

**15.8%**Resultados del Análisis de los plagios del 2023-12-07 06:55 UTC  
Tesis\_Ale Danny\_30112023 mejorada.docx

Fecha: 2023-12-07 06:36 UTC

\* Todas las fuentes 31 | Fuentes de internet 30 | Documentos propios 1

<input checked="" type="checkbox"/>	[0]	<a href="#">hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf</a>	8.3%	69 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[1]	<a href="#">redrrss.minam.gob.pe/material/20090128200240.pdf</a>	3.9%	34 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[2]	<a href="#">bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/1650.pdf</a>	2.1%	23 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[3]	<a href="#">ri.ues.edu.sv/id/eprint/4402/1/tratamiento de desechos solidos en quezaltepeque.pdf</a>	1.7%	19 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[4]	<a href="#">es.slideshare.net/raulcc1950/construccion-de-rellenos-sanitarios</a>	1.7%	18 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[5]	<a href="#">estrucplan.com.ar/guia-para-el-diseno-03-el-relleno-sanitario-parte-1/</a>	1.5%	15 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[6]	<a href="#">azulambientalistas.wordpress.com/enlaces/basura/rellenosanitario/</a>	1.4%	16 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[7]	<a href="#">repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/6132/1/tesis64.pdf</a>	0.8%	13 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[8]	<a href="#">www.ircwash.org/sites/default/files/71CIHS81-263.pdf</a>	0.6%	9 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[9]	<a href="#">www.resol.com.br/textos/girsm.pdf</a>	0.7%	9 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[10]	"INFORME DE TESIS - Segundo Franklin Gutti Jara y Edy Fernando Arteaga Gomez SR.pdf" fechado del 2023-12-07	0.7%	9 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[11]	<a href="#">core.ac.uk/download/pdf/200283357.pdf</a>	0.4%	7 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[12]	<a href="#">www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/residuos/norma de residuos hospitalarios.pdf</a>	0.4%	5 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[13]	<a href="#">core.ac.uk/download/pdf/47250699.pdf</a>	0.2%	3 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[14]	<a href="#">www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/UNFCCC_docs/tap_peru_mitigation_relleno_sanitario_semimecanizado_-_ambito_urbano_0.pdf</a>	0.2%	4 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[15]	<a href="#">1library.co/article/sistema-gestión-residuos-sólidos-delimitación-problema.myjln35z</a>	0.3%	4 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[16]	<a href="#">www.cepal.org/sites/default/files/guia_agentes_demuca.pdf</a>	0.2%	3 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[17]	<a href="#">portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Plan_Pazcifico/ANEXO_3-ALCANCE_EIA_RELLENO_SANITARIO.pdf</a>	0.2%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[18]	<a href="#">www.minam.gob.pe/proyecolegios/Ecolegios/contenidos/biblioteca/biblioteca/m1_rrss_A1L1_Problematica_rrss_Peru.pdf</a>	0.1%	3 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[19]	<a href="#">www.upo.es/depa/webdex/quimfis/CA_old/php/apuntesCA0607_Tema2.pdf</a>	0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[20]	<a href="#">www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MRP.pdf</a>	0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[21]	<a href="#">pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34877422/</a>	0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[22]	<a href="#">www.geomastersac.com/servicios-geofisicos/estudio-tomografia-electrica.html</a>	0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[23]	<a href="#">repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/1199/2/Tesis IAG44_Gut.pdf.txt</a>	0.1%	3 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[24]	<a href="#">repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10203</a>	0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[25]	<a href="#">ocsa-geofisica.com/tomografia-electrica.html</a>		

<input checked="" type="checkbox"/>	[25]	 0.1%	1 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[26]	 0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[27]	 0.1%	1 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[28]	 0.1%	2 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[29]	 0.1%	1 resultados
<input checked="" type="checkbox"/>	[30]	 0.0%	1 resultados

79 páginas, 13297 palabras

Nivel del plagio: 15.8% seleccionado / 16.0% en total

150 resultados de 31 fuentes, de ellos 30 fuentes son en línea.

#### Configuración

Directiva de data: *Comparar con fuentes de internet, Comparar con documentos propios*

Sensibilidad: *Media*

Bibliografía: *Considerar Texto*

Detección de citas: *Reducir PlagLevel*

Lista blanca: --

<sup>[10]</sup>▶ UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

TESIS

IDENTIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LIXIVIADOS EN EL  
BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE SAN  
MIGUEL- CAJAMARCA, 2022

Tesistas:

Bach. Alejandra del Socorro Bardales Saldaña

Bach. Danny Alexis Guevara Vásquez

Asesor:

<sup>[10]</sup>▶ Dr. Miguel Ángel Arango Llantoy

Cajamarca-Perú

Diciembre-2023

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

TESIS

IDENTIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LIXIVIADOS EN EL  
BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE SAN  
MIGUEL- CAJAMARCA, 2022

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar el  
Título Profesional de Ingeniero Ambiental y Prevención de Riesgos

Tesistas:

Bach. Alejandra del Socorro Bardales Saldaña

Bach. Dany Guevara Vásquez

Asesor:

<sup>[10]</sup> Dr. Miguel Ángel Arango Llantoy

Cajamarca-Perú

Noviembre-2023

COPYRIGHT © 2023 by  
ALEJANDRA DEL SOCORRO BARDALES SALDAÑA  
DANY GUEVARA VÁSQUEZ  
Todos los derechos reservados

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y  
PREVENCIÓN DE RIESGOS

APROBACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL

IDENTIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LIXIVIADOS EN EL  
BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE SAN  
MIGUEL- CAJAMARCA, 2022

PRESIDENTE

Dr. Persi Vera Zelada

SECRETARIO

Mag. Alcibiades Aurelio Martos Díaz

ASESOR

Dr. Miguel Ángel Arango Llantoy

## DEDICATORIA

A Mis padres Orlando Y Rosy, por todos los sacrificios que hicieron y hacen por sacarme adelante y hacer de mí una persona de bien, por su amor incondicional y por creer en mí todos los días.

A mi abuela Tere, por ser el motor de mi vida y por qué han sido sus oraciones las que me mantienen hoy con fuerza para continuar y lograr cualquier cosa que me proponga

Alejandra del Socorro Bardales Saldaña

A Dios y a la Virgen María por derramar sus bendiciones sobre mí.

A mis padres por siempre brindarme su apoyo incondicional.

A mis hermanos por siempre estar conmigo en cada paso que he dado.

Danny Alexis Guevara Vásquez

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por haber hecho de mí una persona noble y con el coraje de perseguir mis sueños. A los ingenieros Fatima Rojas Cabrera y Miguel Arango Llantoy por su apoyo desinteresado para el desarrollo de esta tesis.

Alejandra del Socorro Bardales Saldaña

A los docentes de la UPAGU, quienes me impartieron conocimiento e incentivaron a lograr mi propósito, en especial al Ingeniero Miguel Arango Llantoy, asesor del presente trabajo, por su destacada labor, gran apoyo y valiosos aportes.

A los ingenieros Fátima Rojas Cabrera y Manuel Zelada Sangay por su gran apoyo incondicional y desinteresado.

Danny Alexis Guevara Vásquez

## RESUMEN

El botadero de residuos sólidos no controlado de la ciudad de San Miguel de Pallaques, ubicado en el distrito y provincia de San Miguel, al suroeste del departamento de Cajamarca, cuenta con más de veinticinco años de servicio y recibe aproximadamente 3.5 t/día de residuos sólidos municipales, este lugar en la actualidad se encuentra en malas condiciones, causando impactos relativamente negativos en todo su entorno, en ese sentido la presente investigación logro identificar las zonas contaminadas a través de un moldeamiento y simulación de la dispersión de lixiviados en el botadero de residuos sólidos en mención con la aplicación de tomografías eléctricas, uso de imágenes satelitales, levantamiento topográfico con drone, identificación del perfil estratigráfico con calicatas, los resultados de los métodos aplicados mostraron que la profundidad de lixiviados es de 9.37m y que este nivel de profundidad no llega a contaminar agua subterránea sin embargo es preciso recalcar que esta profundidad aumentara progresivamente hacia distintos lados, por lo que en la evaluación se ha identificado y zonas no visibles, esta última zona es la más importante ya que al proponer un plan de remediación este estudio permitirá abarcar la contaminación de lixiviados en el área de estudio.

Palabras clave: Residuos salidos, lixiviados, modelamiento y simulación.

## ABSTRACT

The uncontrolled solid waste dump in the city of San Miguel de Pallaques, located in the district and province of San Miguel, southwest of the department of Cajamarca, has been in service for more than twenty-five years and receives approximately 3.5 t/day of municipal solid waste. 5 t/day of municipal solid waste, this place is currently in poor condition, causing relatively negative impacts throughout its environment. In this sense, the present investigation was able to identify the contaminated areas through a modeling and simulation of the dispersion of leachates in the solid waste dump with the application of electrical tomography, use of satellite images, topographic survey with drone, identification of the stratigraphic profile with calic pits. 37m and that this depth does not contaminate groundwater; however, it is necessary to emphasize that this depth will increase progressively towards different sides, so the evaluation has identified and non-visible zones, this last zone is the most important because when proposing a remediation plan this study will allow to cover the leachate contamination in the study area.

Key words: Waste outflow, leachate, modeling and simulation.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INDICE	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	13
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1. Planteamiento del problema de investigación	14
1.2. Formulación del problema	16
1.3. Justificación de la Investigación	16
1.4. <sup>[10]</sup> <b>Objetivos de la investigación</b>	17
1.4.1. Objetivo general	17
1.4.2. Objetivos específicos	17
1.5. Hipótesis de investigación	18
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	18
1.6. <sup>[10]</sup> <b>Teorías que sustentan la investigación</b>	18
1.7. Bases Teóricas	20
5.2.1. Aspectos importantes a considerar para un relleno sanitario	20
5.2.1.1. Selección del sitio	22
5.2.1.2. <sup>[1]</sup> <b>Diseño y operación de los rellenos sanitarios</b>	23
5.2.1.3. Generación y control de gases y lixiviados	24
5.2.2. Tipos de Relleno sanitario	25
5.2.2.1. Relleno sanitario mecanizado	25
5.2.2.2. Relleno sanitario semimecanizado	27
5.2.2.3. Relleno sanitario manual	27
5.2.3. Tipos de botaderos	27
5.2.4. Riesgos y consecuencias de una disposición inadecuada de los residuos	29
5.2.5. <sup>[1]</sup> <b>Fases del proceso de descomposición de los residuos sólidos</b>	31
5.2.6. Componentes tóxicos derivados de lixiviados	33
5.2.7. Gradiente hidráulico	35
5.2.8. La ley de Darcy	36
5.2.9. Velocidad de flujo	38

5.2.10.	Transporte de contaminantes	40
5.2.10.1.	Advección	41
5.2.10.2.	Dispersión mecánica	44
5.2.10.3.	Contaminantes reactivos	47
5.2.11.	Modelamiento ambiental	49
5.3.	Discusión teórica	50
5.4.	Definición de Términos Básicos	52
5.5.	Operacionalización de variables	54
6.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	55
6.2.	Unidad de análisis, Universo y Muestra	55
6.3.	Procedimiento	55
6.4.	Tipo de investigación	56
6.5.	Técnicas de investigación	56
6.6.	Instrumentos	56
6.7. <sup>[10]</sup>	Técnicas de análisis de datos (estadísticas)	57
7.	RESULTADOS	58
8.	DISCUSION	74
9.	CONCLUSIONES	76
10.	RECOMENDACIONES	77
11.	LISTA DE REFERENCIAS	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes de un Relleno sanitario .....	22
Figura 2: Botadero no controlado .....	29
Figura 3. Fases de descomposición reflejadas en la evolución idealizada de la composición del biogás.....	31
Figura 4. <sup>[2]</sup> Esquema general de la descomposición de los residuos por causa del contacto con agua .....	33
Figura 5: muestra la concentración relativa de lixiviado de varios constituyentes. A medida que la tasa de producción de gas aumenta, el lixiviado se hace menos fuerte en términos de la concentración de constituyentes de lixiviados. ....	35
Figura 6: La sección capaz de dejar pasar el agua, A', es menor que la sección total del acuífero A.....	40
Figura 7. <sup>[0]</sup> Transporte si se produjera sólo advección.....	41
Figura 8. <sup>[0]</sup> Transporte si se produjeran solo advección y difusión. ....	42
Figura 9. Figura. <sup>[0]</sup> Dispersión longitudinal por la tortuosidad .....	44
Figura 10. Figura. <sup>[0]</sup> Dispersión longitudinal por amplitud los canales.....	45
Figura 11. Figura. Dispersión transversal.....	45
Figura 12: Representación del área total y degradada del botadero del distrito de San Miguel.....	59
Figura 13: Tomografía geoelectrica L1.....	61
Figura 14: Tomografía geoelectrica L2.....	62
Figura 15: Tomografía geoelectrica L3.....	63
Figura 16: Tomografía geoelectrica L4.....	64

Figura 17: Tomografía geoelectrica L5.....	66
Figura 18: Estadística descriptiva de la cargabilidad de las diferentes líneas.....	67
Figura 19: Estadística descriptiva de la profundidad de las diferentes líneas.....	68
Figura 20: Perfil estratigráfico de Calicata N° 1.....	70
Figura 21: Perfil estratigráfico de Calicata N° 2.....	71
Figura 22: Perfil estratigráfico de Calicata N° 3.....	72
Figura 23: Perfil estratigráfico de Calicata N° 4.....	73

LISTA DE TABLA

Tabla 1: Composición típica de los lixiviados generados en rellenos sanitarios.....	33
Tabla 2: Composición de lixiviados jóvenes y viejos de relleno sanitario.....	35
Tabla 3. Valores aproximados de conductividad hidráulica.....	38
Tabla 4. Operacionalización de variables.....	54
Tabla 5: <sup>[1]</sup> Vértices del levantamiento topográfico del terreno del área afectada.....	58
Tabla 6: Cálculo de áreas identificadas en el área degradada.....	59
Tabla 7: Extensión de las líneas geofísicas levantadas.....	60
Tabla 8: Identificación de Calicatas.....	69

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### I.1. Planteamiento del problema de investigación

El problema de la contaminación generada por residuos sólidos urbanos es notorio a nivel mundial, debido a su generación excesiva y su mala disposición final. La descomposición desarrollada por los microorganismos, quienes disgregan los residuos generando productos gaseosos, tales como metano, dióxido de carbono y otros compuestos volátiles, además lixiviados líquidos, que son altamente contaminantes. (Masters y Ela, 2008)

El país de México en su afán de poder evitar y mitigar la contaminación de lixiviados por residuos sólidos, ha desarrollado más investigaciones respecto al tema, como el estudio presentado por Gómez (2015), quien encontró que los lixiviados impactan el medio ambiente, siendo este impacto muy nocivo a la salud, además identificó diversas concentraciones de sustancias contaminantes en cuerpos de agua muestreados. Otro de los autores citados son Gonzales y Rodríguez (2006), que indicaron que cuando los lixiviados llegan hacia cuerpos de agua subterránea es la más contaminada y que las concentraciones de los parámetros estudiados se incrementaron considerablemente en la época de lluvias, debido a la generación de lixiviados, que adquieren sales disueltas de los desechos y finalmente para la investigación desarrollada por el autor Gómez el al (2009), mediante la utilización de modelamientos ambientales permitieron concluir que los principales procesos de atenuación (retardo, reducción y transformación química y biológica de los contaminantes) ocurren en la zona no saturada, principalmente en el suelo, la porción biológicamente más activa.

Todas las investigaciones iniciaron caracterizando los lixiviados, para ello el autor Giraldo (2001), expresa que éstos lixiviados tienen una alta concentración de materia orgánica, además de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.<sup>[1]</sup> En este sentido es importante conocer que los lixiviados de los rellenos sanitarios de los países en vías de desarrollo presentan concentraciones mucho mayores de DBO, amoniaco, metales y sustancias precipitables que aquellos países que son desarrollados, esto es debido a las implicaciones de operatividad y rendimiento de los procesos de tratamiento.

Así mismo todas las investigaciones recolectadas especifican que las áreas de rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenas producen un lixiviado altamente contaminante, denominado lixiviado joven, a partir de ese momento sus concentraciones van disminuyendo continuamente en el tiempo, esto ocurre como regla general, sin embargo teniendo en cuenta que un relleno sanitario se opera por lustros, décadas, siempre va haber una parte del relleno que aporta lixiviado joven, la que se está relleno en ese momento, mientras que otras partes del relleno tienen lixiviado maduro, las que tienen unos años y otras lixiviados viejo, que tienen más de cinco años. Entendiendo la dinámica de los lixiviados, en el Perú también encontramos problemas de contaminación provocados por la dispersión de lixiviados, como es el caso reportado por la Municipalidad Metropolitana de Lima, que indica que casi la mitad de su población es abastecida mediante las aguas subterráneas extraídas a través de pozos perforados y que los especialistas en el tema presumen una posible contaminación de dichas aguas causadas por lixiviados provenientes de la deposición de residuos sólidos orgánicos en la margen izquierda del río Lurín, esta situación imposibilitaría su uso en actividades humanas o en todo caso incrementaría el costo de potabilización,

haciéndolas en la práctica igualmente inutilizables para el consumo humano. Siguiendo este tipo de problema no se han identificado investigaciones que lleven a fondo la determinación de las causas posibles de la contaminación en estas fuentes naturales de agua.

<sup>[3]</sup> ▶ **En la ciudad de San Miguel de Pallaques**, ubicada en el distrito y provincia de San Miguel, región de Cajamarca, actualmente deposita sus residuos **en un botadero a cielo abierto** no controlado, este lugar viene originando **serios problemas de contaminación**, debido las afectaciones directas a los diversos componentes ambientales, sobre todo a las fuentes naturales de agua, que **en este caso se** encuentra a 200 m del río San Miguel, siendo este río **uno de los principales** ríos principales de la cuenca del Jequetepeque.

### I.2. Formulación del problema

¿En qué medida se identifica la dispersión de lixiviados en el botadero de residuos sólidos del Distrito de San Miguel- Cajamarca, 2022?

### I.3. Justificación de la Investigación

El botadero de residuos sólidos no controlado de la ciudad de San Miguel de Pallaques recibe en la actualidad aproximadamente 3.5 t/día de residuos sólidos urbanos desde hace más de 25 años, este problema es una fuente de contaminación fija de lixiviados. En este contexto, la presente investigación, tiene mucha relevancia en generar conocimiento respecto la dispersión de los lixiviados que al originarse en el botadero se mantienen intactos a lo largo de su penacho o pluma de contaminación, determinando su extensión, velocidad de propagación y posibles efectos nocivos hacia las personas, de esta manera, el estudio científico aportará proporcionando mayor comprensión a cerca de la dinámica de los lixiviados en un flujo subterráneo, ayudará a desarrollar nuevas

líneas de investigación respecto al tema y en la práctica ayudará a que las autoridades del lugar, tomen medidas correctoras a partir de los resultados obtenidos.

#### I.4.<sup>[10]</sup> Objetivos de la investigación

##### 1.4.1. Objetivo general

Identificar la dispersión de lixiviados en el botadero de residuos sólidos del Distrito de San Miguel- Cajamarca, 2022

##### 1.4.2.<sup>[2]</sup> Objetivos específicos

- ☞ Conocer la zona superficial afectada del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel
- ☞ Determinar la profundidad afectada del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel
- ☞ Determinar la cargabilidad de la zona afectada del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel
- ☞ Conocer el perfil estratigráfico del suelo del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel.

#### I.5. Hipótesis de investigación

- Hipótesis alterna ( $H_a$ ) = La dispersión de lixiviados en el botadero de residuos sólidos del Distrito de San Miguel no dependerá del nivel de área, profundidad y resistividad del suelo.
- Hipótesis nula ( $H_0$ ) = La dispersión de lixiviados en el botadero de residuos sólidos del Distrito de San Miguel dependerá del nivel de área, profundidad y resistividad del suelo.

## 1. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### I.6. Teorías que sustentan la investigación

Para El-Fadel, Findikakis y Leckie (2010), “han desarrollado numerosos modelos matemáticos para simular los procesos que rigen la aparición y el comportamiento de los lixiviados en los vertederos, el énfasis de estos modelos generalmente ha estado en estimar la cantidad y calidad de los lixiviados para controlar sus impactos ambientales asociados, particularmente en la contaminación del agua superficial y subterránea, mejorar la metanogénesis y la estabilización de vertederos, y brindar orientación en el diseño del control, la recirculación y la recolección de lixiviados, estos modelos han tenido éxito hasta cierto punto, más en la estimación de la cantidad de lixiviados que en su composición, debido a las incertidumbres inherentes asociadas con la estimación de los parámetros del modelo que pueden describir adecuadamente los complejos procesos biológicos, químicos y físicos en los vertederos, se vuelven cada vez más útiles a medida que se obtienen y utilizan más datos de campo con fines de calibración y validación. UEste artículo presenta una revisión de modelos matemáticos diseñados para simular la generación y transporte de lixiviados en rellenos sanitarios municipales”.

<sup>[13]</sup>► El-Mathana, Mostafa, Galal, & Elawwad (2011), mencionan que desarrollaron un modelo de transporte de masa de agua subterránea para estudiar el efecto de un vertedero abierto de residuos sólidos en la calidad del agua de los recursos hídricos dentro de la región que lo rodea. USe destacan los efectos nocivos de la eliminación indiscriminada de desechos sólidos mediante vertederos a cielo abierto, que todavía se practica en muchos países en desarrollo de todo el mundo. Uvertedero de Abu Zaabal; Uque se encuentra en la

Gobernación de Qalyubiyah, Egipto; Urecibe grandes cantidades de desechos a diario, lo que provoca la generación de lixiviados que se filtran profundamente en el suelo y contaminan elUacuífero poco profundo.UEl software Groundwater Modeling System (GMS) se utilizó para modelar elUflujo de agua subterráneaUy el transporte masivo, utilizando datos recopilados de laUinvestigación del sitioUy datos históricos de la literatura disponibles, los resultados del modelo de cada contaminante se calcularon en un intervalo de 100 años, desde 1980 hasta 2080, y se presentaron los resultados de 2080.ULos resultados mostraron que el vertedero tuvo un gran impacto en los cuerpos de agua cercanos, los estanques de Abu Zaabal y Belbais Drain.UAdemás, el cierre del vertedero mostró que la concentración máxima de la mayoría de los contaminantes considerados se redujo en aproximadamente un 60-65%.

El autor Gómez (2015), en su investigación: <sup>[2]</sup>▶ “Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea”, <sup>[2]</sup>▶ trata sobre la calidad de las aguas naturales afectadas por la contaminación de los lixiviados originados un relleno sanitario municipal (RSM) que cuenta con más de 17 años de servicio y recibe más de 50 ton/día de desechos sólidos urbanos, donde se identificó un impacto negativo en la calidad del agua superficial y del agua subterránea, sus resultados revelaron deficiencias en el manejo y depósito final de los residuos sólidos municipales (geomembrana desgarrada) y nula gestión de lixiviados (sobresaturación del RSM). En particular, se identificaron concentraciones considerables de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Pb, Mn y Fe en el agua subterránea, así como en los escurrimientos superficiales que generan una importante aporte a la contaminación del agua y el suelo, éste es un aspecto muy importante, sobre todo porque las personas de ésta región consumen dicha

agua que procede de los pozos que están impactados y esto puede ocasionar efectos adversos sobre la salud.

El autor Infante Castillo (2018), tuvo como objetivo dentro de su investigación, evaluar la posible contaminación en las zonas aledañas a un antiguo botadero, mediante la utilización de métodos geofísicos, como sondeos eléctricos verticales en dirección al botadero en mención, en base a las resistividades obtenidas se generó un modelo de simulación de la zona analizada para calcular el desplazamiento por advección como resultado de la dispersión de la pluma contaminante a una distancia de 380 m en un periodo de 16 años aproximadamente en dirección noreste.

#### I.7.<sup>[8]</sup> Bases Teóricas

Las bases teóricas son primordiales dentro de la estructura de la tesis, en este punto trataremos aspectos importantes acerca de la gestión de residuos, datos técnicos acerca de los tipos de vertederos, comportamiento de los residuos sólidos en un vertedero, composición de lixiviados y transporte de contaminantes a través de un modelamiento ambiental.

#### [ 8 ] Fase final de la gestión de residuos sólidos

#### 5.2.1.<sup>[1]</sup> Aspectos importantes para considerar para un relleno sanitario

Para Arellano y Guzmán (2011), un relleno sanitario controla la disposición de los residuos sólidos en el manto superior de la tierra.<sup>[2]</sup> Los aspectos importantes que se deben considerar para la implementación de los residuos son:

- 1) Selección del sitio, 2) Diseño y operación de los rellenos sanitarios, 3) Generación y control de gases y lixiviados.

Figura 1: Partes de un Relleno sanitario (Arocena, 2001)

#### 5.2.1.1.<sup>[2]</sup> Selección del sitio

Los factores que se deben considerar para la evaluación del sitio potencial de disposición se resumen en la tabla 1.<sup>[2]</sup> Pero la selección final de un sitio de disposición final se basa usualmente en los resultados de una inspección preliminar al sitio, resultados de los diseños de ingeniería y estudio de costos y de la evaluación del impacto ambiental.

Factores que deben considerarse en la evaluación de un sitio potencial para relleno sanitario

Factor	Observaciones
Área de tierra disponible	El sitio seleccionado debe tener una vida útil mayor a un año
Distancia de transporte	Debe ser de un tamaño tal que no tenga un impacto significativo en los costos de operación
Condiciones del suelo y topografía	Los materiales de recubrimiento deben estar disponibles cerca del sitio
Agua superficial e hidrología	Se deben especificar los requerimientos de drenaje
Condiciones geológicas	Este es probablemente el factor más importante

	para el establecimiento del sitio del relleno sanitario. Especialmente con respecto a la preparación del sitio
Condiciones climatológicas	Se debe prevenir las situaciones ocasionadas por la lluvia
Condiciones ambientales del sitio	Se deben establecer los requerimientos de control del ruido, olores, viento y factores estéticos
Utilización final del sitio	Se deben prever usos futuros del sitio

Fuente: Arellano y Guzmán 2011.

5.2.1.2.<sup>[1]▶</sup> **Diseño y operación de los rellenos sanitarios**

Las consideraciones **más importantes en el diseño y operación** de los rellenos sanitarios incluyen la clase **de residuos que se manejaría**, la cantidad del terreno, la porosidad para la filtración potencial, **el diseño y la ingeniería del drenaje e instalaciones para el control de la filtración**; además del desarrollo de un plan general de operación, diseño de un plan de llenado con los residuos sólidos y determinación de los requerimientos de equipamiento.

<sup>[6]▶</sup> También se debe tener en consideración los factores individuales que dependen de las áreas seleccionadas y de las acciones preventivas, como la protección de aguas subterráneas, comunicaciones, instalaciones de empleados, equipo contra incendio y tirado clandestino **de residuos sólidos en el relleno sanitario**. De todos esos factores, los más importantes son los planes de operación y de llenado del relleno sanitario. En el primero se deben tomar en consideración los caminos de acceso, las escalas en el traslado, el almacenamiento para los residuos especiales y las plantaciones. Para el llenado del relleno sanitario se deben considerar la cantidad de material con los que se va a llenar, la topografía, geología e hidrología locales.

5.2.1.3.<sup>[1]▶</sup> **Generación y control de gases y lixiviados**

Cuando los residuos sólidos son depositados en un relleno sanitario ocurren una serie de fenómenos químicos, físicos y biológicos, como la descomposición aeróbica y anaeróbica de materia orgánica con la evolución de gases y líquidos; oxidación química de los residuos; <sup>[1]</sup> escape de gases del relleno; movimiento de líquidos ocasionado por las diferencias del terreno; disolución y lixiviación de materiales orgánicos e inorgánicos por agua; movimiento del material disuelto por gradientes de concentración o por ósmosis y asentamientos desiguales de los residuos en los espacios vacíos. <sup>[3]</sup> Los gases que se encuentran dentro de los rellenos sanitarios son el amoníaco, bióxido de carbono, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, metano, nitrógeno y oxígeno, de los cuales los más abundantes son el bióxido de carbono y el metano ya que son descompuesto mediante un proceso anaeróbico de los residuos orgánicos. El control de los gases en los rellenos sanitarios se lleva a cabo construyendo respiraderos, barreras de grava o través de sistemas de recuperación de gas. Para los respiraderos se instalan tuberías a través de las capas de grava en el centro de los rellenos sanitarios. <sup>[2]</sup> Los lixiviados se definen como los líquidos que se han percolado a través de los residuos sólidos y han extraído materiales suspendidos y disueltos de éstos. <sup>[2]</sup> Debemos considerar que los lixiviados se forman en la mayoría de los rellenos sanitarios, debido a los líquidos provenientes de fuentes externas como filtraciones de agua de lluvia, drenaje superficial y agua subterránea, que han entrado en el relleno. En condiciones normales, los lixiviados se encuentran en el centro de los rellenos sanitarios. <sup>[11]</sup> De ahí se mueven de forma vertical a través de los diferentes estratos, sin embargo, en algunas ocasiones pueden presentar un movimiento lateral, dependiendo de las características del material circundante. En el primer caso, algunos de los constituyentes químicos y biológicos serán removidos por la acción de filtración y absorción del material que compone las capas. <sup>[23]</sup> En general esta acción depende de las características del suelo,

especialmente por su contenido de arcilla. De manera que el uso de este material es la manera más eficaz para eliminar o reducir la percolación de los lixiviados. También se utilizan líneas de membrana, pero son más caras y requieren de especial cuidado durante el llenado del relleno sanitario para que no se dañen.

#### 5.2.2. Tipos de Relleno sanitario

Para el Sistema de Información de Recursos Naturales para el desarrollo de una agricultura sostenible (2011), existen tres tipos de rellenos sanitarios, que se describen a continuación:

##### 5.2.2.1.<sup>[4]</sup> Relleno sanitario mecanizado

Un relleno sanitario mecanizado es diseñado para las grandes urbes y poblaciones que generan una cantidad mayor a 40 toneladas diarias de residuos sólidos. Por lo cual se requiere un proyecto de ingeniería de alta complejidad y no solamente es operar un equipo pesado.<sup>[1]</sup> Dicho proyecto de ingeniería debe estar relacionado con el tipo de residuos y la cantidad, la planificación, la extensión de terreno y la selección del sitio, el diseño de la infraestructura requerida y la construcción del relleno, tanto para la recepción de los residuos como para la operación y control.<sup>[4]</sup> También se debe considerar el monto para las inversiones y el costo de operación y mantenimiento.<sup>[1]</sup> En la operación de este tipo de relleno sanitario requiere un compactador de residuos sólidos y equipo especializado para el movimiento de tierra, como puede con son retroexcavadora, tractor de oruga, volquete y cargador.

#### 5.2.2.2.<sup>[1]▶</sup> Relleno sanitario semimecanizado

Para la disponer entre 16 a 40 toneladas de disposición de residuos sólidos de una población, es conveniente usar maquina pesada de apoyo al trabajo manual en el relleno sanitario para hacer una buena compactación de los residuos sólidos, estabilizar los muros y alargar la vida útil del relleno.<sup>[1]▶</sup> Para estos casos, se adapta un tractor agrícola con una hoja topadora o cuchilla y con un rodillo o cucharón para la compactación, este equipamiento es apropiado para operar en este tipo de relleno denominado semimecanizado.<sup>[5]▶</sup> La capacidad de confinamiento sanitario es de 40 t/d para poblaciones de hasta 80.000 habitantes.

#### 5.2.2.3.<sup>[1]▶</sup> Relleno sanitario manual

Para una generación de menos de 15 t/día aplica un relleno sanitario manual, es decir para pequeñas poblaciones, además de las consideraciones económicas, no se estaría en capacidad de adquirir el equipo pesado por los altos costos de operación y mantenimiento. El término manual;<sup>[4]▶</sup> esta referido que la operación de compactación y confinamiento de residuos es ejecutada con el apoyo de una cuadrilla de hombres empleando algunas herramientas.

#### 5.2.3.<sup>[3]▶</sup> Tipos de botaderos

Existen dos tipos de botaderos, uno es el controlado y otro es el no controlado, a continuación, se describen:

<sup>[2]▶</sup> Para la Organización Panamericana de Salud (2004), un botadero controlado es un lugar de disposición final de residuos sólidos que no cuenta con la infraestructura necesaria ni suficiente para ser considerado como un relleno sanitario.<sup>[2]▶</sup> Puede ser usado de manera temporal debido a una situación de emergencia.<sup>[2]▶</sup> En el botadero controlado se darán las

condiciones mínimas de operación para que los residuos no se encuentren a cielo abierto;  
[2]▶ estos residuos deberán ser compactados en capas para reducir su volumen y serán confinados periódicamente con material de cobertura.

[1]▶ Un botadero no controlado es una forma de disposición final de los residuos sólidos que implica la simple descarga de residuos en el terreno sin medidas de protección ambiental o para la salud pública. [11]▶ Esto conlleva problemas como la proliferación de transmisores de enfermedades, malos olores y la contaminación del suelo y el agua. Además, no hay control sobre los tipos de residuos acumulados, incluyendo desechos de servicios de salud e industrias (Arocena, 2001).

Figura 2:<sup>[1]</sup> Botadero no controlado (Arocena, 2001)

#### 5.2.4.<sup>[2]</sup> Riesgos y consecuencias de una **disposición inadecuada de los residuos**

Para Kiss y Encarnación (2006), una mala práctica **de disposición final de los residuos sólidos urbanos** puede causar efectos nocivos **al ambiente y a la salud**, como los que se describen a continuación:

- [ 1 5 ] ▶ Como consecuencia directa de un vertido descontrolado o **disposición inadecuada de los residuos**, aunado a las condiciones calurosas en la mayor parte del territorio mexicano y a las altas precipitaciones en **la época de lluvias**, la población se expone a un alto riesgo debido a posibles infecciones y epidemias transmitidas por el aire, agua y vectores de fauna nociva.

- Por otro lado, la disposición de residuos en sitios que no cuentan con un subsuelo impermeable u otras obras de ingeniería para evitar el flujo de contaminación hacia el manto acuífero, puede incidir en la contaminación del suelo y el manto freático, lo que se traduce en un riesgo de afectación al ecosistema, recursos naturales y finalmente por vía indirecta a la salud humana.
- [ 1 ] ▶ Otro riesgo del manejo inadecuado es la posibilidad de incendios, sea de modo intencional, derivado de un descuido humano o incluso por el auto incendio de los residuos sólidos, provocando por ende el deterioro del suelo y de la vegetación, así como la contaminación del aire con humo, ceniza y gases tóxicos, entre otros.
- El polvo y los residuos ligeros levantados por el viento, así como los materiales arrastrados por posibles escorrentías superficiales, pueden llegar a los terrenos de cultivo y caminos cercanos, estorbando la actividad agrícola y el tránsito vehicular, aunado al efecto antihigiénico e impacto estético desagradable que ello produce.
- [ 1 ] ▶ La descomposición de los residuos sólidos urbanos que tienen un alto contenido de materia orgánica conlleva a la generación de líquidos y gases indeseables, lo cual significa un riesgo, directo o indirecto, a la salud pública dependiendo del contacto de la población con dichas emisiones
- El alto porcentaje de materia orgánica entre los residuos favorece la proliferación de roedores e insectos e inclusive aves de carroña, asociados a la propagación de enfermedades y epidemias
- Y, por último, se da un impacto estético negativo en el paisaje alrededor de los sitios de disposición final sin control adecuado, lo que afecta no sólo a la gente que vive en la zona, sino también la plusvalía socioeconómica de la región.

### 5.2.5.<sup>[1]</sup> Fases del proceso de descomposición de los residuos sólidos

Johannessen (1999), clasifica en cinco fases de descomposición, como ilustra en la figura 3, en donde los diagramas se refieren a la evolución de las proporciones volumétricas de los principales componentes del biogás.

Figura 3. Fases de descomposición reflejadas en la evolución idealizada de la composición del biogás(Johannessen, 1999)

La fase I es una etapa aeróbica promovida por el aire atrapado en las celdas cubiertas en el relleno o vertedero. El oxígeno del aire, sin embargo, empieza a consumirse rápidamente, así como el nitrógeno, por los procesos de nitrificación. Como consecuencia de la degradación aerobia de la materia orgánica, empieza a producirse bióxido de carbono, que se acompaña de una elevación de la temperatura. Esta fase dura hasta el agotamiento del oxígeno, abarcando por lo general un par de semanas. La fase II es la llamada fase ácida, la cual es una transición a los procesos anaerobios, cuando la fermentación empieza a generar lixiviados con un alto contenido de ácidos orgánicos, lo que da lugar a un descenso significativo en el pH. Por otro lado, el biogás generado está constituido mayormente de

Bióxido de carbono y nitrógeno aún no consumido, aunado a la producción de un porcentaje menor de hidrógeno. En los lixiviados, la demanda química de oxígeno alcanza su concentración más alta, así como el amoníaco y los ácidos orgánicos también llegan a su máxima concentración. La fase III es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias. La proporción del metano se incrementa, mientras el contenido de bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, y su concentración disminuye en el lixiviado. Esto conlleva a un aumento en el pH, mientras que la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente. La fase IV es conocida como la fase metanogénica estable. Es un periodo anaerobio durante el cual se alcanza una máxima producción del metano, con una concentración estable en el biogás de alrededor del 55% en volumen. El contenido de bióxido de carbono es algo menor pero también estable, variando entre 40 y 50%. En el lixiviado se mantiene un pH elevado, con concentraciones significativas de amoníaco, y una carga orgánica decreciente medida por la demanda química de oxígeno.

La fase V es la etapa final de la estabilización de los residuos, con un carácter aerobio. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados. La producción de metano decrece y el bióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del relleno

En los procesos de transformación principal, ya sea vía anaerobia, aerobia o por lixiviación, un elemento común es el agua, que está presente como humedad en los mismos residuos; sin embargo, la mayor parte proviene de las lluvias o precipitaciones atmosféricas. Se debe tener en consideración que el agua desempeña un papel muy importante en la degradación de los residuos, debido a que cataliza la degradación mediante los procesos de hidrólisis y

disolución de compuestos tóxicos de la materia orgánica e inorgánica, dando como resultado los lixiviados.

Las transformaciones fisicoquímicas que se derivan del contacto del agua con los residuos, se presentan de manera resumida la figura 4.

Figura 4.<sup>[7]</sup> Esquema general de la descomposición de los residuos por causa del contacto con agua (Kiss y Encarnación 2006)

En la figura anterior, se observa el papel importante que juega el agua al contacto con la materia orgánica para la generación de lixiviados que contienen agentes tóxicos derivados de los residuos.<sup>[2]</sup> Por lo que, si se logra controlar la cantidad de agua que incide en los residuos (impidiendo la entrada de aguas pluviales y subterráneas mediante la impermeabilización del fondo y de la cubierta del relleno), el agua disponible se limitaría al contenido de humedad de los residuos sólidos, y en consecuencia disminuiría considerablemente la generación de lixiviados y el riesgo de contaminación al ambiente.

#### 5.2.6.<sup>[2]</sup> Componentes tóxicos derivados de lixiviados

Los componentes tóxicos derivados de lixiviados constituyen un riesgo potencial de contaminación de cuerpos de agua y suelo con su afectación a la salud humana. La carga

contaminante de los lixiviados disminuye en función del tiempo, conforme a la evolución de las diferentes fases **de descomposición de los residuos**.

Tabla 1: Composición típica de los lixiviados generados en rellenos sanitarios

Fuente: Kiss y Encarnación 2006

Según Mihelic y Zimmerman (2012), a pesar de los controles implementados para reducir el flujo de agua hacia un vertedero, algo de agua ingresará y generará lixiviado. El manejo del lixiviado debe tener en cuenta su cantidad, calidad y posibles impactos negativos. Las concentraciones de lixiviado varían significativamente según la ubicación y la vida útil del vertedero (consulte la tabla 2). Esta tabla proporciona concentraciones típicas para lixiviados jóvenes y viejos. Además, la información presentada en la tabla 2 y la figura 5 muestra cómo la concentración de los componentes disminuye a medida que el vertedero envejece y los componentes fácilmente lixiviables son eliminados.

Tabla 2: Composición de lixiviados jóvenes y viejos de relleno sanitario

Fuente: Mihelic y Zimmerman 2012

Figura 5: muestra la concentración relativa de lixiviado de varios constituyentes. A medida que la tasa de producción de gas aumenta, el lixiviado se hace menos fuerte en términos de la concentración de constituyentes de lixiviados. (Mihelic y Zimmerman 2012)

#### 5.2.7. Gradiente hidráulico

Según Masters y Ela (2008), en un acuífero no confinado, la pendiente del nivel freático, medida en la dirección en que es máxima, se conoce como gradiente hidráulico. Este concepto es crucial ya que el flujo de agua subterránea se dirige en la dirección del gradiente ya una velocidad proporcional al mismo. Para definirlo de manera más precisa, es necesario introducir el concepto de nivel piezométrico. El nivel piezométrico es la distancia vertical entre un nivel de referencia (generalmente el nivel del mar) y el nivel freático. Se

expresa en unidades de longitud, como "metros de agua" o "pies de agua". Si imaginamos dos pozos alineados con el flujo de agua, el gradiente sería simplemente la diferencia en el nivel piezométrico dividido por la distancia horizontal entre ellos. Del mismo modo, el gradiente de un acuífero confinado es el valor máximo de la pendiente del nivel piezométrico en el punto considerado.

Si el flujo en la Figura 6, va de izquierda a derecha en el plano de la página, el gradiente es:

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{\text{Diferencia de nivel hidrostático}}{\text{Distancia horizontal}} = \frac{h_2 - h_1}{L}$$

Adviértase que el gradiente es adimensional puesto que numerador y denominador tienen las mismas dimensiones. En cálculo infinitesimal lo podemos expresar como

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{dh}{dL}$$

#### 5.2.8. La ley de Darcy

Para Masters y Ela (2008), “la ecuación básica que describe el flujo de agua subterránea fue formulada por el ingeniero hidráulico francés Henri Darcy en 1856. Basándose en experimentos del laboratorio donde estudiaba el flujo de agua a través de filtros de arena, Darcy concluyó que la velocidad de dicho flujo  $Q$  era proporcional al área de la sección  $A$  multiplicada por el gradiente hidráulico ( $dh/dL$ )”

$$Q = KA \frac{dh}{dL}$$

Donde:

$Q$  = Velocidad de flujo ( $m^3/día$ )

K=Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (m/día)

A=Sección del flujo (m<sup>2</sup>)

$\frac{dh}{dL}$  = Gradiente hidráulico

La ecuación presentada es conocida como la ley de Darcy para flujos a través de medios porosos. Esta ley asume una relación lineal entre la velocidad de flujo y el gradiente hidráulico, lo cual es una suposición válida en la mayoría de las situaciones, aunque no en todas. Esta suposición no se cumple en casos de régimen turbulento, como puede ocurrir cerca de un pozo en operación. Tampoco es válido cuando el agua fluye a través de materiales extremadamente finos, como arcillas coloidales, y solo debería aplicarse en medios completamente saturados.<sup>[1]</sup> Además, su validez depende de la temperatura. Se proporcionan algunos valores de la constante de proporcionalidad K en la Tabla 3.<sup>[16]</sup> Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos valores son aproximados, ya que la conductividad hidráulica puede variar significativamente incluso dentro del mismo material, dependiendo de la forma y tamaño de sus partículas, así como de la presencia de limo o arcilla.

Tabla 3. Valores aproximados de conductividad hidráulica

Fuente: Linsley et al, 1992

Los acuíferos que muestran una conductividad hidráulica constante en todos sus puntos se conocen como homogéneos, mientras que aquellos que varían en este aspecto de un lugar a otro se consideran heterogéneos. No solo la conductividad puede variar de un punto a otro, sino que también puede hacerlo en diferentes direcciones del flujo. Es común, por ejemplo, encontrar conductividades hidráulicas más altas en la dirección horizontal que en la vertical. Los acuíferos que tienen la misma conductividad en todas las direcciones se denominan isótropos, mientras que aquellos en los que la conductividad varía se consideran anisótropos. Aunque es matemáticamente conveniente considerar acuíferos homogéneos e isótropos, es probable que no existan en la realidad.

#### 5.2.9. Velocidad de flujo

Frecuentemente es importante estimar la velocidad del agua que se mueve en el acuífero, principalmente cuando existe una pluma de contaminación con gradiente arriba de un pozo de suministro de agua. Si se combina la ecuación que relaciona velocidad de flujo, velocidad y área de la sección (Masters y Ela 2008).

$$Q = Av$$

Con la ley de Darcy, podemos despejar la velocidad:

$$\text{Velocidad de Darcy } v = \frac{Q}{A} = \frac{K}{A} \frac{dh}{dL} = K \frac{dh}{dL}$$

La velocidad mencionada en la ecuación previa es conocida como la velocidad de Darcy. No representa una velocidad "real" en sí misma, ya que asume que toda la sección A es capaz de permitir que el agua fluya a través de ella. Dado que gran parte de la sección está

compuesta por sólidos, el área real a través de la cual fluye el agua es mucho menor, lo que resulta en que la velocidad real del agua subterránea sea considerablemente mayor que la velocidad de Darcy. Considerando que el acuífero está compuesto por sólidos y espacios vacíos, con A representando el área de la sección y A' como el área de los espacios vacíos llenos de agua, podemos reescribir esto como la siguiente ecuación (Masters y Ela 2008).

$$Q = Av = A' v'$$

Resolviendo para v' e introduciendo una longitud arbitraria para el acuífero L, tenemos

$$v' = \frac{Av}{A'} = \frac{ALv}{A'L} = \frac{\text{Volumen total} * v}{\text{Volumen de huecos}}$$

Pero recordemos que la razón del volumen de huecos al volumen total es exactamente la porosidad g introducida. Luego la velocidad real promedio a través del acuífero es la velocidad de Darcy dividida por la porosidad:

$$v' = \frac{\text{Velocidad de Darcy}}{\text{Porosidad}} = \frac{v}{n}$$

Figura 6: La sección capaz de dejar pasar el agua, A', es menor que la sección total del acuífero A.

$$\text{Velocidad lineal promedio} = V' = \frac{k}{n} \left( \frac{dh}{dL} \right)$$

#### 5.2.10.<sup>[0]▶</sup> Transporte de contaminantes

Según Sánchez (2017), cuando un contaminante entra en el agua subterránea, generalmente en forma disuelta, se desencadenan varios procesos complejos. Para su análisis, es necesario diferenciar entre dos posibles escenarios, cada uno conllevando distintos conjuntos de procesos:

- a)<sup>[0]▶</sup> Cuando no hay interacción con el medio geológico, el contaminante se desplaza arrastrado por el flujo subterráneo, si este existe.<sup>[0]▶</sup> En este caso, se estudian la advección, la difusión y la dispersión.<sup>[0]▶</sup> Estamos hablando de contaminantes (o solutos) no reactivos o conservativos, como el cloruro o el Tritio.
- b)<sup>[0]▶</sup> Cuando se producen interacciones entre las sustancias presentes en el agua y el medio geológico, como la adsorción, precipitación o disolución, así como diversas reacciones químicas. Estos se conocen como solutos reactivos.<sup>[0]▶</sup> La comprensión de este fenómeno resultará más compleja que en el caso anterior, ya que será necesario considerar conjuntamente estos procesos reactivos con los mencionados en el punto anterior.

A continuación, se describen las formas de dispersión de contaminantes:

##### 5.2.10.1.<sup>[0]▶</sup> Advección

La advección es el arrastre de la sustancia contaminante por el agua.<sup>[0]▶</sup> Si sólo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada por el contaminante sería constante (figura 8)

Figura 7. Transporte si se produjera sólo advección

La advección simplemente transporta las sustancias contaminantes. En un medio poroso, el flujo de masa a través de una sección unidad perpendicular al flujo es igual a:

$$J = m_e \cdot C \cdot v$$

Siendo:

$J$  = Flujo de masa, por unidad de sección y por unidad de tiempo

$C$  = Concentración

$v$  = velocidad lineal media (=velocidad Darcy/  $m_e$ )

Si en un punto de un medio sin flujo depositamos una gota de contaminante y observamos una gota de contaminante y observamos un tiempo después, el punto inicial se habrá ampliado y difuminado. Si a eso le unimos el transporte por advección, sucedería lo mostrado en la figura 9.

Figura 8. Transporte si se produjeran solo advección y difusión. (Sánchez 2017)

Las moléculas de la sustancia disuelta en el agua se mueven de los puntos de mayor concentración hacia los de menor concentración. Este proceso se denomina difusión molecular o simplemente difusión y se produce a causa de la agitación continua de todas las moléculas del líquido. Para su estudio consideraremos que no existe movimiento del fluido. En realidad, cuando existe un flujo activo, el efecto de la difusión es despreciable frente a la dispersión, que veremos más adelante; sólo tiene importancia cuando apenas existe flujo subterráneo.

En la difusión, las sustancias disueltas se mueven por un gradiente de concentraciones. En un líquido (no contenido en un medio poroso), el flujo de masa por difusión está regido por la primera ley de Fick :

$$F = D_m \frac{dC}{dx}$$

Donde:

$F$  = flujo de masa por unidad de tiempo y por unidad de sección perpendicular al flujo  
(M/T)

$D_m$  = coeficiente de difusión ( $L^2/T$ )

$C$  = concentración ( $M/L^3$ )

$dC / dx$  = gradiente de concentraciones: entre dos puntos situados a una distancia  $dx$  existe una diferencia de concentraciones  $dC$

Lo explicado hasta aquí se refiere a un medio líquido (100% líquido). Si el proceso se desarrolla en el agua que se encuentra en un medio poroso, la facilidad de movimiento disminuye y hay que considerar las características del medio poroso (principalmente la porosidad eficaz y la tortuosidad). Esto se expresa simplificada así [ CITATION Fet01 \l 10250 ]

$$D^* = D_m \cdot w$$

Donde:

$D^*$  = Coeficiente de difusión efectiva

$D_m$  = Coeficiente de difusión

$w$  = Coeficiente que depende del medio poroso

Según Freeze y Cherry (1979) este coeficiente  $w$  puede variar de 0,01 a 0,5. Sin embargo, Coutelieres y Delgado (2012), son más específicos:

$$D^* = D_m \cdot m_e \cdot \tau$$

Donde:

$m_e$  = Porosidad eficaz

$\tau$  = Tortuosidad (longitud recorrida / longitud en línea recta)<sup>2</sup>

Factor de constricción (constrictivity)<sup>3</sup>

Y como normalmente los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  son desconocidos, Coutelieis y Delgado (2012), simplifican la relación como una función de la porosidad eficaz:

$$D^* = D_m \cdot (m_e)^c$$

Donde:

$m_e$  = Porosidad eficaz

$c$  = coeficiente (1,8 a 2,0 para materiales consolidados; 1,3 para arenas no consolidadas.)

#### 5.2.10.2. Dispersión mecánica

La dispersión mecánica es la provocada por el movimiento del fluido a través del medio poroso. Esta dispersión se produce en el sentido del flujo (longitudinal) y lateralmente (transversal).

Figura 9. Figura. Dispersión longitudinal por la tortuosidad (Sánchez 2017)

Figura 10. Figura. Dispersión longitudinal por amplitud los canales.  
(Sánchez 2017)

Figura 11. Figura. Dispersión transversal.<sup>[0]</sup> (Sánchez 2017)

La dispersión longitudinal es debida a:

- [ - 0 ] ▶ Las moléculas que encuentran caminos más tortuosos se retrasan (fig. 3a).
- [ - 0 ] ▶ Las moléculas que encuentran caminos más anchos avanzan más rápido (fig. 3b).
- [ - 0 ] ▶ Las moléculas que circulan por el centro de los canales intergranulares avanzan más rápido que las que circulan cerca de los granos.

<sup>[0]</sup>▶ Todo esto suponiendo un medio homogéneo. <sup>[0]</sup>▶ Las heterogeneidades aumentarán la dispersión, retrasando a las moléculas que encuentren zonas menos permeables.

La dispersión transversal es debida a la constante bifurcación de los caminos que encuentra el fluido.

<sup>[0]</sup>▶ La dispersión longitudinal siempre es mayor que la transversal, por lo que la mancha contaminante adquirirá una forma alargada en el sentido del flujo.

<sup>[0]</sup>▶ La capacidad del medio poroso para dispersar mecánicamente un fluido que circula por él se refleja en un coeficiente denominado dispersividad dinámica  $\alpha$  (unidades: L), en el que influyen la porosidad, la tortuosidad, la forma de los granos, etc.

<sup>[0]</sup>▶ Se distingue la dispersividad dinámica longitudinal  $\alpha_L$  (en el sentido del flujo) y transversal  $\alpha_T$  (en sentido transversal).

Donde:

$$\alpha_L = 0.83 (\log L)^{2.41}$$

Se ha obtenido mediante una correlación de datos empíricos. <sup>[0]</sup>▶ No considera las características del medio

La dispersión mecánica es igual al producto de este coeficiente por la velocidad lineal media (unidades: L<sup>2</sup>/T):

$$\text{Dispersión mecánica} = \alpha V$$

Donde:

$\alpha$  Dispersividad dinámica (L)

V = Velocidad lineal media (L/T)

### 5.2.10.3. <sup>[0]</sup> Contaminantes reactivos

Es muy difícil que un contaminante se mueva a través de los poros o fisuras de una formación geológica sin sufrir algún tipo de interacción con el medio geológico. <sup>[0]</sup> Pueden producirse muy diversos procesos: adsorción, absorción, intercambio iónico, precipitación química, biodegradación, reacciones de oxidación-reducción, etc. <sup>[0]</sup> Estos procesos pueden provocar los siguientes efectos: (Sánchez 2017).

[ 0 ] <sup>[0]</sup> Retardo (las sustancias se mueven más lentamente).

<sup>[0]</sup> El proceso de retardo en el transporte del contaminante está provocado principalmente por los procesos de adsorción que estudiaremos brevemente en el apartado siguiente: <sup>[0]</sup> las moléculas del contaminante arrastrado por el agua quedan provisionalmente adheridas a los minerales de terreno, incorporándose posteriormente al flujo. <sup>[0]</sup> El proceso es complejo, pero para incluirlo en el cálculo que hemos expuesto, se define un factor de retardo que ralentiza la velocidad de transporte del contaminante de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{V_a}{Rf}$$

Donde:

<sup>[0]</sup>  $V_c$  = Velocidad del contaminante

$V_a$  = Velocidad del agua

$Rf$  = Factor de retardo (adimensional)

## □ Sorción, adsorción

La adsorción es la adherencia de una sustancia a la superficie de un sólido, mientras que la absorción implica la penetración de la sustancia en el interior del sólido. El término sorción engloba a los dos anteriores.

[0]▶ La adsorción puede ser:

[ - 0 ] ▶ Muy débil (fuerzas de Van der Waals)

- Débil (cargas eléctricas). Los minerales arcillosos presentan cargas negativas libres en superficie, y los iones positivos en disolución quedan atraídos por ellas. Si un ión que estaba así adherido es desplazado por otro se habla de intercambio iónico.

[ - 0 ] ▶ Fuerte (enlaces químicos), que sólo son importantes a temperatura elevada

La adsorción (la sorción, en general) inicialmente puede provocar una atenuación en las concentraciones (si el contaminante queda permanentemente adsorbido, desaparece del flujo), una transformación (si existe intercambio iónico), pero su principal efecto es el retardo: las moléculas del contaminante arrastrado por el agua se retiran provisionalmente del flujo, incorporándose posteriormente al mismo.

[0]▶ En el proceso influyen: (Piwoni y Keely, 1990)

- Las características del contaminante: pueden ser iones (con carga eléctrica) o ser moléculas no cargadas, polares o no polares. Moléculas no polares (muchas moléculas orgánicas: tolueno, benceno) tienen baja solubilidad y resultan adsorbidas por su incompatibilidad con la molécula polar de H<sub>2</sub>O (“sorción hidrofóbica”).

- Las características del suelo o acuífero: <sup>[0]</sup>▶ mineralogía, textura, permeabilidad, porosidad, materia orgánica, etc.

#### 5.2.11. Modelamiento ambiental

Según Kiely (2002), la modelización de los procesos ambientales y de transporte de contaminantes se ha convertido en una labor esencial para el ingeniero y el científico modernos. La variedad de problemas de ingeniería que pueden abordarse mediante la modelización, es verdaderamente infinita. Existen modelos diseñados o paquetes de programas para casi cada tarea que se pueda plantear, ya sea el tratamiento de aguas residuales, la optimización de las rutas para los camiones municipales de transporte de residuos sólidos, la identificación de una localización óptima para el vertido de aguas residuales (con objeto de maximizar la mezcla y la dilución) o, por supuesto, la modelización de la calidad del aire. Una buena fuente de paquetes de software de dominio público y de bajo costo es EPA en EE UU. Los foros de ingeniería ambiental en Internet también ofrecen sitios con software disponible. Los modelos físicos tradicionales de sistemas riparios se han sustituido mayoritariamente por modelos informáticos, principalmente debido a su bajo costo, a la facilidad y a la gran velocidad con la que los problemas se pueden solucionar a partir de datos diferentes. <sup>[13]</sup> La modelización se puede simplificar generalmente como se muestra en la Figura 13.

### 5.3. Discusión teórica

El modelamiento ambiental como tal es una herramienta fundamental, para conocer el movimiento de contaminantes a través del suelo, en este caso los contaminantes identificados son los lixiviados generados a raíz de la constante degradación de desechos dispuestos en un ambiente no controlado, esta premisa es una de las causas más importante de la degradación de los recursos naturales, que aqueja a todas las poblaciones mundiales, en este sentido los autores Chamorro y López (2016) hacen énfasis en que esta problemática causa muchos serios problemas de salud de los seres humanos y se asocian con esta forma de contaminación, de igual manera indican que diversas investigaciones han permitido el desarrollo de modelos y métodos que describen el transporte de lixiviados a través del suelo y en el interior de un relleno sanitario, su investigación presentada precisa una revisión de estos estudios, donde

inicialmente presenta un análisis que permite conocer la delimitación del área contaminada por los residuos sólidos, así mismo permitió conocer el tiempo en que el contaminante alcanza la fuente de agua, logrando identificar claramente la importancia que tiene la aplicación de estos modelos ambientales que en un futuro próximo serán muy útiles en la remediación de dichas áreas degradadas.

Esta premisa es ideal en un contexto en el que vivimos, pues para el autor Infante Castillo (2018), también logró identificar la contaminación en las zonas aledañas a un antiguo botadero, mediante la utilización de métodos geofísicos, como sondeos eléctricos verticales en dirección al botadero en mención, en base a las resistividades obtenidas se generó un modelo de simulación de la zona analizada para calcular el desplazamiento por advección como resultado de la dispersión de la pluma contaminante.

A lo largo del presente trabajo e investigación se presentan muchos estudios que logran identificar las plumas contaminantes no sólo de lixiviados sino que también encontramos identificación de dispersiones de gases y olores dentro de un botadero de residuos sólidos, todos los estudios presentados nos indican la efectividad de la aplicación de un modelamiento ambiental, que en la actualidad ninguna jurisdicción los usa por desconocimiento o porque simplemente no se precisa en la normativa vigente al momento de aplicar un plan de cierre de estas áreas, este tema viene siendo un motivo más de la problemática existente dentro de nuestro país.

#### 5.4. Definición de Términos Básicos

##### 5.4.1. Botadero no controlado a cielo abierto

Los botaderos de residuos sólidos a cielo abierto representan una amenaza para la salud pública y para el ambiente. Por las siguientes razones: Intensifica la contaminación, facilita la migración de gases al suelo o al aire y la quema incontrolada de residuos aumentando el riesgo de explosiones e incendios. Promueve la proliferación de moscas, roedores e insectos en todo el terreno. El deslizamiento de tierra y/o de residuos sólidos tiene como consecuencia la dispersión de polvos y olores en el terreno.<sup>[7]</sup> Perjudica la salud de los vecinos y de los trabajadores y recuperadores de residuos.<sup>[1]</sup> Además, daña la flora y fauna de la zona. [ CITATION Ban16 \l 10250 ]

##### 5.4.2.<sup>[1]</sup> Relleno Sanitario

El relleno sanitario es un proceso utilizado para la disposición de residuos sólidos en la tierra, particularmente residuos sólidos domiciliarios. El proceso se basa en que "criterios de ingeniería y normas operacionales específicas, permiten su confinamiento seguro en términos de control de contaminación ambiental y protección de la salud pública". Es por lo tanto una <sup>[3]</sup> forma de disposición final de residuos sólidos urbanos en la tierra, a través de su confinamiento en capas cubiertas con materia inerte, generalmente tierra, según normas operacionales específicas, de modo de evitar daños o riesgos para la salud pública y la seguridad, minimizando los impactos ambientales". (Arocena, 2001)

##### 5.4.3.<sup>[1]</sup> Remediación ambiental

La remediación es el conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos, de conformidad con lo que establece en ley (Red Latinoamericana de Prevención y Gestión de Sitios Contaminados., 2012).

## 5.5.<sup>[10]</sup> Operacionalización de variables

Tabla 4. Operacionalización de variables.

Univariable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Instrumentos
Dispersión de lixiviados de residuos sólidos	Esparcimiento de sustancias contaminadas que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos sólidos.	Zona superficial afectada	-Delimitación de área afectada	-m <sup>2</sup>	-Levantamiento topográfico con Drone
		Profundidad afectada (zona no visible)	-Estratificación del suelo -Cargabilidad de materiales del suelo	-N° de estratos -(mV/V)	-N° de calicatas -N° de puntos de tomografía geoelectrica (TGE).

Fuente: Elaboración propia

## 6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 6.2. Unidad de análisis, Universo y Muestra

#### 6.2.1. Unidad de análisis:

Área afectada causada por residuos sólidos

#### 6.2.2. Universo:

Botadero de Residuos sólidos del distrito de San Miguel

#### 6.2.3. Muestra:

Medición en campo del Botadero de Residuos sólidos del distrito de San Miguel

### 6.3. Procedimiento

#### 6.3.1. Identificación de área degradada

-Se procedió a cuantificar el área visiblemente degradada a través de un levantamiento topográfico con Dron

#### 6.3.2. Medición de líneas tomográficas del subsuelo

-Las líneas ubicadas para la tomografía fueron tomadas en diferentes zonas del área del terreno con la finalidad de obtener un panorama claro del tipo de resistividad de materiales encontrados, sobre todo para poder identificar acuíferos que puedan encontrarse y ser afectados por la contaminación de los lixiviados.

#### 6.3.3.<sup>[22]</sup> Perforación del suelo a través de calicatas

-Se realizaron perforaciones en el suelo a través de calicatas para poder conocer el perfil estratigráfico y corroborar los resultados de la tomografía eléctrica.

### 6.4. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es de campo pues consiste en acudir a la zona de estudio a realizar observaciones que permitan la confiabilidad de los datos generados en gabinete.

- El tipo de investigación es descriptiva porque describe situaciones, eventos, cualidades y atributos de área a estudiar.
- El nivel de diseño no experimental- Transversal, ya que se ha hecho una medición para conocer la situación actual más no se ha modificado la variable.

#### 6.5. Técnicas de investigación

Univariable	Técnicas de investigación
Dispersión de lixiviados de residuos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Delimitación del área degradada por residuos sólidos a través de imágenes satelitales y levantamiento topográfico con Dron.</li> <li>- Identificación de cargabilidad del suelo a través de tomografías eléctricas.</li> <li>- Determinación del perfil estratigráfico de la litología a través de la ejecución de calicatas</li> </ul>

#### 6.6. Instrumentos

Univariable	Instrumentos
Dispersión de lixiviados de residuos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Levantamiento topográfico con Drone</li> <li>-N° de calicatas</li> <li>-N° de puntos de tomografía geoelectrica (TGE).</li> </ul>

#### 6.7. Técnicas de análisis de datos (estadísticas)

De acuerdo a la naturaleza de la investigación, no aplicaría la presentación de estadística, sin embargo por fines académicos se realizará una pequeña comparación entre los datos que arroja la tomografía con las calicatas para poder establecer una relación entre ambos valores y poder llegar a un análisis más detallado, es importante recalcar que la representación de datos obtenidos de la Tomografía Geo Eléctrica, son los únicos datos cuantitativos expresados a partir de la cargabilidad expresada a mV/V de esta manera podremos identificar las zonas contaminadas por lixiviados a través de diferentes estudios se explicará el fenómeno de la dispersión de estos.

## 7. RESULTADOS

7.1. Identificación del área total y degradada del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel.

Se obtuvo la delimitación del área del botadero de residuos sólidos del distrito de San Miguel, mediante levantamiento topográfico.

Tabla 5: Vértices del levantamiento topográfico del terreno del área afectada.

CUADRO DE COORDENADAS WGS\_1984\_UTM\_ZONA\_17S

VERTICE	LADO	DISTANCIA(m)	ANGULO	ESTE	NORTE
P1	P1-P2	28.833	119° 14' 58''	737445.010	9224356.762
P2	P2-P3	43.474	190° 51' 48''	737485.874	9224340.741
P3	P3-P4	26.869	193° 00' 48''	737536.510	9224321.322
P4	P4-P5	3.636	65° 42' 21''	737555.934	9224309.616
P5	P5-P6	23.428	197° 42' 8''	737542.113	9224306.084
P6	P6-P7	14.806	127° 30' 37''	737525.355	9224306.438
P7	P7-P8	9.703	146° 56' 26''	737502.510	9224292.757
P8	P8-P9	7.953	237° 2' 00''	737461.253	9224263.930
P9	P9-P10	13.329	192° 28' 22''	737456.292	9224265.809
P10	P10-P11	15.929	130° 58' 44''	737423.523	9224268.730
P11	P11-P12	32.899	182° 12' 54''	737407.614	9224269.529
P12	P12-P13	5.305	195° 39' 33''	737399.389	9224280.018
P13	P13-P14	50.331	124° 18' 23''	737393.246	9224285.069
P14	P14-P15	26.628	184° 1' 34''	737383.998	9224282.133
P15	P15-P16	16.762	212° 7' 33''	737369.727	9224286.078
P16	P16-P17	14.265	164° 27' 21''	737360.928	9224307.792
P17	P17-P18	22.679	45° 24' 38''	737358.603	9224310.587
P18	P18-P19	54.232	169° 54' 21''	737384.499	9224317.752
P19	P19-P1	43.892	180° 25' 31''	737422.712	9224338.483

Nota: Elaboración propia

Tabla 6: Cálculo de áreas identificadas en el área degradada.

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Porcentaje (%)
Área visiblemente degradada	2597.271	245.212	27.359
Área NO visiblemente degradada	7067.568	400.619	74.448
Área no degradada	2425.690	855.572	25.552
<b>Área total del terreno</b>	<b>9493.258</b>	<b>454.953</b>	<b>100.000</b>
Área total degradada	7067.568	400.619	74.448

Nota: Elaboración propia

Figura 12: Representación del área total y degradada del botadero del distrito de San Miguel.

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

Según la figura 12, se identificaron tres áreas específicas en todo el botadero del Distrito de San Miguel: área visible degradada, área no visible degradada y área no degradada. El área visible degradada está dada por la acumulación directa de los residuos sólidos y la presencia de vectores, es decir, es el centro propiamente dicho del botadero que se extiende a 2597.27 m<sup>2</sup>, equivalente a un 27.36% del terreno total. La segunda área no visible degradada, se conforma por residuos sólidos dispersos que se encuentra en descomposición

o enterrados por vegetación, está área es de 7067.57 m<sup>2</sup> que equivale el 74.45% del área total; y finalmente, el área no afectada o degradada el cual ocupa un 2425.69 m<sup>2</sup> equivalente al 25.55% del área total (9493.26 m<sup>2</sup>). Estos resultados, nos muestra que el área degradada no visible tiene mayor impacto, ya que, abarca mayor área y con miras a extenderse hasta el área no degradada.

## 7.2. Análisis de la tomografía geoelectrica (TGE) en el área degradada por residuos sólidos del botadero del distrito de San Miguel.

Tabla 7: Extensión de las líneas geofísicas levantadas

NOMBRE DE LINEA	ESTACIÓN INICIAL	ESTACIÓN FINAL	DIRECCIÓN DE LA LINEA	COORDENADA INICIAL	COORDENADA FINAL	ALTITUD (msnm)	METODO TGE	CARGABILIDAD (mV/V)	PROFUNDIDAD (m)	
L-1	0	60m	95° N	737410 9224272	73747 9224270	2472	F	1.26	15	
L-2	0	37 m	342° N°	737454 9224264	737442 9224303	2484	F	0.32 0.32	1.2 13	
L-3	0	46 m	242°N	7374557 9224351	737407 9224324	2516	F	0.91	2	
L-4	0	31 m	130°N	737407 9224325	737439 9224311	2515	F	0.49	10	
L-5	0	31 m	45°N	737443 9224313	737451 9224350	2518	F	0.42	15	
LONGITUD TOTAL MEDIDO (m)							205 m			

Figura 13: Tomografía geoelectrica L1.

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

La figura 13, muestra el perfil de la línea 1, en el cual se realizó la medición. Según se visualiza, desde una profundidad mayor a 30 m, se observa una formación rocosa con alta resistividad (color amarillo hasta el rojo), además no se visualiza una fuente subterránea de agua. A partir de la profundidad de 30 m hasta la profundidad de 15 m, se muestra un color verde, lo que indica que, es un subsuelo semiblando, es decir, existe una resistencia o resistividad media. Y finalmente, el color azul (menor a 15 m) indica blandura o alta humedad, esto quiere decir que existe presencia de lixiviados o contaminantes, es decir, los lixiviados están afectando o degradando a una profundidad de 15 m aproximadamente en

alta proporción. Esto se alinea con el valor de 1.26 mV/V de cargabilidad de la línea 1 (ver tabla 7).

Figura 14: Tomografía geoelectrica L2.

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

La figura 14, muestra el perfil de la línea 2, en el cual se realizó la medición. Según se visualiza, desde una profundidad mayor a 15 m, se observa una formación rocosa con alta resistividad (color amarillo hasta el rojo), además, no se visualiza una fuente subterránea de agua. A partir de la profundidad de 15 m hasta la profundidad 13 m aproximadamente, se muestra un color verde, lo que indica que, es un subsuelo semiblando, es decir, existe una resistencia o resistividad media. Y finalmente, el color azul (menor a 13 m) indica blandura

o alta humedad, esto quiere decir que existe presencia de lixiviados o contaminantes, es decir, los lixiviados están afectando o degradando a una profundidad menor a 13 m aproximadamente en alta proporción. Esto se alinea con el valor de 0.32 mV/V de cargabilidad de la línea 2, a una longitud de 11- 37 m. (ver tabla 7).

Figura 15: Tomografía geoelectrica L3.

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

La figura 15, muestra el perfil de la línea 3, en el cual se realizó la medición. Según se visualiza, desde una profundidad mayor a 30 m, se observa una formación rocosa con alta

resistividad (color amarillo hasta el rojo), además, no se visualiza una fuente subterránea de agua. A partir de la profundidad de 30 m hasta la profundidad 15m aproximadamente, se muestra un color verde, lo que indica que, es un subsuelo semiblando, es decir, existe una resistencia o resistividad media. Y finalmente, el color azul (menor a 2 m) indica blandura o alta humedad, esto quiere decir que existe presencia de lixiviados o contaminantes en filtración, es decir, los lixiviados están afectando o degradando a una profundidad menor a 2 m aproximadamente en alta proporción. Esto se alinea con el valor de 0.91 mV/V de cargabilidad de la línea 3, a una longitud de 1- 46 m. (ver tabla 7).

Figura 16: Tomografía geoelectrica L4.

Nota: Elaboración propia

### Interpretación

La figura 16, muestra el perfil de la línea 4, en el cual se realizó la medición. Según se visualiza, desde una profundidad mayor a 30 m, se observa una formación rocosa con alta resistividad (color amarillo hasta el rojo), además, no se visualiza una fuente subterránea de agua. A partir de la profundidad de 30 m hasta la profundidad 15 m aproximadamente, se muestra un color verde, lo que indica que, es un subsuelo semiblando, es decir, existe una resistencia o resistividad media. Y finalmente, el color azul (menor a 10 m) indica blandura o alta humedad, esto quiere decir que existe presencia de lixiviados o contaminantes en filtración, es decir, los lixiviados están afectando o degradando a una profundidad menor a 10 m aproximadamente en alta proporción. Esto se alinea con el valor de 0.49 mV/V de cargabilidad de la línea 4, a tres diferentes longitudes: 1 – 3, 8 – 17 y 22 – 27 m. (ver tabla 7).

Figura 17: Tomografía geoelectrica L5.

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

La figura 17, muestra el perfil de la línea 5, en el cual se realizó la medición. Según se visualiza, desde una profundidad mayor a 40 m, se observa una formación rocosa con alta resistividad (color amarillo hasta el rojo), además, no se visualiza una fuente subterránea de agua. A partir de la profundidad de 40 m hasta la profundidad 15 m aproximadamente, se muestra un color verde, lo que indica que, es un subsuelo semiblando, es decir, existe una resistencia o resistividad media. Y finalmente, el color azul (menor a 15 m) indica blandura o alta humedad, esto quiere decir que existe presencia de lixiviados o contaminantes en filtración, es decir, los lixiviados están afectando o degradando a una profundidad menor a

15 m aproximadamente en alta proporción. Esto se alinea con el valor de 0.42 mV/V de cargabilidad de la línea 5, en dos diferentes longitudes: 1 – 16 y 28 – 30 m. (ver tabla 7).

Figura 18: Estadística descriptiva de la cargabilidad de las diferentes líneas.

#### Interpretación

La figura 18, muestra los intervalos de confianza al 95% de la cargabilidad del botadero del Distrito de San Miguel. Es decir, se proyecta los valores aproximados que se tienen de las cargas, es decir, la cargabilidad media de todas las líneas es 0.62 mV/V y tiene un intervalo de 0.21885 a 1.02115 mV/V, lo que significa, que, si se realiza nuevas líneas de medición, el valor de cargabilidad oscilará entre 0.21 a 1.02 aproximadamente. Lo que indica, que el

suelo tiene una humedad relativa a causa del lixiviado de los residuos sólidos. La parte inferior de la figura 18, muestra una gráfica de intervalos, que indica que los valores obtenidos de la medición son menores a 1, sea para la media o la mediana.

Figura 19: Estadística descriptiva de la profundidad de las diferentes líneas.

#### Interpretación

La figura 19, muestra los intervalos de confianza al 95% de la profundidad que el lixiviado de residuos sólidos del botadero del Distrito de San Miguel está alcanzando. Es decir, se proyecta los valores aproximados que se tienen de las filtraciones del contaminante, es decir, la profundidad media de todas las líneas es 9.37 m y tiene un intervalo de 2.76 a 15.97 m, lo que significa, que, si se realiza nuevas líneas de medición, el valor de profundidad oscilará entre 2.76 a 15.97 m aproximadamente. Lo que indica, que el suelo

tiene una profundidad de humedad por lixiviados de residuos sólidos, alta; sin embargo, no contamina a las aguas subterráneas, ya que, no se encuentra humedad en las zonas rocosas. La parte inferior de la figura 19, muestra una gráfica de intervalos, que indica que los valores obtenidos de la medición son mayores a 9m, sea para la media o la mediana, esto quiere decir, que existen suposiciones sólidas para inferir que a la larga estas profundidades aumentarán significativamente.

7.3. Perfil estratigráfico de la litología, a través de un programa de exploración en campo y calicatas en el área degradada por residuos sólidos.

Tabla 8: Identificación de Calicatas.

CALICATAS	ESTE (X)	NORTE (Y)	PROFUNDIDAD (M)
Calicata (C-01)	0737426	9224342	6.10
Calicata (C-02)	0737431	9224269	2.10
Calicata (C-03)	0737466	9224348	1.88
Calicata (C-04)	0737395	9224300	3.82

Nota: Elaboración propia

Figura 20: Perfil estratigráfico de Calicata N° 1

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

El análisis descriptivo estratigráfico de la calicata N°1, indica dos capas principales con una profundidad de 6.10 m, la primera conformada por residuos sólidos, humedad y suelo limoso. Y la segunda parte, por roca volcánica, arenisca rojiza y aglomerados piroclásticos en la parte superior. Esto muestra, el tipo de formación geológica del lugar, pero, más precisamente la acumulación de lixiviados que puede existir en la interface con la placa rocosa. En efecto, se observa que esta placa rocosa funciona naturalmente como una capa impermeable que impide el avance del lixiviados a zonas más profundas, esto se corrobora con las tomografías (ver figuras 13 – 17), que muestran la ausencia de aguas subterráneas próximas al botadero.

Figura 21: Perfil estratigráfico de Calicata N° 2

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

El análisis descriptivo estratigráfico de la calicata N°2, indica dos capas principales con una profundidad de 2.10 m, la primera conformada por residuos sólidos, humedad y suelo limoso. Y la segunda parte, por roca volcánica, arenisca rojiza y aglomerados piroclásticos en la parte superior. En efecto, se observa que esta placa rocosa funciona naturalmente como una capa impermeable que impide el avance del lixiviados a zonas más profundas, esto se corrobora con las tomografías (ver figuras 13 – 17), que muestran la ausencia de aguas subterráneas próximas al botadero.

Figura 22: Perfil estratigráfico de Calicata N° 3

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

El análisis descriptivo estratigráfico de la calicata N°3, indica dos capas principales con una profundidad de 1.88 m, la primera conformada por residuos sólidos, humedad y suelo limoso. Y la segunda parte, por roca volcánica, arenisca rojiza y aglomerados piroclásticos en la parte superior. En efecto, se observa, al igual que en las calicatas N° 1 y 2, que la placa rocosa funciona naturalmente como una capa impermeable que impide el avance del lixiviados a zonas más profundas, esto se corrobora con las tomografías (ver figuras 13 – 17), que muestran la ausencia de aguas subterráneas próximas al botadero.

Figura 23: Perfil estratigráfico de Calicata N° 4

Nota: Elaboración propia

#### Interpretación

El análisis descriptivo estratigráfico de la calicata N°4, indica dos capas principales con una profundidad de 3.82 m, la primera conformada por residuos sólidos, humedad y suelo limoso. Y la segunda parte, por roca volcánica, arenisca rojiza y aglomerados piroclásticos en la parte superior. En consecuencia, la función de la placa rocosa impide el avance de los lixiviados en las cuatro calicatas estudiadas, es decir, el material roca volcánico y areniscas rojizas se muestran en cada calicata. Por lo que, se infiere que la geología del botadero es del material indicado anteriormente, el cual es un aspecto ambiental beneficioso para el control del lixiviado, sin embargo, las operaciones de reconstrucción son infaltables.

## 8. DISCUSION

Huanca Apaza, J. (2020), en su estudio sobre la evaluación del Botadero el Cebollar – Arequipa, indicó que el área superficial del botadero Cebollar oscila entre de 20,000.00 m<sup>2</sup>, sin embargo, en su diagnóstico no identifica una zona no visible de degradación, esto, es relevante porque muestra el impacto indirecto de los lixiviados, en la zona interna del área no degradadas. Es decir, los lixiviados que logran filtrarse o escurrirse hasta las áreas no degradadas, terminan modificando la composición química del agua o suelo. De ahí que, es importante identificar las zonas no visibles. En este estudio, se considera que las áreas degradadas no visibles, no solo dependen de residuos sólidos en su proceso de descomposición, sino también de los lixiviados que se generan: tanto como consecuencia de la descomposición como de las lluvias. Larico Larico,( 2020), realizó 11 tipos de subárea, que identifica por cada una el tipo de residuos más abundante, sin embargo, no contempla el lixiviado como agente degradante de zonas no alteradas. En consecuencia, se puede inferir que la zona no visible del botadero de San Miguel es alterada en su mayoría por los lixiviados, esto se corroborará con la tomografía geoelectrica.

La aplicación de las tomografías geoelectricas tienen mayor relevancia en la hidrogeología, el cual son importantes para la identificación de aguas subterráneas. (Alvarado Tacilla, 2020). Sin embargo, Valencia Miraval, (2017), aplicó la tomografía geoelectrica a la evaluación de los lixiviado en base a las resistividades del suelo, y demostró que las bajas resistividades se deben a la humedad del suelo, principalmente por el lixiviado. Y vista desde un relleno sanitario es aún más significativo. Además, Suárez & Zúñiga, (2013), utilizaron 25 SEV's (Sondeos Eléctricos Verticales) en un relleno sanitario, para evaluar el almacenamiento del lixiviado, y concluyó que, que su modelo constituyó de cuatro capas:

“la primera corresponde a una cobertura de material compactado (20  $\Omega$ m – 54  $\Omega$ m); la segunda capa contiene desechos no saturados (11  $\Omega$ m – 18  $\Omega$ m); la tercera (1  $\Omega$ m – 5,4  $\Omega$ m) es de desechos saturados con lixiviados y la cuarta (49  $\Omega$ m – 360  $\Omega$ m) el basamento sobre el cual se instaló el relleno sanitario.” (p. 1). De esto se deduce, que a menor resistividad existirá mayor probabilidad de humedad, y, por ende, de blandura y contaminación de lixiviado. En consecuencia, la información obtenida de las TGE, nos brindan información de que el botadero de San Miguel tiene una capa de 15 m de profundidad aproximadamente, que se debe al lixiviado hasta llegar a la interface con la roca impermeable donde rebasa hasta expandirse por la parte superficial, de ahí que, exista un área no visible degradable. Además, la TGE, nos brinda luces de que no existe agua subterránea menor a 150 m aproximadamente. Lo que, el lixiviado en ese sentido no es un riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Esta afirmación se corrobora con la estratificación de las calicatas.

## 9.<sup>[10]</sup> CONCLUSIONES

- Se **acepta la hipótesis alterna**: Un modelamiento ambiental y simulación de la dispersión de lixiviados no logra identificar el área totalmente contaminada. Esto debido a que, existen estratos del terreno que no tienen un acceso o son netamente montículos de residuos sólidos. Por lo que, es importante hacer mediciones más profundas de estratificaciones de calicatas para obtener más información.
- Se identificó tres áreas del área total del botadero del distrito de San Miguel: área visible degradada (2587.27 m<sup>2</sup>), área no visible degradada (7067.57 m<sup>2</sup>) y área no degradada (2425.69 m<sup>2</sup>); siendo el área no visible degradado el con mayor extensión superficial, lo que indica que, es el más afectado por residuos sólidos, pero también por lixiviados.
- La TGE identificaron tres zonas de subsuelos: zona dura, media y blanda; esta última confirmada por subsuelos blandos y presencia de residuos sólidos, además, se observó en las diferentes tomografías, humedad en la zona blanda a diferentes profundidades, siendo el promedio <sup>[30]</sup> 9.3 m en un **intervalo de confianza al 95% de 2.76 a 15.97 m** (15 m máxima profundidad): lixiviado de residuos sólidos principal factor de la humedad. Por último, la cargabilidad tiene un valor promedio de 0.62 mV/V en un intervalo de 0.22 a 1.02 mV/V, lo que indica una baja resistividad del terreno.
- El estudio de estratificación de las calicatas, identificaron dos fases importantes: la primera conformada por residuos sólidos, humedad y suelo limoso, y la segunda parte, por roca volcánica, arenisca rojiza y aglomerados piroclásticos en la parte superior. Esto muestra, la acumulación del lixiviados que se ubica en la interface

con la placa rocosa; siendo esta placa rocosa como una capa impermeable que impide el avance del lixiviados a zonas más profundas, esto se corrobora con las TGE.

#### 10. RECOMENDACIONES

- ▣ Instar a las entidades responsables, el estudio de tomografías geoeléctricas y perfiles estratigráficos en zonas no visibles del área degradada.
- ▣ Realizar estudios tomografías geoeléctricas en época de lluvia y seca, para conocer con mayor amplitud la dinámica de los lixiviados de los residuos sólidos.
- ▣ Implementar programas de recuperación de áreas degradadas e impedir la infiltración de lixiviados hacia las áreas no degradadas.

## 11. LISTA DE REFERENCIAS

- Alvarado Tacilla , J. S. (2020). CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA MEDIANTE TOMOGRAFÍAS GEOELÉCTRICAS (TGE) PARA LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL SECTOR RONQUILLO, CAJAMARCA - 2020. Cajamarca: Repositorio UPN. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23902>
- Arellano, J., & Guzmán , J. (2011). Ingeniería Ambiental. México: Alfaomega.
- Arocena, A. (2001). Residuos sólidos urbanos. Manual de Gestión integral. Venezuela: CEMPRE.
- Banco Mundial. (2016). Riesgos de un basural a cielo abierto. California: World Bank.
- Banco Mundial. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 . Washington: Cover photo: .
- Bernache Pérez, G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México. Mexico: ISSN.
- Camargo, J., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problema medioambiental, criterios de calidad de agua e implicaciones del cambio climático. España: AEET.
- Castaño, S. (2008).<sup>[26]</sup> [Vertederos e impacto sobre las aguas subterráneas](#). Madrid: Instituto geológico y minero de España.
- Chamorro, C., & López, N. (2016). Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo. SMIG.
- Coutelieis, F., & Delgado, J. (2012).<sup>[0]</sup> [Transport Processes in Porous Media](#). New York: Springer.
- De León Gómez, C., Cruz Vega, C., Velasco Tapia, F., & Chapa Guerrero, J. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. México: ISSN.
- El-Fadel, M., Findikakis, A., & Leckie, J. (2010). Modeling Leachate Generation and Transport in Solid Waste Landfills. Environmental Technology.
- El-Mathana, M., Mostafa, N., Galal, M., & Elawwad, A. (2011).<sup>[21]</sup> [Assessment and simulation of a solid waste dumpsite impact on the surrounding water resources: A case study in Abu Zaabal, Egypt](#).<sup>[21]</sup> Heliyon.
- Ferrero, J. (1974). Depuración biológica del agua. Alhambra: Bs.As.
- Fetter, C. (2001). Applied Hydrogeology. Prentice Hall, Upper Saddle River. Estados Unidos: NJ.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. California: Dover.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Madrid: Universidad de los Andes.
- Gómez, L. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. México: Scielo.

- Guía Operativa. (2013). Procedimiento de muestreo. Argentina: GOAS.
- Huanca Apaza, J. N. (2020). DIAGNÓSTICO SITUACIONAL DE ÁREAS DEGRADADAS POR RESIDUOS SÓLIDOS Y PROPUESTA DE CIERRE DE BOTADEROS A CIELO ABIERTO EN LA CIUDAD DE AREQUIPA. Arequipa: Repositorio UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/56490a52-e580-4464-afab-8d187d0930c2>
- Infante Castillo, P. (2018). El presente estudio trata sobre el diagnóstico de la contaminación de acuíferos por efecto de los. Ecuador: ndla.
- Instituto de ciencias de la naturaleza, territorio y energías renovables.<sup>[11]</sup> (31 de Marzo de 2016).<sup>[23]</sup> Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/sabias-que-peru-genera-18-131-toneladas-de-basura-al-dia/>
- Johannessen, L. (1999). Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. The International Bank for Reconstruction and Development. Washington, D.C. U.S.A. : THE WORLD BANK.
- Kiely, G. (2002). Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. España: DIMA.
- Kiss, K. G., & Encarnación, A. G. (2006).<sup>[1]</sup> Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. México: Gaceta Ecológica.
- Larico Larico, A. M. (2020). ÁREAS DEGRADADAS POR RESIDUOS SÓLIDOS SIN INTERVENCIÓN Y EL IMPACTO AMBIENTAL, EN LA ZONA DE VIÑANI- DISTRITO DE CORONEL GREGORIO ALBARRACÍN LANCHIPA, TACNA 2018. Tacna: Repositorio UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA. Obtenido de <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1621>
- Martinez, J. (2012).<sup>[1]</sup> Calidad y contaminación de las aguas subterráneas: Los sistemas acuífero del campo de dalías y cuenca del Andarax. Almería, España: Universidad de Almería.
- Masters, G., & Ela, W. (2008). Introducción a la ingeniería medioambiental. Madrid: Pearson educación .
- Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2012). Ingeniería ambiental. Fundamentos, Sustentabilidad, Diseño. México: Alfaomega.
- Organización Panamericana de Salud. (2004).<sup>[2]</sup> Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos. Perú: CEEPIS.
- Piwoni, M., & Keeley, J. (1990).<sup>[0]</sup> Basic concepts of contaminant Sorption at Hazardous Waste Sites. U.S. . Washington: Environmental Protection Agency.
- Red Latinoamericana de Prevención y Gestión de Sitios Contaminados. (2012). La remediación de sitios contaminados público especializado. GIZ.
- Sánchez, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. México: Createspace Independent Pub.

- Sánchez, O., Herzig, M., Eduardo, P., Márquez, R., & Zambrano, L. (2015). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Estados Unidos: Wildifile.
- Sistema de Información de Recursos Naturales para el desarrollo de una agricultura sostenible (SIRENA). (2011). Manual del usuario-Residuos sólidos. Ecuador: PASQUEL.
- Suárez, J., & Zúñiga, H. (2013). Detección de capas de desechos con métodos geoelectrónicos: caso Relleno Sanitario Río Azul, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. Obtenido de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0256-70242013000200011](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000200011)
- VALENCIA MIRAVAL, C. E. (2017). CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO 3D A TRAVÉS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN EL RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE CHANCAY - LIMA. Arequipa: Repositorio UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.