de 2 horas y media) para vaciar los 76.5m³ de lixiviados almacenados en la fosa.

Con la recirculación de los lixiviados se pretende utilizar el relleno sanitario como un gran reactor anaerobio para que dentro de éste se logre la conversión de los ácidos grasos presentes en el lixiviado a metano. Al recircular los lixiviados se logra un incremento en la humedad de los residuos dispuestos, lo que aumenta la tasa de producción de biogás en el relleno y es beneficioso si éste es aprovechado. Una vez que los ácidos grasos han sido metanizados, el pH del lixiviado se vuelve alcalino y hace que la solubilidad de los metales disminuya, logrando una reducción significativa de los metales que finalmente arrastra el lixiviado (Jácome-Cordones, 2016).

La recirculación de los lixiviados se realizará previamente a la temporada de lluvias, para evitar desbordamientos de la fosa, con los consecuentes problemas ambientales analizados en esta tesis.

6.5 RECOMENDACIONES PARA EL SELLADO DE LA CELDA Y EVACUACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.

El propósito del sellado de la celda de residuos sólidos urbanos es evitar los riesgos que conlleva exponer al ambiente los residuos y partículas contaminantes. Por lo general, el sellado se inicia cuando en la celda de disposición se ha agotado el espacio destinado para el depósito de residuos. También puede realizarse de manera gradual, conforme se van saturando de residuos ciertas áreas del relleno (Roben, 2002).

La evacuación de las aguas superficiales de la celda de residuos sólidos previene la generación excesiva de lixiviados y la erosión hídrica en la superficie de sellado de la celda.

A continuación, se presentan recomendaciones para realizar el sellado de la celda en su talud lateral oeste, en el que se encuentra comprometida la exposición de los residuos. Se propone realizar un desazolve del canal de encausamiento del arroyo intermitente que

pasa por en medio del relleno sanitario. Se señalan algunas sugerencias para reintegrar el sitio de disposición final al paisaje.

6.5.1 *CONDICIÓN ACTUAL DE LA CELDA DE CONTENCIÓN DE RSU.*

La celda de contención de residuos sólidos urbanos (RSU) en el sitio de estudio se encuentra en mal estado: los con taludes tienen pendientes muy pronunciadas (cercasas a los 80°); los RSU están descubiertos y expuestos a la intemperie (Figura 6.9), además, los escurrimientos pluviales han producido grietas en la celda de contención de residuos (Figura 6.10).

Los RSU se encuentran en contacto con el agua de lluvia promoviendo la formación de lixiviados fuera de la celda de contención de residuos. Los RSU y sus partículas en las que se degradan son dispersados por el viento y llevados corriente abajo por el agua, esparciéndolos en los alrededores del sitio de estudio.



Figura 6.9 Condiciones actuales del talud de la celda de contención de residuos en el sitio de estudio.



Figura 6.10 Grietas ocasionadas por la acción de agentes hídricos en la celda de contención de residuos.

6.5.2 SELLADO Y MANTENIMIENTO DE LA CELDA

Antes de realizar el sellado de una celda de contención de RSU, se debe asegurar el control de acceso a la zona para evitar el depósito de otros residuos, antes del sellado permanente del sitio (SEDESOL, 2005).

Se debe hacer un reperfilado de la superficie de la celda, tomando en cuenta la estabilidad del talud de los residuos para evitar deslaves y disminuir las pendientes pronunciadas que incentivan la erosión hídrica. Para evitar la erosión hídrica y eólica, la pendiente de los taludes de las celdas de contención de residuos debe tener una relación de 1 unidad vertical por cada 3 unidades horizontales (ISWA, 2010; SEDESOL, 2005).

Enseguida, la celda de contención se debe sellar y cubrir su talud desgastado que exponen al ambiente a los residuos. Se colocará una capa de material arcilloso compactado de 60 cm de espesor (Figura 6.11) (Cortázar et al., 2017).

Las grietas en las capas de sello se repararán con material arcilloso, evitando dejar espacios porosos que puedan albergar líquidos que agraven su erosión. Para lograr una

compactación adecuada del material en las reparaciones grandes se utilizará un vibro compactador y para las pequeñas, un apisonador motorizado.

Se propone realizar el sellado del costado oeste del relleno sanitario municipal, el cual, se encuentra desgastado y expone al ambiente las capas de RSU. Este talud desgastado suma una longitud de 80 m, por una anchura de 3 m. Si se considera una cubierta de suelo con un espesor de 0.8 m, el volumen necesario de material arcilloso será de 192 m³ para colocar sobre el talud una capa de sellado compactado, de aproximadamente 0.6 m de espesor (se considera una compactación de 0.2 m).

La dirección de obras públicas del municipio de Cerritos, S.L.P., refiere que el costo actual de material arcilloso, incluido el viaje de transporte de carga y descarga, desde un banco de material hasta el relleno sanitario es de \$800.00 por 6 m³ (que es la capacidad del camión). De acuerdo con lo anterior, para cubrir y sellar el talud expuesto del sitio de disposición final, serían necesarios un total de 32 viajes de camiones con material arcilloso, con un costo estimado total de: \$25,600.00.

A lo anterior se debe considerar la renta una retroexcavadora y un vibrocompactador, así como los servicios de un topógrafo y una estación total para asegurar el nivel de compactación y espesor deseado.

También, se recomienda que, en el RSM, se les dé reparación primordial a grietas en las capas de sello, que son provocadas por la acción de agentes erosivos eólicos e hídricos (Figura 6.11). Dichas reparaciones deben llevarse a cabo con material de características composicionales similares, evitando dejar espacios porosos en los cuales se pueden albergar líquidos que agravan su erosión. Es ideal utilizar maquinaria como un vibrocompactador (en caso de reparaciones grandes) o un apisonador motorizado (en caso de reparaciones de tamaño menor), para lograr una compactación adecuada del material.

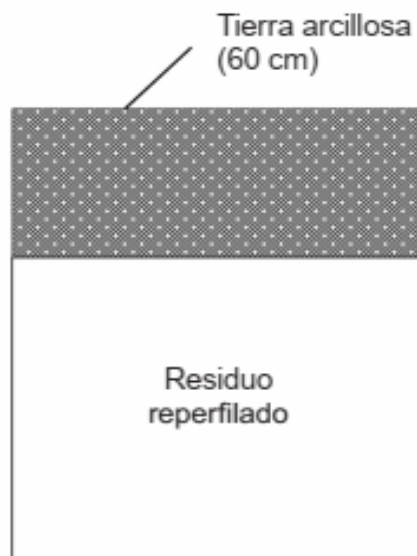


Figura 6.11 Propuesta de sellado de la celda en el sitio de estudio (Cortázar *et al*, 2017).

Para evitar la erosión en la capa de sellado, debida a la entrada de agua al sitio de disposición final se debe minimizar la escorrentía sobre la cobertura del relleno sanitario con la instalación de cunetas perimetrales que interceptan y desvían las precipitaciones pluviales.

En el sitio de estudio las cunetas se encuentran en mal estado debido a la falta de mantenimiento. Se sugiere realizarles un desazolve para retirar el material que ha sido depositado por las lluvias en épocas anteriores. Este mantenimiento puede reducir en gran manera la cantidad de agua que ingrese a las celdas de contención de RSU, disminuyendo la erosión de sus taludes y generar menos lixiviados.

6.5.3 REINSERCIÓN AL PAISAJE LOCAL.

Después de sellarlos con material arcilloso, los taludes de la celda de contención de residuos se redondearán para procurar una armonía con el paisaje local (Figura 6.12).

La rehabilitación paisajística del sitio requerirá de la plantación de especies vegetales locales, que reintegrarán de manera estética el paisaje, estabilizarán la superficie y reducirán la erosión en los taludes.

La solución más simple es la plantación de especies herbáceas, de rápido desarrollo y raíces someras. El espesor de suelo y tierra debe ser suficiente para el crecimiento de las raíces. Los árboles y arbustos pueden reservarse a las zonas perimetrales del sitio de disposición final.

Dadas las especies nativas que se observan en la zona donde se ubica el sitio de disposición final (Capítulo 2.3.1), se recomienda realizar una reintegración paisajística con especies locales como: “Nopal de Tuna” (*Opuntia ficus indica*), “Choya” (*Corynopuntia bulbispina*), “Biznaga” (*Echinocactus visnaga*), “Maguey de peña” (*Agave mitis*), “Lechuguilla” (*Esperaloe chianguii*), “Huapilla” (*Hechtia glomerata*), y “Granjeno” (*Celtis laevigata*) (Figura 6.13).

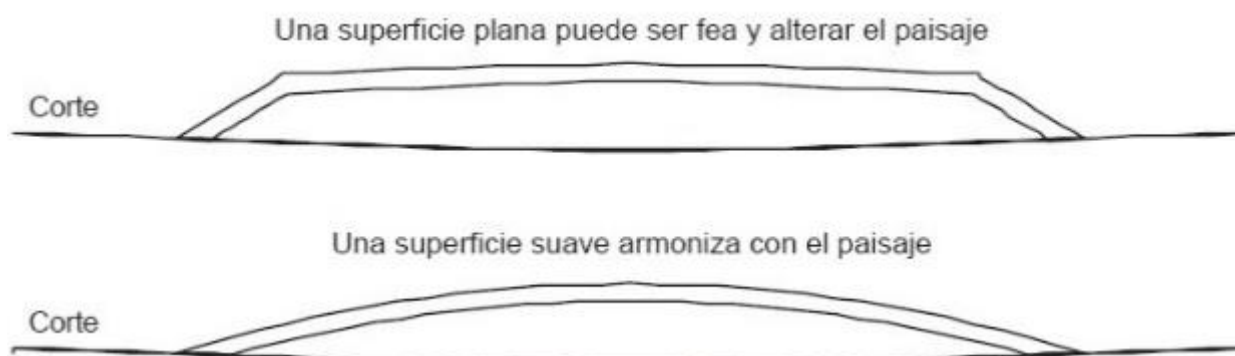


Figura 6.12 Vista en corte de una celda de contención de residuos que altera el paisaje y una celda de contención de residuos que armoniza con el paisaje.



Figura 6.13 Especies propuestas para la rehabilitación paisajística del relleno sanitario.

6.6 MONITOREO DEL RELLENO SANITARIO MUNICIPAL.

El monitoreo permite identificar con suficiente antelación los posibles agrietamientos en la capa de sellado para dar una respuesta pronta de reacción y evitar que estos problemas se agraven. Los elementos siguientes se deberán monitorear al inicio de la temporada de lluvias (mes de julio) y al inicio de la temporada de sequía (mes de enero) (Capítulo 2.4.6):

Celda de contención de residuos sólidos urbanos: se deberá realizar una inspección visual a las condiciones del sellado superficial de las celdas de contención de residuos sólidos urbanos en la que se valore la estabilidad del talud, el agrietamiento de la superficie selladora y de ser posible, realizar mediciones de la subsidencia de la celda de acuerdo con registros previamente recabados por la topografía. (Figuras 6.9 y 6.10).

Fosa colectora de lixiviados: Es recomendable realizar mediciones del nivel de lixiviados en la fosa durante todo el año especialmente en la temporada de lluvias. Debe verificarse que no haya un desbordamiento del lixiviado, que el cercado de seguridad de ésta se mantenga en buen estado restringiendo su acceso para la fauna local. En caso de que el nivel de los lixiviados sea elevado, éstos se recircularán por medio de bombeo a la parte superior de la celda de contención de residuos, y se inyectarán a través de los pozos de venteo de biogás (Figura 2.7).

Pozos de venteo de biogás: Se debe verificar que la red de pozos de venteo de biogás se mantenga en buen estado y sin obstrucciones en sus ductos exteriores de PVC. En la revisión visual se deben detectar los deterioros que pudiere tener el mallado de armex de los pozos de venteo, su relleno de piedra bola y el ducto colector principal de biogás (Figura 2.7).

Cerca perimetral: El cercado perimetral se debe mantener en buen estado para evitar que la fauna local, la fauna nociva y el ganado de las localidades cercanas deteriore la capa de sellado de la celda de contención de residuos y tenga acceso a la fosa de lixiviados.

Acceso y vías de comunicación: Se debe dar mantenimiento al camino de acceso al sitio, con el objeto de facilitar el desplazamiento a éste del personal que realizará las actividades de mantenimiento, antes descritas. En la temporada de lluvias, las vías de

acceso pueden deteriorarse y ser inaccesibles, por tanto, se debe verificar que no haya obstrucciones en los caminos que eviten el ingreso del personal y maquinaria.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Al término de este trabajo de investigación se pueden expresar las conclusiones siguientes:

Los trabajos de campo y gabinete permitieron caracterizar los elementos ambientales bióticos (como la flora y fauna) y los elementos físicos (como la geología, la edafología, morfología, la hidrología de la cuenca local y el clima dominante) del sitio de estudio.

El uso del modelo EFDC Explorer, en conjunto con los principios hidrológicos de deposición de sedimentos en cauces meándricos, habilitó el conocimiento de la hidrodinámica del arroyo intermitente afectado, e identificó los sitios de muestreo con mayor posibilidad de depósito y concentración de metales pesados (Pb), transportados a partir de la fuente contaminante.

A partir del análisis con Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (EFRX) en campo, se identificaron concentraciones elevadas de Pb en la fosa de lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos, y en un punto en la desembocadura del arroyo. Sin embargo, en las otras muestras de sedimentos del arroyo, los valores de las concentraciones medidas fueron bajas.

La orientación de los estudios a la búsqueda de Pb sugirió un análisis más preciso con el método ICP-MS. Las concentraciones de Pb obtenidas fueron:

- a) En la fuente de contaminación, muy altas (Rangos de 30 k – 50 k ppm de Pb).
- b) En la muestra de subsuelo aguas abajo, muy alta (700 – 10,000 ppm de Pb).
- c) En los sedimentos superficiales del arroyo, normal en un rango de (10 ppm de Pb).

El análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB) confirmó las concentraciones elevadas de Pb por los métodos anteriores y sugirió que el Pb encontrado en las muestras es metálico

Las concentraciones bajas de Pb encontradas en los sedimentos superficiales del arroyo (e inferiores a los límites máximos permisibles en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) indican que, en fechas recientes, no han ocurrido eventos en los que el sitio de disposición final de RSU aporte sus contaminantes al arroyo intermitente. **Con lo cual se puede decir que no hay contaminación de esta fuente en el área estudiada.**

Las recomendaciones para el tratamiento de los lixiviados (recirculación), el sellado del talud de la celda que expone sus residuos y las sugerencias respecto a los elementos del relleno sanitario que se deben monitorear, ofrecen alternativas efectivas para la prevención de la contaminación del sitio.

A fin de orientar líneas de investigación futuras en el sitio estudiado y a fin de profundizar el trabajo desarrollado en la presente tesis, se propone:

Atender las recomendaciones propuestas para el sellado del talud de la celda de contención de residuos y la reintegración al paisaje.

Realizar un plan de muestreo más extenso, en el que se abarque al menos 1 km aguas arriba de la fuente de contaminación, para obtener el valor de fondo (concentración de metales pesados) que tienen de manera natural el suelo y los sedimentos en la zona de estudio.

Realizar un reconocimiento en campo, enfocado a la búsqueda y localización de fallas geológicas en la zona de estudio.

REFERENCIAS.

Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. and Barberis, R. 2002. Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. Environmental Pollution, 119: 177.

Abril Menéndez, E. Y., 2016. Diseño de un modelo de gestión integral para mitigar la contaminación visual y efectos sanitarios, ocasionados por la acumulación de los neumáticos fuera de uso (nfu), de la cabecera parroquial Joya de los Sachas, cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana (Bachelor's thesis).

Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P. F., & Zepeda, F., 1997. Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. Inter-American Development Bank.

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. Ingeniería, 15(1), 37-45.

Angelova V., Ivanova, R., Delibaltova, V. and Ivanov, K. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Industrial Crops and Products, 19: 197–205.

Bagchi, A., 1990. Design, construction and monitoring of sanitary landfill. John Wiley & Sons. New York.

Barradas Rebolledo, A., 2009. Gestión integral de residuos sólidos municipales: estado del arte.

Batalla R.J. y Sala, M., 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. En: Variability in Stream Erosion and Sediment

Camacho, A., Abellán, J., Garcia, C., & Lopez, D., 2011. Mejores técnicas disponibles de referencia europea para la incineración de residuos.

Caneiro A., Serquis A., Montero R.J., Bozzano P.B. (2010) Del metro al nanómetro. ¿Qué tamaño tiene lo que vemos? ¿Y lo que no podemos ver?, Consultado el 16 de abril de 2020. Disponible en: http://www.cnea.gov.ar/pdfs/divulgacion/28_metro_nanometro.pdf

Carrillo-Bravo, J., 1971. La Plataforma Valles-San Luis Potosí. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23(1-6), 1-102.

CEPA,1999. Canadian Environmental Protection Act.

Chapa Arce, C. F., 2015. Determinación de la concentración de fondo total de cadmio, plomo y vanadio en suelos prístinos en el estado de Nuevo León y su comparación con estudios previos de suelo en el área metropolitana de Monterrey (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Chinchilla, R. M., & Amador, R. M., 2003. Reseña histórica del relleno sanitario de Río Azul y consideraciones sobre los metales pesados tratados en él y los presentes en nuestros hogares. Reflexiones, 82(2), 5.

Colomina, A. F., 2005. La gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el desarrollo sostenible local. Revista Cubana de Química, 17(3), 35-39.

Corena Luna, M. D. J., 2008. Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios (trabajo de grado modalidad monografía, presentado como requisito para optar el título de ingeniero civil). Universidad de Sucre.

Cuenca, J., 2017. El Biogás y los Gases de Efecto Invernadero. Recuperado 8 de enero de 2020, de AGF Ingeniería de Procesos website: <https://agfprocesos.com/biogas-los-gases-efecto-invernadero-gei/>

Cuesta López, J., 2015. Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red (Grado en Ingeniería Mecánica). Universidad Carlos III de Madrid.

Cortázar, A. L. G., Narea, M. S., & Llamas, S., 2017. Cierre, sellado y reinserción de antiguos vertederos. Experiencias en Iberoamérica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32, 123-139.

Del Ángel Hernández, E., 2014. Hidrodinámica. Hidalgo. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/16715/LECT147.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delgado Rodríguez, M., 2012. Optimización de las variables implicadas en el proceso de compostaje de RSU para minimizar la emisión de compuestos orgánicos volátiles. Universidad de Huelva.

Echeverri, S. M. P., 2004. Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Revista lasallista de investigación, 1(1), 56-65.

EPA, 2017. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Parte 258: Criterios para los vertederos de residuos sólidos urbanos. Consultado el 15 de mayo de 2019. Disponible en: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR>.

Fallas, J., 2007. Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica.

Gaitán, A. F. S., 2009. La Contaminación Visual-Paisajística en el Derecho Costarricense.

García, C., Moreno, J. L., Hernández Fernández, M. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo.

García, H., Toyo, L., Acosta, Y., Rodríguez, L., & El Zauahre, M., 2014. Percepción del manejo de residuos sólidos urbanos (fracción inorgánica) en una comunidad universitaria. Multiciencias, 14(3), 247-256.

García, I. y Dorronsoro, C. 2005. Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>.

García-Piñón, F., & Jordán, M., 2008. Análisis de la Normativa de Vertederos, Ingeniería de residuos. Hacia una gestión sostenible. In I Simposio Iberoamericano sobre Ingeniería de Residuos.

Garrido, J. L., Martínez, J. P., & Acosta, R. R., 1980. Eliminación de los residuos sólidos urbanos. Reverte.

Rangel, N. B., 2016. Simulación numérica del comportamiento de la calidad de agua en ríos contaminados, a partir de datos de monitoreo puntuales (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Guzmán Chávez, M., & Macías Manzanares, C. H., 2012. El manejo de los residuos sólidos municipales: un enfoque antropológico. El caso de San Luis Potosí, México. Estudios sociales (Hermosillo, Son.), 20(39), 235-262.

Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, I., García, N., & García, D., 2008. El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Univ. Autónoma de Nayarit.

Hickman L., 1990. Integrated solid waste management, Estados Unidos, Ed. American Academy of Environmental Engineers Staff.

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P., 2012. What a waste: a global review of solid waste management.

Imlay, R. W., 1944. Cretaceous formations of central America and Mexico. AAPG Bulletin, 28(8), 1077-1195.

INECC-SEMARNAT, 2012. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos Disponible en:<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>

INEGI, 2015. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales. Modulo ambiental de residuos sólidos urbanos.

INEGI, 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico

Ipohorski, M., & Bozzano, P., 2013. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. Ciencia e investigación, 63(3), 43-53.

Israde I., Buenrostro O. y Carrillo A., 1999. El tiradero de Morelia y sus lixiviados. Vinculación, núm. 6, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 35-43.

Israde I., Buenrostro O. y Carrillo-Chávez A., 2005. Geological characterization and environmental implications of the Placement of the Morelia landfill, Michoacán. Central Mexico. J. Air Waste Manage. 55, 755-764

ISWA, 2010. International Solid Waste Association. What is good practice in solid waste sanitarios.management? United States.

Jácome-Cordones, D. F., 2016. "Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del Cantón Salcedo Provincia de Cotopaxi mediante floculación iónica y técnica fenton en el año 2015" (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 19-24. Journal(93), 67-73. doi:DOI: 10.7203/metode.8.9415

Kaoser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M., 2000. Compartments for the management of municipal solid waste: Soil and Sediment Contamination,9, 503-522.

León-Gómez, H. D., Cruz-Vega, C. R., Dávila-Pórcel, R. A., Velasco-Tapia, F., & Chapa-Guerrero, J. R., 2015. Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. Revista mexicana de ciencias geológicas, 32(3), 514-526.

LGPGIR, 2007. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Actualizada: 19 de junio de 2007. (Fecha de consulta: 10 de mayo de 2010) Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>

López, M. A. T., García, E. A., Sáenz, F. M. B., Paiz, C. C., Ruiz, F. J. D., Soto, I. J., & Martínez, L. S. M., 2018. Derecho ambiental. Comercial Grupo ANAYA, SA.

Lucho, C.A., Álvarez, M., Beltrán, R.I., Prieto, F. and Poggi, H. 2005a. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. Environmental International, On Line: 0160- 4120-D 2004 doi:10.1016/j.envint.2004.08.002.

Luna, M. D., 2008. Sistemas de tratamiento para lixiviados generados en rellenos

Manrique, F., Manrique, D., Manrique, R. & Tejedor, M., 2007. Contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha y algunas aproximaciones sobre la salud humana.

Revista Salud Historia y sanidad, 2 (1), 03-13. Recuperado de: <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1352/1/RED-124.pdf>

Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Alvarez, J., & Salvarrey, A., 2005. Guía para la gestión integral de residuos peligrosos: Fundamentos.

Martínez Salcedo, H. G., 2012. Análisis de los modelos de transporte fluvial por los ríos Paraná, Danubio y Yangtsé para el proceso logístico de mercancías y su aplicabilidad en Colombia.

Méndez, F., Gómez, O., Girón, S., Mateus, J., Mosquera, J., Filigrana, P & Guloso, L., 2006. Evaluación del impacto del relleno sanitario Doña Juana en la salud de grupos poblacionales en su área de influencia. Consultado el 12 de mayo de 2019. Disponible en: <http://www.cerrarelbotadero.org/inicio/archivos/EstudioEpidemiologicoRSDJ.pdf>.

MIKE Powered by DHI, 2018. MIKE 21 and MIKE 3.

MINISTERIO DEL AMBIENTE., 2014. Guía para el Muestreo de Suelos. Gobierno de Perú.

Miniussi, C. L., Meda, J. F., & Popovsky, C., 1975. Estudio de una técnica que aplica la espectrometría de rayos X al análisis de aleaciones de estaño-plomo. In Anales LEMIT. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).

MOHID Water Modelling System., 2018. Agua mohid. Obtenido de http://www.mohid.com/pages/models/mohidwater/mohid_water_quality.shtml

Mora, X., 2017. LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES. Mètode Science Studies

Morales-Soto, S. E., & Rodríguez-Infante, A., 2016. Evaluación geológica ambiental para ubicar un relleno sanitario manual en la parroquia Mene de Mauroa, Venezuela. Minería y Geología, 32(2), 87-101.

Niño Carvajal, L. X., Ramón Valencia, J. A., & Ramón Valencia, J. L., 2016. Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. Producción+ limpia, 11(1), 66-74.

Ocampo, C., Gullos, L., 2006. Evaluación del impacto del relleno sanitario Doña Juana en la salud de grupos poblacionales en su área de influencia. [http://www.cerrarelabotadero.org/inicio/archivos/Estudio EpidemiologicoRSDJ.pdf](http://www.cerrarelabotadero.org/inicio/archivos/Estudio_EpidemiologicoRSDJ.pdf). Último acceso enero 16 de 2020.

Palacio, C., García, F., & García, U., 2010. Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de Cartagena. *Dyna*, 77(164), 152-166.

Pineda, H.R. 2004. Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de Glomus Intraradices en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*Helianthus Annuus* L.) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima.

PROFEPA, 2016. Procuraduría Federal de protección al Ambiente. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (Fecha de consulta: 17

Pulido, J. D. M., González, J. M. T., & Mora, M. A. T., 2015. Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, 19(1), 118-122.

Quiroz, R., 2015. Evaluación y Recomendaciones para mejorar el Rendimiento de los Sistemas de Contención de Residuos. *Gidahatari*. Consultado el 15 de mayo de 2020, Disponible en: <https://gidahatari.com/ih-es/evaluacion-y-recomendaciones-para-mejorar-el-rendimiento-de-los-sistemas-de-contencion-de-residuos>

Reinhart, D.R., Townsend, T.G., 1998. *Landfill Bioreactor Design and Operation*. Lewis Publishers, Boca Raton.

Roben, E., 2002. Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales. Municipalidad de Loja. Ecuador

Robles Aguilar, L.F., 2019. Modelación hidrodinámica para conocer el diagnóstico hidráulico del río gallinas, estado de San Luis Potosí, México. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí. Recuperado de: <http://ciep.ing.uaslp.mx/<ahref=tesisPDF/3102019102872865082013.pdf>

Rocha-Rocha, M., 2008. Yacimientos de Celestina en la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Repositorio Nacional CONACYT.

Romero Paredes, A., 2013. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CEDA. 1st ed. México: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

Rosas Domínguez, Anabell; Peña Luna, Angélica; Ramos Rodríguez, Graciela; Izumikawa, Chiaki; Aguilar, Guillermo; Velasco Trejo, Juan; Flores Martínez, Sergio; Díaz Ramos, Adrián; Magdaleno Gutiérrez, Ana; García Romero, Luis; Salgado Figueroa, Paola, 2003. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México. Evaluación de la incineración de residuos peligrosos Gaceta Ecológica, núm. 66, enero-marzo, 2003, pp. 27-40

Sáez, A., & Urdaneta, J. A., 2014. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia, 20(3), 121-135.

Sámano Celorio, M. L., 2011. Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica. Universidad de Cantabria.

Sauquillo, A., Rigol, A. and Rauret, G. 2003. Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends in Analytical Chemistry, 22: 152-159.

SCFI., 2006. Norma Mexicana NMX-AA-132. SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la Federación.

SEDESOL, 2005. Secretaría de Desarrollo Social. Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales.

SEGAM, 1999. Secretaria de Ecología y Gestión Ambiental. Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí. [Fecha de consulta: 10 marzo 2010]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/San%20Luis%20Potosi/wo29911.pdf>

SEMARNAT, 2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

SEMARNAT, 2003. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial: México, SEGOB, SEMARNAT, Serie Normas Oficiales en Materia de Residuos, recurso electrónico: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PD02/nom083.pdf>, consultada en junio 2018.

SEMARNAT, 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de estos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

SEMARNAT, 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificación para la remediación. 2012.

SEMARNAT, 2015. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf. Consultado el 17 de marzo de 2020.

Sepúlveda, T. V., 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología.

Siebe, C., 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 10(1), 15-21.

SGM, 2006. Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológico-Minera Cerritos, F14-A76, escala 1:50,000.

Sumathi, V.R., Natesan, U., Sarkar, C., 2008. GIS-based approach for optimized.

Tarbut, E. y F. Lutgens. 1999. Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física. 6ª. Ed. Prentice Hall Iberia S. R. L. Madrid. 572 p.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S., 1994. Gestión integral de residuos sólidos. Editorial McGraw-Hill.

Torres Bejarano, F., Padilla, J., & Rodriguez Cuevas, C., 2015. Hydrodynamics modelling utilizing the EFDC Explorer model for the sustainable management of Canal del Dique-Guajaro hydrosystem, Colombia. doi:10.2495/SD150371

Villalpando, T. D. G., 2016. Manejo de residuos sólidos municipales en Belice, Canadá y México: una perspectiva informativa.

Villota Lopez, C., 2019. Modelación numérica de la calidad del agua en el río Gallinas, estado de San Luis Potosí, México. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí. Recuperado de: <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/972019102872865102013.pdf>

Wolman, M.G. & Miller, J.P., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journal of Geology, 68: 54-74. 15

M. Xia, P.M. Craig, C.M. Wallen, A. Stoddard, J.M. Poulsen, M. Peng., 2011. Numerical simulation of salinity and dissolved oxygen at Perdido Bay and adjacent coastal ocean, J. Coastal. Res. 27 (1) 73–86.

Zhen-Gang Ji., 2008. Hydrodynamics and Water Quality.