

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



Presentado por

Bach. LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR
LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE
LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023**

Asesor:

Dra. YUDITH CHOQUE QUISPE

Co-Asesor:

Dra. AYDEE MARILÚ SOLANO REYNOSO

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ

2023



APROBACIÓN DEL ASESOR

Quién suscribe:

Dra. YUDITH CHOQUE QUISPE, por la presente:

CERTIFICA

Que, el Bachiller en Ingeniería Ambiental, LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS, ha culminado de manera satisfactoria del Informe Final de tesis intitulado:

“EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS”, para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Andahuaylas, 26 de diciembre de 2023

Ing. Yudit Choque Quispe
Asesor

Liliana Rodríguez Cardenas
Bachiller



APROBACIÓN DEL CO-ASESOR

Quién suscribe:

Dra. AYDEE MARILÚ SOLANO REYNOSO, por la presente:

CERTIFICA

Que, el Bachiller en Ingeniería Ambiental, LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS, ha culminado de manera satisfactoria del Informe Final de tesis intitulado:

“EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS”, para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Andahuaylas, 26 de diciembre de 2023

Ing. Aydee Marilú Solano Reynoso
Co-asesor

Liliana Rodríguez Cardenas
Bachiller



FACULTAD DE INGENIERIA

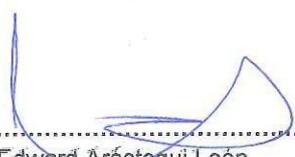
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la Av. José María Arguedas del Local Académico SL01 (Ccoyahuacho) en el auditorio del Departamento Académico de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional José María Arguedas ubicado en el distrito de San Jerónimo de la Provincia de Andahuaylas, siendo las 08:30 horas del día 11 de diciembre del año 2023, se reunieron los docentes: Dr. Edward Aróstegui León, Mag. Alexei Reynaga Medina, Mag. Yakov Felipe Carhuarupay Molleda, en condición de integrantes del Jurado Evaluador del Informe Final de Tesis intitulado: "EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023", cuya autora es la Bachiller en Ingeniería Ambiental **LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS**, la Asesora, Dra. Yudith Choque Quispe y Co- Asesora Mag. Aydee Marilú Solano Reynoso, con el propósito de proceder a la sustentación y defensa de dicha tesis.

Luego de la sustentación y defensa de la tesis, el Jurado Evaluador **ACORDÓ:** APROBADO por UNANIMIDAD al Bachiller en Ingeniería Ambiental **LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS**, obteniendo la siguiente calificación y mención:

Nota escala vigesimal		Mención
Números	Letras	
16	DIECISEIS	MUY BUENO

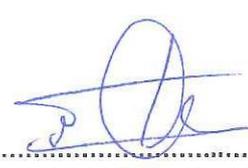
En señal de conformidad, se procedió a la firma de la presente acta en 03 ejemplares.


.....
Dr. Edward Aróstegui León

Presidente del Jurado Evaluador


.....
Mag. Alexei Reynaga Medina

Primer Miembro del Jurado Evaluador


.....
Mag. Yakov Felipe Carhuarupay Molleda

Segundo Miembro del Jurado Evaluador



APROBACIÓN DEL JURADO DICTAMINADOR

La Tesis "EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023", para optar el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL, ha sido evaluada por el Jurado Dictaminador conformado por:

PRESIDENTE: Dr. Edward Aróstegui León

PRIMER MIEMBRO: Mag. Alexei Reynaga Medina

SEGUNDO MIEMBRO: Mag. Yakov Felipe Carhuarupay Molleda

Habiendo sido aprobada por UNANIMIDAD, en la ciudad de Andahuaylas el día 11 del mes de diciembre de 2023.

Andahuaylas, 26 de Diciembre del 2023

Dr. Edward Aróstegui León

Presidente de Jurado

Mag. Alexei Reynaga Medina

Primer Miembro

Mag. Yakov Felipe Carhuarupay Molleda

Segundo Miembro



Universidad Nacional José María Arguedas

Identidad y Excelencia para el Trabajo Productivo y el Desarrollo

Unidad de Investigación de la Facultad Ingeniería
C003-2024

Andahuaylas, 11 de enero de 2024

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería, expide la:

Constancia

De porcentaje de similitud (04%) según el software Turnitin, al informe final de investigación: Evaluación del índice de contaminación por lixiviados (ICL) en el relleno sanitario de la provincia Andahuaylas, 2023. Presentado por la Bach. Liliana Rodríguez Cárdenas cuyo Dra. Yudith Choque Quispe Co-asesor Aydeé Marilú Solano Reynoso

Dra. María del Carmen Delgado Laime
Presidente de la Unidad de Investigación de la
Facultad de Ingeniería

MSc. Fidelia Tapia Tadeo
Miembro de la
Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería

M.Sc. Richard Carrión Abollaneda
Miembro de la
Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería

C.c
Archivo.

INFORME DE ORIGINALIDAD

El que suscribe del trabajo de investigación/tesis, titulada "**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023**" presentada por la **Br. Liliana Rodríguez Cardenas**, con **DNI N° 77291389**, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Ambiental**, para optar el título profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Informo que el documento ha sido sometido a revisión de originalidad, utilizando el software de control de similitud y detección de plagio Turnitin, conforme al reglamento vigente, verificándose un porcentaje de 4 % de similitud general.

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto el reporte de software firmado.

Andahuaylas, 26 de diciembre de 2023



.....
Ing. Yudith Choque Quispe
Asesor

INFORME DE ORIGINALIDAD

El que suscribe del trabajo de investigación/tesis, titulada "EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023" presentada por la Br. Liliana Rodríguez Cardenas, con DNI N° 77291389, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Informo que el documento ha sido sometido a revisión de originalidad, utilizando el software de control de similitud y detección de plagio Turnitin, conforme al reglamento vigente, verificándose un porcentaje de 4 % de similitud general.

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto el reporte de software firmado.

Andahuaylas, 26 de diciembre de 2023



Ing. Aydee Marilú Solano Reynoso
Co-asesor

Se adjunta:

1. Reporte firmado, generado por el software.

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DEL INDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADO ICL DEL RELLEN O SANITARIO DE LA PROVINCIA DE ANDAHUAYLAS

AUTOR

LILIANA RODRIGUEZ CARDENAS

RECUENTO DE PALABRAS

40341 Words

RECUENTO DE CARACTERES

208661 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

164 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

10.8MB

FECHA DE ENTREGA

May 27, 2024 11:19 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 27, 2024 11:22 AM GMT-5

● **4% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

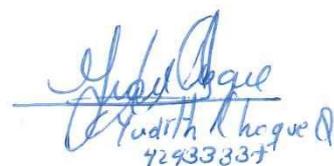
- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)



72291389
Liliana Rodriguez
Cardenas



Judith Cheque
42933337

● 4% de similitud general

Principales fuentes encontradas en las siguientes bases de datos:

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

FUENTES PRINCIPALES

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	hdl.handle.net Internet	<1%
2	repositorioacademico.uda.cl Internet	<1%
3	repositorio.unajma.edu.pe Internet	<1%
4	scielo.org.bo Internet	<1%
5	SERV GEOGRAFICOS Y MEDIO AMBIENTE SAC. "Plan de Cese Tempor... Publication	<1%
6	Ananda Cristina Froes Alves. "Investigação do comportamento da dige... Crossref posted content	<1%
7	repositorio.uwiener.edu.pe Internet	<1%
8	renati.sunedu.gob.pe Internet	<1%


77291389
Liliama Rodriguez
cardenas


Judith Choque
42933337

9	virtualpro.co Internet	<1%
10	vsip.info Internet	<1%
11	dspace.lib.ntua.gr Internet	<1%
12	fdocuments.mx Internet	<1%
13	1library.co Internet	<1%
14	WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "MEIA... Publication	<1%
15	core.ac.uk Internet	<1%
16	dspace.ups.edu.ec Internet	<1%
17	repositorio.continental.edu.pe Internet	<1%
18	repositorio.ucv.edu.pe Internet	<1%
19	repositorio.utc.edu.ec Internet	<1%
20	DQ ASESORIA & CONSULTORIA E.I.R.L.. "Modificación y Actualización ... Publication	<1%

HR
77291389
Liliana Rodríguez
Cardenas

Andrés
42933333
Auditor de gestión

21	repositorio.uap.edu.pe Internet	<1%
22	secgen.unajma.edu.pe Internet	<1%
23	bdigital.unal.edu.co Internet	<1%
24	riuc.bc.uc.edu.ve Internet	<1%
25	repositorio.uancv.edu.pe Internet	<1%
26	repositorio.unsaac.edu.pe Internet	<1%
27	elsro.sk Internet	<1%
28	hannacolombia.com Internet	<1%


42933232.
Judith Lopez Q.


77291339
Liliana Rodriguez
Cardenas

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi querida madre Albertina Cardenas Huaraca y a mis hermanas Brysa Aracely Alarcón Cardenas y Lucia Milagros Cardenas Huaraca, por todo el apoyo incondicional durante mi formación profesional.

Asimismo, a mi abuelito Arístides Cardenas Farfán, el cual siempre estuvo guiándome como un padre durante esta etapa de mi vida, a mi abuelita María Huaraca Peceros por el apoyo moral brindado.

AGRADECIMIENTO

A mi querida madre Albertina y a mi abuelita María por el sacrificio y esfuerzo durante estos años por brindarme un mejor futuro y mis hermanas.

A la Universidad Nacional José María Arguedas, por brindarme el financiamiento para la presente investigación y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental (EPIAM) por acogerme en estos 5 años de estudios, asimismo a los docentes que formaron parte de mi vida académica y aportaron en mi formación profesional.

Al Ing. David Choque Quispe, por todo el tiempo, dedicación y el apoyo brindado durante la ejecución del presente proyecto de investigación, guiándome a lo largo de este camino con sus conocimientos para el avance de esta tesis. Y a la Ing. Betsy Suri Ramos Pacheco, por siempre estar dispuesta a brindarme su apoyo.

A mi asesora la Ing. Yudith Choque Quispe y Co-asesora la Ing. Aydee Marilú Solano Reynoso por el apoyo, dedicación y sus valiosas sugerencias para mejorar durante todo el desarrollo de la presente investigación.

Al Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos (LIMTA) integrado por el Ing. David Choque, Ing. Yudith y Ing. Betsy Ramos, por darme las facilidades para el análisis experimental del presente trabajo de investigación.

A mis jurados evaluadores; Dr. Edward Aróstegui León, Mag. Yakov Felipe Carhuarupay Molleda y Mag. Alexei Reynaga Medina por su profesionalismo, tiempo, y orientación, que dignamente colaboraron con sus conocimientos y comentarios los cuales fueron muy útiles para mejorar el informe final de investigación.

A todos mis compañeros y amigos en especial a Emerson Oscoco, Leslie Velarde, Melisa Ccasa, Karina Herbas, Fernando Laime y Yorfin Alcarraz, por brindarme su apoyo durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

APROBACIÓN DEL ASESOR.....	II
APROBACIÓN DEL CO-ASESOR.....	III
COPIA DEL ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	IV
APROBACIÓN DEL JURADO EVALUADOR.....	V
RESULTADO DE INFORME DE SIMILITUD DE LA TESIS.....	VI
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CHUMASQA.....	3
INTRODUCCIÓN.....	7
1. CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
1.1 Planteamiento del Problema.....	8
1.2 Problema de la Investigación.....	9
1.2.1 Problema General.....	9
1.2.2 Problemas Específicos.....	9
1.3 Objetivos de la Investigación.....	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.2 Objetivo Especifico.....	10
1.4 Justificación de la Investigación.....	10
1.5 Variables.....	11
1.6 Operacionalización de Variables.....	12
2. CAPITULO II: ANTECEDENTES.....	13
2.1 Antecedentes Internacionales.....	13
2.2 Antecedentes Nacionales.....	16
3. CAPITULO III: MARCO TEÓRICO.....	19
3.1 Lixiviados.....	19
3.1.1 Lixiviado.....	19
3.1.2 Composición química de los lixiviados.....	19
3.1.3 Lixiviados acidogénicos y metanogénicos.....	23
3.1.4 Tratamiento de lixiviados.....	25
3.2 Relleno Sanitario.....	27
3.2.1 Residuos sólidos.....	27
3.2.2 Gestión de los residuos solidos.....	28
3.2.3 Relleno sanitario.....	28
3.2.4 Impacto de los rellenos sanitarios.....	29
3.3 Índice de Contaminación por Lixiviados ICL.....	30
3.3.1 Definición y cálculo del Índice de Contaminación de Lixiviados.....	30
3.3.2 Métodos para medir la contaminación de lixiviados.....	30

3.3.2.1	Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL)	30
3.3.2.2	El Índice de Contaminación por Lixiviado para países en vías de desarrollo (ICLv _d)	33
3.4	Marco normativo internacional de los lixiviados	36
3.5	Marco conceptual	41
4.	CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	43
4.1	Lugar de ejecución	43
4.2	Información meteorológica	47
4.3	Materiales, equipos y reactivos	47
4.4	Material de estudio	50
4.4.1	Población	50
4.4.2	Muestra	50
4.4.3	Muestreo	50
4.5	Metodología	51
4.5.1	Tipo	51
4.5.2	Diseño de investigación	51
4.6	Métodos y técnicas de Análisis	51
4.6.1	Procedimientos y métodos de análisis	52
4.6.1.1.	Toma de muestra	52
4.6.1.2.	Medición de parámetros	54
4.6.1.3.	Determinación y cálculo del ICL	61
4.6.2	Procesamiento y análisis de datos	67
5.	CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
5.1	Variación de la precipitación	68
5.1.1	Precipitación promedio mensual del periodo 1970 a 2019	68
5.1.2	Variaciones diarias y mensuales de las precipitaciones para el año de estudio (2020-2023)	70
5.2	Evaluación de los parámetros físicos, químicos y biológico de los lixiviados	71
5.2.1	Compuestos Orgánicos	71
5.2.2	Compuestos Inorgánicos	78
5.2.3	Metales pesados	88
5.3	Evaluación del Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL)	91
5.3.1	ICL de los Compuestos Orgánicos (ICL _{or})	91
5.3.2	ICL de los Compuestos Inorgánicos (ICL _{in})	94
5.3.3	ICL de los Metales Pesados (ICL _{mp})	97
5.3.4	ICL Total Del Relleno Sanitario de Andahuaylas (ICL _{total})	100
	CONCLUSIONES	109
	RECOMENDACIONES	110
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	111
	ANEXOS	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	12
Tabla 2 Componentes típicos de lixiviados de un vertedero de Residuos Sólidos Urbanos	20
Tabla 3 Comparación de la composición química de lixiviados con otros países.....	21
Tabla 4 La concentración de lixiviados y la edad del relleno.....	22
Tabla 5 Clasificación de los Lixiviados vs la edad del Relleno	22
Tabla 6 Estabilidad del vertedero en función de la relación DBO/DQO	23
Tabla 7 Resultados típicos de lixiviados de rellenos acidogénicos y metanogénicos	24
Tabla 8 Sub ICL	31
Tabla 9 Parámetros del ICL y el peso del contaminante planteado por Kumar y Alappat (2005)	32
Tabla 10 Parámetros del ICL y el peso del contaminante por Sundara et al. (2020)	34
Tabla 11 Índice de contaminación individual para el parámetro de revestimiento del relleno	34
Tabla 12 Límite máximo permisible de concentración para el Lixiviado	36
Tabla 13 Concentración Máximas Permisible (CMP).....	37
Tabla 14 Límites máximos de concentración de contaminantes en los lixiviados	38
Tabla 15 Estándares para la eliminación de los lixiviados tratados	39
Tabla 16 Estándares para el vertimiento de aguas residuales industriales	40
Tabla 17 Estado del RSA.....	45
Tabla 18 Cantidad de disposición de residuos sólidos en el año 2022.....	45
Tabla 19 Estación Meteorológica	47
Tabla 20 Fecha de muestreo	47
Tabla 21 Materiales de laboratorio	48
Tabla 22 Equipos de laboratorio.....	49
Tabla 23 Reactivos	49
Tabla 24 Puntos de muestreo.....	54
Tabla 25 Parámetros del ICL con el peso del contaminante	62
Tabla 26 Sub-ICL	63
Tabla 27 Parámetros del ICL con factores de peso de subíndices.....	63
Tabla 28 Parámetros del ICL con el peso del contaminante	64
Tabla 29 Índice de contaminación individual para el parámetro de revestimiento del relleno	65

Tabla 30 ICL estándar, para los Subíndices	67
Tabla 31 Precipitación promedio mensual mm del periodo 1970-2019.....	68
Tabla 32	70
Tabla 33: Resultado del DQO en los puntos de muestreo y temporadas	72
Tabla 34: Resultado del DBO ₅ en los puntos de muestreo y temporadas	75
Tabla 35 Relación de DBO ₅ /DQO para la Temporada 1 y 2.....	76
Tabla 36 Resultados de Coliformes totales para la Temporada 1	78
Tabla 37: Resultados de Coliformes totales para la Temporada 2	78
Tabla 38: Resultado del pH en los puntos de muestreo y temporadas	80
Tabla 39: Comparación de los diferentes tipos de sólidos presentes en las muestras de lixiviado recogidas en el relleno: L1 – L2.....	81
Tabla 40 Resultado del Nitrógeno Amoniacal en los puntos de muestreo y temporadas..	84
Tabla 41 Resultado del Cloruro en los puntos de muestreo y temporadas.....	86
Tabla 42 Resultado del Cianuro en los puntos de muestreo y temporadas	87
Tabla 43 Resultado de los metales pesados en los puntos de muestreo y temporadas	88
Tabla 44 Cálculo del ICLor para Temporada 1	92
Tabla 45 Cálculo del ICLor para Temporada 2	92
Tabla 46 Cálculo del ICLin para la Temporada 1	95
Tabla 47 Cálculo del ICLin para la Temporada 2	95
Tabla 48 Cálculo del ICLmp en la Temporada 1	98
Tabla 49 Cálculo del ICLmp en la Temporada 2	98
Tabla 50 Cálculo del ICL total para la Temporada 1 y Temporada 2, de acuerdo a, Kumar y Alappat (2003).....	101
Tabla 51 Cálculo del ICLvd para la temporada 1 y temporada 2, de acuerdo, a Sundara et al. (2020).....	104
Tabla 52 Comparación de los ICL de rellenos y vertederos para los distintos países internacional	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación del RSA	43
Figura 2 Plano general del RSA	44
Figura 3 Composición de residuos sólidos generados, 2022.....	46
Figura 4 Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación LIMTA	46
Figura 5 Esquema metodológico	52
Figura 6 Pozo de lixiviación.....	53
Figura 7 Precipitación promedio mensual observadas para el periodo 1970-2019.....	69
Figura 8 Climograma para precipitación y temperatura promedio mensual para el periodo 1970-2019.....	69
Figura 9 Diagrama de intervalos para DQO para las temporadas 1 y 2.....	71
Figura 10: Diagrama de intervalos de DBO ₅ para las temporadas 1 y 2.....	74
Figura 11: Diagrama de intervalos de pH para la temporada 1 y 2.....	79
Figura 12 Diagrama de intervalos de Nitrógeno Amoniacal para la Temporada 1 y 2.....	83
Figura 13 Diagrama de intervalos de intervalos del Cloruro para la temporada 1 y 2.....	85
Figura 14 Diagrama de intervalos de intervalos del Cianuro para la temporada 1 y 2.....	87
Figura 15 Gráfico de metales para la temporada 1	89
Figura 16 Grafico de metales pesados para la temporada 2	90
Figura 17 Gráfico de ICLor para la Temporada 1 y Temporada 2.....	93
Figura 18 Grafico de ICLin para la Temporada 1 y Temporada 2.....	96
Figura 19 Grafico de ICLmp para la Temporada 1 y Temporada 2.....	99
Figura 20 Gráfico del ICL total para la Temporada 1 y Temporada 2.....	102
Figura 21 Gráfico del ICLvd para la Temporada 1 y Temporada 2.....	105

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Curva de los subíndices de los contaminantes del Lixiviado.....	122
ANEXO 2 Datos medidos por triplicado del DQO.....	126
ANEXO 3 Análisis de Varianza para el DQO	126
ANEXO 4 Datos medidos por triplicado del DBO ₅	126
ANEXO 5 Análisis de Varianza para el DBO ₅	126
ANEXO 6 Datos medidos por triplicado del pH	126
ANEXO 7 Análisis de Varianza para el pH.....	127
ANEXO 8 Datos medidos por triplicado de los coliformes totales	127
ANEXO 9 Análisis de Varianza para coliformes totales	127
ANEXO 10 Datos medidos por triplicado del Cloruro	127
ANEXO 11 Análisis de Varianza para cloruro	127
ANEXO 12 Datos medidos por triplicado de la serie de sólidos.....	128
ANEXO 13 Análisis de Varianza para Sólidos disueltos totales (TDS).....	128
ANEXO 14 Análisis de Varianza para Sólidos Suspendedos Totales (TSS).....	128
ANEXO 15 Análisis de Varianza para Sólidos Totales Volátiles (STV)	129
ANEXO 16 Análisis de Varianza para Sólidos Totales Fijos (STF)	129
ANEXO 17 Análisis de Varianza para Sólidos Totales (ST)	129
ANEXO 18 Datos medidos por triplicado del nitrógeno amoniacal.....	129
ANEXO 19 Análisis de Varianza para nitrógeno amoniacal.....	129
ANEXO 20 Datos medidos por triplicado del níquel	130
ANEXO 21 Análisis de Varianza para el níquel.....	130
ANEXO 22 Datos medidos por triplicado del cianuro	130
ANEXO 23 Análisis de Varianza para cianuro.....	130
ANEXO 24 Datos medidos por triplicado de los metales pesados	131
ANEXO 25 Análisis de Varianza para cromo	131
ANEXO 26 Análisis de Varianza para plomo	131
ANEXO 27 Análisis de Varianza para mercurio	132
ANEXO 28 Análisis de Varianza para arsénico	132
ANEXO 29 Análisis de Varianza para zinc	132
ANEXO 30 Análisis de Varianza para cobre.....	132
ANEXO 31 Análisis de Varianza para hierro	132
ANEXO 32 Análisis de Varianza para el cadmio	133

ANEXO 33 Matriz de Consistencia.....	134
ANEXO 34 Métodos y equipos para los análisis en laboratorio	135
ANEXO 35 Operacionalización de variables	136
ANEXO 36 Panel Fotográfico	137

RESUMEN

El lixiviado contiene una variedad de contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales pesados que pueden ser peligrosos para el medio ambiente. El manejo inadecuado de los lixiviados es uno de los principales problemas asociados a la disposición de residuos sólidos, el cual causa una grave contaminación ambiental en los rellenos sanitarios y sus alrededores. Es importante caracterizar las variaciones temporales de los lixiviados para desarrollar un sistema adecuado de tratamiento en los rellenos sanitarios y minimizar los riesgos de contaminación ambiental. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) del Relleno Sanitario de la provincia de Andahuaylas y la variación temporal, para lo cual se identificó el ICLor, el ICLin, el ICLmp y la caracterización del lixiviado. El ICL se evaluó considerando 18 parámetros físicos (pH, TDS, TSS), químicos (DBO5, DQO, Nitrógeno amoniacal, Cl⁻, Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg, As, Cd, CN⁻) y microbiológicos (Coliformes totales); se muestreo en temporadas de lluvias y secas. Los datos se recolectaron por triplicado y se analizaron a través de un ANOVA, test de Tukey al 5% de significancia.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron la variación temporal de ICL y precipitación, en periodo de lluvias las variaciones son entre (76.12-116.14) mm, ICL (25.690 - 22.152), ICLor (51.565 - 48.730), ICLin (21.953 - 11.497), ICLmp (10.210 - 10.617) y en periodos secos las oscilaciones de las precipitaciones están entre (1.17– 7.95) mm, ICL (26.976 - 23.693), ICLor (48.796 - 43.47), ICLin (27.711 - 21.059), ICLmp (10.808 - 10.870); además, los compuestos orgánicos e inorgánicos fueron los principales componentes del ICL total. Asimismo, el valor ICL puede usarse como herramienta para evaluar el potencial de contaminación por lixiviados de los rellenos sanitarios, además de identificar sitios donde existe un alto riesgo de migración de lixiviados y contaminación de las aguas subterráneas. Concluyendo que los valores obtenidos del ICL total, ICLor, ICLin y ICLmp fueron superiores a al ICL estándar (7.31), para ambos estudios.

Palabras claves: Caracterización de lixiviados, contaminación, Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL), lixiviado, relleno, variación temporal.

ABSTRACT

Leachate contains a variety of organic and inorganic contaminants and heavy metals that can be hazardous to the environment. Inadequate leachate management is one of the main problems associated with solid waste disposal, which causes serious environmental pollution in and around landfills. It is important to characterise the temporal variations of leachate in order to develop an adequate landfill treatment system and minimise the risks of environmental contamination. The objective of the present work was to evaluate the Leachate Contamination Index (LCI) of the Andahuaylas Province Landfill and the temporal variation, for which the LCI_{or}, LCI_{in}, LCI_{mp} and leachate characterisation were identified. The ICL was evaluated considering 18 physical (pH, TDS, TSS), chemical (BOD₅, COD, ammoniacal nitrogen, Cl⁻, Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg, As, Cd, CN⁻) and microbiological (total coliforms) parameters; it was sampled in rainy and dry seasons. Data were collected in triplicate and analysed by ANOVA, Tukey's test at 5% significance.

The results obtained in this study showed the temporal variation of ICL and precipitation, in rainy period the variations are between (76.12-116.14) mm, ICL (25.690 - 22.152), ICL_{or} (51.565 - 48.730), ICL_{in} (21.953 - 11.497), ICL_{mp} (10.210 - 10.617) and in dry periods the rainfall oscillations are between (1.17- 7.95) mm, ICL (26.976 - 23.693), ICL_{or} (48.796 - 43.47), ICL_{in} (27.711 - 21.059), ICL_{mp} (10.808 - 10.870); moreover, organic and inorganic compounds were the main components of the total ICL. Furthermore, the ICL value can be used as a tool to assess the potential for leachate contamination of landfills, as well as to identify sites where there is a high risk of leachate migration and groundwater contamination. It was concluded that the values obtained for the total LCI, LCI_{or}, LCI_{in} and LCI_{mp} were higher than the standard LCI (7.31) for both studies.

Key words: Leachate characterisation, contamination, Leachate Pollution Index (LPI), leachate, landfill, temporal variation.

CHUMASQA

Lixiviado nisqapiqa imaymana contaminantes orgánicos y inorgánicos nisqakunan kan, lllasa q'illaykunapas, chaykunan pachamamapaq peligroso kanman. Chay lixiviado nisqa mana allin kamachiyqa hukninmi hatun sasachakuykuna, chaymi tupan residuos sólidos nisqakuna wischuywan, chaymi sinchi pachamama qachachakun vertederokunapi, muyuriqninpipas. Importantemi caracterizay chay variaciones temporal de lixiviado nisqa, chaynapi sistema de tratamiento adecuado nisqa vertedero nisqapi ruwanapaq, chaynallataqmi pisiyachinapaq riesgos de contaminación ambiental nisqapas. Kay llamkaypa munayninqa karqan Andahuaylas suyupa Vertedero Sanitario nisqapa Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) nisqa chaninchanapaq chaynallataq variación temporal nisqapas, chaypaqmi ICLor, ICLin, ICLmp chaymanta caracterización nisqa lixiviado nisqapas riqsichisqa karqa. Chay ICL nisqa chaninchasqa karqan 18 parámetros físicos (pH, TDS, TSS), químicos (BOD5, COD, Nitrógeno Amoníaco, Cl-, Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg, As, Cd, CN-) nisqakunata qhawarispa, hinallataq microbiológico (tukuy coliformes); Muestreo ruwayqa paray pachakunapi, ch'aki pachakunapi ima ruwakurqa. Chay willakuykunataqa kimsa kutipi huñurqaku hinaspam ANOVA, Tukey pruebawan 5% significanciawan qawarirqaku.

Kay yachaypi tarikusanmi qawarichirqa ICLpa chaynallataq parapa variacionnin temporal nisqatapas, paray pachapiqa chay variacin nisqakunam kachkanku (76,12-116,14) mm, ICL (25,690 - 22,152), ICLor (51,565 - 48,730), ICLin (21,953 - 11,497) . , ICLmp (10,210 - 10,617) hinallataq ch'aki pachakunapi parapa kuyuriyninkunaqa (1,17 - 7,95) mm, ICL (26,976 - 23,693), ICLor (48,796 - 43,47), ICLin (27,711 - 21,059), ICLmp (10,808 - 10,47) nisqa chawpipim kachkan. 870) ; Chaymantapas, compuestos orgánicos y inorgánicos nisqakunam tukuy ICL nisqapiqa aswan hatun componentekuna karqaku. Hinallatahmi, chay valor ICL nisqataqa huk yanapakuy hina churakunman, chaywanmi chaninchakunman vertedero nisqamanta lixiviado nisqapa contaminación nisqapa atikuynin, chaynallataqmi riqsichikunman maykunapichus hatun riesgo kanman lixiviado nisqapa migracionninpa, allpa ukupi yakupa contaminación nisqapa ima. Tukuchispa kay valores obtenidos kay tukuy ICL, ICLor, ICLin chanta ICLmp kaqmanta aswan hatun karqanku kay ICL estándar kaqmanta (7,31), iskaynin yachaykunapaq.

Sapaq simikuna: Caracterización de lixiviado, contaminación, Índice de Contaminación al Lixiviado (ICL), lixiviado, vertedero, variación temporal.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AGV	:	Ácidos Grasos Volátiles
AH	:	Ácido Húmico
AF	:	Ácidos Fúlvicos
CT	:	Coliformes Totales
DBO ₅	:	Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)
DQO	:	Demanda Química de Oxígeno
DBO/DQO	:	Relación de Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno
TOC	:	Contenido de carbono orgánico total
pH	:	Potencial de Hidrogeno
SS	:	Sólidos en Suspensión
NTK	:	Nitrógeno Total Kjeldahl
ICL	:	Índice de Contaminación por Lixiviado
ICL or	:	Índice de Contaminación por Lixiviado de compuestos orgánicos
ICL in	:	Índice de Contaminación por Lixiviado de compuestos inorgánicos
ICL mp	:	Índice de Contaminación por Lixiviado de metales pesados
ICLvd	:	Índice de Contaminación por Lixiviado de las Características del Relleno
TDS	:	Sólidos Disueltos Totales
TSS	:	Sólidos Suspendidos Totales
SSF	:	Sólidos Suspendidos Fijos
STV	:	Sólidos Totales Volátiles
STF	:	Sólidos Totales Fijos
ST	:	Sólidos Totales
NA	:	Nitrógeno Amoniacal
MINAM	:	Ministerio del Ambiente
MPA	:	Municipalidad Provincial de Andahuaylas
RSA	:	Relleno Sanitario de Andahuaylas
p_i	:	Valor del subíndice del contaminante
w_i	:	Peso del contaminante
Sig.	:	Significancia
Con.	:	Concentración del contaminante

P	:	Es el parámetro
S	:	Desviación estándar
\bar{x}	:	Promedio
CV	:	Coefficiente de variación
T1	:	Temporada 1
T2	:	Temporada 2
Temporada 1	:	Temporada 1, correspondiente a la época de lluvias
Temporada 2	:	Temporada 2, correspondiente a la época de seca o estiaje
L1	:	Punto de muestreo en el primer pozo de Lixiviación
L2	:	Punto de muestreo en el segundo pozo de Lixiviación
P1	:	Peso inicial
Po	:	Peso final
V	:	Volumen de la muestra
L	:	Litro
Kg	:	kilogramos
g	:	Gramo
mL	:	Mililitro
mg/mL	:	Unidades de miligramos por litro
m ²	:	Metros cuadrados
m ³	:	Metros cúbicos
°C	:	Grados centígrados
Σ	:	Símbolo de sumatoria
M	:	Es el número de parámetros contaminantes
NMP	:	Número más probable
Na	:	Sodio
K	:	Potasio
Ca	:	Calcio
Cd	:	Cadmio
Zn	:	Zinc
Mg	:	Magnesio
Cl ⁻	:	Cloruro
As	:	Arsénico
Co	:	Cobalto
Pb	:	Plomo

Cr	:	Cromo
Cu	:	Cobre
Fe	:	Hierro
Ni	:	Níquel
Mn	:	Manganeso
Hg	:	Mercurio
CN ⁻	:	Cianuro
CO ₂	:	Dióxido de carbono
H ₂ O	:	Moléculas de agua

INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países con mayor generación de residuos sólidos en América Latina (El Peruano, 2021), generando un promedio de 21 mil toneladas de residuos municipales al día, lo que representa un promedio de 0.75 kg por persona al día. De acuerdo, al MINAM (2021) solo el 30% es reciclado adecuadamente y el resto de residuos terminan en un relleno sanitario o vertedero, el cual puede llegar a contaminar el agua y el suelo. Los rellenos sanitarios son lugares de disposición final para los residuos sólidos municipales, sin embargo, la mayoría de estos rellenos en el país no cumplen con las normativas ambientales para el manejo de lixiviados, lo cual puede provocar una contaminación en las fuentes hídricas. Los lixiviados contienen una variedad de contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales pesados que pueden ser volátiles para el medio ambiente. Es por ello, la necesidad de determinar el impacto del lixiviado en el Relleno Sanitario de Andahuaylas (RSA) mediante la caracterización del lixiviado, para la toma de medidas y acciones.

En el presente trabajo de investigación se evaluó el Índice de Contaminación de los Lixiviados (ICL) que produce el RSA, además, cuanto mayor sea el ICL, más contaminado estará el relleno y mayor será el riesgo al medio ambiente. Por lo cual, ayudara a investigadores y legisladores a tomar decisiones sobre la gestión de los lixiviados del relleno sanitario.

El estudio está compuesto por el capítulo I, el cual contempla la situación problemática, la justificación, los objetivos y las variables de la investigación, asimismo, el propósito fue determinar el ICL del RSA. En el capítulo II, se presenta los antecedentes nacionales e internaciones sobre el ICL para poder comparar y discutir los resultados obtenidos, en el Capítulo III, se tomó el marco teórico sobre lixiviados, rellenos sanitarios y el ICL, en el Capítulo IV, se encuentra la metodología usada para la presente investigación que es de tipo descriptiva, transversal, con un enfoque cuantitativo, asimismo se detalla los materiales, equipos e instrumentos que se utilizaron, en el capítulo V, se tiene los resultados obtenidos para los compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados de la caracterización de los lixiviados, además de los resultados del ICLtotal, ICLor, ICLin y ICLmp. Por último, encontramos las conclusiones que obtuvieron de los resultados y las recomendaciones para futuras investigaciones similares.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El relleno sanitario es una de las opciones más usadas para la eliminación de residuos sólidos en varios países del mundo principalmente en los países en vías de desarrollo, ya que demanda menos costos. Están diseñados para la disposición de residuos sólidos, este tipo de método tiene como consecuencia las emisiones de gases y la producción de lixiviados con altas concentraciones que tienen efectos peligrosos en el ecosistema circundante. El lixiviado es un efluente tóxico con un color oscuro o amarillento y produce un mal olor, que se caracteriza especialmente por su alto contenido en componentes orgánicos, metales pesados, ácidos, sales disueltas y microorganismos. Muchos factores influyen en la composición del lixiviado, entre ellos están los tipos de residuos sólidos depositados en el relleno, la composición de los residuos, el contenido de humedad, el tamaño de las partículas, el grado de compactación, la hidrología, el clima y la antigüedad del relleno entre otras. Los lixiviados se generan principalmente a partir del contenido de humedad de los residuos depositados y la filtración de la lluvia en el relleno, además se le considera como subproducto que más amenaza al ambiente debido a las altas concentraciones de compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados.

En la provincia de Andahuaylas la producción de residuos sólidos es un problema importante en la gestión y el manejo de los residuos municipales, ya que su acumulación en el relleno sanitario conduce a la generación de lixiviados por la precipitación y penetración de agua en la masa del residuo en el proceso de biodegradación. El distrito de Andahuaylas en el año 2019, según la Municipalidad Provincial Andahuaylas - MPA (2022), tuvo una generación de 27.37 ton/día de residuos sólidos municipales que es destinado al relleno sanitario. La MPA en el Año 2023, ha reportado un total de 14 998.00 Ton de residuos que ingresó al RSA provenientes de los distritos de Andahuaylas, San Jerónimo, Talavera y Pacucha (SIGERSOL, 2023), asimismo indica que el 51% de la composición física de los residuos sólidos generados es de origen orgánico, el 18% son de residuos no aprovechables y el 22% son de origen inorgánico (SIGERSOL, 2023). Una de las formas de evaluar el daño o toxicidad de los lixiviados en el ambiente es mediante la composición de sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Es por ello que en la actualidad existen varias metodologías o técnicas para determinar y evaluar el grado de contaminación de un lixiviado en el medio ambiente, entre ellas tenemos a los análisis físicos, análisis biológicos y métodos numéricos. El Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) es una herramienta cuantitativa que permite obtener datos cuantificables sobre la contaminación por lixiviados de los rellenos. Este método numérico permite determinar el nivel de contaminación que tiene el lixiviado del RSA. Los lixiviados que se genera en el relleno pueden contaminar los sistemas acuáticos y litosféricos adyacentes a menos que se aplique medidas preventivas y correctoras. Para priorizar las acciones de remediación, Kumar y Alappat (2003) formularon un método para identificar el potencial de contaminación de lixiviados de diferentes vertederos y rellenos sanitarios mediante el uso de un índice conocido como Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL). El ICL puede ser utilizado como una herramienta para evaluar el potencial de contaminación de lixiviados de los Rellenos (Manimekalai y Vijayalakshmi, 2012). Por lo tanto, comprender y cuantificar el potencial de contaminación por lixiviados es esencial para elegir los procesos adecuados y efectivos para la gestión y tratamiento de lixiviados

Este estudio tiene como objetivo evaluar las características del lixiviado y determinar el Índice de Contaminación de Lixiviado de los compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados del RSA.

1.2 Problema de la Investigación

1.2.1 Problema General

- ❖ ¿Qué significado tiene el valor del índice de contaminación que generan los residuos en el relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?

1.2.2 Problemas Específicos

- ❖ ¿Cuál es el valor del Índice de Contaminación de Lixiviados de los compuestos orgánicos del Relleno Sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?
- ❖ ¿Cuál es el Índice de Contaminación de Lixiviados de los compuestos inorgánicos del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?

- ❖ ¿Cuánto es el valor del Índice de Contaminación de Lixiviados de los metales pesados del Relleno Sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el valor del índice de contaminación por lixiviados (ICL) del relleno sanitario de Andahuaylas

1.3.2 Objetivo Especifico

- ❖ Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los compuestos orgánicos (ICLor) del relleno sanitario de Andahuaylas.
- ❖ Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los compuestos inorgánicos (ICLin) del relleno sanitario de Andahuaylas.
- ❖ Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los metales pesados (ICLmp) del relleno sanitario de Andahuaylas

1.4 Justificación de la Investigación

Los lixiviados son uno de los principales problemas asociados a los vertederos y rellenos sanitarios, ya que, pueden migrar y contaminar el suelo y fuentes hídricas como las aguas subterráneas y superficiales. Además, la caracterización de los lixiviados de vertederos y rellenos sanitarios es un factor importante para establecer estrategias de gestión o propuesta de implementación de un sistema de tratamiento efectivo. Por tanto, la utilización de una herramienta como el ICL favorece la comparación entre distintos sitios de disposición, dado que esta herramienta está a base de opiniones de experto y de un análisis estadístico.

La presente investigación brindara el Índice de Contaminación de los Lixiviados que produce el RSA. El ICL se calcula asignando a cada contaminante un valor numérico basado en los niveles de toxicidad del contaminante, asimismo, cuanto mayor sea el ICL, más contaminado estará el relleno o vertedero y mayor será el riesgo al medio ambiente.

Por lo tanto, el ICL es una herramienta que puede utilizarse para ayudar a investigadores y legisladores a tomar decisiones informadas sobre la gestión de los lixiviados de los Rellenos sanitarios. Asimismo, los rellenos con un ICL alto deben ser monitoreados adecuadamente para evitar cualquier impacto en los recursos hídricos y litosféricos adyacentes.

Por otra parte, contribuirá a un beneficio social al proporcionar información sobre los efectos de la descarga de lixiviado del RSA. Esta información puede utilizarse para desarrollar medidas de contingencia para controlar las descargas de lixiviado y hacer frente a la problemática presente del Relleno. Las medidas de contingencia pueden incluir la construcción de una planta de tratamiento de los lixiviados para eliminar los contaminantes y el monitoreo de los lixiviados para asegurar que no causen daños al medio ambiente.

La presente investigación del Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL) puede contribuir a la sociedad de manera significativa para mejorar la vida y los recursos naturales, ya que ayuda a identificar y priorizar los rellenos, botaderos y otras fuentes de contaminación por lixiviados y desarrollar métodos de tratamiento para la eliminación del lixiviado, asimismo el ICL ayuda a identificar y monitorear los lugares con riesgo de exposición a lixiviados, además de mejorar la gestión de los residuos que ingresa al relleno. Es necesario establecer un ICL en el Perú, para identificar los elementos contaminantes y sus potenciales impactos para luego manejarlos y mitigarlos.

Por otro lado, el Cálculo de ICL en Perú es escaso, por lo cual, el presente trabajo permitirá ser parte de la base de datos de la caracterización de los lixiviados en referencias futuras.

1.5 Variables

Variable de estudio: Se tiene una variable de estudio

- ❖ Parámetro del Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL)

1.6 Operacionalización de Variables

Tabla 1
Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALAS DE MEDICIÓN	MEDIDAS DE MEDICIÓN	
Parámetro del Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL)	El Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) es una medida de la contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios, se utiliza para evaluar el riesgo potencial de contaminación que representan los lixiviados. Se calcula asignando a cada contaminante un valor numérico basado en los niveles de toxicidad del contaminante o parámetro y sumando después los valores para obtener un índice global. Cuanto mayor sea el ICL, más contaminado estará el relleno sanitario y mayor será el riesgo potencial para el medio ambiente. El ICL puede utilizarse para evaluar el riesgo medioambiental potencial de un relleno sanitario y ayudar a identificar áreas de preocupación e informar sobre el desarrollo de planes para la gestión de lixiviados. (Kumar y Alappat, 2005a)	El ICL es una variable cuantitativa que se utiliza para evaluar la calidad de los lixiviados, los cuales provienen de líquidos que se filtran a través de la basura.	ICL orgánico (ICL or)	DBO ₅	Razón	mg O ₂ /L	
		Se calcula a partir de la concentración de los contaminantes, mediante factores de ponderación.		DQO	Razón	mgO ₂ /L	
				Coliformes totales (CT)	Razón	NMP/100 m	
			ICL inorgánico (ICL in)	pH	Razón	-	
		Nitrógeno amoniacal (AN)		Razón	mg/L		
		Sólidos Disueltos Totales (TDS)		Razón	mg/L		
		Cloruro		Razón	mg/L		
		ICL metales pesados (ICL mp)	<p>Operacionalmente</p> $ICL = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i}$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> w_i, peso del parámetro. p_i, puntuación del subíndice para el parámetro. m, número de parámetros del lixiviado para los que se dispone de datos, pero en ese caso m < 18 y $\sum_{i=1}^m w_i < 1$. (Kumar y Alappat, 2005). <p>Formula general:</p> $ICL_{total} = 0.232 ICL_{or} + 0.257 ICL_{in} + 0.511 ICL_{mp}$	ICL metales pesados (ICL mp)	hierro	Razón	mg/L
					Cobre	Razón	mg/L
					Níquel	Razón	mg/L
Zinc	Razón				mg/L		
Plomo	Razón				mg/L		
Cromo total	Razón				mg/L		
Mercurio	Razón	mg/L					
Arsénico	Razón	mg/L					
Cianuro	Razón	mg/L					
Cadmio	Razón	mg/L					

CAPITULO II: ANTECEDENTES

Se revisaron artículos e investigaciones científicas relacionadas al Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL) en vertederos municipales y rellenos sanitarios nacionales e internacionales.

2.1 Antecedentes Internacionales

Sunday y Baldwin (2021), en su investigación sobre Evaluación del potencial de contaminación por lixiviados de los vertederos de Ibadan (Nigeria), determinó el potencial de contaminación de los lixiviados del relleno sanitario (LFL) en África, Sub-Saharan. Se llevó a cabo un estudio de los dos principales vertederos activos sin revestimiento (Ajakanga y Awotan) en Ibadan. Durante el muestreo se analizaron dieciocho parámetros, asimismo se calcularon los índices de contaminación por lixiviados (ICL) de cada vertedero. El ICL del vertedero de Awotan es de 17.55, mientras que el de Ajakanga es de 15.67. Dado que se ha superado el valor estándar del ICL de 7.378, se recomienda el cierre de los dos vertederos de estudios, de acuerdo con las mejores prácticas internacionales, y la creación de nuevos vertederos sanitarios en su lugar. Basándose en los valores sub-ICL, se concluyó, que el tratamiento biológico sería la opción de tratamiento más viable y eficiente para el Lixiviado del relleno sanitario (LFL) ubicado en Ibadan.

Hoai et al. (2021), en su investigación sobre la caracterización y variación estacional de los lixiviados mediante el Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL) en el relleno sanitario de residuos sólidos de Nam Son en Hanoi, Vietnam, determinó la calidad de los lixiviados en 2017-2019 y caracterizó los riesgos potenciales de los lixiviados utilizando un índice de contaminación de lixiviados (ICL). Los resultados de este estudio mostraron que la variación estacional y temporal del ICL general durante el período de monitoreo fue pequeña y en el rango de 20-25 (valores 2.5 veces superiores a los límites máximos permisibles de Vietnam National Technical Regulation on Industrial Wastewater). Los subíndices del ICL atribuidos a los contaminantes orgánicos e inorgánicos fueron los principales componentes del ICL. En particular, los valores medios anuales del ICL de los contaminantes inorgánicos fueron 7.7 veces superiores a los límites máximos permitidos, lo que sugiere que el tratamiento de los contaminantes inorgánicos, como el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+ \text{N}$) y el nitrógeno total (NT), es muy necesario en el

Relleno sanitario de Nam Son para evitar la contaminación ambiental en los alrededores del Relleno.

Ibezute y Erhunmwunse (2018), en su publicación científica sobre la Evaluación de las características de los lixiviados y del Índice de Contaminación del relleno de Ikhueniro en la ciudad de Benin, estado de Edo, Nigeria, evaluó la caracterización de calidad de los lixiviados y el índice de contaminación del relleno sanitario de Ikhueniro (estado de Edo). La muestra de lixiviado se recogió de distintas partes del pozo de lixiviados y se mezclaron a fondo para obtener una muestra homogénea representativa de cada punto de muestreo. El resultado del análisis mostró que los valores de conductividad eléctrica, TDS, TSS, sulfato, nitrato, turbidez, Cl-, Ni, Cu, Cr, Zn, Fe, Pb, Cd y Mg, estaban por encima de los límites establecidos por ministerio Federal del Medio ambiente (FMENV); mientras que el oxígeno disuelto estaba por debajo del límite detectable en el lixiviado del relleno de Ikhueniro. Los valores de ICL para las diferentes localizaciones de las muestras L1 y L2 se calcularon en 6.71 y 37.93 respectivamente, con un valor medio de 22.31. Estos valores de ICL también se compararon con el estándar de ICL (7.38) para lixiviados tratados. La comparación demostró que el vertedero de Ikhueniro en la ciudad de Benin tiene un alto potencial de contaminación, así mismo de debe tomar medidas correctoras.

Siddiqi et al. (2022), en su artículo sobre la caracterización y potencial de contaminación de los lixiviados de vertederos urbanos durante periodos secos y húmedos en regiones áridas tuvo como objetivo la caracterización biológica y físico-química del lixiviados de dos vertederos de Omán, el lixiviado del vertedero de Multaqa (MLL) y el lixiviado del vertedero de Barka (BLL), asimismo se tomó muestras antes y después de la precipitación. Las muestras se caracterizaron para 92 parámetros. Además, se estimó el Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL) para evaluar los niveles de contaminación previstos y los posibles para el ambiental. El estudio detectó un valor elevado de los parámetros de lixiviados en temporada sin precipitación. Se observan correlaciones de Pearson (+ve) superiores al 90% en todos los casos, lo que supone una fuerte asociación (r.0.75) para los parámetros medidos de los dos vertederos de residuos sólidos estudiados. Las precipitaciones redujeron significativamente las concentraciones de contaminantes orgánicos y sólidos en el lixiviado debido a la dilución. El estudio reveló unas reducciones del 18%-29% y del 14%-28% en el subíndice ICL para contaminantes orgánicos e inorgánicos, respectivamente, tras las precipitaciones.

Hussein et al. (2019), en su estudio sobre la caracterización de lixiviados e índices de contaminación de vertederos activos y cerrados sin revestimiento en Malasia, tuvo como objetivo caracterizar y comparar los lixiviados brutos procedentes de vertederos activos (Ulu Maasop y Kampung Keru) y un vertedero cerrado (Pajam) y posteriormente cuantificar la contaminación potencial por lixiviados de cada vertedero mediante el Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL). Se concluyó que el ICL calculado para los vertederos de Ulu Maasop, Kampung Keru y Pajam fue de 15.28, 13.89, 12.91 y 11.51, respectivamente, superando el valor del ICL estándar de 5.696, de acuerdo a la normativa. Basándose en las caracterizaciones de los lixiviados y en los valores del ICL, estos vertederos suponen una amenaza significativa para el medio ambiente a través de la disipación de lixiviados a las aguas superficiales y subterráneas, especialmente por la presencia de DBO, DQO, As y Cr. Por lo tanto, las medidas correctoras, son cruciales para los vertederos activos como para los cerrados, con fin de garantizar que los lixiviados generados se estabilizan.

Abunama y Nilam (2021), en su investigación sobre la comparación de la generación de lixiviados de vertedero y de los potenciales de contaminación en climas húmedos y semiáridos, tuvo como objetivo evaluar la generación de lixiviados y el potencial de contaminación de los vertederos en distintas condiciones climáticas, por ejemplo, en regiones húmedas y semiáridas. Los volúmenes de lixiviados se han estimado mediante el modelo de evaluación hidrológica del rendimiento de vertederos (HELP), y los principales parámetros de calidad del agua se analizaron in situ y los metales pesados en laboratorio. Los resultados del volumen de generación para el lixiviados en vertederos húmedos y semiáridos fueron de 0,148 y 0,079 m³ respectivamente. Sin embargo, los contaminantes de los lixiviados de los vertederos húmedos mostraron concentraciones inferiores a las de los vertederos semiáridos. Esto se reflejó en los resultados del ICL de 25,1 y 29,5 para ambos vertederos, respectivamente. Estos resultados concluyeron que los lixiviados de zonas semiáridas presentaban menores índices de generación y un mayor potencial de contaminación que los lixiviados de zonas húmedas, lo que puede deberse al efecto de dilución de los altos niveles de precipitaciones en climas húmedos.

Ofomola et al. (2017), en su investigación sobre la evaluación de la contaminación de los vertederos de Ughelli (Nigeria) mediante el método del Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) permitiendo cuantificar el potencial de contaminación en Ughelli,

Nigeria. Se recolectaron muestras de agua de pozos alrededor de cuatro vertederos para análisis de laboratorio y estimación de su ICL. Se encontró que los valores eran 11.95, 11.32, 8.47 y 10.08, para el vertedero de Omotor (OD), el vertedero de Iwhreko (ID), el vertedero de Divine (DD) y el vertedero del mercado de Ughelli (UMD), respectivamente. Estos valores son superiores al estándar de (7.378). Por lo tanto, la caracterización de lixiviados y los valores de ICL revelaron que el agua subterránea en el área se ha visto afectada debido a la filtración de lixiviados. Se recomienda que los procedimientos de remediación se implementen lo antes posible para mejorar la calidad del agua en el área.

2.2 Antecedentes Nacionales

Rodríguez (2014), en su tesis sobre la Relación del Índice de Contaminación de Lixiviados con el impacto fitotóxico de un lixiviado plantea por objetivo determinar el Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL) con dos muestras de lixiviado, una muestra es del relleno sanitario y la otra de una disposición final incontrolada, asimismo, se determinó la fitotoxicidad de ambas muestras de lixiviado sobre el frijol y su relación con el ICL. Los resultados obtenidos de ICL de los lixiviados de Guanajuato y Toluca oscilaron entre 38.83 y 19.30, respectivos. Además, se realizó bioensayos de fitotoxicidad de los lixiviados en el frijol. El primer bioensayo se evaluó la fitotoxicidad de los dos lixiviados en el frijol, para el segundo bioensayo se evaluó la fitotoxicidad de los dos lixiviados en el frijol en las fases de: plántula, floración y maduras, por otra parte, las variables de respuestas calculadas fueron: %germinación, fenotipia, biomasa y el rendimiento del grano. Concluyeron que los lixiviados de Guanajato fue más fitotóxico con mayor ICL por sus propiedades físicas y químicas, en sus primeras etapas de crecimiento desde la dilución al 25 %, por otro lado, los lixiviados de Toluca desde el 50 %. El segundo ensayo en la etapa de plántula y floración de ambos lixiviados es benéfico para la planta de frijol. EL ICL de ambos lixiviados analizados determino su potencial de daño ambiental, además el ensayo relaciono el valor numérico y el frijol con su fitotoxicidad.

Ñahui y Acosta (2021), en su investigación sobre el efecto de la descarga de lixiviado del ex - botadero El Edén en el cuerpo de agua adyacente, sector Yauris, distrito de El Tambo, Provincia de Huancayo, evaluó la contaminación del lixiviado en cuerpos de agua. El estudio fue no experimental, longitudinal y descriptivo ya que se tomaron 5

puntos de muestreo por conveniencia de la investigación, en periodo seco, determinaron los parámetros como pH, DQO, DBO₅, Fe, Cu, Pb, Zn, As y TSS de los lixiviados provenientes del botadero. Se concluyó que del DQO, DBO₅ y Fe superan los LMP para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad.

Montalvo y Quispe (2018), en su investigación sobre la contaminación del agua superficial por lixiviados de un relleno sanitario de Cajamarca determinaron el grado o potencial de contaminación del lixiviado que genera en las aguas superficiales, tuvieron que analizar los parámetros fisicoquímicos. Se concluyó que el grado de contaminación del lixiviado es alto, ya que, al infiltrarse en el suelo o el contacto con el agua se modifica algunos parámetros químicos como: Fe, Mn, DBO, DQO, Cl⁻, NO₃, Pb y la acumulación de metales pesados como el: Cr, Ni, Zn, As, Ba, y Pb, superan los límites establecidos por la legislación de NOM y la US EPA.

Saavedra (2019), en su trabajo de investigación sobre la Contaminación del suelo por lixiviados generados en el botadero de Cuñumbuque ubicado en la región de San Martín determinó la afectación del lixiviados en el suelo provenientes del botadero Cuñumbuque. El estudio fue de diseño no experimental y transversal. En el estudio, se tomó dos muestras del suelo (1kg) del botadero por cada área determinada. Se concluyó, que existe una mayor concentración de arcilla en las dos muestras de lixiviados. Con un 1.2 % de metales pesados obtuvo el (M²) con una mayor concentración de Cd y el Pb con un 18.23 y a la muestra 1 obtuvo un 0.78 de Cd y 14.23 de Pb y teniendo en la M1 el porcentaje es de 4.35% y en la M² un porcentaje mayor con 5.12 %. Y los valores de afectación de contaminación por lixiviados no es tan alta en el botadero Cuñumbuque.

Zavaleta (2021), en su investigación sobre el Impacto del lixiviado del relleno sanitario de Cajamarca en la calidad del agua del río Cajamarquino del distrito de Jesús determinó si los lixiviados producidos en el relleno sanitario tienen un impacto negativo en la calidad del río del distrito Cajamarquino. El monitoreo de la muestra se realizó en tres puntos del río, para su posterior análisis del parámetro fisicoquímico y microbiológico en el laboratorio. Asimismo, concluye que el impacto de los lixiviados en el río es significativo, es decir que, si impacta en la calidad de agua, sin embargo, no superan los Estándares de Calidad Ambiental ECAs, para el agua, de categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales, también se evaluó que, en épocas de estiaje, indicando que el agua

del Rio llega contaminado al lugar o sitio de estudio, con un aumento de en parámetro de Manganeseo.

Valverde (2021), en su tesis sobre la Influencia del hipoclorito de calcio sobre los parámetros fisicoquímicos de lixiviado de un relleno sanitario en la Región de la Libertad determinó la intervención o aplicación del hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ en los parámetros físicos y químicos del lixiviado de un relleno sanitario. Esta investigación fue experimental, se caracterizó los parámetros físicos y químicos de los lixiviados antes del tratamiento con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ en la muestra RS-01, y en la muestra RS-03 después del tratamiento, concluye que los dos puntos de muestreo exceden o superan los límites máximos permisibles (LMP) en los parámetros: DBO_5 , DQO, TSS, aceites y grasas. Además, se realizó la caracterización de los parámetros físicos y químicos del lixiviado antes del tratamiento con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ en la muestra RS-02, obteniendo seis (6) parámetros que están dentro de los LMP: Aceites y Grasas, Ci, TSS, DQO, DBO_5 , Cr.

CAPITULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Lixiviados

3.1.1 *Lixiviado*

El lixiviado es un líquido que se forma de la percolación del agua a través de los residuos sólidos de un relleno y/o vertedero (Méndez et al., 2009). Están compuestos generalmente por componentes orgánicos e inorgánicos, además de la presencia de metales pesados. Suele considerarse un líquido peligroso y debe tratarse antes de ser liberado al medio ambiente.

En un relleno sanitario los lixiviados se generan por la degradación de residuos sólidos y la presencia de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos (Franco et al., 2017). Además, las condiciones ambientales, las características del residuo y la precipitación contribuyen para un mayor o menor volumen de lixiviados. La composición de los lixiviados es compleja, ya que contiene características físicas, químicas y biológicas perjudiciales principalmente para los recursos hídricos (Aguas superficiales y subterráneas), la flora y fauna (Lippi et al., 2018).

Según Ferraz et al. (2016), los lixiviados son aguas residuales que se caracterizan por tener un color oscuro y está compuesto por metales pesados, materia orgánica, y nitrógeno amoniacal. Los lixiviados pueden clasificarse como lixiviados jóvenes, medios y viejos (Abbas et al., 2009) en función a su edad. Además, el lixiviado joven está conformado en un 80% de materia orgánica que es fácilmente biodegradable y que puede ser tratado mediante procesos biológicos. Por otro lado, los lixiviados viejos presentan concentraciones muy altas de nitrógeno amoniacal total y materia orgánica limitando la viabilidad de un tratamiento biológico.

3.1.2 *Composición química de los lixiviados*

Los lixiviados provienen de la degradación de los residuos sólidos formando un líquido negro y con un olor fétido, el término lixiviado se denomina a una sustancia que contenga componentes nocivos para la salud y el ambiente. Según Betancourt y Martínez, (2012), el lixiviado contiene 200 compuestos diferentes de los cuales algunos son dañinos y cancerígenos, de modo que el tipo de residuo, la precipitación y la evapotranspiración

afectan la composición y comportamiento del lixiviado. Las características de los lixiviados de un relleno o vertedero, suelen estar representadas por parámetros básicos como: Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) relación de DBO_5/DQO , pH, sólidos en suspensión (SS), Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno Total Kjeldahl y metales pesados (Abbas et al., 2009).

Según Rodríguez (2014), los lixiviados tienen altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica, además la composición del lixiviado depende de la edad del relleno sanitario, la ubicación, la precipitación pluvial, la temperatura, el tipo de residuo urbano y el diseño del relleno sanitario, etc. Los componentes típicos del lixiviado se observan en la Tabla 2.

Tabla 2

Componentes típicos de lixiviados de un vertedero de Residuos Sólidos Urbanos

Composición		Rangos (mg/L)	
Tipo	Parámetro	Mínimo	Máximo
Físico	pH	3.70	8.9
	Turbidez	30JTU	500JTU
	Conductividad	480mho/cm	72500 mho/cm
Inorgánico	Sólidos suspendidos Totales	02	170 900
	Sólidos disueltos Totales	7 25	55 000
	Cloruro	02	11 375
	Sulfato	00	1 850
	Dureza	300	22 5000
	Alcalinidad	00	20 350
	Nitrógeno total Kjeldahl	02	3 320
	Sodio	02	6 010
	Potasio	00	3 200
	Calcio	03	3 000
	Magnesio	04	1 500
	Plomo	00	17.2
	Cobre	00	9.0
	Arsénico	00	70.2
	Mercurio	00	3.0
	Cianuro	00	6.0
	Orgánico	DQO	50
TOC		00	45 000
Acetona		1 70	11 000
Benceno		02	410
Tolueno		02	1 600
Cloroformo		02	1 300
Delta		00	5
1.2 dicloroetano		00	11 000
Metiltilcetona		1 10	28 000
Naftaleno		04	19
Fenol		10	28 800
Cloruro de vinilo		00	100
DBO		00	195 000
Biológica	Coliformes totales	00	100
	Coliformes fecales	0	10

Fuente. Las unidades están en mg/L, excepto la conductividad eléctrica y el pH. Datos Tomados de Bagchi (19974), Rakesh kumar y Gayathri (2012).

En la Tabla 2, se muestran 34 parámetros esenciales en la composición química de un lixiviado. Por ejemplo, los valores de pH oscilan entre 3.7 y 8.9, la concentración de turbidez oscila entre 30 JTU y 500 JTU. También las concentraciones de DQO oscilaron entre 50 y 99 000 mg/L, mientras que el total de sólidos en suspensión oscila entre 2 y 170 900 mg/L. Por otro lado, los valores de concentraciones de sodio (Na⁺), potasio (K⁺), calcio (Ca), magnesio (Mg), cloruro, arsénico (As), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), manganeso (Mn) y zinc (Zn) solubles en los lixiviados se detallan en la Tabla 2. Los valores mencionados para los compuestos inorgánicos se dan durante la descomposición de los residuos sólidos municipales ya que las sales solubles (cloruros, nitratos) son propensos a ser lixiviados (Al-Wabel et al., 2011).

Tabla 3

Comparación de la composición química de lixiviados con otros países

Parámetro (mg/L) *	USA ^a	Italia ^a	Alemania ^a	México ^b	Taiwán ^a
pH	5.1 – 6.9	6 – 8.5	5.7 – 8.1	7.9 – 8.5	6.82 – 8.37
CE	-	-	-	17.1 – 18.5	5 – 29.6
DQO	1340 – 18 100	7 750 – 38 520	1 630- 63 700	4 268 – 7 610	840 – 4 210
DBO	-	-	-	236 – 2 580	-
Cl ⁻	-	-	-	2 489 – 3 654	-
NTK	-	-	-	1 004 – 2 515	-
K ⁺	-	-	-	1 636 – 23 100	312 – 2 243
Na ⁺	-	-	-	1 632 – 28 180	431 – 3 142
Ca	254.1 – 2 300	0 - 175	70 – 290	-	15.9 - 61
Mg	233 – 410	827 – 1 469	100 - 270	-	15.7 – 157
Cd	-	-	-	0.001 – 0.158	<0.01
Cr	-	-	-	4.74 – 14.35	0.004 – 1.26
Cu	0 – 0.1	-	-	0.056 – 0.388	0.02 – 0.9
Fe	4.2 – 1 185	47 - 330	8 – 1 979	7.92 – 164.4	0.39 – 28
Mn	-	-	-	0.12 – 1.49	0.02 – 0.75
Ni	-	-	-	0.319 – 0.387	0.01 – 0.28
Pb	0 – 0.46	-	-	0.016 – 0.9	0.02 – 0.18
Zn	18.8 - 67	5 - 10	-	0.43 – 5.8	0.03 – 0.66

Fuente. * Excepto pH, conductividad eléctrica CE (ds/m); ^a Al-Wabel et al. (2011); ^b Méndez et al. (2009)

Se recopilieron diferentes estudios de la composición de los lixiviados en diversos países, las concentraciones que se muestran en la Tabla 3, fueron reportadas dentro de los rangos permisibles de las normativas vigentes de su país respectivamente. Sin embargo, la ubicación geográfica, edad y el tipo de residuos depositados en un relleno sanitario varía y modifica las concentraciones (Pozo et al., 2020).

Tabla 4
La concentración de lixiviados y la edad del relleno

Parámetros (mg/L)	Edad del Relleno (años)			
	0 a 5 años	5 a 10 años	10 a 20 años	> 20 años
DBO	10 000 – 25 000	1 000 – 4 000	50 – 1 000	< 50
DQO	15 000 – 40 000	10 000 – 20 000	1 000 – 5 000	< 1 000
NTK	1 000 – 3 000	400 – 600	75 – 300	< 50
NH ₃ -N	500 – 1 500	300 - 500	50 – 200	< 30
TDS	10 000 – 25 000	5 000 – 10 000	2 000 – 5 000	< 1 000
pH	3 – 6	6 – 7	7 – 7.5	7.5
Ca	2 000 – 4 000	500 – 2 000	300 – 500	< 300
Na y K	2 000 – 4 000	500 – 1 500	100 – 500	< 100
Mg y Fe	500 – 1 500	500 – 1 000	100 – 500	< 100
Zn y Pb	100 – 200	50 – 100	10 – 50	< 10
Cloruro	1 000 – 3 000	500 – 2 000	100 - 500	< 100
Sulfato	500 – 2 000	200 – 1 000	50 - 200	< 50
Fosforo	100 - 300	10 - 100		< 10

Fuente. Datos tomados de El-fadel et al. (2002) y Rodríguez (2014)

Por otro lado, en la Tabla 4, se observa que los lixiviados también dependen de la edad que tenga el relleno. Además, las concentraciones disminuyen continuamente con el tiempo (El-Fadel et al., 2002).

Abbas et al. (2009), menciona que la composición de los lixiviados en un relleno varía mucho en función a su edad, y se definen 3 tipos de lixiviados de acuerdo a su edad: Lixiviado joven, Lixiviado Mediano, Lixiviado viejo, como se muestra en la Tabla 5. Por lo tanto, a medida que aumenta la edad del relleno, disminuye la materia orgánica y aumenta la concentración de nitrógeno amoniacal.

Tabla 5
Clasificación de los Lixiviados vs la edad del Relleno

	Joven	Mediano	Viejo
Edad (Años)	< 5	5-10	>10
pH	< 6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg/L)	> 20 000	20 000-5000	< 5000
DBO ₅ /DQO	>0.3	0.1-0.3	< 0.1
AGV (%COT)	70-90	20-30	5
Nitrógeno Kjeldahl	100-2000	-	-
NH ₃ -N	< 400	400	>400
Metales pesados (mg/L)	>2	<2	<2
Compuesto orgánico	80% AGV	5-30% AGV+ AH+AF	AH+AF

Fuente. AGV=Ácidos grasos volátiles; AH=Ácido húmico; AF=Ácidos fúlvicos. Dato obtenido de (Abbas et al., 2009; Amokrane et al., 1997; Baig et al., 1999; Poznyak et al., 2008)

Los compuestos de ácidos grasos volátiles (AGV) están conformados por ácidos acéticos, ácidos propiónicos, ácidos isobutíricos, etc. (Mandal et al., 2017) y los ácidos húmicos (AH) se pueden encontrar en fuentes de agua o agua residual.

El-Fadel et al. (2002), menciona que la DQO en un lixiviado es una medida de toda la materia oxidable, mientras que la DBO₅ es una medida de la masa orgánica biodegradable. Por tanto, la relación DBO₅/DQO puede considerarse una medida de la biodegradabilidad de la materia orgánica y la madurez del lixiviado y del relleno, que normalmente disminuye con el tiempo. La Tabla 6, presenta la evaluación de la estabilidad del relleno en función de la relación DBO₅/DQO.

Tabla 6
Estabilidad del vertedero en función de la relación DBO/DQO

Relación DBO/DQO	Significado
>0.5	Relleno joven
0.1-0.5	Relleno moderadamente estable
<0.1	Relleno antiguo estable

Fuente..(El-Fadel et al., 2002)

Otros parámetros importantes en el lixiviado es el pH y el nitrógeno amoniacal, este último, parece ser el constituyente que más perdura en el lixiviado del relleno y puede utilizarse para determinar el potencial de contaminación en el relleno.

3.1.3 Lixiviados acidogénicos y metanogénicos

Kylefors (2002), indica que las condiciones de degradación acidogénica y metanogénica son las más importantes para la calidad de los lixiviados. Por otra parte, la fase aeróbica es menos importante para los flujos de masa por la corta duración del proceso.

La formación de AGV es la principal razón del bajo pH, a menudo en torno a 5-6, y del alto contenido orgánico en los lixiviados acidogénicos. El contenido de materia orgánica en el lixiviado se expresa a menudo como una combinación de DBO, DQO y TOC. En la Tabla 07 se presenta algunos resultados típicos de lixiviados de rellenos acidogénicos y metanogénicos.

Tabla 7
Resultados típicos de lixiviados de rellenos acidogénicos y metanogénicos

Parámetro	Fase ácida		Fase metanogénica		Media
	Media	Rango	Media	Rango	
pH	6.1	4.5-7.5	8	7.5-9	-
DBO	13000	4000-40000	180	20-550	-
DQO	22000	6000-60000	3000	500-4500	-
BOD ₅ /DQO	0.58		0.06		-
Sulfato	500	70-1750	80	10-420	-
Ca	1200	10-2500	60	20-600	-
Mg	470	50-1150	180	40-350	-
Mn	25	0.3-65	0.7	0.03-45	-
NH ₃	-	-	-	-	741
Cl ⁻	-	-	-	-	2120
K	-	-	-	-	1085
Na	-	-	-	-	1340
Fosforo	-	-	-	-	6
Cd	-	-	-	-	0.005
Pb	-	-	-	-	0.09
Ni	-	-	-	-	0.17
Zn	5	0.1-120	0.6	0.03-4	

Nota.

Todos los valores están en mg/L a excepción del pH y BOD₅/DQO. (Kylefors, 2002)

Asimismo, se muestra que los AGV son los constituyentes dominantes de la materia orgánica disuelta en los lixiviados acidogénicos (alrededor del 80 % del COT) (Kjeldsen et al., 2002).

La fase metanogénica inicial es una etapa importante en la descomposición de los residuos en un relleno. Es probable que el inicio de esta fase esté asociado a la neutralización suficiente del pH de los residuos para que se produzca al menos un crecimiento limitado de bacterias metanogénicas. Durante esta fase, los ácidos acumulados en la fase ácida son convertidos en metano y dióxido de carbono por las bacterias metanogénicas y la tasa de producción de metano. Las concentraciones de DQO y DBO comienzan a disminuir y el pH aumenta a medida que se consumen los ácidos. Las relaciones DBO/DQO también disminuirán a medida que se consuman los ácidos carboxílicos (Christensen et al., 2001).

3.1.4 Tratamiento de lixiviados

El tratamiento para un lixiviado en específico contempla varios aspectos: la generación de flujo, la composición físico-química del lixiviado, la superficie disponible para la planta del sistema, capacidad de inversión y funcionamiento del relleno y el cumplimiento de las normas y leyes medioambiental local establecidas (Lippi et al., 2018). Además, los lixiviados pueden ser tratados por métodos fisicoquímicos y biológicos para la remoción de contaminantes, por varios autores (Montenegro et al., 2020).

3.1.4.1 Tratamientos biológicos

Se utilizan para la biodegradación de compuestos orgánicos, especialmente en lixiviados con alta concentración de DBO. Esta técnica favorece, a través de la actividad de descomposición de los microorganismos, la transformación de los compuestos presentes en el lixiviado en: gas carbónico y biomasa en forma de lodo, cuando se someten a condiciones aerobias; y biogás, a condiciones anaerobias (Lippi et al., 2018). Este tipo de tratamiento es eficiente para nuevos lixiviados inmaduros o jóvenes, donde la relación de Demanda Bioquímica y Química de Oxígeno (DBO / DQO) son superiores a 0.4 (Peng, 2013). Sin embargo, este tipo de tratamientos tienen sensibilidad operativa y tienden a ser afectada su eficiencia por la variabilidad fisicoquímica y biológica del lixiviado. Asimismo, la mayor presencia de compuestos refractarios (principalmente ácidos húmicos y fúlvicos) tiende a limitar la efectividad del proceso (Abbas et al., 2009).

3.1.4.2 Tratamiento fisicoquímico

Los procesos fisicoquímicos tienen la necesidad de mejorar la eficacia de los sistemas de tratamiento biológico. Se utilizan generalmente aguas abajo de un pretratamiento biológico. Este sistema actúa modificando las estructuras químicas de contaminantes específicos o elementos físicos con capacidad de retener o eliminar contaminantes (Montenegro et al., 2020).

Abbas et al., indica que este método se utiliza junto a los métodos biológicos principalmente para mejorar la eficiencia del tratamiento o hacerlos posibles cuando el

proceso de oxidación biológica se ve dificultado por la presencia de materiales biorrefractarios (no biodegradable) (2009).

3.1.4.3 Co -tratamiento con aguas residuales domésticas

Un medio habitual de eliminación de lixiviados es su conducción a la red de alcantarillado para su vertido para su tratamiento combinado con aguas residuales domésticas en depuradora convencional. Se prefería por su fácil mantenimiento y bajos costes de funcionamiento. Sin embargo, esta opción ha sido cada vez más cuestionada debido a la presencia en el lixiviado de compuestos orgánicos inhibidores con baja biodegradabilidad y metales pesados que pueden reducir la eficacia del tratamiento y aumentar las concentraciones del efluente (Abbas et al., 2009).

El tratamiento combinado de lixiviado con efluente sanitario en las estaciones de tratamiento de alcantarillado, es una práctica común en Brasil y en todo el mundo. Un punto importante de discusión dentro de la comunidad científica es la viabilidad del co-tratamiento y cuál sería la proporción ideal de lixiviado / alcantarillado para no perjudicar la estación y comprometer la calidad final del efluente (Lippi et al., 2018).

3.1.4.4 Tratamientos de membrana

Los procesos de membrana son una nueva tecnología que se utiliza para tratar el lixiviado. Son más eficientes que los métodos biológicos tradicionales y pueden lograr niveles de eliminación más altos. Este proceso utiliza membranas para separar los contaminantes del lixiviado. La membrana es una barrera fina que permite que el agua pase, reteniendo los contaminantes. Los contaminantes retenidos se denominan concentrado y deben ser tratados o eliminados de forma segura (Lippi et al., 2018).

En resumen, los procesos de membrana son tecnologías prometedoras para el tratamiento de lixiviado, ya que son más eficientes, adaptables e indispensables que los métodos biológicos tradicionales. Sin embargo, también son más caros y requieren más mantenimiento. Es importante evaluar cuidadosamente los costos y beneficios de los procesos de membrana antes de decidir utilizarlos para tratar el lixiviado.

3.1.4.5 La recirculación

Este es un método común para tratar el lixiviado en los rellenos, que consiste en reciclar el lixiviado, asimismo, es muy usada en varios países por el bajo costo (Abbas et al., 2009). Esta es una de las opciones más baratas y fáciles de hacer, muchos estudios han demostrado que la recirculación del lixiviado puede tener una serie de ventajas y desventajas, incluyendo, por ejemplo:

- Mejorar la calidad del lixiviado al reducir su contenido de contaminantes.
- Acortar el tiempo necesario para que el lixiviado se decante, lo que libera espacio en el relleno.
- Aumentar la producción de metano, un gas que puede utilizarse como combustible.

Sin embargo, Abbas et al. (2009) menciona que es importante tener en cuenta que la recirculación del lixiviado también puede tener algunos inconvenientes, como:

- Puede aumentar las concentraciones de ácidos orgánicos en el lixiviado, lo que puede ser dañino para las bacterias que descomponen los residuos.
- Puede conducir a la saturación del relleno, lo que puede provocar problemas de olor y contaminación del suelo y el agua.

En general, la recirculación del lixiviado es una herramienta eficaz para tratar el lixiviado en los rellenos. Sin embargo, es importante evaluar cuidadosamente los riesgos y beneficios antes de implementar este método.

3.2 Relleno Sanitario

3.2.1 Residuos sólidos

Por residuo sólido se entiende cualquier tipo de basura, desperdicio, desecho o material desechado. Se clasifica según el lugar donde se generen como residuos sólidos urbanos, residuos sanitarios y residuos electrónicos. Asimismo, una eliminación inadecuada de los residuos puede generar consecuencias negativas para la salud mediante la contaminación del agua, el suelo y el aire (Organización Mundial de la salud, 2021).

Por otra parte, Zurbrugg (2003) indica que el residuo sólido es material doméstico, industrial y agrícola que se haya agotado. Además, se denominan "residuos

sólidos urbanos” aquellos residuos que se acumulan en territorios gestionados por los municipios responsables de su retirada y almacenamiento.

3.2.2 *Gestión de los residuos sólidos*

En la gestión de residuo sólidos es importante la reducción, la reutilización y el reciclaje de los residuos biodegradables y no biodegradables, ya que reduce la cantidad de residuos que se depositan en el relleno sanitario (Ireaja et al., 2018). Este enfoque se le conoce como las 3R:

- Reducción de los residuos sólidos: Reducir la cantidad que se compra es la más importante de todas las opciones para gestionar los residuos. Reducir el uso de plásticos en los envases porque tardan cientos o miles, de años en descomponerse, asimismo pueden sustituirse (EPA, 2019).
- Reutilización de residuos sólidos: Significa que un producto puede volver a utilizarse con poco o ningún procesamiento. El proceso de reutilización parte del supuesto de que los materiales usados pueden ser un recurso en lugar de un desecho (EPA, 2019).
- Reciclaje de residuos sólidos: El reciclaje es la recuperación de materiales para fabricar nuevos productos reduciendo la necesidad de recolectar, extraer y procesar materiales vírgenes. El reciclaje reduce la contaminación en la población y evita que los residuos acaben en rellenos o vertederos (EPA, 2019).

3.2.3 *Relleno sanitario*

El relleno sanitario es un método diseñado para depositar desechos en contenedores, los rellenos desempeñan un papel importante en las estrategias de gestión de residuos (Danthurebandara et al., 2012).

Este sistema de ingeniería consiste en colocar los residuos sobre un revestimiento, extendiendo la masa de residuos en capas y compactarla con maquinaria pesada. Principalmente son diseñados para evitar los malos olores, el arrastre de basuras y los vectores (portadores capaces de transmitir agentes patógenos de un organismo a otro). Los revestimientos de los rellenos sanitarios pueden estar compuestos de arcilla compactada o materiales sintéticos que evitan la migración de gases y crear una barrera impermeable

para los lixiviados. Por último, se coloca una cubierta final sobre el relleno para evitar la erosión, la infiltración de precipitaciones y el control de olores y gases (Autoridad de Protección del Medio Ambiente - EPA, 2011).

3.2.4 Impacto de los rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son una amenaza potencial para la calidad del medio ambiente, debido a sus emisiones gaseosas y de lixiviados, así como la basura y el polvo arrastrados por el viento. Asimismo, el transporte y la recogida de residuos también tienen importantes efectos sobre el medio ambiente. Es por ello, que se consideran tres categorías principales de impactos ambientales: la construcción del relleno, los gases de vertedero y los Lixiviados (Danthurebandara et al., 2012).

La construcción de un relleno sanitario puede tener un impacto en la selección del lugar, ya que los proyectos de infraestructuras pueden dañar la ecología del lugar en el que se desarrollan, provocando cambios en el paisaje, la pérdida de hábitats y el desplazamiento de la fauna. Asimismo, los rellenos sanitarios generan emisiones de gases, los cuales pueden contribuir al efecto invernadero y daño al ecosistema, además, tiene impactos significativos como la emisión de olores debido a algunos gases (Iravanian y Ravari, 2020).

Por otro lado, la producción de lixiviados tiene un impacto significativo en el medio ambiente, ya que estos, pueden migrar a través del suelo a las aguas subterráneas y superficiales, debido a la falta de un sistema de revestimiento adecuado, lo cual, resulta un impacto grave en los acuífero o recursos hídricos, además el suelo puede retener componentes del lixiviado causando efectos adversos en el ecosistema (Iravanian y Ravari, 2020). Los lixiviados de un relleno sanitario son una amenaza potencial para la degradación del medio ambiente. Un relleno sanitario incontrolado se asocia a efectos nocivos para la salud como consecuencia de las emisiones de gases y la generación de lixiviados altamente concentrados que tienen efectos peligrosos en el ecosistema circundante, contaminando el terreno adyacente, el suelo, las aguas subterráneas y superficiales (EPA, 2019).

3.3 Índice de Contaminación por Lixiviados ICL

3.3.1 Definición y cálculo del Índice de Contaminación de Lixiviados

El Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) es una medida de la contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios o vertederos, se determina mediante la concentración del contaminante presente en la muestra de lixiviado. Asimismo, este método se usa para comparar el nivel de contaminación por lixiviados de varios rellenos en una zona geográfica determinada. (Kumar y Alappat, 2003)

3.3.2 Métodos para medir la contaminación de lixiviados

Existen métodos estadísticos para el análisis de los lixiviado, que incluye la determinación de la calidad y la clasificación de acuerdo al tipo de relleno. Los cuales no llevan procedimientos de análisis en el laboratorio, sino toman otras características para determinar el impacto del lixiviado en el medio ambiente. Índice de Contaminación por Lixiviado, que es una herramienta cuantificable del potencial de contaminación de un lixiviado, el cual pronostica el impacto que tienen los lixiviados de los rellenos y vertederos. Esta herramienta proporciona información de los rellenos sanitarios para tomar medidas preventivas (Kumar y Alappat, 2003).

Por otro lado, existe el índice de interacción ambiental, el cual aplica metodologías mediante un diagnostica del medio ambiente para los rellenos y vertederos de residuos sólidos urbanos en la España. (Calvo et al. 2004, como se citó en Rodriguez, 2014)

3.3.2.1 Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL)

El Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL), es una herramienta que permite cuantificar el potencial de contaminación de Lixiviados de diferentes Rellenos sanitarios y Vertederos basándose en una escala comparativa. El uso de esta herramienta provee información acerca de cual relleno sanitario requieren atención inmediata en términos de medidas de remediación para el mejoramiento de las instalaciones. (Kumar y Alappat, 2005). Asimismo, el uso de índices en la gestión del ecosistema está bien aceptado, ya que permite representar de forma sencilla información sobre variables del ecosistema.

El ICL global o total proporciona una visión general del potencial de contaminación por lixiviados de un vertedero a escala comparativa. Por otra parte, Kumar y Alappat (2003) agruparon en “sub” los contaminantes considerados en el ICL. De acuerdo a Naveen et al. (2005), el ICL el potencial de contaminación por lixiviados de un determinado vertedero o relleno, este es un número que oscila entre 5 a 100 (como un grado) en función a varios parámetros del lixiviado, este índice de escala creciente cuando presenta un valor más alto indica un mal estado del relleno.

Se seleccionaron 18 contaminantes de lixiviados para su inclusión en el ICL (Kumar y Alappat, 2005), los cuales también se clasificaron en Sub índices del ICL, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8

Sub ICL

Sub ICL	Parámetro
ICL Orgánico	DBO ₅ , DQO, Compuestos fenólicos, coliformes totales
ICL inorgánico	pH, nitrógeno total Kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, TDS, Cloruro
ICL metales pesados	Hierro, cobre, níquel, Zinc, Plomo, Cromo, Mercurio, Arsénico, Cianuro

Fuente. Datos tomas de (Kumar y Alappat, 2005, pág. 232)

La ponderación o peso de contaminantes se calcularon a partir de los niveles de significancia de cada parámetro. De acuerdo a Kumar y Alappat (2005) considera el Cianuro dentro del ICL metales pesados, porque es un contaminante prioritario (en función a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad agua), además la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. incluye dentro de los contaminantes prioritarios al cianuro, este contaminante no metálico, se le clasifica como compuesto orgánicos volátiles.

En la Tabla 9, se muestra la significancia y el peso del contaminante.

Tabla 9

Parámetros del ICL y el peso del contaminante planteado por Kumar y Alappat (2005)

Índice	Parámetro	Significancia	Peso del contaminante
ICL Orgánico ICLor	DQO	3.963	0.062
	DBO ₅	3.902	0.061
	Compuestos Fenólicos	3.627	0.057
	Coliformes totales	3.289	0.052
ICL Inorgánico ICLin	pH	3.509	0.055
	NTK	3.367	0.053
	Nitrógeno Amoniacal	3.25	0.051
	Solidos Disueltos Totales	3.196	0.05
	Cloruro	3.078	0.048
ICL Metales Pesados ICLmp	Cromo total	4.057	0.064
	Plomo	4.019	0.063
	Mercurio	3.923	0.062
	Arsénico	3.885	0.061
	Cianuro	3.694	0.058
	Zinc	3.585	0.056
	Níquel	3.321	0.052
	Cobre	3.170	0.05
	Hierro	2.830	0.044
	Total	63.165	1.00

Fuente. Datos tomas de (Kumar y Alappat, 2005, pág. 232)

Los factores o coeficientes se calculan para indicar la importancia de cada contaminante, esta ponderación se calcula de acuerdo a la suma aritmética de los valores de significación de todos los contaminantes y se asignó a cada contaminante una ponderación proporcional a la significancia, de modo que la ponderación total de los contaminantes es 1. La ponderación calculada para cada variable contaminante en función de los valores de significación.

Además, las curvas de subíndices para cada parámetro se establecen para la relación entre la contaminación del lixiviado y la fuerza o concentración del parámetro. La función de agregación de variables se utilizó para sumar el comportamiento de todas las variables contaminantes del lixiviado (Kumar y Alappat, 2003).

El Índice de Contaminación por Lixiviado se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ICL = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

ICL: es el índice ponderado de contaminación por lixiviados (*ICL*);

w_i : peso para la variable del contaminante

p_i : es la puntuación del subíndice para la variable contaminante de lixiviados;

n : es el número de variables contaminantes de lixiviados utilizadas en el cálculo del *ICL*.

Sin embargo, cuando no se dispone de los datos de todas las variables contaminantes de lixiviados incluidas en el *ICL*, éste puede calcularse utilizando la concentración de los contaminantes de lixiviados disponibles, mediante la siguiente ecuación 2.

$$ICL = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

m : es el número de parámetros contaminantes de lixiviados para de los que se dispone de datos, pero en ese caso $m < 18$ y $\sum_{i=1}^m w_i < 1$. (Kumar y Alappat, 2005)

3.3.2.2 El Índice de Contaminación por Lixiviado para países en vías de desarrollo (*ICLvd*)

Asimismo, Sundara et al., (2020) formula el método para determinar el *ICL* para países en vías de desarrollo, es más preciso para determinar el grado de contaminación de los lixiviados, ya que las características específicas de los lixiviados de una región se deben tener en cuenta a la hora de evaluar su impacto. El *ICL* de acuerdo a Sundara et al., (2020) cuenta con un total de 20 parámetros. La ponderación se calculó en función de los niveles de significancia, además se mantiene 16 parámetros del *ICL* propuesto por Kumar y Alappat, (2003a), los parámetros que se excluyeron son el pH y los compuestos Fenólicos, además se agregaron 2 parámetros (Sólidos suspendidos totales y cadmio) y 2 características del Lixiviado (volumen del lixiviado y el revestimiento del relleno o vertedero).

Tabla 10

Parámetros del ICL y el peso del contaminante por Sundara et al. (2020)

	Parámetro	Significancia	Peso del contaminante
1	DQO	3.963	0.054
2	DBO ₅	3.902	0.053
3	CT*	3.289	0.045
4	Nitrógeno amoniacal	3.25	0.044
7	Sólidos disueltos totales	3.169	0.043
6	Cloruros	3.078	0.042
7	TSS	3.163	0.043
8	NTK	3.367	0.046
9	Cromo total	4.057	0.055
10	Plomo	4.019	0.055
11	Mercurio	3.923	0.054
12	Arsénico	3.885	0.053
13	Cianuro	3.694	0.05
14	Zinc	3.585	0.049
15	Níquel	3.321	0.045
16	Cobre	3.17	0.043
17	Hierro	2.86	0.039
18	cadmio	4.00	0.055
19	Volumen de descarga del Lixiviado	4.50	0.061
20	Revestimiento	5.00	0.068
	Total	73.195	1.00

Donde: La significancia está dada por Kumar y Alappat, (2003a) y el peso del contaminante (w_i) por Sundara et al. (2020).

La calificación de los Sub índices de los parámetros y las curvas de calificación se mantiene los propuestos por Kumar y Alappat, (2005).

Para el cálculo del revestimiento se considera si el relleno cuenta con un revestimiento incorporado y la edad de este, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Índice de contaminación individual para el parámetro de revestimiento del relleno

Edad del revestimiento del relleno	Índice de contaminación individual
Revestimiento presente (menos de 20 años)	5
Revestimiento presente (21 a 30 años)	10
Revestimiento presente (31 a 40 años)	20
Revestimiento presente (más de 40 años)	30
Revestimiento no presente	100

Fuente. Dato tomado de Sundara et al. (2020)

En el revestimiento del relleno las membrabas son literalmente las únicas barreras que impiden que los lixiviados contaminen en directamente las aguas subterráneas, para la puntuación de este parámetro, de acuerdo a Sundara et al. (2020), los encuestados consideraron un parámetro importante en la determinación del ICL para países en vías de desarrollo.

Del mismo modo el volumen diario del lixiviado también se considera un factor importante en el cálculo del ICL (Kumar y Alappat, 2005), asimismo, influye significativamente en el valor del ICL total.

Por otro lado, el segundo parámetro de mayor preocupación que consideraron fue el Volumen diario, asimismo el volumen puede estimarse utilizando la siguiente formula desarrollada por el Departamento de Medio Ambiente, Agua, Patrimonio y Artes de Australia (Ibrahim y Mahmood, 2016, citado por Sundara et al., 2020, pág. 5):

$$V = (0.15 \times R \times A) / 365 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

V : Es el Volumen diario de descarga del lixiviado ($\text{m}^3/\text{día}$)

R : Es la precipitación anual (m)

A : es la superficie del relleno (m^2)

El cálculo del ICL para países en vías de desarrollo es similar al ICL propuestos por Kumar y Alappat (2003), se resume de la siguiente en la ecuación 4.

$$ICL = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

ICL , es el índice ponderado de contaminación por lixiviados (ICL) para países en vías de desarrollo

w_i , peso para la variable del contaminante

p_i , es la puntuación del subíndice para la variable contaminante de lixiviados;

m , es el número de variables contaminantes de lixiviados utilizadas en el cálculo del ICL .

3.4 Marco normativo internacional de los lixiviados

a. México

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en los residuos sólidos urbanos manejados en los sitios de disposición final, es una norma mexicana que establece los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes en los residuos sólidos urbanos manejados en los sitios de disposición final.

Tabla 12

Límite máximo permisible de concentración para el Lixiviado

Concentración	Unidad	Límite máximo permisible
Orgánico		
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	200
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	800
Grasas y aceites	mg/L	100
Fenoles	mg/L	0.1
Aceites minerales	mg/L	10
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	mg/L	0.001
Dioxinas y furanos	mg/L	0.000001
Pesticidas	mg/L	0.01
Inorgánico		
pH		6.5 a 8.5
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	500
Conductividad eléctrica (CE)	µS/cm	2 500
Cloruros	mg/L	500
Sulfatos	mg/L	500
Sodio	mg/L	250
Potasio	mg/L	100
Calcio	mg/L	250
Magnesio	mg/L	100
Hierro	mg/L	10
Manganeso	mg/L	1
Níquel	mg/L	0.1
Cobre	mg/L	0.2
Zinc	mg/L	1
Plomo	mg/L	0.1
Cadmio	mg/L	0.01
Cromo hexavalente	mg/L	0.05
Mercurio	mg/L	0.001
Arsénico	mg/L	0.01
Selenio	mg/L	0.01
Fluoruros	mg/L	2.0
Cianuros	mg/L	0.05
Nitritos	mg/L	1.0
Nitratos	mg/L	10.0

Fuente. Obtenido de Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (2004).

b. Chile

Decreto Supremo N° 148, Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos, este Reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reúso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos. Para la disposición final del lixiviado en el suelo se considera las siguientes concentraciones señaladas en la siguiente Tabla.

Tabla 13
Concentración Máximas Permisible (CMP)

CÓDIGO RP	N° CAS	SUSTANCIA	CMP (mg/l)
D032	118-74-1	Hexaclorobenceno	0.13
D033	87-68-3	Hexacloro-1,3-butadieno	0.5
D034	67-72-1	Hexacloroetano	3
D013	58-89-9	Lindano	0.4
D014	72-43-5	Metoxicloro	10
D035	78-93-3	Metiletilcetona	200
D036	98-95-3	Nitrobenceno	2
D037	87-86-5	Pentaclorofenol	100
D038	110-86-1	Piridina	5
D011	7440-22-4	Plata	5
D039	127-18-4	Tetracloroetileno	0.7
D015	8001-35-2	Toxafeno	0.5
D040	49-01-6	Tricloroetileno	0.5
D041	95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400
D042	88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2
D017	93-72-1	2,4,6,-TP (silvex)	1
D043	75-01-4	Cloruro de vinilo	0.2
D004	7440-38-2	Arsénico	5
D007	7440-47-3	Cromo	5
D009	7439-97-6	Mercurio	0.2
D008	7439-92-1	Plomo	5
D010	7782-49-2	Selenio	1
D005	7440-39-2	Bario	100
D018	71-43-2	Benceno	0.5
D006	7440-43-9	Cadmio	1
D019	56-23-5	Tetracloruro de carbono	0.5
D020	57-74-9	Clordano	0.03
D021	108-90-7	Clorobenceno	100
D022	67-66-3	Cloroformo	6

Nota. (*) La suma de las concentraciones de los isómeros (o-Cresol m-Cresol y p-Cresol) debe ser inferior a la CMP establecida para el Cresol. Obtenido de Decreto Supremo N° 148 (2004)

c. Unión europea

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, el cual regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertederos en la Unión Europea. Este decreto tiene como objetivo prevenir o reducir al mínimo los efectos negativos de los residuos de vertedero sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje. También se establece requisitos para la gestión de los lixiviados de vertedero, como el tratamiento, el almacenamiento y la disposición final. Estos requisitos están diseñados para proteger el medio ambiente de los impactos negativos de los lixiviados.

Tabla 14

Límites máximos de concentración de contaminantes en los lixiviados

Contaminante	Unidad	Concentración
Contaminantes inorgánicos		
pH		6,5 a 8,5
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	500
Conductividad eléctrica (CE)	µS/cm	2.500
Cloruros	mg/L	250
Sulfatos	mg/L	250
Sodio	mg/L	250
Potasio	mg/L	100
Calcio	mg/L	250
Magnesio	mg/L	100
Hierro	mg/L	10
Manganeso	mg/L	1
Níquel	mg/L	0,1
Cobre	mg/L	0,2
Zinc	mg/L	1
Plomo	mg/L	0,1
Cadmio	mg/L	0,01
Cromo hexavalente	mg/L	0,05
Mercurio	mg/L	0,001
Arsénico	mg/L	0,01
Selenio	mg/L	0,01
Fluoruros	mg/L	2,0
Cianuros	mg/L	0,05
Nitritos	mg/L	1,0
Nitratos	mg/L	10,0
Contaminantes orgánicos		
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	200
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	800
Grasas y aceites	mg/L	100
Fenoles	mg/L	0,1
Aceites minerales	mg/L	10
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	mg/L	0,001
Dioxinas y furanos	mg/L	0,000001

Fuente. Obtenido del Real Decreto 1481 / 2001(2002).

d. India

Normas municipales de gestión y manipulación de residuos sólidos, Nueva Delhi, India (2013), la presente norma número S.O. 1978 (E) con fecha se estableció el 2 de junio del 2013, con la finalidad de brindar estándares para la eliminación de los lixiviados tratados los cuales se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 15
Estándares para la eliminación de los lixiviados tratados

Parámetro	Unidad	Estándar		
		Aguas superficiales continentales	Alcantarillado público	Vertido de tierras
pH	-	5.5-9.0	5.5-9.0	5.5-9.0
Solidos disueltos	mg/L	2100	2100	2100
Solidos suspendidos	mg/L	100	600	200
DQO	mg/L	250	-	-
DBO ₅	mg/L	30	350	100
Nitrógeno amoniacal	mg/L	50	50	-
NTK	mg/L	100	-	-
Arsénico	mg/L	0.2	0.2	0.2
Mercurio	mg/L	0.01	0.01	-
Plomo	mg/L	0.1	1.0	-
Cadmio	mg/L	2.0	1.0	-
Cromo Total	mg/L	2.0	2.0	-
Cobre	mg/L	3.0	3.0	-
Zinc	mg/L	5.0	15	-
Níquel	mg/L	3.0	3.0	-
Cianuro	mg/L	0.2	2.0	0.2
Cloruro	mg/L	1000	1000	600
Fluoruro	mg/L	2.0	1.5	-
Compuestos fenólicos	mg/L	1.0	5.0	-

Fuente. Tomado de (Angmo et al., 2023; Change, 2016; Maiti et al., 2016; Ministry of Environment and Forests, 2013)

Normas de gestión y manipulación de residuos sólidos municipales. Nueva Delhi: Ministerio de Medio Ambiente y Bosques, Gobierno de la India (2016), con número de norma S.O. 783 E 1357(E) que establece las Normas Municipales de Residuos Sólidos (Gestión y Manipulación) de fecha 3 de junio del 2015 en la Gaceta de la India, brinda límite permisible para el vertido de lixiviados para aguas superficiales, como se muestran en la anterior Tabla 15.

e. Vietnam

Normativa técnica nacional QCVN 40:2011/BTNMT sobre aguas residuales industriales: Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Vietnam, 2011, este reglamento QCVN 40:2011/BTNMT establece los valores máximos de los parámetros de contaminación de las aguas residuales industriales que se vierten en las aguas receptoras (Hoai et al., 2021).

Tabla 16
Estándares para el vertimiento de aguas residuales industriales

Parámetro	Unidad	Normas de vertido
pH	-	5.5-9
TDS	mg/L	
Solidos suspendidos	mg/L	100
DQO	mg/L	150
DBO ₅	mg/L	50
Cloruro	mg/L	1000
NTK	mg/L	40
Amonio	mg/L	10
Nitrógeno amoniacal	mg/L	
Arsénico	mg/L	0.1
Cromo Total	mg/L	0.1
Cobre	mg/L	2
Mercurio	mg/L	0.01
Níquel	mg/L	0.5
Plomo	mg/L	0.5
Cadmio	mg/L	0.1
Hierro	mg/L	5
Zinc	mg/L	3
Cianuro	mg/L	0.1
Compuestos fenólicos	mg/L	0.5
Coliformes Bacteria	NMP/100mL	5000

Fuente. Tomado de (Hoai et al., 2021; Ministry of Natural Resources and Environment, 2012)

3.5 Marco conceptual

Biodegradable: Capaz de ser descompuesto por un proceso biológico (Alemayehu, 2004).

Biodegradación: Proceso metabólico por el que los orgánicos de alta energía se convierten en CO₂ y H₂O de baja energía (Alemayehu, 2004).

Botadero: Se refiere a una instalación de eliminación en un espacio geográfico donde se depositan residuos sólidos municipales sobre tierra que no cuentan con revestimiento y una infraestructura adecuada para el almacenamiento de residuos (Danthurebandara et al., 2012). Por otra parte, Alemayehu (2004), menciona que es eliminación final de todos los residuos mediante su depósito incontrolado e indiscriminado en zonas arenosas, en fosos o canteras, ríos, etc.

Componentes inorgánicos: son componentes que no se descomponen. Asimismo, contienen varios iones como calcio, magnesio, sodio, potasio amonio, hierro, cloruro, sulfato, nitrato, carbonato de hidrógeno, etc. (Alemayehu, 2004).

Componentes orgánicos: Son componentes biodegradables que se descomponen en el proceso, tales como la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, carbono orgánico total, etc.

Contaminación: la adición de sustancias no deseadas en una concentración que tiene un efecto adverso sobre los organismos y el medio ambiente. Asimismo, es una alteración desfavorable de las características físicas, químicas o biológicas del aire, el agua y el suelo que puede o afectará adversamente la vida humana, las condiciones de vida y los bienes culturales (Saha et al., 2017).

Lixiviado: Se define como cualquier líquido que se filtra a través de los residuos depositados en un relleno o vertedero. Los lixiviados pueden causar serios problemas ya que pueden transportar contaminantes que causa una contaminación al suelo, a las aguas subterráneas y superficiales (Ireaja et al., 2018).

Metales pesados: Los principales metales pesados presentes en los lixiviados de son cadmio, cromo, mercurio, cobre, zinc, plomo y arsénico. Estos metales pesados

pueden producirse al eliminar en vertederos diversos materiales como pilas, aparatos electrónicos de consumo, cerámica, bombillas y vidrio (Iravanian y Ravari, 2020).

Propiedades Físicas: Son las características que están relacionadas con la apariencia, es decir, el color, la temperatura, el sabor y el olor (Chaudhary, 2022).

Propiedades Químicas: Son características relacionadas al lixiviado, químicamente el lixiviado estos compuestos como el pH, materia orgánica, amonio, cianuro, níquel, etc. (Chaudhary, 2022).

Propiedades Biológicas: Son características relacionadas a los microorganismos vivos presentes en los lixiviados como bacterias, coliformes, etc. (Chaudhary, 2022).

Precipitación: Es un proceso dentro del ciclo hidrológico, ya que ayuda a distribuir el agua, además se entiende como la caída del agua sólida o líquida desde la atmósfera (Cuba & Surco, 2022).

Relleno sanitario: Los rellenos sanitarios son instalaciones de ingeniería diseñadas para la eliminación de residuos sólidos que son construidos y operados de manera que no causen un peligro a la salud y al ambiente (Ireaja et al., 2018).

Residuos sólidos: Son los materiales inútiles, no deseados y desechables que resulta de las actividades cotidianas de la población (Mishra et al., 2014).

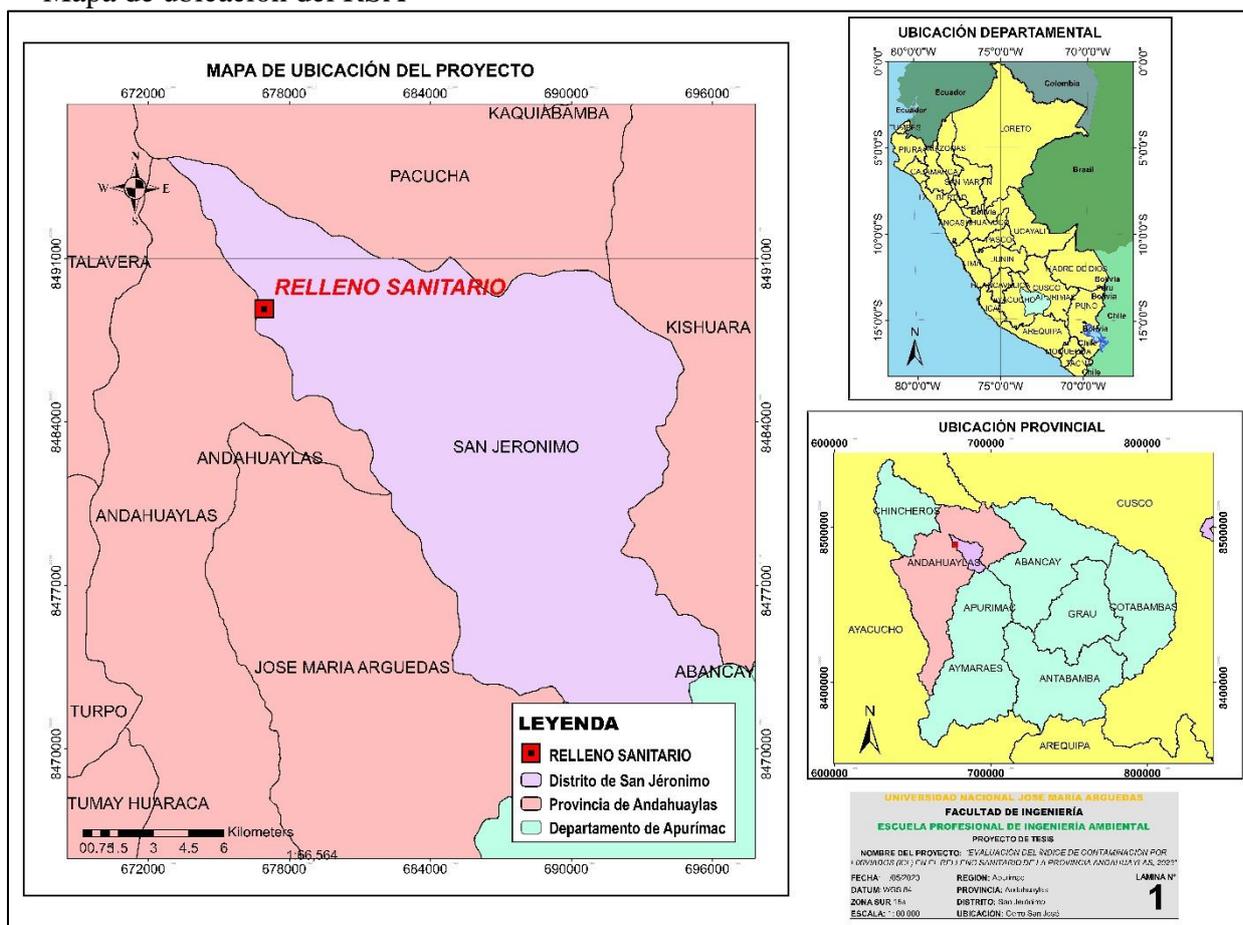
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Lugar de ejecución

La presente investigación se realizó en dos etapas: una en campo y otra en laboratorio. El trabajo en campo se llevó a cabo en la poza de lixiviación del Relleno Sanitario de Andahuaylas (RSA), ubicado en el cerro San José de la comunidad “Unión Chumbao” del distrito de San Jerónimo, que limita con el distrito de Andahuaylas de la provincia de Andahuaylas, ubicado en latitud 13°39'50.67"S y longitud 73°21'50.50"O.

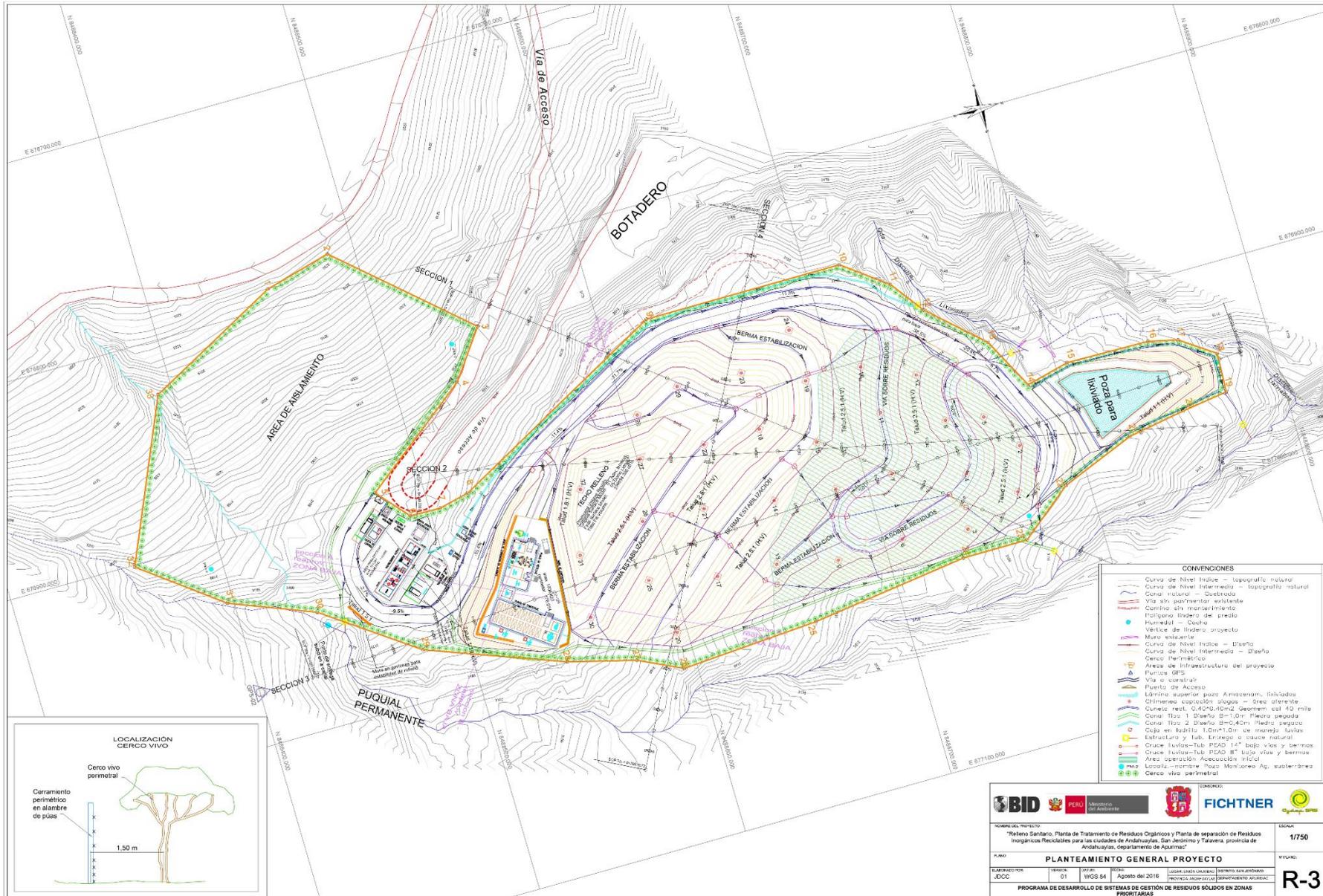
El relleno se inauguró en el año 2018 y comenzó a funcionar a partir del 2019, recibiendo 27.37 toneladas de residuos sólidos municipales al día (MPA, 2022), provenientes de los distritos de Andahuaylas, San Jerónimo, Talavera y Pacucha.

Figura 1
Mapa de ubicación del RSA



La Figura 02, se muestra el plano completo del RSA.

Figura 2
Plano general del RSA



Fuente. Plano tomado de Consorcio Fichtner S.A.S (2016).

La Tabla 17, muestra información actual del RSA, de acuerdo, al estudio técnico realizado por el Consorcio Fichtner (2016) el proyecto está contemplado para la disposición de Residuos Sólidos Municipales de los distritos de Andahuaylas, San Jerónimo y Talavera con una etapa operativa de 10 años.

Tabla 17
Estado del RSA

Relleno Sanitario Andahuaylas	
Estado ^a	Nuevo- Activo
Período del Relleno ^a	4 años y 7 meses
Superficie ocupada ^a	96 173.87 m ²
Tipo de residuos ^a	Residuos Municipal
Topografía ^a	Pendiente pronunciada
Tipo de suelo ^a	Limo arcilloso
Tonelaje medio diario ^b	27.37 toneladas
Revestimiento de fondo ^a	Si
Tratamiento de lixiviados ^a	No
Volumen de lixiviados descargado ^a	ND

Fuente. ^aConsorcio Fichtner S.A.S, 2016; ^bSIGERSOL, 2023.

Asimismo, el relleno sanitario solo recibe residuos sólidos municipales de los distritos de Andahuaylas, San Jerónimo, Talavera y Pacucha (MPA, 2023). La Tabla 18, presenta la cantidad de residuos sólidos que ingreso al relleno sanitario en el 2022, donde se observa mayor aporte del distrito de Andahuaylas.

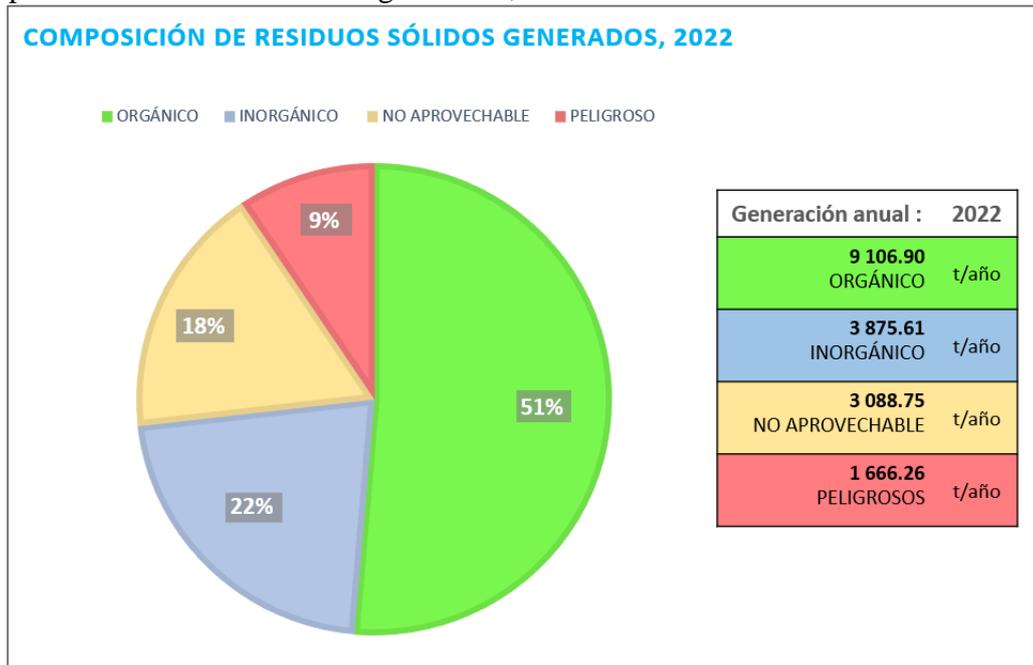
Tabla 18
Cantidad de disposición de residuos sólidos en el año 2022

Distritos	Ton/Año
Andahuaylas	9 874.04
San Jerónimo	2 560.66
Talavera	2 342.18
Pacucha	221.12
TOTAL	14 998.00

Fuente. De acuerdo a la base de datos del Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL, 2023) y de la municipalidad provincial de Andahuaylas (MPA, 2023)

La composición de los residuos sólidos generales de los distritos de Andahuaylas, Talavera, San Jerónimo y Pacucha que llega al relleno sanitario del año 2022, se muestra en la Figura 3.

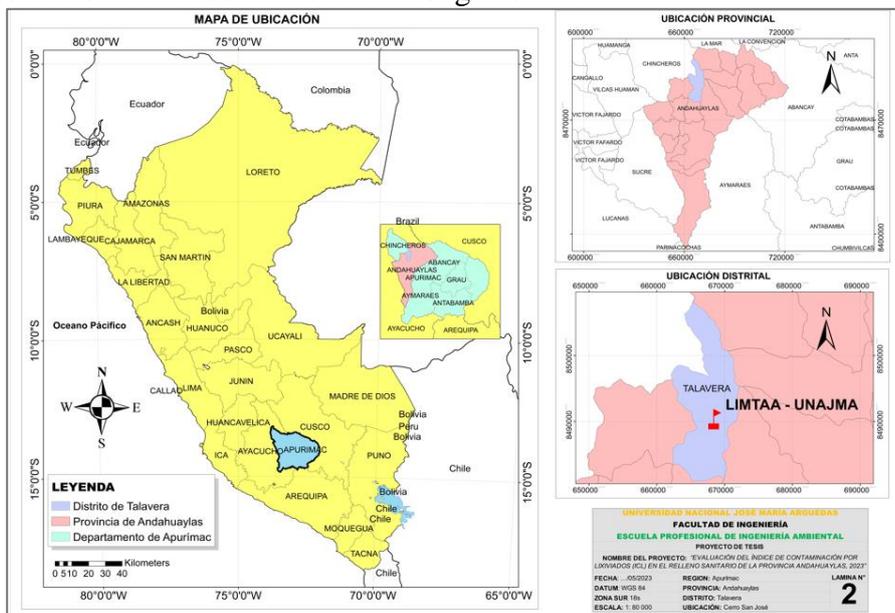
Figura 3
Composición de residuos sólidos generados, 2022



Fuente. Obtenido de SIGERSOL- MINAM, 2022.

El trabajo en laboratorio se ejecutó en el Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos (LIMTA) de la Universidad Nacional José María Arguedas, ubicado en la Av. 28 de Julio N° 1103, distrito de Talavera, Sede Santa Rosa, donde se analizó y determinó los parámetros físicos, químicos y Microbiológicos, así como la redacción del informe final.

Figura 4
Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación LIMTA



4.2 Información meteorológica

La información meteorológica exclusiva sobre las precipitaciones procede de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI y satelital, además son precipitaciones para el año de estudio y próximos a ello, también son precipitaciones diarias, mensuales y anuales.

Los datos fueron recopilados de la estación meteorológica convencional del del distrito de Andahuaylas, el cual pertenecen al SENAMHI, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19
Estación Meteorológica

Distrito	Estación Meteorológicas	Latitud - S	Longitud - W	Altitud	Fuente
1 Andahuaylas	Estación Andahuaylas	13° 39' 25"	73° 22' 15"	2 933	SENAMHI

Fuente. Coordenadas tomadas del Google Earth

A fin de aproximar, la precipitación pluvial del área de estudio, el RSA, se realizó una regionalización de la precipitación pluvial, considerando la estación meteorológica más cercanas al área de estudio.

Para esta investigación a criterio del investigador y por la naturaleza de las precipitaciones en los andes se va a tomar la muestra de lixiviado en el mes de abril del periodo de lluvia y el mes de junio para el periodo de estiaje.

Tabla 20
Fecha de muestreo

Periodo	Temporada	Fecha de muestreo
Periodo de lluvia	Temporada 1	Abril del 2023
Periodo de estiaje	Temporada 2	Junio del 2023

4.3 Materiales, equipos y reactivos

Los materiales utilizados para la presente investigación fueron los siguientes:

Tabla 21
Materiales de laboratorio

MATERIALES	
Cant.	Descripción
8 unid.	Vasos precipitados de 100mL
4 unid.	Vasos precipitados de 1000mL
4 unid.	Botellas de plástico de 1L
5 unid.	Frascos ámbar de 1000mL
8 unid.	Plásticos de muestra Whirl-pak
10 unid.	Placas petrifilm 3M
1 paquete	Filtros de $\varnothing = 47\text{mm}$, poros de $0.45\mu\text{m}$
1 unid.	Matraz Erlenmeyer 1L
1 unid.	Filtro Kitasato
5 unid.	Barras magnéticas
1 unid.	Varilla de vidrio
1 unid.	Pipeta (5mL, 10mL)
1 unid.	Micro pipeta
1 unid.	Mechero
1 litro	Alcohol 96°
1 paquete	Algodón
5 unid.	Espátula de metal
10 unid.	Fiola (100mL)
11 unid.	Matraz Erlenmeyer Esmerilado con Tapa de Vidrio 250 mL
2 unid.	Soporte
10 unid.	Hielo Gel Refrigerante
1 unid.	Papel de laboratorio
2 unid	Probeta de 100 mL, 500mL
1 litro	Agua destilada, agua desionizada
1 unid.	Cúter
4 unid	Cono Imhoff
2 unid	Soporte universal
1 unid	Guardapolvo
1 paquete	Guantes de nitrilo
1 paquete	Mascarillas

Tabla 22
Equipos de laboratorio

EQUIPOS		
Cant.	Descripción	Marca
1	Espectrómetro	HANNA HI801
1	Potenciómetro	HANNA HI5522
1	Balanza analítica	PIONER PX224/E
2	Laptop	TOSHIBA, LENOVO
1	Estufa	BINDER
1	Mufla	FOC-2151
1	Desecador	Dry Keeper SANPLATEC
1	Secador	OHAUS MB20
1	Refrigerador	LG LM57SDT
1	Sensores de medición	VELP DBO
1	Microondas	LG
1	Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma	Marca Shimadzu (ICPE-9800)
1	Equipo TOC (Carbono Orgánico Total)	TOC-L5000A/ASI-L

Tabla 23
Reactivos

REACTIVOS		
Cant.	Descripción	Marca
2 g	Dicromato de Potasio	R-JT Baker 3090
100 mL	Ácido Sulfúrico	SPECTRUM S1730
04 paquetes	Reactivo de Amonio rango bajo A (HI93700A)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivo de Amonio rango bajo B (HI93700B)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivo de cloruro B (HI 93753B)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivo de cloruro A (HI 93753A)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivó cianuro A (HI93714A-0)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivó cianuro B (HI93714B-0)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivó cianuro C (HI93714C-0)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivo níquel rango bajo A (HI93740A-0)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivó níquel B (HI93740B-0)	HANNA HI801 Instruments
04 paquetes	Reactivo níquel C (HI93740A-0)	HANNA HI801 Instruments
4 unid	Reactivo de DQO Rango alto (HI93754C-25)	HANNA HI801 Instruments
3 g	Cloruro de amonio	CIENCIA & TECNICA
3 g	sulfato de magnesio heptahidratado	CIENCIA & TECNICA
3 g	Tampón de fosfato	CIENCIA & TECNICA
3 g	Cloruro férrico	CIENCIA & TECNICA
4 g	Hidróxido de Potasio	CIENCIA & TECNICA
5 g	Hidróxido de sodio	CIENCIA & TECNICA

4.4 Material de estudio

4.4.1 Población

La población para el presente estudio fueron las pozas de lixiviados que son generados por la descomposición de los residuos sólidos en el Relleno Sanitario de Andahuaylas (RSA), ubicado en el distrito de San Jerónimo que pertenece a la comunidad Unión Chumbao, en la Provincia de Andahuaylas, Apurímac.

4.4.2 Muestra

La muestra para la presente investigación fue obtenida de 2 pozos de lixiviación del RSA. La primera muestra se tomó de la poza pequeña, que es la primera poza de lixiviación y la segunda muestra se tomó de la poza grande de lixiviados.

Se consideraron 2 litros de muestra de cada poza, de acuerdo a las condiciones generales para la toma de muestras del Instituto de Toxicología de la Defensa (2016) las muestras se tomaron en la temporada de estiaje y temporada de lluvias.

4.4.3 Muestreo

El tipo de muestreo que se aplicó para este estudio de investigación fue puntual en la toma de muestra de lixiviación del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas.

El procedimiento de muestreo se realizó utilizando un muestreo no probabilístico y el tamaño de la muestra quedó a criterio del investigador. Así como a la metodología aplicada por Ibezute y Erhunmwunse (2018) y al Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales de Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (2010). En el cual se tomó la muestra representativa para la temporada de lluvia, en mes de marzo, que corresponde a 5 meses de almacenamiento. El segundo muestreo se dio en el periodo seco, en el mes de junio, donde la recirculación esta activa diariamente, por lo que el lixiviado tiene un almacenamiento de un día.

4.5 Metodología

4.5.1 Tipo

El presente estudio de investigación es de tipo básica de según el propósito o el fin que persigue (Ñaupas et al., 2018), ya que se quiere lograr nuevo conocimiento de permita la solución de problemas prácticos. Asimismo, tiene un enfoque u objeto de estudio cuantitativo (Hernández, 2018), porque se recolectara datos numéricos y un análisis estadístico.

El alcance del estudio es de tipo descriptiva, ya que servirá para mostrar con precisión los ángulos o dimensiones de un fenómeno, suceso, comunidad, contexto o situación (Hernández, 2018).

4.5.2 Diseño de investigación

La presente investigación tiene un diseño no experimental transversal, puesto que el investigador analiza la variable en un momento dado, en un tiempo único, su objetivo es analizar el comportamiento y describir la variable en un momento dado (Hernández, 2018).

El diseño transversal se utilizó para recolectar los datos en dos periodos determinados. La primera muestra representativa se tomó en el periodo de lluvias, y la segunda muestra representativa se tomó en el periodo de estaje. El investigador observó y describió el comportamiento de la variable en ambos periodos de tiempo, este diseño fue útil para describir la situación actual de la población.

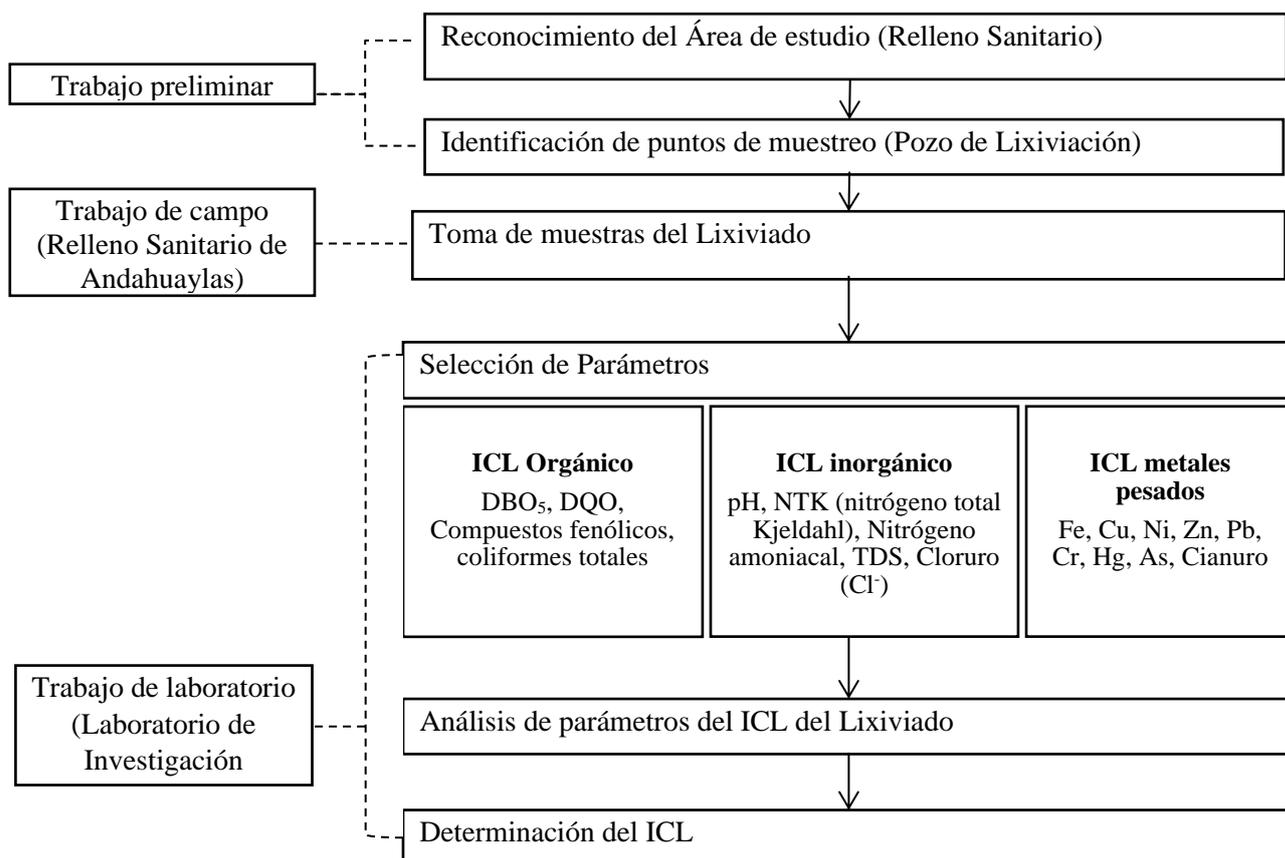
4.6 Métodos y técnicas de Análisis

El presente estudio tuvo un enfoque cuantitativo, ya que se recopilaron datos de los parámetros fisicoquímicos y biológicos del pozo de lixiviación del RSA. Además, en base a la medición de los parámetros se realizó una evaluación del Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) en temporada seca y temporada de lluvias mediante un análisis estadístico.

El análisis fisicoquímico y microbiológico de la muestra se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos (LIMTAA- UNAJMA), asimismo, se consideró los materiales y equipos adecuados para la

toma de muestras. El estudio se realizó mediante el siguiente diagrama metodológico, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5
Esquema metodológico



4.6.1 Procedimientos y métodos de análisis

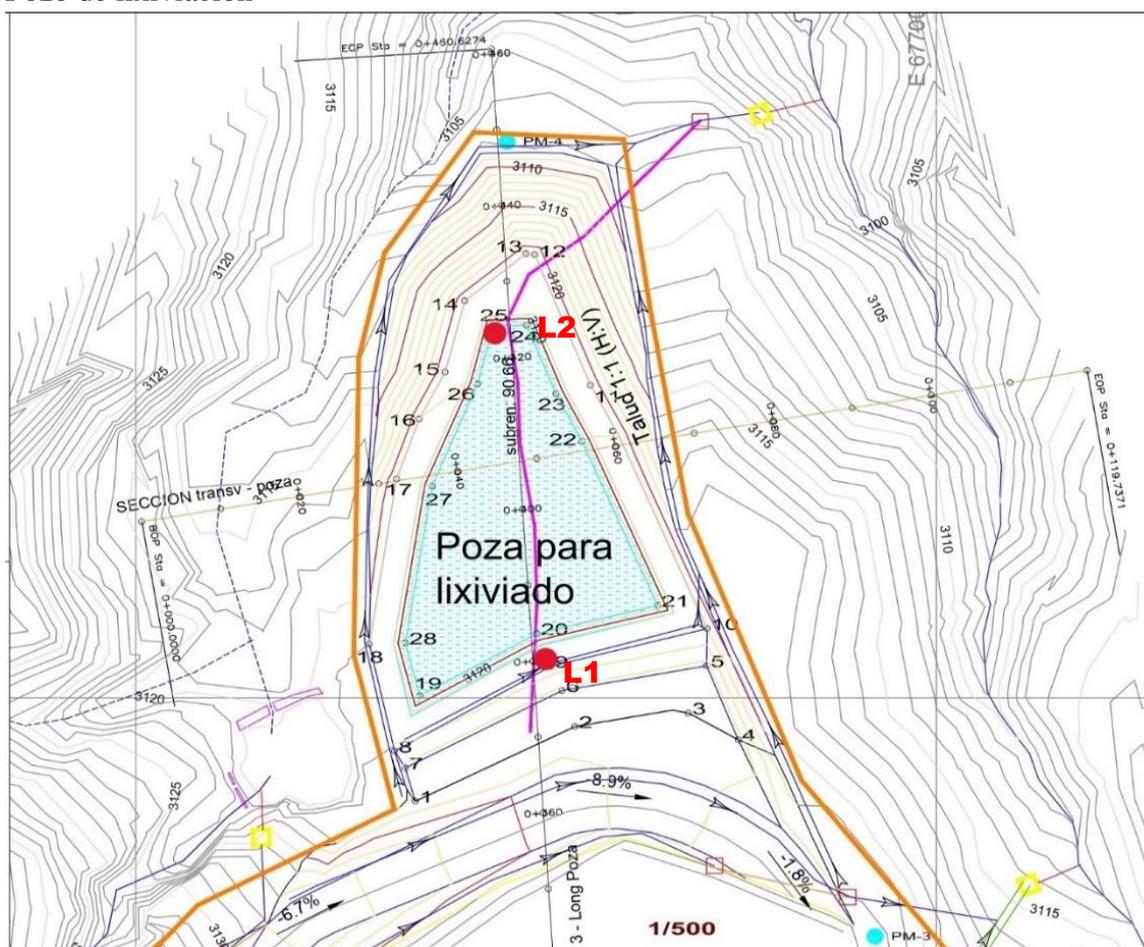
4.6.1.1. Toma de muestra

El recogido de muestras se realizó de acuerdo a la metodología del Instituto de Toxicología de la Defensa (2016) y en el Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales de Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (2010). Se usó la indumentaria de protección completa, guantes de nitrilo, cofias, botas, gafas y mascarilla para la toma de la muestra de lixiviado en el Relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas. Se utilizaron frascos de un 1 litro de capacidad previamente esterilizados y

limpios, asimismo, se usaron bolsas estériles (bolsas Whirl-Pak) para las muestras microbiológicas. Los frascos se llenaron con las muestras de lixiviado sin dejar ningún espacio vacío y en el menor tiempo posible evitando el ingreso de componentes que puedan alterar los resultados de las muestras, posteriormente se preservó, conservó y se transportó al laboratorio para su respectivo análisis cumpliendo con los requisitos del Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia, 2010).

El volumen recolectado en cada temporada fue en total de 2 Litros y fueron colocadas en el cooler con hielo para que las muestras estén refrigeradas y llevadas al laboratorio de análisis LIMTA. También se llenaron muestras de lixiviados en las bolsas Whirl-Pak estéril igualmente fueron refrigeradas para su posterior análisis en Laboratorio.

Figura 6
Pozo de lixiviación



Fuente. Imagen tomado de Consorcio Fichtner S.A.S (2016)

En la Figura 6, donde se observa los pozos de lixiviación, donde se recogió en dos puntos de muestreo.

Tabla 24
Puntos de muestreo

Ubicación geográfica			
Puntos	Latitud	Longitud	Altitud
L1	13° 39' 51.58" S	73° 21' 50.23" O	3120 m.s.n-m
L2	13° 39' 50.12" S	73° 21' 50.77" O	3118 m.s.n-m

Donde: El L1, es el primer pozo de entrada del lixiviado que conecta con el drenaje de Lixiviación del Relleno Sanitario con un área de 0.63 m² (volumen de 0.441 m³). El L2 es la segunda poza donde se deposita el lixiviado y tiene un área 1170 m² (volumen de 1580 m³).

En la Tabla 24, se muestra los puntos L1 y L2, que pertenece a los pozos de lixiviación, que está conectado con el drenaje de Lixiviación del Relleno Sanitario. El primer pozo donde llega el relleno tiene un área de 0.63 m² (volumen de 0.441 m³). El segundo pozo donde se deposita el lixiviado y tiene un área 1170 m² (volumen de 1580 m³).

4.6.1.2. Medición de parámetros

La medición de los parámetros se realizó en el LIMTA y se utilizaron guantes de nitrilo, guardapolvo, lentes y mascarillas a fin de no contaminar o alterar los resultados del análisis de la muestra de lixiviado, asimismo, se utilizó materiales, equipos e instrumentos del laboratorio.

En este estudio se determinó 17 parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, coliformes totales, Potencial de hidrogeno, nitrógeno amoniacal, sólidos totales, cloruro, hierro, cobre, zinc, plomo, cromo total, mercurio, arsénico, níquel, cadmio y cianuro.

4.6.1.2.1 *Análisis de los compuestos orgánicos*

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Para la determinación de la DBO₅ del lixiviados se utilizó el método Respirométrico/ Manométrico oxitop (APHA, 2012). Primero se preparó la solución

tampón de fosfato, en 60mL de agua destilada se disolvió 0.85g de fosfato monobásico potasio, 2.17g de fosfato dibásico de potasio, 3.34g del fosfato dibásico de sodio, 0.17g del NH_4Cl (cloruro de amonio) y se aforó una fiola de 100 mL con agua destilada.

Para la preparación de la solución de sulfato de magnesio en 80 mL de agua destilada se disolvió 2.25 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de magnesio heptahidratado), luego se transfirió a una fiola de 100 mL y se aforó con agua destilada.

Para la preparación de la solución de CaCl_2 (cloruro de calcio) en 80 mL de agua destilada se disolvió 2.75 g de CaCl_2 , asimismo se transfirió a una fiola de 100 mL y se aforo con agua destilada.

Para la preparación de la solución de FeCl_3 (cloruro de hierro) en 80 mL de agua destilada se disolvió 0.025g de FeCl_3 , luego se transfirió a una fiola de 100 mL y se aforo con agua destilada.

Y para la solución de NH_4Cl (cloruro de Amonio), se pesó 3.82g de cloruro de amonio y se disolvió en 80mL de agua destilada, luego se neutralizo el pH a 7.0 con hidróxido de potasio (KOH) y se trasfirió a una fiola de 100mL para completar con agua destilada.

Finalmente se preparó la solución mix de nutrientes, que contiene: 3mL de la Solución de tampón de fosfato, 1mL de la solución de NH_4Cl , 1mL de la solución de MgSO_4 , 1mL de la solución de CaCl_2 , 1mL de la solución de FeCl_3 .

En un frasco ámbar (botella de DBO oxitop) se transfirió 184 mL de la muestra y se añadió 0.6 mL de la solución mix de nutrientes de acuerdo al factor de dilución, luego se colocó un magneto en el frasco ámbar y un depósito de goma en la boca del frasco con 2 pastillas de hidróxido de sodio (NAOH), se cerró el frasco con el sensor EVO-DBO y se colocó en una incubadora refrigerada con un sistema de agitación a 20 °C de temperatura, y se dejó por cinco días para la lectura.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación de la DQO del lixiviados se utilizó el reflujo Cerrado, método colorimétrico (APHA, AWWA, 2012). Para la lectura de la DQO se preparó la solución de

ácido sulfúrico con sulfato de plata, la solución de $K_2Cr_2O_7$ (DQO>100mg/L) y la solución de hidrogenoftalato de potasio (DQO>100).

La solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) se preparó con 1.022g de dicromato de potasio en un frasco ámbar de 100mL, se adiciono 60mL de agua destilada, 16.7mL de H_2SO_4 y 3.33g de sulfato de mercurio y se aforo con agua destilada.

La solución de ácido sulfúrico con sulfato de plata se preparado en un frasco ámbar de 100mL, se colocó un 1g de sulfato de plata con 100mL de ácido sulfúrico y se dejó por 2 días. Para la preparación del DQO en un vial de 13mm de añadió 1.5mL del dicromato de potasio (solución digestora), 3.5 mL del sulfato de plata y ácido sulfúrico (solución catalítica) y 2.5 mL de la muestra. Luego se digesto por 2 horas a 150°C y se realizó la lectura con el fotómetro con una longitud de onda de 620nm (DQO>100).

Coliformes totales (CT)

La determinación de la CT del lixiviados se utilizó el recuento de E.coli/coliformes, método ISO 4832 (ISO 4832, 2021), mediante las placas Petrifilm 3M.

La muestra de lixiviado fue recogida en bolsas Whirl-Pak estéril y refrigeradas hasta su posterior análisis microbiológico. Para los coliformes totales se utilizó 7 placas 3M petrifilm, por cada muestra se realizó por triplicado y un blanco. Primero se levantó la película superior de la placa y con una jeringa se colocó 1mL de la muestra de manera perpendicular en el centro de la placa, y cuidadosamente se bajó la película superior evitando burbujas de aire, luego se colocó las placas en una incubadora a 48°C de temperatura por 24 horas para coliformes totales.

4.6.1.2.2 *Análisis de los compuestos inorgánicos*

Potencial de Hidrogeno

Para la determinación de pH se realizó mediante el método Electro Selectivo, se utilizó el Potenciómetro de mesa modelo HI5522 de marca Hanna cuenta con 3 canales que permite la medición simultanea del pH entre otros parámetros. Este equipo costa con un potenciómetro, un dispositivo de temperatura, un electrodo de referencia y uno de vidrio.

Se colocó la muestra de lixiviado en un vaso precipitado de 100 mL, luego se insertó el electrodo y se esperó que se estabilice del pH y se anotó el resultado que aparecía en el equipo por triplicado.

Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal, se determinó mediante el método Nessler (APHA; AWWA; WEF, 1998), el cual fue propuesto por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials - ASTM). El equipo utilizado para la lectura del nitrógeno amoniacal fue el iris-espectrómetro HI801.

En un vial de 13 mm se llenó 10mL de la muestra de lixiviado, el cual es el blanco, luego se ubicó el vial en el soporte del equipo y se presionó la tecla ZERO. Después se retiró el vial con la muestra y se agregó 2 gotas del reactivo de Amonio rango bajo A (HI93700A) y 2 gotas del reactivo de Amonio rango bajo B (HI93700B), seguidamente se colocó el vil en el soporte del quipo y se esperó 3 minutos y 30 segundos, una vez cumplido el tiempo establecido se presionó la tecla READ y se anotó el resultado en mg/L por triplicado.

Serie de solidos

La determinación de la serie de sólidos se realizó mediante el Método Gravimétrico (APHA, AWWA, 2012)(APHA; AWWA; WEF, 1998).

Se colocó 6 capsulas en la mufla a una temperatura de $550\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora para esterilizar las capsulas, luego se ubicaron las capsulas en la estufa durante 45 minutos, seguidamente en el desecador durante 45 minutos y posteriormente se pesaron las capsulas en la balanza analítica y se anotó el peso inicial (PO).

- Determinación de sólidos totales (ST)

Se transfirió a la capsula un 1mL de la muestra de lixiviado y se llevó a la incubadora a 60°C por 2 horas, hasta su total sequedad, las capsulas fueron manipuladas por pinzas metálicas sin contacto directo de la mano. Posteriormente se llevaron las capsulas con las muestras a una estufa de 105°C durante 45 minutos, se dejó enfriar en el desecador por 45 minutos, seguidamente se pesó las capsulas con las muestras y se anotó el resultado en gramos (P1). Se expresó el resultado con la siguiente fórmula:

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P1 - PO) \times 1000\ 000}{V \text{ (muestra ml)}} \quad (5)$$

- Determinación de sólidos totales fijos (STF)

Después de anotar el valor del peso P1, se transfirieron las capsulas con la muestra a la mufla a 550°C por 1 hora, luego se dejó enfriar en la estufa a 105°C por 30 minutos, seguido del desecador por 45 minutos. Posteriormente se pesaron las capsulas con la muestra y se anotó el resultado como P2. Se expresó el resultado con la siguiente fórmula:

$$STF \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P2 - PO) \times 1000\ 000}{V \text{ (muestra ml)}} \quad (6)$$

- Determinación de sólidos totales volátiles (STV)

Luego se obtuvo los STV calculando la diferencia entre sólidos totales y sólidos fijos totales.

$$STV \left(\frac{mg}{L} \right) = ST - STF \quad (7)$$

- Sólidos suspendidos totales (TSS)

Se colocó 6 crisoles limpios con una membrana de fibra de vidrio en la mufla a 550°C durante 1 hora, luego se dejó enfriar en la estufa a 105°C por 45 minutos, seguido del desecador por 1 hora. Posteriormente se pesó el crisol que contiene la fibra de vidrio y se anotó el resultado como PO (g).

Después se transfirió los crisoles que contiene la fibra de vidrio a un portafiltros adaptado al Kitasato para filtrarlo. Se filtró un 50mL de muestra de lixiviado previamente medido en una probeta graduada, lo que favoreció la cuantificación de TSS en la muestra de lixiviado. Se retiró el filtro de vidrio del Kitasato y se colocó en el crisol, seguidamente se introdujeron los crisoles a la estufa a 105°C por 1 hora, luego se dejó enfriar en el desecador por 30 minutos y se pesó el crisol con el filtro de vidrio en una balanza analítica, registrando el resultado como P1. Se expresó el resultado con la siguiente fórmula:

$$TSS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P1 - PO) \times 1000\ 000}{V \text{ (muestra ml)}} \quad (8)$$

- Determinación de sólidos suspendidos fijos (SSF)

Después de anotar el valor del P1, se transfirieron los crisoles a una mufa a 550°C durante 1 hora, se dejó enfriar el crisol en el horno a 105°C durante 30 minutos, luego en el desecador por 45 minutos y se procedió a pesar los crisoles en la balanza analítica, se registró el resultado como P2. Por último, se expresó el resultado con la siguiente fórmula:

$$SSF \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P2 - P0) \times 1000000}{V \text{ (muestra ml)}} \quad (9)$$

- Determinación de sólidos suspendidos volátiles (SSV)

Después se obtuvo los sólidos suspendidos volátiles de la diferencia entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos fijos.

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = SST - SSF \quad (10)$$

- Sólidos Sedimentables

Para la determinación de sólidos sedimentables se utilizó los conos Imhoff, primero se homogenizó la muestra de lixiviado y se vertió 1000 mL al cono Imhoff. Luego se dejó reposar por 45 minutos y con ayuda de una bagueta de vidrio se agitó lentamente sin tocar las paredes del cono, se dejó reposar otros 15 min y por último se determinó el volumen ocupado de sedimentación en el cono, se registró el resultado en mg/L.

Cloruro

Se usó el equipo iris-espectrómetro HI801 para la lectura del cloruro el cual está adaptado al método de tiocianato de mercurio (II). Se seleccionó el método coluro en el equipo y se utilizó dos viales de 22 mm, la primera se llenó con 10 mL de agua destilada y el segundo se llenó con 10 mL de la muestra de lixiviado, luego se añadió 0.5 mL del reactivo de cloruro A (HI 93753A) a cada vial, se mezcló durante 30 segundos, posteriormente se añadió 0.5 mL del reactivo de cloruro B (HI 93753B) a ambos viales, se mezcló por 30 segundos y se procedió a colocar en el soporte del equipo. Primero se colocó el vial que contiene agua destilada como blanco, seguidamente se colocó el vial con la muestra para la lectura del cloruro, por último, se registró el resultado en mg/L por triplicado.

4.6.1.2.3 *Análisis de los metales pesados*

Cianuro

El cianuro se determinó con el equipo iris-espectrómetro HI801 marca HANNA por el método Piridina-Pirazalona. En el equipo se seleccionó la opción CYANIDE y en una cubeta o vial de 22mm se rellenó 10 mL de la muestra sin reaccionar, luego se colocó en el soporte del equipo como el blanco, seguidamente se retiró el vial y se añadió 1 cucharada del reactivo cianuro A (HI93714A-0), agitando el vial por 30 segundos, luego se añadió un sobre del reactivo cianuro B (HI93714B-0), agitando el vial con el reactivo por 10 segundos, posteriormente se añade el reactivo C (HI93714C-0), agitando por 20 segundos el vial y esperar 25 minutos para la lectura del cianuro, por último se registró el resultado en mg/L por triplicado.

Níquel (Ni)

El níquel se determinó mediante el equipo iris-espectrómetro HI801 marca HANNA, el procedimiento para la medición es una adaptación del método 1-(2-piridilazo)-2-naftol (PAN). Primero se seleccionó el método níquel LR y en un vaso precipitado se llenó 25 mL de agua desionizada (que es nuestro blanco) y en otro vaso precipitado se llenó con 25 mL de la muestra de lixiviado, luego se añadió un paquete del reactivo níquel rango bajo A (HI93740A-0) a cada vaso precipitado, se cubrió el vaso y se agitó suavemente hasta que el reactivo se disolvió, seguidamente se añadió 1 mL del reactivo níquel B (HI93740B-0) y se agitó hasta mezclar, después de 15 minutos de reposo se añadió un sobre del reactivo níquel C (HI93740A-0) a ambos vasos precipitados y se agitó hasta mezclar. Por último, en un vial de 22mm se llenó 10mL del blanco y en otro vial se llenó 10 mL de la muestra reaccionada, seguidamente se introdujo el vial con el blanco en el soporte del equipo y se presionó ZERO, luego se retiró el vial y se colocó el segundo vial con la muestra, presionando READ para la lectura del Níquel en mg/L por triplicado.

Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Cromo total (Cr), Mercurio (Hg), Arsénico (As) y Cadmio (Cd)

La cuantificación de metales se analizó en un Espectrómetro de Emisión Óptica-Plasma de Acoplamiento Inductivo, ICP-OES 9820 Shimadzu. Para la determinación de Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, Hg, As y Cd se filtró 20mL de la muestra de lixiviado con filtros de diámetro $\varnothing=47\text{mm}$ y tamaño de poros $0.45\mu\text{m}$, posteriormente se colocó en tubos de ensayo y colocadas en el Espectrómetro de Emisión de Absorción Atómica (ICPE-9800) de la marca Shimadzu. Una vez insertada la muestra en el equipo se seleccionó las curvas de los parámetros que deseamos medir (Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, Hg, As, Cd) y el resultado demoró aproximada mente 10 min por cada metal pesado, el equipo reporto 3 valores para cada parámetro.

4.6.1.3. Determinación y cálculo del ICL

El cálculo del ICL se realizó de acuerdo a Kumar y Alappat, (2003a) y Sundara et al. (2020).

4.6.1.3.1 Cálculo del ICL Total

El ICL formulado por Kumar y Alappat, (2003a) contine 18 parámetros (Kumar y Alappat, 2005a) y cálculo se realizó de acuerdo a la Ecuación 11.

$$ICL = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

ICL , es el índice ponderado de contaminación por lixiviados (ICL)

w_i , peso para la variable del contaminante

p_i , es la puntuación del subíndice para la variable contaminante de lixiviados

m , es el número de parámetros contaminantes de lixiviados para de los que se dispone de datos, pero en ese caso $m < 18$ y $\sum_{i=1}^m w_i < 1$. (Kumar y Alappat, 2005)

Se realizo varios pasos para determinar el ICL en el RSA, como se muestra a continuación.

➤ Selección de variable (m)

Se eligieron dieciocho (16) parámetros del Lixiviado, de acuerdo, a Kumar y Alappat, (2003a), que fueron incorporados en el ICL, estos parámetros son: pH, sólidos disueltos totales (TDS), DQO, DBO₅, coliformes totales, nitrógeno amoniacal, cloruros, As, Zn, Cu, Ni, Fe, Cr, Hg, Pb y CN, compuestos fenólicos y nitrógeno total Kjendal.

➤ **Peso de las variables (w_i)**

El peso del contaminante se determinó en función a la significancia del parámetro, asimismo, los factores de ponderación para el peso del contaminante se calcularon a una escala de 1.00. (Kumar y Alappat, 2005a), como se observa en la Tabla 25.

Tabla 25

Parámetros del ICL con el peso del contaminante

Parámetro	Significancia	Peso del contaminante (w_i)
DQO	3.963	0.062
DBO ₅	3.902	0.061
Compuestos Fenólicos	3.627	0.057
Coliformes totales	3.289	0.052
pH	3.509	0.055
NTK	3.367	0.053
Nitrógeno Amoniacal	3.25	0.051
TDS	3.196	0.05
Cloruro	3.078	0.048
Cromo total	4.057	0.064
Plomo	4.019	0.063
Mercurio	3.923	0.062
Arsénico	3.885	0.061
Cianuro	3.694	0.058
Zinc	3.585	0.056
Níquel	3.321	0.052
Cobre	3.17	0.05
Hierro	2.83	0.044
Total	63.665	1.0

Fuente: tomado de (Kumar y Alappat, 2003)

➤ **Puntuación del contaminante (p_i), de acuerdo, a la Curva de subíndices**

La curva de subíndices es la relación entre la concentración y la contaminación del lixiviado. Para cada uno de los contaminantes Kumar y Alappat elaboraron curvas de subíndices la cuales se encuentra en el ANEXO 1.

4.6.1.3.2 Cálculo de los Subíndices de ICL

El ICL total se dividió en tres (3) Subíndices: ICLor, ICLin, ICLmp, estos subíndices indican el predominio de los contaminantes en función de sus concentraciones. Para encontrar la concentración de los contaminantes en el lixiviado, se realizó los análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Kumar y Alappat, 2005, agruparon en tres sub-ICL los 18 parámetros, que se indican a continuación en la Tabla 26.

Tabla 26

Sub-ICL

Sub ICL	Parámetro
ICL or	DBO ₅ , DQO, Compuestos fenólicos, coliformes totales
ICL in	pH, Nitrógeno total Kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, TDS, Cloruro
ICL mp	Hierro, cobre, níquel, Zinc, Plomo, Cromo, Mercurio, Arsénico, Cianuro

Fuente. Datos tomas de (Kumar y Alappat, 2005, pág. 232)

Determinación del sub-ICL y cálculo del ICL total

El cálculo del pesos o ponderación del contaminante (w_i) de los subíndices está a una escala de 1 para el ICLor, ICLin y ICLmp, como se observa en la siguiente Tabla 27.

Tabla 27

Parámetros del ICL con factores de peso de subíndices

Índice	Parámetro	Significancia	w_i
ICL Orgánico	DQO	3.963	0.267
	DBO ₅	3.902	0.263
	Compuestos fenólicos	3.627	0.246
	Coliformes totales	3.289	0.224
	Total		1
ICL Inorgánico	pH	3.509	0.214
	NTK	3.367	0.206
	Nitrógeno Amoniacal	3.25	0.198
	TDS	3.196	0.195
	Cloruro	3.078	0.187
	Total		1
ICL Metales Pesados	Cromo total	4.057	0.125
	Plomo	4.019	0.123
	Mercurio	3.923	0.121
	Arsénico	3.885	0.119
	Cianuro	3.694	0.114
	Zinc	3.585	0.11
	Níquel	3.321	0.102
	Cobre	3.17	0.098
	Hierro	2.83	0.088
Total		1	

Fuente: Kumar y Alappat, (2003a),

Asimismo, en la presente investigación se tomó dieciséis (16) contaminantes del lixiviado para el RSA.

Para el cálculo de sub-ICL se determinó, a las curvas de subíndices (p_i) en función a la concentración del contaminante (ANEXO 1) y el peso del contaminante (w_i) a partir de la Tabla 27, luego se sumó los valores de los subíndices para los tres Sub-ICL. Finalmente, el ICL total se calculó con la siguiente ecuación dada por Kumar y Alappat, (2003a),

$$ICL\ total = 0.232\ ICLor + 0.257\ ICLin + 0.511\ ICLmp \quad (12)$$

4.6.1.3.3 Cálculo del Índice de Contaminación para Países en vías de desarrollo (ICLvd)

Sundara et al., (2020) formularon un método para determinar el Índice de Contaminación por Lixiviado para países en vías de desarrollo (ICLvd). Este método es más preciso que el ICL propuesto por Kumar y Alappat, (2003). El ICLvd tiene un total de 20 parámetros, de los cuales 16 son los mismos que el ICL planteado por Kumar y Alappat. Los parámetros que se excluyeron fueron el pH y los compuestos fenólicos. Se agregaron 4 características nuevas: TSS, cadmio, volumen de lixiviado y revestimiento del relleno sanitario o vertedero, como se observa en la Tabla 28.

Tabla 28
Parámetros del ICL con el peso del contaminante

	Parámetro	Significancia	Peso del contaminante (w_i)
1	DQO	3.963	0.054
2	DBO ₅	3.902	0.053
3	CT*	3.289	0.045
4	Nitrógeno amoniacal	3.25	0.044
7	Sólidos disueltos totales	3.169	0.043
6	Cloruros	3.078	0.042
7	NTK	3.367	0.046
8	Cromo total	4.057	0.055
9	Plomo	4.019	0.055
10	Mercurio	3.923	0.054
11	Arsénico	3.885	0.053
12	Cianuro	3.694	0.05
13	Zinc	3.585	0.049
14	Níquel	3.321	0.045
15	Cobre	3.17	0.043
16	Hierro	2.86	0.039
17	cadmio	4	0.055
18	TSS	3.163	0.043
19	Volumen de descarga del Lixiviado	4.5	0.061
20	Revestimiento	5	0.068
		73.195	1.00

Fuente: Kumar y Alappat, (2003a), Sundara et al. (2020).

➤ Cálculo del revestimiento del relleno

Para el cálculo del revestimiento se consideró si el relleno o vertedero cuenta con un revestimiento incorporado y la edad de este, como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29

Índice de contaminación individual para el parámetro de revestimiento del relleno

Edad del revestimiento del relleno	Índice de contaminación individual
Revestimiento presente (menos de 20 años)	5
Revestimiento presente (21 a 30 años)	10
Revestimiento presente (31 a 40 años)	20
Revestimiento presente (más de 40 años)	30
Revestimiento no presente	100

Nota. Dato tomado de Sundara et al. (2020)

➤ Cálculo del volumen de descarga

El volumen diario del lixiviado también es un factor importante en el cálculo del ICLvd, de acuerdo a Sundara et al. (2020), el volumen de descarga influye significativamente en el valor del ICL total. Asimismo, el volumen puede estimarse utilizando la siguiente fórmula desarrollada por el Departamento de Medio Ambiente, Agua, Patrimonio y Artes de Australia (Ibrahim y Mahmood, 2016, citado por Sundara et al., 2020, pág. 5):

$$V = (0.15 \times R \times A) / 365 \quad (13)$$

Donde:

V, es el Volumen diario de descarga del lixiviado (m³/día)

R, es la precipitación anual (mm)

A, es la superficie del relleno (m²)

➤ Cálculo del ICLvd

El método de cálculo del ICLvd es similar al del ICL, como se explica en Kumar y Alappat (2005). La ecuación 14 es para el ICLvd.

$$ICLvd = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (14)$$

Donde:

ICLvd, es el índice ponderado de contaminación por lixiviados para países en vías de desarrollo

w_i , peso para la variable del contaminante

p_i , es la puntuación del subíndice para la variable contaminante de lixiviados

n , es el número de variables contaminantes de lixiviados utilizadas en el cálculo del ICL.

4.6.1.3.4 Índice de Contaminación de Lixiviado Estándar

Según las recomendaciones de Kumar y Alappat (2003), mencionan que los valores totales del ICL no deben superar el valor estándar del ICL de 7.37, ya que pronostica un grave impacto ambiental en el suelo y aguas superficiales. Es por ello que se clasificara la contaminación en alta y baja de acuerdo a la ponderación estándar de ICL.

4.6.1.3.5 Índice de Contaminación de Lixiviado estándar para los sub índices (ICLor, ICLin, ICLmp)

Maiti et al. (2016) y Kumar y Alappat (2003) definieron un estándar para los sub ICL, de acuerdo a las normas de vertido para lixiviados en aguas superficiales.

Tabla 30
ICL estándar, para los Subíndices

Índice	Parámetro	w_i	Normas de vertido de lixiviados (aguas superficiales)	subíndice valor p_i	$w_i p_i$
ICLor	DQO	0.267	250	10	2.67
	DBO ₅	0.263	30	6	1.58
	Compuestos fenólicos	2.46	1.0	5	1.23
	CT*	0.224	-	-	-
	Suma				5.48
				ICLor	7.03
ICLin	pH*	0.214	5.5-9.0	5	1.07
	Nitrógeno tota Kendal	0.206	100	6	1.24
	Nitrógeno amoniacal	0.198	50	7	1.39
	Sólidos disueltos totales	0.195	21000	7	1.37
	Cloruros	0.187	1000	8	1.50
	Suma				6.57
				ICLin	6.57
ICLmp	Cromo total	0.125	0.2	9	1.13
	Plomo	0.123	0.1	5	0.62
	Mercurio	0.121	0.01	6	0.73
	Arsénico	0.119	0.2	5	0.60
	Cianuro	0.114	0.2	6	0.68
	Zinc	0.110	5.0	6	0.66
	Níquel	0.102	3.0	10	1.02
	Cobre	0.098	3.0	18	1.76
	Hierro	0.088	-	-	-
	Suma				7.20
				ICLmp	7.89
ICL TOTAL		3			7.36

Donde: w_i es el peso del contaminante, están en unidades mg/L a excepción del pH y CT (*)

4.6.2 *Procesamiento y análisis de datos*

Los datos serán representados a través de la media aritmética, desviación estándar y el coeficiente de variabilidad los cuales se presentarán en tablas dinámicas, del mismo modo a través de diagrama de intervalos. Asimismo, para evaluar la diferencia significativa entre temporada y punto de muestreo se aplicó un análisis de varianza (ANVA) de dos factores, y para constatar la diferencia entre temporadas en el mismo punto de muestreo se aplicó la prueba Tukey al 5% de significancia.

El procesamiento de datos llevó a cabo mediante el software Minitab V20.3 y en hojas de cálculo de Excel versión 2018.

CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Variación de la precipitación

La presente investigación se realizó en el periodo de lluvias y el periodo seco o ausencia de lluvias del presente año, 2023. Asimismo, se recopiló información meteorológica, específicamente de las precipitaciones, entre el periodo de 1970- 2019 y las precipitaciones para el año de estudio (2023) y próximos al año de estudio.

5.1.1 Precipitación promedio mensual del periodo 1970 a 2019

Para el presente estudio se determinó la precipitación promedio anual para un periodo largo de 1970 a 2019, tomando datos de la estación meteorológica convencional del del distrito de Andahuaylas, el cual pertenecen al SENAMHI.

Tabla 31

Precipitación promedio mensual mm del periodo 1970-2019

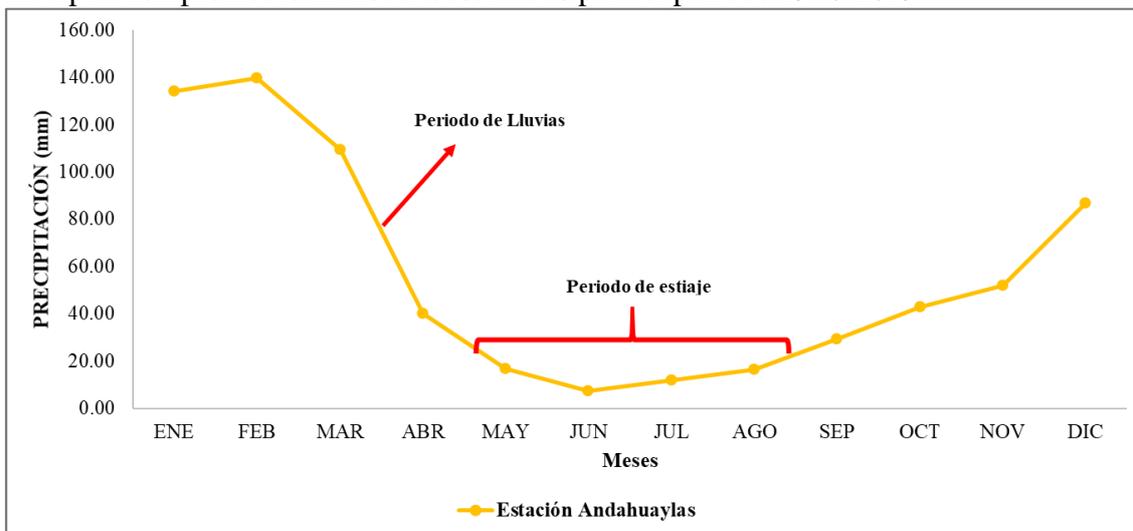
Mes	P(mm)
Enero	134.30
Febrero	139.64
Marzo	109.46
Abril	39.94
Mayo	16.76
Juno	7.28
Julio	11.94
Agosto	16.44
Septiembre	29.39
Octubre	42.90
Noviembre	51.91
Diciembre	86.75
ANUAL	686.73

Nota. Los datos de precipitación mensual fueron recopilados de la base de datos históricos del SENAMHI entre el periodo 1970-2019.

La Tabla 31, muestra la precipitación pluvial mensual del área de estudio, que oscila entre 7.28 y 134.30 mm/mes, siendo el valor medio anual 686.73 mm/año.

Figura 7

Precipitación promedio mensual observadas para el periodo 1970-2019

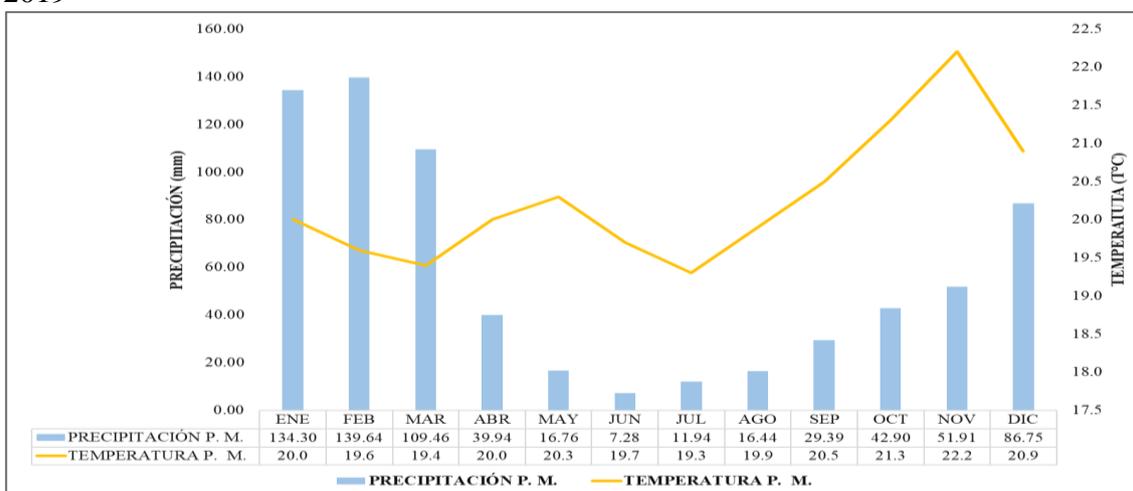


Nota. El grafico se realizó con los datos de precipitación mensual de la base de datos históricos del SENAMHI entre el periodo 1970-2019.

La Figura 7, muestra la estacionalidad de la precipitación a través de la estación meteorológica del distrito de Andahuaylas. Asimismo, se observa que en el distrito de Andahuaylas las mayores precipitaciones se da desde el mes de noviembre a abril y la mayor descarga de lluvia se dan en el mes de enero y febrero con un promedio aproximado de 115mm/mes entre el periodo 1970-2019, como se observa en la Tabla 32, por otro lado, la ausencia de lluvias o periodo seco se da en los meses de abril hasta octubre, este resultado coinciden con el análisis realizado por Cuba y Surco (2022) para el periodo de 1986-2015.

Figura 8

Climograma para precipitación y temperatura promedio mensual para el periodo 1970-2019



Nota. El grafico se realizó con los datos de precipitación mensual de la base de datos históricos del SENAMHI entre el periodo 1970-2019.

En la Figura 8, se observa un climograma con la precipitación y temperatura promedio mensual para el periodo 1970-2019, donde se observa el comportamiento de la temperatura en la zona de estudio. Asimismo, la provincia de Andahuaylas tiene una temperatura mensual de 20°C de acuerdo a los datos del SENAMHI (2019), lo cual varía poco a poco a lo largo del año.

5.1.2 Variaciones diarias y mensuales de las precipitaciones para el año de estudio (2020-2023)

Para el presente estudio se determinó la precipitación promedio anual para el año de estudio 2023, por lo cual se tomó datos satelitales, el cual pertenece a la NASA. En la Tabla 32, se muestra la tasa de precipitación media mensual.

Tabla 32

Serie temporal, área promedio de estimación de la tasa de precipitación media diaria (mm/día) durante 2020-01-01 - 2023-05-31, Región 73.36W, 13.6594S, 73.3502W

Mes/Año	2020	2021	2022	2023	Precipitación mm/mensual
Enero	88.88	119.95	168.79	160.17	134.45
Febrero	92.98	103.23	131.04	137.314	116.14
Marzo	75.37	105.89	128.71	110.27	105.06
Abril	21.37	67.16	31.18	52.97	43.17
Mayo	26.34	9.91	6.99	34.11	19.34
Junio	0.69	1.96	0.86	ND*	1.17
Julio	3.45	1.34	1.08	ND*	1.96
Agosto	9.85	5.37	8.63	ND*	7.95
Setiembre	9.58	21.37	14.04	ND*	14.99
Octubre	27.27	48.09	4.45	ND*	26.59
Noviembre	24.81	61.93	21.61	ND*	36.12
Diciembre	144.85	39.65	43.84	ND*	76.12
TOTAL (mm/año)	525.45	585.86	561.23	494.84	541.85

Nota. ND* información no disponible. La información se obtuvo de un Satélite Giovanni Nasa.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron la variación en la precipitación, la precipitación mínima en periodo de lluvias es de 76.12 mm en el mes de diciembre y la máxima es de 116.14 en el febrero. Para el periodo de estiaje la precipitación más baja es de 1.17 mm en el mes de junio y la más alta es de 7.95 mm en el mes de agosto.

Asimismo, en el año 2023 se tuvo una precipitación anual de 494.84 mm.

5.2 Evaluación de los parámetros físicos, químicos y biológico de los lixiviados

Se realizó los análisis del parámetro físicos como TDS; parámetros químicos como DQO, DBO₅, pH, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno Disuelto, Cloruros, Cianuro y metales pesados (Cromo total, Plomo, Mercurio, Arsénico, Zinc, Níquel, Cobre, Hierro, Cadmio) y biológicos como los Coliformes Totales en dos temporadas: temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y la temporada 2, correspondiente a la época de estiaje.

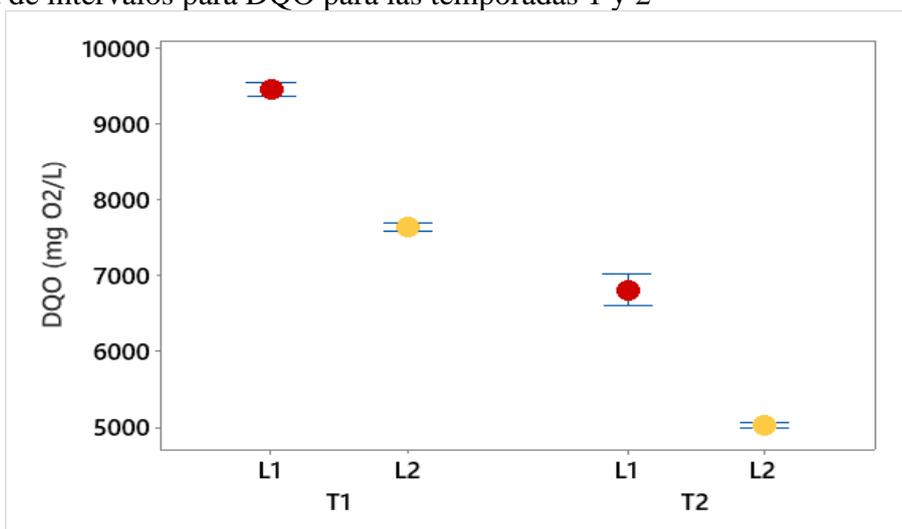
5.2.1 Compuestos Orgánicos

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El DQO mide la cantidad de oxígeno requerido para que los componentes orgánicos de los desechos se oxiden completamente (Hussein et al., 2019). La Figura 9, muestra los valores de la Temporada 1, correspondientes a época de precipitación, donde el primer pozo de lixiviación (L1) reportó un valor de 9446.7 mgO₂/L y el segundo pozo (L2) reportó 7633.3 mgO₂/L en la concentración de DQO. Por otro lado, en el Temporada 2, correspondiente a la época de estiaje, se reportó 6 806.7 mgO₂/L para L1 y en L2 de 5 016.8 mgO₂/L. Las altas concentración de DQO tiene el potencial de alterar las propiedades físicas del agua subterránea y superficial (Mor et al., 2018).

Figura 9

Diagrama de intervalos para DQO para las temporadas 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los valores antes mencionados muestran, que el DQO es mayor en L1, debido a que el lixiviado es drenado directamente del Relleno Sanitario, el drenaje no permite una exposición con el aire, por ende, no hay suministro de oxígeno que permita la oxidación; mientras que en L2 el valor es menor, esto sucede debido a que este pozo está más expuesto al aire, con un área superficial mayor además de mayor tiempo de retención, lo que permite mayor oxidación de la materia.

Valores altos se observó durante la temporada 1 en el primer pozo (L1), esto se debe a la mayor lixiviación de los residuos depositados influenciado por la lluvia, como observó Aluko et al. (2003) donde reportó una DQO alto de 3066.6 ± 1538.4 por la presencia de lluvias. Del mismo modo, Caroline et al. (2020), reportó valores altos de DQO durante el periodo lluvioso, según Moody y Townsend (2017), la lluvia juega un papel importante en la generación y calidad del lixiviado. Por lo contrario, Ñahui y Acosta, (2021), reportaron valores en su investigación sobre el botadero Edén, en Huancayo, en épocas de estiaje que oscilan de 85.22 a 130.60 mg O₂/L, indicando que la cantidad de DQO es baja, ya que el botadero tiene más de 10 años de edad.

Los valores indican que en L1 y L2, de la Temporada 1, se encuentra en fase acidogénica. En esta fase el valor de DQO oscila entre 6000 y 60 000 mg O₂/L (Christensen et al., 2001), a excepción del L2 en la temporada 2, que estaría pasando por una fase metanogénica donde el rango oscila entre 500 a 5000 mg O₂/L. De acuerdo a Christensen et al. (2001) y Harmsen (1983), en la fase acidogénica el 95% del contenido de DQO está formado por ácidos grasos volátiles (AGV) y en la fase metanogénica existe ausencia de AGV, y el 60% del contenido de DQO es material tipo húmico (AH) y el 30% como ácidos fúlvicos (AF).

Tabla 33:
Resultado del DQO en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2				
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV%	
L1	9446.7		35.1	0.37	A	6806.7	85.0	1.25	A
L2	7633.3		25.2	0.33	B	5016.8	15.3	0.30	B

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 3)

La Tabla 32, muestra los resultados obtenidos en la temporada 1 y temporada 2, similares a los rellenos sanitarios de Guanajuato y Toluca (México) que tuvieron concentraciones altas de 42000 mgO₂/L y 1084.6 mgO₂/L de DQO respectivamente (Rodríguez, 2014). Según Rakesh y Gayathri (2012) los Componentes típicos de lixiviados de un relleno de Residuos Sólidos Urbanos para el DQO están dentro del rango de 50 mgO₂/L a 99 000 mgO₂/L.

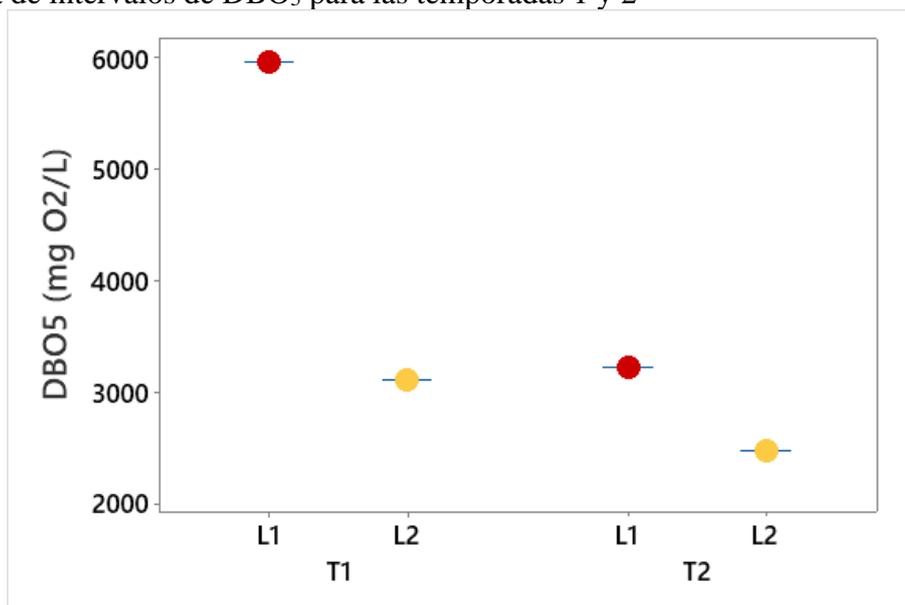
El RSA tiene 4 años de funcionamiento y actualmente está activo. Los lixiviados “jóvenes” generalmente provienen de rellenos que tienen menos de 5 años y son conocidos por su alta concentración de compuestos orgánicos biodegradables (Renou et al., 2008). Los valores reportados para relleno sanitario jóvenes, es de > 20 000 mgO₂/L para del DQO (Amokrane et al., 1997; Baig et al., 1999; Poznyak et al., 2008) por lo que nos conlleva afirmar que el DQO analizado en ambas temporadas estaría por debajo del rango de lixiviación para rellenos jóvenes, lo que indica que el relleno de Andahuaylas estaría entrando a la categoría de rellenos de edad intermedia (5 -10 años) donde existe la presencia de AGV, AH y AF (Abbas et al., 2009).

Demanda Bioquímica De Oxígeno 5 - DBO₅

EL DBO₅ mide la cantidad de oxígeno requerida por el microorganismo para descomponer el contaminante orgánico. El DBO₅ registrado en la temporada 1 de los puntos L1 y L2 fueron 5960.0 y 3110.0 mgO₂/L respectivamente y los valores registrados en la temporada 2 del punto L1 y L2 fueron de 3220.0 y 2470.0 mgO₂/L respectivamente, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10:

Diagrama de intervalos de DBO₅ para las temporadas 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los valores antes mencionados muestran, que el DBO₅ es mayor en L1, debido a la actividad bacteriana que se da en el drenaje de lixiviación del relleno que llega directamente al pozo L1. Asimismo, los cambios de temperatura tienen un efecto significativo en la descomposición microbiana de la materia y la descomposición de residuos orgánicos, dentro del relleno se genera calor dando lugar a temperaturas elevadas provocando el aumento de la actividad microbiana en el lixiviado, mientras que en L2 existe mayor tiempo de residencia previa oxidación rápida de materia orgánica generando la disminución de DBO₅.

Los altos valores observados de DBO₅ observados en la temporada 1, se debe a la influencia de la lluvia y la cantidad de residuos que llega al relleno sanitario. Aluko et al. (2003), reportó altas concentración del DBO₅ en los lixiviado durante la temporada de lluvias, también Caroline et al. (2020), reportó valores altos en el periodo de lluvias (2500 mgO₂/L) en comparación al periodo de estiaje (916 mgO₂/L), en este sentido se afirma que la precipitación pluvial es un factor importante en la generación de cantidad y calidad de lixiviados.

Tabla 34:Resultado del DBO₅ en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2			
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV %
L1	5960.0		0.0	0.0 A	3220.0		0.0	0.0 A
L2	3110.0		0.0	0.0 B	2470.0		0.0	0.0 B

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 5)

En la Tabla 34, se muestra valores promedios de DBO₅ entre 2470 a 5960 mgO₂/L, los cuales son típicos en rellenos que contienen un alto porcentaje de residuos orgánicos, tal es el caso del RSA, que recibe una gran cantidad de residuos orgánicos de la población (MPA, 2022, 2023). Sin embargo dichos resultados son similares a los reportados en la investigación de Caroline et al. (2020), que registró valores entre 916 y 7500 mgO₂/L en el relleno sanitario de Curitiba, Sur de Brasil (Relleno Joven-Activo) y Guerrero et al., (2014) reportó valores de 1032.0 y 2034.4 mgO₂/L para los rellenos sanitarios activos de Toluca y Guanajuato (México), respectivamente, indicando que el contenido orgánico de los Rellenos cerrados son significativamente menores a los rellenos activos. Por lo tanto, el RSA al estar activo y estar actualmente en funcionamiento contine altas concentraciones de materia orgánico.

Por su parte Qarani et al., (2010) indico que el DBO₅ varía dependiendo a la edad del relleno y proporcionó rangos para rellenos nuevos o jóvenes que oscila de 2 000 a 30 000 mgO₂/L de DBO₅, por lo tanto los resultados obtenidos del L1 y L2 en ambas temporadas (1 y 2) se encuentra dentro del rango de un relleno joven (< 5 años). Además, la normativa peruana de ECA para el agua de la categoría 4, indica que el nivel permisible de DBO₅ es de 20 mg/L y los valores obtenidos del L1 y L2 en ambas temporadas está por encima de la limitación, es decir que el lixiviado es altamente toxico para el medio acuático como ríos, lagos, y aguas subterráneas. La alta concentración de DBO₅ en el lixiviado indica que tienen una alta carga orgánica biodegradable, señal de actividades microbiológicas potencialmente grandes (Sunday y Baldwin, 2021).

Relación de DBO5/DQO

La tabla 32 y 33 muestran elevados valores de DBO y DQO los cuales son indicativos de un alto contenido de materia orgánica en los residuos (Kale et al., 2010). La relación de DBO₅/DQO, correspondiente a la temporada 1, es de 0.63 en L1 y 0.41 en L2, en la temporada 2 los valores fueron de 0.47 en L1 y 0.49 en L2, esto indica que la mayoría de los compuestos orgánicos son biodegradable.

Tabla 35

Relación de DBO₅/DQO para la Temporada 1 y 2

	Temporada 1		Temporada 2	
	L1	L2	L1	L2
DQO mgO₂/L	9446.6	7633.3	6806.7	5016.8
DBO mgO₂/L	5960	3110	3220	2470
DBO₅/DQO	0.63	0.41	0.47	0.49

Donde: L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los resultados de la relación de DBO₅/DQO, se muestran en la Tabla 35, donde se observa que existe una diferencia significativa entre el pozo L1 y pozo L2 de la temporada 1, el L1 reporto valores elevados de DQO y DBO₅, lo que significa que hay mayor índice de biodegradabilidad. Asimismo, la relación de DBO₅/DQO fue casi constante en la temporada 2 presentando valores en un rango de 0.4. Por su parte Kang et al. (2002), indicó que a medida aumenta la edad de un relleno disminuye la relación de DBO₅/DQO, manifestando la presencia de compuestos recalcitrantes o biorrefractarios en los lixiviados de rellenos maduros o viejos (Renou et al., 2008). Una relación superior a 0.4 indica que el lixiviado se encuentra en fase ácida, mientras que una relación inferior a 0.1 indica baja biodegradabilidad del contenido orgánico (Ehrig, 1988, citado por Hussein et al., 2019, pág. 6). Por otra parte, en el lixiviado se nota una disminución de la relación DBO₅/DQO a medida que envejecen los Rellenos sanitario. En el presente estudio de acuerdo valores de DBO₅/DQO registrados se encuentra en fase acidogénica.

Por otro lado, Rathod et al. (2013), evaluó el DBO₅/DQO en el relleno de Navi Mumbai, India, con valores que oscila entre 0.47 y 0.62 indicando que la mayor parte de los compuestos orgánicos son biodegradables, por otro lado, Babic et al.(2014) reportó el valor 0.3 para la relación de DBO₅/DQO en un relleno activo de Malasia, y de forma similar, Rashid et al.(2022), reporto el valor de 0.63 de DBO₅/DQO del relleno sanitario

Tanjaro, Iraq, que se encuentra activo, asimismo, Sunday y Baldwin (2021), evaluó la relación de DBO_5/DQO en el relleno de Pune, en India, con valores que oscila entre 0.6 a 0.75, del mismo modo Chaudhary (2022), reporto valores de 0.4 a 0.5 de DBO_5/DQO en el Relleno de Ghazipur - India, indicando que el relleno tiene una edad intermedia. Similares a los obtenidos en este estudio en L1 y L2, los cuales se encuentran dentro de una fase acidogénica. Además, la relación de DBO_5/DQO por encima de (> 0.1) observada en varios rellenos medianos y jóvenes citados en este estudio (< 10 años del relleno), como los de Navi Mumbai, Pune, Malasia, Ghazipur y Tanjaro, sugieren que tratamiento más adecuado para tratar el lixiviado es el Biológico (Hussein et al., 2019). Los parámetros de DQO y DBO refleja una caracterización más detallada del lixiviado y proporciona un método de juicio rápido en la selección del tratamiento del lixiviado.

Por su parte Naveen et al. (2005), menciona que la relación de DBO_5/DQO para rellenos jóvenes (< 5 años) es de ≥ 0.5 con un DQO mayor a $> 10\ 000\text{mgO}_2/\text{L}$, para rellenos intermedios (5 a 10 años), la relación es de 0.1 a 0.5 con un DQO que oscile de 500 a 10 000 mgO_2/L y para rellenos viejos (> 10 años) la relación es menor a < 0.1 y el DQO es mayor a $> 500\text{mgO}_2/\text{L}$. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la relación de DBO_5/DQO de la temporada 1 oscila de 0.63 a 0.41, perteneciendo a un relleno joven que esta por convertirse en un relleno intermedio. Y en la temporada 2 se reportaron datos de 0.47 a 0.49 para el DBO_5/DQO , el cual pertenece a un relleno intermedio, lo que afirma que el lixiviado del relleno está en una fase acidogénica.

Coliformes Totales - CT

En los lixiviados se puede encontrar algunos microorganismos como bacterias y arqueas que desempeñan un papel importante en la descomposición de los residuos orgánicos e inorgánicos. Además, algunas bacterias como E. coli, pseudomonas, enterococos, salmonella y staphylococcus que están presentes en los lixiviados de los rellenos sanitarios (Babic et al., 2014; Krishnamurthi & Chakrabarti, 2013).

La Tabla 36, muestra los valores de CT para la temporada 1, donde los valores en los puntos de muestreo L1 y L2 son de 1780.0 y 1200.0 NMP/100 mL respectivamente. Se observa que el pozo L1 presenta mayor cantidad de CT, debido a la actividad microbiana que se da en el drenaje de lixiviación del relleno que llega directamente al pozo L1, debido a los cambios de temperatura que desempeñan un papel importante en la activad

microbiana, ya que la descomposición de materia orgánica dentro del relleno puede generar calor dando lugar a temperaturas elevadas en el lixiviado; mientras que en el pozo L2 existe mayor tiempo de residencia de los microorganismos generando la disminución de la actividad microbiana.

Tabla 36

Resultados de Coliformes totales para la Temporada 1

Puntos de Muestra	Coliformes Totales	Unid. de medición
L1	1 780.0	NMP/100mL
L2	1 200.0	NMP/100mL

Donde: NMP es número más probable; L1, L2 son los puntos de muestreo

Por otra parte Caroline et al. (2020), reportó datos del relleno sanitario de Curitiba (Brasil), que recibió residuos sólidos durante más de 20 años, con valores elevados de $1.0E+03$ NMP/100mL a $2.42E+06$ NMP/100mL de CT, los cuales son superiores a los reportados en L1 y L2, según Aziz et al.(2013), el bajo contenido de coliformes se atribuye al alto contenido de salinidad que pueda contener el lixiviado como un limitante para el crecimiento bacteriano.

Tabla 37:

Resultados de Coliformes totales para la Temporada 2

Puntos de Muestra	Coliformes Totales	Unid. de medición
L1	1 230.0	NMP/100mL
L2	700.0	NMP/100mL

Fuentes: NMP es número más probable. L1, L2 son muestras de cada punto.

La Tabla 37, muestra los resultados de la Temporada 2 del CT para los puntos de muestreo L1 y L2 con 1230.0 NMP/100mL y 700.0 NMP/100mL respectivamente, donde el L1 es mayor al L2. El valor más alto de CT corresponde a la Temporada 1, por lo que pudo haber ocurrido una mayor concentración de bacterias por los residuos depositados en el relleno más el efecto de la percolación del agua (Aluko et al., 2003).

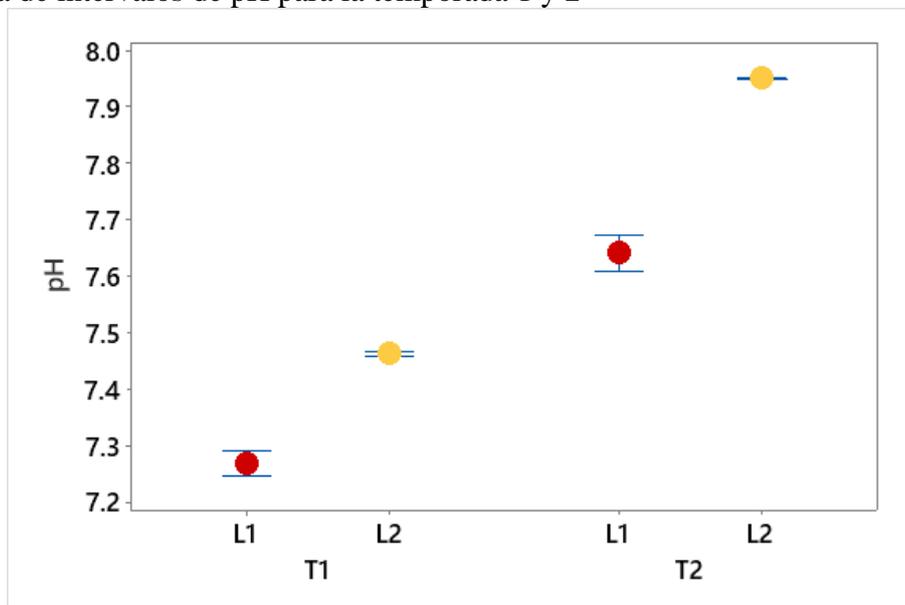
5.2.2 *Compuestos Inorgánicos*

Potencial de Hidrogeno - pH

Los valores medios de pH de los lixiviados de L1 y L2 en la temporada 1, oscilaron entre 7.268 y 7.463 y en la temporada 2 los resultados de pH en los puntos L1 y L2 fueron 7.641 y 7.950 respectivamente, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11:

Diagrama de intervalos de pH para la temporada 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

En la Figura 11, se observa que L2 es mayor al L1, debido a que el segundo pozo (L2) tiene mayor tiempo de residencia, dando valores pH altos, asimismo, los minerales alcalinos presentes en el lixiviados, tales como el calcio, sodio, potasio producen variaciones en el pH.

En la temporada 1, los valores de pH concuerdan con el rango para lixiviados de edad media (5 a 10 años) que oscila de 6.5 a 7.5 (Amokrane et al., 1997). El valor de pH en L1 y L2 no varía mucho, puesto que las moléculas de agua se disociaron para producir iones de hidrogeno e iones de hidroxilo neutralizando los efectos de acidez/alcalinidad en el Lixiviado (Siddiqi et al., 2022). Chaudhary, (2022), determinó el pH en el lixiviado proveniente de relleno de Ghazipur, India, con valores promedios que oscilan entre 6.24 a 6.88, sin embargo, Hoai et al. (2021), reporto valores de pH en el relleno de Nam Son, Vietnam que oscila entre 6.8 a 7.7, por otra parte, Renou et al. (2008), menciona valores de pH para los rellenos sanitarios de Canadá, Italia y china con valores de 6.58, 7.3 y 7.0 respectivamente, indicando que los valores de pH para los países en vías de desarrollo eran próximos a la neutralidad, siendo la media de 7.2 ± 0.51 . A diferencia de los países

desarrollados, que pueden ser muy ácidos (Visvanathan et al. ,2014, citado por Sundara et al., 2020), dichos resultados son similares a los reportados en la temporada 1.

Asimismo, en la temporada 2, se presenta valores de pH neutros, a excepción del L2 que presenta un pH casi alcalino por la presencia de carbonatos y bicarbonatos (Sundara et al., 2020). Los valores en L1 y L2 fueron superiores a 7.5 y se asocia a una fase metanogénica que se puede dar por la elevada concentración de nitrógeno amoniacal en el lixiviado (Caroline et al., 2020). Además del nitrógeno amoniacal y el pH puede variar de acuerdo a la concentración o proporción de sulfatos y cloruro (Bilgili et al., 2008), similares resultados llegaron en sus investigaciones Aluko et al. (2003), Caroline et al. (2020), Kale et al. (2010), Kumar y Alappat (2003), Rashid et al. (2022), Sunday y Baldwin (2021) donde los autores citados reportaron $\text{pH} > 7.5$.

Tabla 38:

Resultado del pH en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2			
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV %
L1	7.268		0.0096	0.11 B	7.641		0.013	0.15 B
L2	7.463		0.0015	0.02 A	7.950		0.0006	0.01 A

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 7)

En la Tabla 38, se muestra los valores promedios del pH de la temporada 1 y temporada 2, donde el pH aumenta con la edad del relleno sanitario, y según Daabes et al. (2013) los rellenos nuevos tienen valores de pH entre 4.5 – 7.5 y en los rellenos viejos o maduros el pH suele aumentar hasta 9. Sin embargo, se observa que los valores de la temporada 2 tuvieron un pH alto, mostrando un signo temprano de fase metanogénica. Durante esta fase, los AGV son degradados por las bacterias metanogénicas y reducen la fuerza orgánica del lixiviado, lo que genera un pH más alto, que mayormente se da en los rellenos sanitarios viejos (>10 años) (Daabes et al., 2013), también, Sunday y Baldwin (2021), menciona que los lixiviados viejos tienen un pH superior a 7.5. Por otra parte Zeng et al. (2013), indica que la descomposición de los residuos sólidos produce amoníaco, que finalmente forma iones de amonio e hidroxilos para causar la alcalinidad, elevando los niveles de pH a 8. Asimismo, una alcalinidad elevada en los lixiviados puede afectar a la acidez de las masas de agua cercanas como las aguas superficiales o subterráneas, lo que podría tener efectos negativos sobre la vida acuática y los ecosistemas (Zeng et al., 2013).

Sólidos Disueltos Totales - TDS

La tabla 39 muestra los resultados obtenidos de los sólidos de la temporada 1, donde se reportó valores altos de 7784 mg/L en L1 y 8568 mg/L en L2 de sólidos disueltos totales (TDS), asimismo los valores de sólidos totales (ST) oscilaron entre 8188 mg/L y 8667 mg/L en L1 y L2, respectivamente. Mientras que los valores más bajos se observaron en los STF con 35mg/L en L1 y 22 mg/L en L2. En la temporada 2, los valores altos de TDS oscilaron entre 8361.3 mg/L a 8621.3/L en L1 y L2 y los ST entre 8600 y 8800 mg/L en L1 y L2, respectivamente.

Las muestras recogidas en la temporada 1 y 2 se analizaron para evaluar el efecto de la precipitación en el contenido de sólidos, como se muestra en la Tabla 39. Los resultados indican altas concentraciones de ST y TDS, debido a la alta composición de materia orgánica de los residuos del relleno, por lo contrario, se obtuvo valores bajos de los TSS, STV, STF.

Tabla 39:

Comparación de los diferentes tipos de sólidos presentes en las muestras de lixiviado recogidas en el relleno: L1 – L2

	Resultados del análisis de sólidos											
	T1						T2					
	L1 (mg/L)			L2 (mg/L)			L1 (mg/L)			L2 (mg/L)		
	\bar{x}	\pm		\bar{x}	\pm		\bar{x}	\pm		\bar{x}	\pm	
TDS	7784	41.6	B	8568	104.6	A	8361.3	193	B	8621.3	23.4	A
TSS	202	18.0	A	49	8.33	B	119.3	11.02	A	89.3	11.72	B
STV	167	3.0	A	27.3	3.06	B	70.0	6.00	A	56.0	5.29	B
STF	35	15.00	A	22	6.00	B	49.3	9.87	A	33.3	6.43	B
ST	8188	20.8	B	8667	115.5	A	8600	173.0	B	8800.0	0.00	A

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 13, ANEXO 14, ANEXO, 15, ANEXO 16, ANEXO 17)

Los niveles de TDS y TS fueron muy elevados en ambas temporadas, debido al alto porcentaje de residuos sólidos alimentarios que llega al relleno. El TDS en los puntos L1 y L2 aumento en la temporada 2, como se observa en la Tabla 39. Según Hussein et al. (2019), el aumento de la concentración de TDS, STF, TS y STV muestra el grado de mineralización y, en última instancia, determina la turbidez, es decir que mientras aumente la concentración de partículas sólidas presentes en el agua aumenta la turbidez del agua.

Además, la contaminación de las aguas superficiales por los lixiviados puede afectar a la supervivencia del fitoplancton y otras comunidades de algas verdes, ya que el lixiviado reducirá las actividades fotosintéticas de los organismos debido a los altos niveles de turbidez (Hussein et al., 2019). Además, la ST en forma de ácidos xenobióticos, fúlvicos y húmicos podría ser gravemente perjudicial para los acuíferos naturales a través de la filtración, afectando a la calidad de las aguas subterráneas (Hussein et al., 2019). La mayoría de los estudios previos sobre caracterización de lixiviados se han centrado en la concentración de TDS. Muy pocos estudios han considerado la concentración de TSS, STV, STF y ST (Hussein et al., 2019a; Mor et al., 2018, Vahabian et al. 2019). Por lo contrario, mencionan Siddiqi et al. (2022), que la disminución del TDS reduce la eutrofización de las masas de agua que causa la muerte de organismos acuáticos

Mor et al. (2018), reporto valores altos de TDS en 3 Rellenos, en épocas de lluvias, que oscilan de 7261 a 12 263 mg/L, y en épocas secas se registró valores de 7 848 a 22 805 mg/L indicado que las altas concentraciones de TDS se da durante el periodo seco en comparación al periodo de lluvias, ya que, en el temporada seca los minerales del lixiviado se diluyen lo que afecta las concentraciones de TDS, de acuerdo a Maiti et al. (2016), encontró una alta concentración de TDS en lixiviados (1194 mg/L) durante un periodo seco en comparación con el periodo de lluvias (920mg/L). De forma similar, los resultados obtenidos en este estudio, se observa en la Tabla 39 donde los valores de la temporada 2, correspondientes al periodo seco, son mayores a la temporada 1, correspondiente al periodo de lluvias. Según Peixoto et al. (2018), menciona que el lixiviado joven presenta una mayor concentración de sólidos totales, con presencia de STV disminuyendo más rápido que los STF.

Asimismo, la normativa peruana los estándares de calidad de agua para la conservación del medio acuático, el nivel permisible de TSS, es de <100 mg/L y los valores obtenidos en L1 en ambas temporadas está por encima de la limitación, es decir que el lixiviado es altamente toxico para el medio acuático como ríos, lagos, y aguas subterráneas.

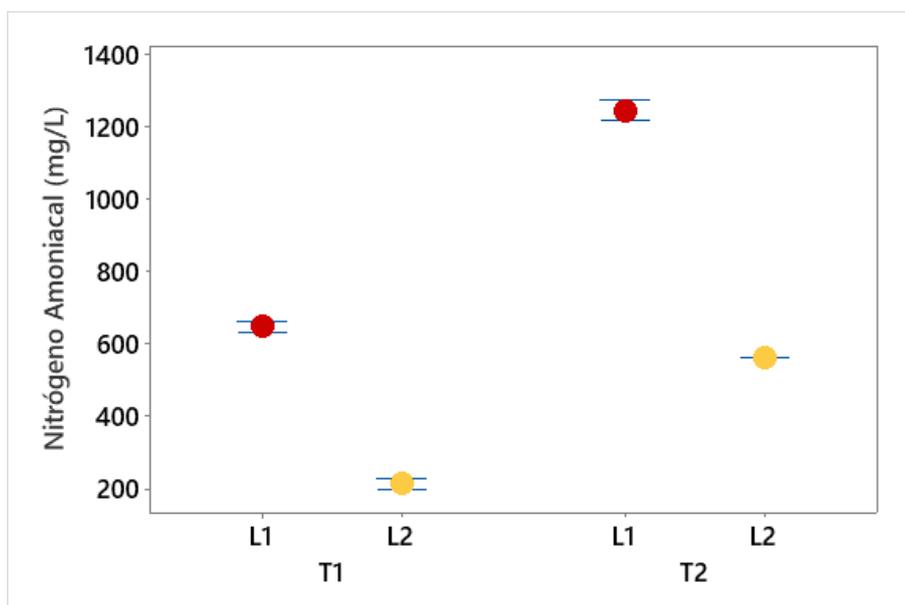
Nitrógeno Amoniacal – (NA)

La materia orgánica disuelta y el NA son parámetros de alta consideración en la contaminación ambiental. (Mandal et al., 2017). El NA es uno de los principales contaminantes del lixiviado porque persiste por un periodo más largo.

La Figura 12, la Temporada 1 presenta valores en el punto L1 de 646.67 y 213.33 mg/L en L2. Por otro lado, en la temporada 2, se reportaron valores en L1 de 1243.3 mg/L y en L2 de 560.0 mg/L de NA.

Figura 12

Diagrama de intervalos de Nitrógeno Amoniacoal para la Temporada 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

El valor de NA en el punto L1, es mayor en ambas temporadas, ya que el primer pozo está conectado al drenaje de Lixiviación, por ende, tiene mayor contacto con la materia orgánica depositada en el relleno sanitario, es decir, que los residuos depositados en el relleno pueden contener cantidades significativas de NA, proporcionando grandes cantidades en el Lixiviado. Los niveles altos de NA suelen ser tóxicos para la plantas y animales, puede contaminar las aguas subterráneas y contribuir a la eutrofización, que es un fenómeno que provoca el crecimiento excesivo de las algas en las aguas subterráneas (Fernandes et al., 2015).

Asimismo, los resultados de NA obtenidos en la temporada 2 son mayores que la temporada 1, probablemente relacionado al pH, ya que, en la temporada 2 se obtuvo

valores elevados de pH, lo provocaría que el nitrógeno se encuentre en su forma iónica dando un aumento del NA, generando que sea más soluble en el agua (Ghani et al., 2017).

Tabla 40
Resultado del Nitrógeno Amoniacal en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2				
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV %	
L1	646.67		5.77	0.89	A	1243.3	11.5	0.93	A
L2	213.33		5.77	2.71	B	560.0	0.0	0.00	B

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO18)

De acuerdo a Mor et al. (2018), la concentración de NA en los lixiviados de los vertedero de Chandigarh, SAS Nagar y Panchkula (India) presento valores de 2825, 2081 y 1773 mg/L respectivamente en periodos de lluvias y valores de 2046, 1640, 1550 mg/L en periodo seco respectivamente, indicando mayores concentración de NA en el periodo de lluvias. Por otro lado, en la Tabla 40, los valores de la temporada 2 (periodo seco), son mayores a la temporada 1 (periodo de lluvias), ya que, durante el periodo seco se presenta niveles bajos de agua en el relleno, generando que el lixiviado sea más concentrado y que las bacterias que descomponen la materia orgánica en el lixiviado son menos activas en este periodo, ya que necesitan agua para sobrevivir provoca mayor cantidad de NA en el Lixiviado.

Fernandes et al. (2015), indica que concentración de NA no tiene una tendencia decreciente con el tiempo, es decir que la concentración NA en el lixiviado de un relleno sanitario, no disminuye de forma natural con el tiempo, por otra parte, puede aumentar por varios factores como la descomposición de materia orgánica y la evaporación. Por lo tanto, el NA se ha identificado como el componente más significativo en el lixiviado a largo plazo. Además, el control del NA garantiza un tratamiento efectivo en el lixiviado.

Christensen et al. (2001), reporto valores de NA en la composición de lixiviados de 50 a 4500 mg/L, asimismo Méndez et al (2002), obtuvo resultados del relleno sanitario de Mérida (México) que oscila de 1120 a 2303 mg/L, también Farhana y Abdul (2017), obtuvo un valor de 1241 mg/L de NA en un relleno activo y joven (relleno Alor, India).

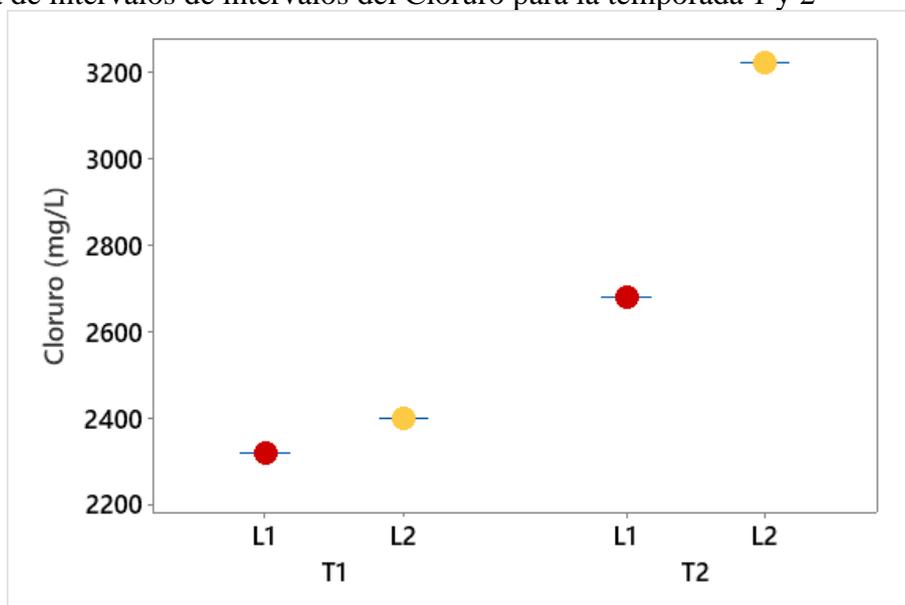
Por lo que, los resultados obtenidos en L1 y L2 se encuentran dentro del rango reportado en la investigación corroborando lo mencionado.

Cloruros

La Figura 13, muestra los valores de Cloruro en la temporada 1, donde en L1 se reportó los resultados de 2320.0 mg/L y en L2 de 2400.0 mg/L y en la Temporada 2, correspondiente a la época de estiaje, se reportó 2680.0 para L1 y en L2 de 3220. mg/L, asimismo, se muestra que el L2 es mayor en ambas temporadas (1 y 2).

Figura 13

Diagrama de intervalos de intervalos del Cloruro para la temporada 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los cloruros en L2 son mayores al L1, debido a los residuos depositados en el relleno pueden contener residuos de cloruros en productos de limpieza, desodorante, champús, cremas hidratantes, desinfectantes etc. que al descomponerse liberan cloruro, asimismo, el pozo L2 está más expuesto al aire, con un área superficial mayor además de mayor tiempo de retención provocando una acumulación del Cloruro en el lixiviado que puede llegar a ser perjudicial a niveles altos. Cabe destacar que el cloruro es un contaminante que puede afectar fuentes hídricas como aguas subterráneas y superficiales.

En la Figura 13, donde se observa que el contenido de cloruro es mayor en la temporada 2, debido a una acumulación de cloruro en el lixiviado, ya que en periodos

secos el agua de lluvia se evapora, lo cual provoca que exista menos cantidad de agua para diluir el cloruro generando un aumento en los niveles de cloruro en el lixiviado.

Tabla 41

Resultado del Cloruro en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2				
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV %	
L1	2320.0		0.0	0.0	B	2680.0	0.0	0.0	B
L2	2400.0		0.0	0.0	A	3220.0	0.0	0.0	A

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 11)

En Tabla 41, me muestra los valores promedios del cloruro en ambas temporadas, donde los valores oscilan de 2320 a 3220 mg/L, similares a los valores reportados por Caroline et al. (2020), en el relleno sanitario de Curitiba, Brasil, que oscilan entre 1890 a 3890 mg/L, asimismo, Bilgili et al. (2008) menciona el valor de 3390 mg/L para vertederos tradicionales, por otra parte Aluko et al., (2003), reporto valores para rellenos activos que oscilan entre 1271 a 1606 mg/L.

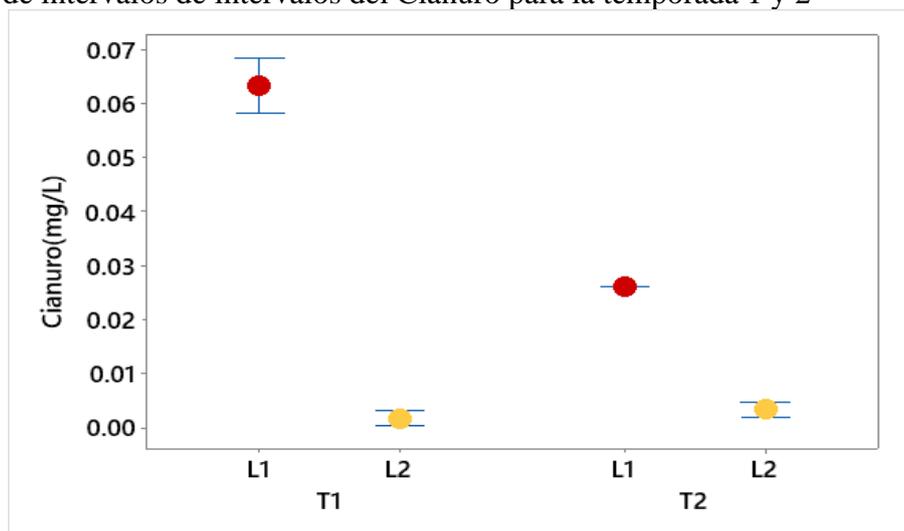
Cianuro (CN⁻)

El cianuro es un compuesto que contiene Carbono (C) y Nitrógeno (N) y se expresa en CN⁻, asimismo se usa en industrias de caucho, jébe y en la minería. Es una sustancia tóxica para el ser humano. El CN⁻ puede encontrarse en baterías, plásticos, pesticidas y productos de limpieza (Yu, 2007).

En la Figura 14, la Temporada 1 presenta valores en el punto L1 de 0.0633 y 0.0017 mg/L en L2 y en la temporada 2, se reportaron valores en L1 de 0.0266 mg/L y en L2 de 0.0033 mg/L de CN⁻.

Figura 14

Diagrama de intervalos de intervalos del Cianuro para la temporada 1 y 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

El valor de CN^- en el punto L1, es mayor en ambas temporadas, ya que el primer pozo está conectado al drenaje de Lixiviación, por ende, tiene mayor contacto con la materia orgánica depositada en el relleno sanitario, es decir que los residuos depositados en el relleno pueden contener cantidades significativas de CN^- provenientes de los residuos como baterías o pilas, proporcionando cantidades de CN^- en el Lixiviado. Asimismo, cabe destacar que los niveles altos de CN^- son tóxicos para las fuentes hídricas (Mahler y Almeida, 2020).

En Tabla 42, me muestra los valores promedios del cianuro en ambas temporadas, donde los valores oscilan de 0.0033 a 0.0633 mg/L de CN^- . Los valores de CN^- en la temporada 1 son mayores, la influencia de la lluvia puede ayudar a liberar el CN^- que se encuentra los residuos sólidos. Esto se debe a que la lluvia puede aumentar la temperatura y la humedad del relleno, lo que puede generar a que el CN^- se libere de los residuos (Lagas et al., 1982).

Tabla 42

Resultado del Cianuro en los puntos de muestreo y temporadas

Punto de Muestreo	Temporada 1				Temporada 2			
	\bar{x}	\pm	S	CV %	\bar{x}	\pm	S	CV %
L1	0.0633	0.0	0.0	B	0.0266	0.0	0.0	B
L2	0.0017	0.0	0.0	A	0.0033	0.0	0.0	A

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, CV % es el coeficiente de variación. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO 23)

El CN⁻ en los lixiviados procede principalmente de la eliminación de residuos industriales en los componentes de los residuos municipales. De acuerdo a Abunama et al. (2021), menciona que, en países africanos y asiáticos, se observaron valores medios de CN⁻ entre 0,261 mg/L y 0,216 mg/L respectivamente, que fueron los más altos entre otros continentes, sin embargo, se observaron valores mucho menores en Europa de 0,075 mg/L, Sudamérica de 0,055 mg/L y Norteamérica 0,025 mg/L. Estos resultados reportados en la investigación de Abunama et al. (2021) en Sudamérica, Norteamérica y Europa se asemejan a los obtenidos en L1 y L2.

5.2.3 Metales pesados

Los metales están presentes en todos los materiales, incluidos los seres vivos. Los desechos domésticos, especialmente cuando no se separan adecuadamente en su origen, pueden ser una fuente importante de metales. Los metales más comunes en el lixiviado son el arsénico (As, como metaloide), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y el zinc (Zn) (Mandal et al., 2017).

Se evaluó los metales pesados: Cr, Pb, Hg, As, Zn, Ni, Cu, Fe y Cd. La Tabla 43, se observa que los metales con la mayor media calculada para la temporada 1 fueron el As y el Fe con valores de 1.748 y 1.938 mg/L, respectivamente, del mismo modo, para la temporada 2, los metales con la mayor media calculada fueron nuevamente el As y el Fe con valores de 1.466 y 4.607 mg/L, respectivamente.

Tabla 43

Resultado de los metales pesados en los puntos de muestreo y temporadas

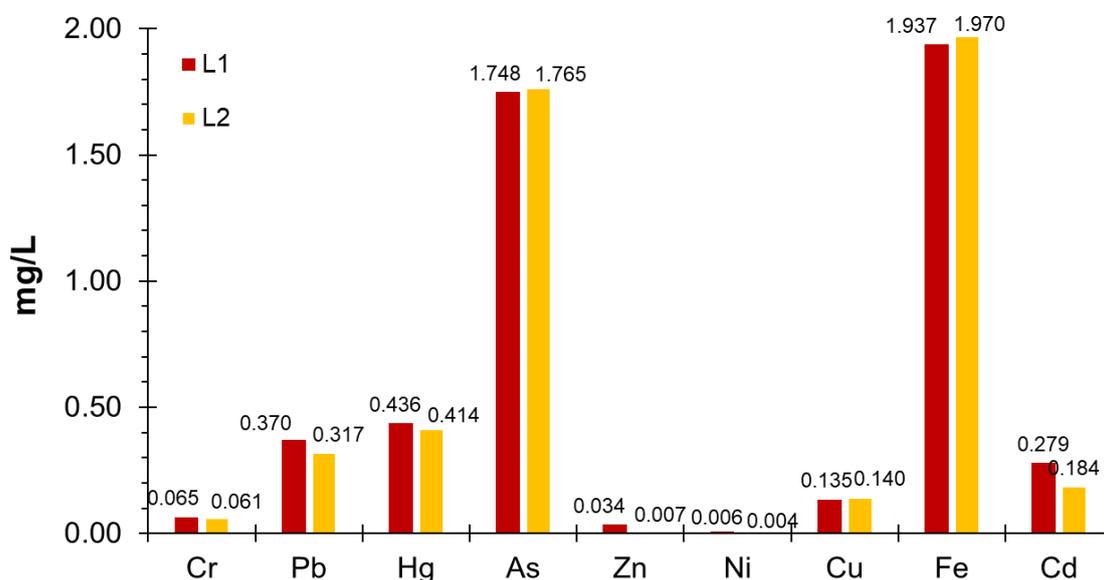
METALES PESADOS	TEMPORADA 1				TEMPORADA 2			
	L1		L2		L1		L2	
	\bar{x}	$\pm S$	\bar{x}	$\pm S$	\bar{x}	$\pm S$	\bar{x}	$\pm S$
Cr	0.065	0.001	0.061	0.000	0.066	0.000	0.068	0.000
Pb	0.370	0.000	0.317	0.003	0.467	0.025	0.510	0.020
Hg	0.436	0.000	0.414	0.001	0.442	0.002	0.451	0.002
As	1.748	0.046	1.765	0.031	1.466	0.032	1.543	0.020
Zn	0.034	0.002	0.005	0.003	0.290	0.002	0.275	0.001
Ni	0.006	0.000	0.004	0.000	0.0038	0.000	0.0036	0.000
Cu	0.135	0.004	0.140	0.004	0.085	0.008	0.081	0.006
Fe	1.938	0.174	1.970	0.170	4.607	0.038	1.837	0.012
Cd	0.279	0.029	0.184	0.011	0.221	0.005	0.242	0.003

Donde: \bar{x} es la media, S es la desviación de estándar, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

*Evaluada a través de un ANVA bifactorial y la prueba Tukey, con $\alpha = 5\%$ (Los cálculos se presentan en el ANEXO25, ANEXO 26, ANEXO27, ANEXO 28, ANEXO29, ANEXO30, ANEXO31, ANEXO32)

Figura 15

Gráfico de metales para la temporada 1



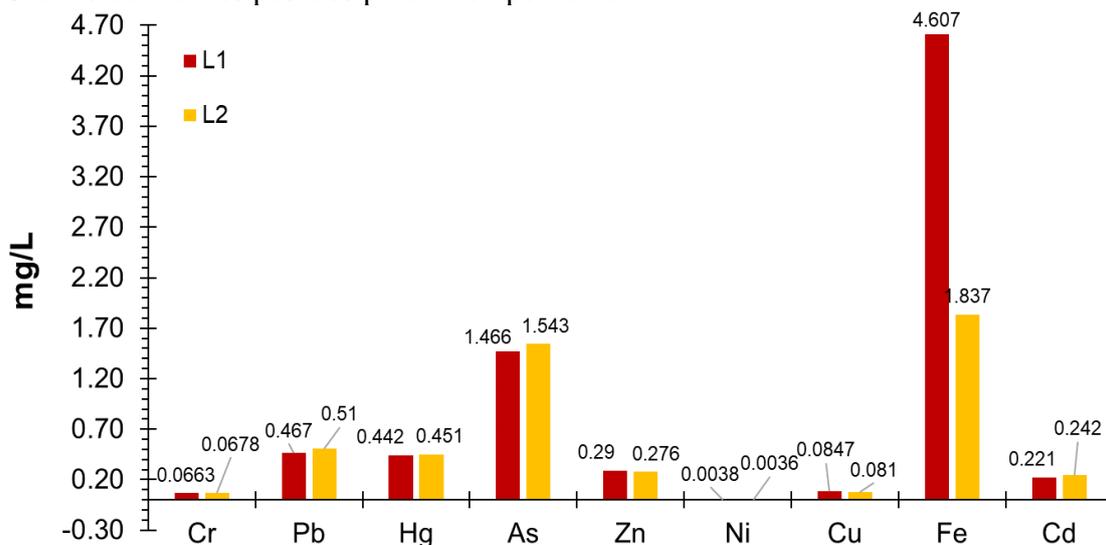
Donde: L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

El la Figura 15, se observa mayor presencia de As y Fe que están por encima de 1.500 mg/L en L1 y L2. Por otra parte, se muestra que el Pb, Cd y el Hg que están por encima de 0.150 mg/L. Asimismo, los valores altos de metales pesados en los lixiviados de un relleno generalmente se debe a los residuos depositados como baterías usadas, pinturas a base de Pb, efluentes industriales, plásticos, aparatos electrónicos, cerámica, bombillas y tuberías (Aziz et al., 2013). Además, el Pb se considera un contaminante importante en el cálculo del ICL.

Los valores de metales como Cr, Zn, Ni y Cu oscilan entre 0.1500 a 0.002 mg/L. Kjeldsen et al. (2002), indica que las concentraciones promedio de metales son bastante bajas en los lixiviados. Esto ha sido demostrado por varios estudios en los que los investigadores han informado concentraciones de metales en varios rellenos y vertederos, por lo cual, se concluyó que los metales pesados en la actualidad no son motivo de gran preocupación en los lixiviados de rellenos (Christensen et al., 2001).

Figura 16

Grafico de metales pesados para la temporada 2



Donde: L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

En la Figura 16, se muestra los metales pesados en la temporada 2, donde se observa que el As y el Fe tienen valores altos en comparación a los otros metales. Además, L1 es mayor a L2 en la concentración de Fe. El lixiviado también se caracteriza por una alta concentración de Fe y en menor medida de metales como Cu, Cr, Ni, Pb, Zn y Cd (Arunbabu et al., 2017).

Además, otra fuente de metales importante, específicamente del Fe, son los suelos arcillosos utilizados en las capas de cobertura y en los sistemas de impermeabilización. Los minerales que se encuentran en la arcilla utilizada en las capas de cobertura en el relleno sanitario, pueden ser degradados por el ácido carbónico que se encuentra en el agua de lluvia que se deriva del CO₂ atmosférico. Este proceso libera metales que se infiltran en el relleno junto con el agua, formando parte del lixiviado (Peixoto et al., 2018). Asimismo, (Edokpayi et al., 2018), reporta niveles altos de Fe, Ni y Al en el lixiviado del relleno sanitario de la municipalidad Thulamela, provincia de Limpopo. Montalvo y Quispe (2018), menciona que el Relleno sanitario de Cajamarca, Perú, presenta altos contenidos de metales tales como el Fe, Pb, Cr, Zn y As, indicando que la acumulación de metales tiene un alto grado de contaminación. Por otro lado, Saavedra (2019), reporta contaminación en el suelo por la presencia de metales provenientes del botadero Cuñumbuque, San Martín, indicando que los contaminantes con mayor concentración fueron Cd y Pb.

En la temporada 1 y temporada 2, las concentraciones de As, Pb, Cd y Hg son altas en comparación a los otros metales, según Daabes et al. (2013), señala que los metales más comunes en un relleno sanitario activo son la concentración de Cr, Mn y Cd. Esto podría deberse a la segregación y gestión de residuos sólidos en Andahuaylas.

En general las concentraciones de metales pesados fueron más altas en la temporada 1, a excepción del arsénico, ya que tuvo un aumento en la temporada 2. Las altas concentraciones se deben a la influencia de la lluvia lo que resulto en una generación considerable de lixiviados, en comparación a época seca (Daabes et al., 2013). Además, la alta concentración del As proviene de la eliminación incontrolada de los desechos electrónicos presentes en el chip de computados y pantallas. Ponthieu et al., (2007) señalaron que el arsénico está presente en el lixiviado en forma orgánica e inorgánica.

Por otra parte, los metales pesados pueden permanecer dentro de los rellenos sanitarios durante alrededor de 150 años si se lixivian a una tasa de 400 mm/año. El relleno sanitario está equipado con un sistema de recolección de lixiviados y un revestimiento lo que evitaba que los lixiviados se filtraran al suelo cercano y también a las aguas subterráneas (Hussein et al., 2019). La concentración de metales pesados en un relleno sanitario suele ser mayor en los primeros años debido a que tienen mayor solubilidad como resultado del bajo pH causado por la producción de ácidos orgánicos. Debido a la que se encuentra en una fase acidogénica, es decir que hay mayor presencia de materia orgánica y microorganismo, originando una reducción de metales.

Cabe destacar que, la concentración de metales pesados en los lixiviados de un relleno sanitario es importante para la selección de un método de tratamiento de lixiviados (Daabes et al., 2013).

5.3 Evaluación del Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL)

5.3.1 ICL de los Compuestos Orgánicos (ICLor)

Los componentes orgánicos normalmente están formados por la combinación de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno en algunos casos. Los principales grupos de compuestos orgánicos son las proteínas, grasas y aceites (Kumar y Alappat, 2005a). Por

otra parte, el ICLor está constituido el DQO, DBO y CT, estos parámetros proporciona información sobre la biodegradabilidad del lixiviado en un determinado momento, asimismo los cambios que se dan en la biodegradabilidad puede controlarse comprobando la relación de DBO₅/DQO (Kumar y Alappat, 2003).

La Tabla 44, muestra el cálculo del ICLor correspondiente a la Temporada 1 en el relleno de Andahuaylas, reportando un valor de 51.565 en L1 y 48.730 en L2 evidenciando que existe diferencia considerable.

Tabla 44
Cálculo del ICLor para Temporada 1

TEMPORADA 1											
			L1				L2				
	P	Sig	Conc. (mg/L)	w _i	p _i	(p _i)(w _i)	Conc. (mg/L)	w _i	p _i	(p _i)(w _i)	
ICL orgánico	DQO	3.963	9446.67	0.267	78	19.491	7633.33	0.267	73	20.826	
	DBO ₅	3.902	5960	0.263	53	13.939	3110	0.263	49	12.887	
	CT*	3.289	1780	0.224	75	16.800	1200	0.224	73	16.352	
ICLor						51.565	ICLor				48.730

Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante, ICLor es el Índice de Contaminación por Lixiviados de los compuestos orgánicos. L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los resultados del ICLor en la temporada 2, se muestran en la Tabla 45, donde se observa que existe una diferencia entre el L1 y L2. Asimismo, presenta valores altos en L1 de 48.769 y en L2 presento un valor de 43.470.

Tabla 45
Cálculo del ICLor para Temporada 2

TEMPORADA 2											
			L1				L2				
	P	Sig	Conc. (mg/L)	w _i	p _i	(p _i)(w _i)	Conc. (mg/L)	w _i	p _i	(p _i)(w _i)	
ICL orgánico	DQO	3.963	6806.67	0.267	70	18.690	5016.8	0.267	65	17.355	
	DBO ₅	3.902	3220	0.263	54	14.202	2470	0.263	43	11.309	
	CT*	3.289	1230	0.224	71	15.904	710	0.224	66.1	14.8064	
ICL org						48.796	ICL org				43.470

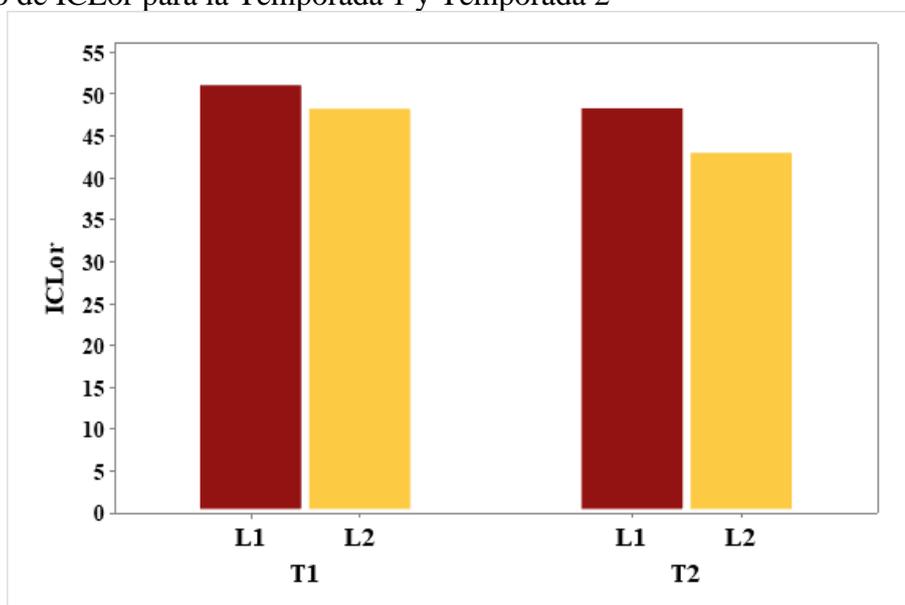
Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante, ICLor es el Índice

de Contaminación por Lixiviados de los compuestos orgánicos, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

En la Figura 17, se observó que el punto L1 fue más alto en la temporada 1 y 2, debido a las altas concentraciones de DQO, DBO y CT en el lixiviado, además de ser un indicativo de la fase acidogénica (Sunday y Baldwin, 2021). Por otra parte, el ICLor es mayor en la temporada 1, debido a la influencia de la lluvia, puesto que se reportaron altas concentraciones de DQO y DBO en la temporada 1. Aluko et al. (2003) y Caroline et al. (2020), reportaron valores altos de DBO y DQO durante la temporada de lluvias, indicando que la precipitación pluvial es un factor importante en la generación de cantidad y calidad de lixiviados.

Figura 17

Gráfico de ICLor para la Temporada 1 y Temporada 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Ebinimitei y Opololaoluwa (2022), determino el ICLor del Relleno Central de Yenagoa, Nigeria, con un valor de 29.073, mientras Rodríguez (2014), presentó un ICLor de 35.466 en el relleno de Guanajuato, por otro lado, Mor et al. (2018), indico que el relleno ubicado en la ciudad de Nagar, India, presento resultados de 35.991 de ICLor, por su parte, Kumar y Alappat (2015) reportaron un valor de 32.707 para el Relleno Municipal Nueva Delhi, India, indicando que los países en vías de desarrollo presentan valores altos en el ICLor, ya que el 60% de los residuos que genera son residuos orgánicos (Sundara et al., 2020). Sin embargo, los resultados de los autores mencionados son menores a los

reportados en el L1 y L2, debido a la edad del relleno, mientras más joven sea el relleno o vertedero los compuestos orgánicos son altos.

En tanto, Hoai et al. (2021), reportó resultados de ICLor entre 46.90 y 50.60 en el vertedero de Nam Som, en Vietnam; donde indicó que el ICLor es mayor por la influencia de las precipitaciones. Del mismo modo, Maiti et al. (2016), reportó un valor de 53.09 para el ICLor del Relleno Activo de Kolkata, en India, Angmo et al. (2023), presentó resultados de 81.4 a 90.5 en el ICLor del relleno de Okhla, nueva Delhi (India).

De acuerdo a Maiti et al (2016), el valor estándar para el ICLor es de 7.03. Angmo et al. (2023) presentó un valor estándar de 5.62, Hoai et al. (2021) indica que el valor estándar para el ICLor es de 24.4, Los L1 y L2 superan estos valores estándar para el ICLor.

5.3.2 ICL de los Compuestos Inorgánicos (ICLin)

El componente inorgánico del ICL está formado por cloruros, pH, NA, NTK y TDS, asimismo, el peso del contaminante (w_i) en el ICLin se han recalculado en una escala de 1 como si fuera un índice absoluto (Kumar y Alappat, 2005a). El ICLin tiene su propio significado e importancia a la hora de plantear un sistema de tratamiento de lixiviados, debido a que los algunos parámetros presentes en el lixiviado pueden plantear dificultades en tratamiento del mismos.

Los resultados del ICLin correspondiente a la temporada 1, se muestran en la Tabla 46, donde se observa que existe una diferencia entre el L1 y L2, con valores promedios de 21.953 para el punto L1 y 11.497 para el punto L2. Asimismo, el valor del subíndice (p_i) para el NA en ambas temporadas es alto, lo cual se debe tener en cuenta para el cálculo del ICLin.

Tabla 46
Cálculo del ICLin para la Temporada 1

TEMPORADA 1											
ICL inorgánico	P	Sig	L1				L2				
			Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	
			pH	3.509	7.268	0.214	5	1.07	7.463	0.214	4
NA	3.25	647.667	0.198	75	14.85	213.33	0.198	20	3.960		
TDS	3.196	7784	0.195	15.5	3.0225	8568	0.195	17	3.315		
Cl ⁻	3.078	2320	0.187	16.1	3.0107	2400	0.187	18	3.366		
ICL in					21.953	ICL in					11.497

Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante, el ICLin índice de contaminación por lixiviados de los compuestos inorgánicos, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los resultados ICLin para la temporada 2, se muestran en la Tabla 47, donde se observa que existe una diferencia considerable entre el L1 y L2. Los valores reportados en L1 es de 27.711 y en L2 es de 21.059. Por otro lado, los valores del L1 son superiores a los valores registrados en la temporada 1.

Tabla 47
Cálculo del ICLin para la Temporada 2

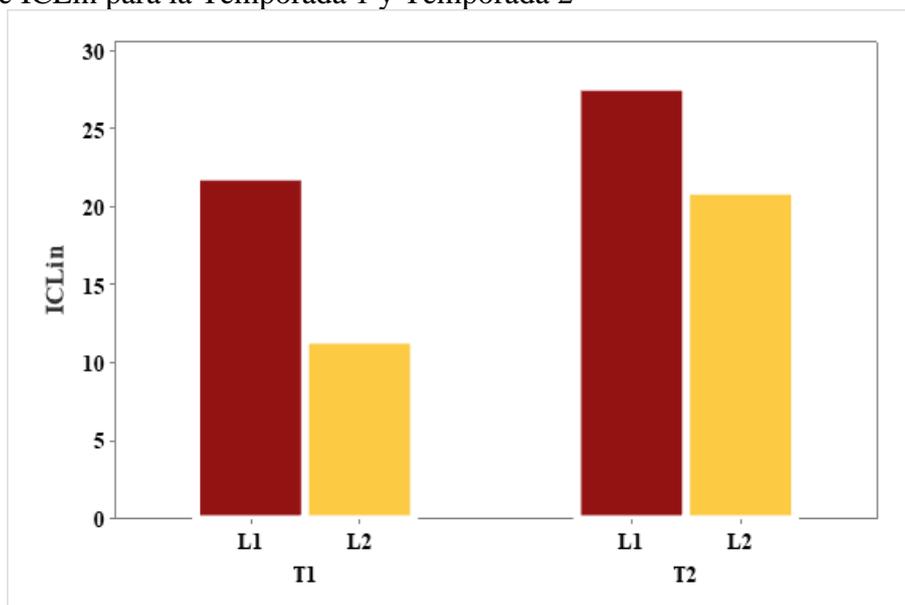
TEMPORADA 2											
ICL inorgánico	P	Sig	L1				L2				
			Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	
			pH	3.509	7.641	0.214	4	0.856	7.95	0.214	3.5
NA	3.25	1243.333	0.198	100	19.800	560	0.198	60	11.880		
TDS	3.196	8361	0.195	17	3.315	8621	0.195	18.3	3.569		
Cl ⁻	3.078	2680	0.187	20	3.740	3220	0.187	26	4.862		
ICL in					27.711	ICL in					21.059

Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante, el ICLin índice de Contaminación por Lixiviados de los compuestos inorgánicos, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

En la Figura 18, se observa que los valores del ICLin en L1 son altos en ambas temporadas, debido a la concentración del NA en el lixiviado. En el pozo L2 el ICLor en menor, debido a que existe mayor tiempo de residencia de los contaminantes, reduciendo el valor del ICLin.

Figura 18

Grafico de ICLin para la Temporada 1 y Temporada 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Por otro lado, se observa en la Figura 18, que los valores de ICLin de la temporada 2, son mayores a la temporada 1, ya que, el periodo seco presenta niveles bajos de agua en el relleno, generando que el lixiviado sea más concentrado. Asimismo, las bacterias que descomponen la materia orgánica en el lixiviado son menos activas en el periodo seco, debido a que necesitan agua para sobrevivir provocando mayor cantidad de NA en el Lixiviado lo que favorece el aumento del ICLin. Siddiqi et al. (2022), detectó un valor elevado de los parámetros de lixiviados en temporada sin lluvias.

Maiti et al. (2016), reporto valores de ICLin de 51.73 y 48.57 para vertederos activos y cerrados, en kolkata (India), respectivamente, indicando que los principales contaminantes para el ICLin fueron el NTK y NA, ya que contribuyeron con un 40% y un 38%, respectivamente, en un vertedero activo. Asimismo, en su investigación Sunday y Baldwin (2021), determino el CILin del 2 rellenos sanitarios de Ibadam (Nigeria) con valores de 5.25 y 5.37, por otra parte, Angmo et al. (2023), reportó valores de 40.58 en periodo secos y 25.94 en periodo de lluvias del relleno sanitario Okhla, indicando que la concentración de cloruro, NA y TDS es mucho más alta en periodos secos favoreciendo un incremento del ICLin. De forma similar, Hoai et al. (2021), presento valores de ICLin para el Relleno sanitario de Nam Son que oscilan de 35.8 a 42.9, indicando que el ICL del relleno sanitario estaba denominado principalmente por contaminantes orgánicos e inorgánicos, además que el ICLin varía de acuerdo a la precipitación mensual dando un

valor alto en estaciones secas, debido a que se mantuvo una concentración alta del NA. Siendo, los resultados obtenidos en L1 y L2, son similares a los reportados en la investigación de los autores mencionados.

De acuerdo a Maiti et al (2016), el valor estándar para el ICLin es de 6.57. Angmo et al. (2023) presento un valor estándar de 3.81, Hoai et al. (2021) indica que el valor estándar para el ICLin es de 5.5, los resultados en L1 y L2 superan estos valores estándar.

5.3.3 ICL de los Metales Pesados (ICLmp)

Varios metales como el Cr, Pb, Zn, Ni, Cu, Fe y Hg son componentes importantes de los lixiviados producidos en los rellenos y vertederos. Gran parte de estos metales están clasificados como contaminantes prioritarios (Kumar y Alappat, 2005a). La Agencia de Protección del medio Ambiente de EE.UU. ha identificado cerca de 129 contaminantes prioritarios, los cuales se seleccionaron en función de su carcinogenicidad, genotoxicidad o toxicidad aguda. También se han incluido en este grupo 2 contaminantes prioritarios no metálicos: el As y el CN⁻. De acuerdo a Kumar y Alappat (2005) considera el Cianuro dentro del ICL metales pesados, porque es un contaminante prioritario, asimismo los factores de ponderación de los contaminantes incluidos en este subíndice se han recalculado en una escala de 1 siendo el Índice de Contaminación por Lixiviado de los metales pesados (ICLmp) un índice absoluto. El ICLmp es un índice que mide la concentración de metales pesados en el lixiviado.

Los resultados del ICLmp para la temporada 1, se muestran en la Tabla 48, donde se observa que no existe una diferencia, asimismo el punto L1 presenta un valor de 10.213 y el punto L2 presentó un valor de 10.617.

Tabla 48
Cálculo del ICLmp en la Temporada 1

TEMPORADA 1											
	P	Sig	Conc. (mg/L)	L1			L2				
				w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	
ICL Metales Pesados	Cr	4.057	0.0648	0.125	5	0.625	0.0614	0.125	5	0.625	
	Pb	4.019	0.3701	0.123	6	0.738	0.3171	0.123	6	0.738	
	Hg	3.923	0.4355	0.121	45.1	5.457	0.4135	0.121	50	6.050	
	As	3.885	1.7481	0.119	7	0.833	1.7648	0.119	5	0.595	
	CN	3.694	0.0633	0.114	5	0.570	0.0017	0.114	5	0.570	
	Zn	3.585	0.0343	0.11	5	0.550	0.0069	0.11	5	0.550	
	Ni	3.321	0.0061	0.102	5	0.510	0.0039	0.102	5	0.510	
	Cu	3.17	0.135	0.098	5	0.490	0.1403	0.098	5.5	0.539	
	Fe	2.83	1.937	0.088	5	0.440	1.97	0.088	5	0.440	
ICL mp						10.213	ICL mp				10.617

Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante. Cr: Cromo total, Pb: Plomo, Hg: Mercurio, As: Arsénico, Zn: Zinc, Ni: Níquel, Cu: Cobre, Fe: Hierro y Cd es cadmio, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Los resultados ICLmp para la temporada 2, se muestran en la Tabla 49, donde se observa que no existe una diferencia significativa entre el L1 y L2. Los valores reportados en L1 es de 10.808 y en L2 es de 10.870. Por otro lado, los valores en L1 y L2 son mayores a la temporada 1.

Tabla 49
Cálculo del ICLmp en la Temporada 2

TEMPORADA 2											
	P	Sig	Conc. (mg/L)	L1			L2				
				w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	Conc. (mg/L)	w_i	p_i	$(p_i)(w_i)$	
ICL Metales Pesados	Cr	4.057	0.0663	0.125	5	0.625	0.0678	0.125	5	0.625	
	Pb	4.019	0.467	0.123	6	0.738	0.51	0.123	7	0.861	
	Hg	3.923	0.442	0.121	51	6.171	0.451	0.121	50	6.050	
	As	3.885	1.466	0.119	6	0.714	1.543	0.119	6.5	0.774	
	CN	3.694	0.026	0.114	5	0.570	0.0033	0.114	5	0.570	
	Zn	3.585	0.29	0.11	5	0.550	0.276	0.11	5	0.550	
	Ni	3.321	0.0038	0.102	5	0.510	0.0036	0.102	5	0.510	
	Cu	3.17	0.0847	0.098	5	0.490	0.081	0.098	5	0.490	
	Fe	2.83	4.607	0.088	5	0.440	1.837	0.088	5	0.440	
ICL mp						10.808	ICLmp				10.870

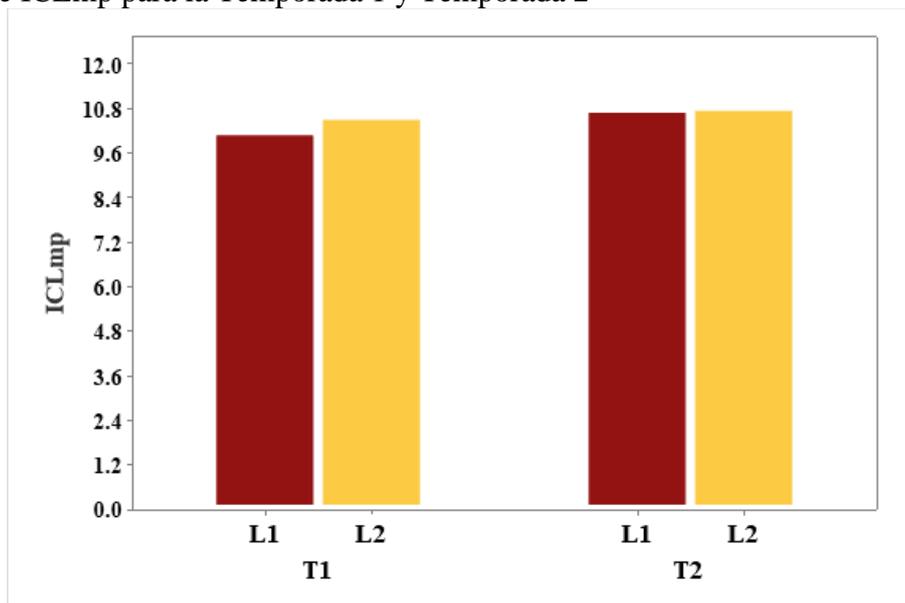
Donde: P es el parámetro, Sig. es la significancia del contaminante, Conc. es la concentración del contaminante, w_i es el peso de contaminación, p_i es el valor del subíndice del contaminante. Cr: Cromo total,

Pb: Plomo, Hg: Mercurio, As: Arsénico, Zn: Zinc, Ni: Níquel, Cu: Cobre, Fe: Hierro y Cd es cadmio, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

En la Figura 19, donde se observa que los valores del ICLmp en L1 y L2 son similares en ambas temporadas, debido a la baja concentración de metales en el lixiviado. En el pozo L2, el ICLmp no varía mucho, debido a que existe mayor tiempo de residencia de los metales, lo que mantiene el valor del ICLmp.

Figura 19

Grafico de ICLmp para la Temporada 1 y Temporada 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

Por otro lado, se observa que los metales en la temporada 1 y 2 que existe una pequeña diferencia, que podría atribuirse al volumen comparativamente mayor de constituyentes de residuos peligrosos depositados en la temporada de lluvias y la temporada de estiaje, predominando residuos de laboratorio, farmacéuticos entre otros que pueden contener metales pesados, como el Hg, Pb y Cd que son tóxicos para el medio ambiente (Sunday y Baldwin, 2021).

Las bajas concentraciones de metales pesados ICLmp ayudan al crecimiento del microorganismo y ayudan al tratamiento biológico de lixiviados, debido a que los metales pesados pueden ser tóxicos para los microorganismos, lo que dificulta su crecimiento. Cuando los niveles de metales pesados son bajos, los microorganismos pueden crecer y multiplicarse más fácilmente, lo que ayuda a degradar los contaminantes del lixiviado (Sunday y Baldwin, 2021).

Maiti et al. (2016), reportaron un ICLmp de 16.37 y 16.46 para un vertedero activo y un vertedero cerrado, respectivamente, indicando que el mercurio fue el contaminante dominante en ICLmp, representando alrededor del 60% en el vertedero activo y un 67% en los vertederos cerrado. Por otra parte, Angmo et al.(2023), presentaron valores de ICLmp para el relleno de Okhla, nueva Delhi, que oscilan de 5.24 a 6.64 en periodo de lluvias y periodo seco, respectivamente, el mismo estudio también fue realizado por Hoai et al. (2021), en el Relleno de Nam Som, en Vietnam, observando que le ICLmp eran bajos e indico que el ICL era muy baja durante los periodos de lluvia. Sin embargo, Sunday y Baldwin (2021), mencionó valores de ICLmp de dos relleno en Ibadan, en Nigeria, los datos obtenidos son 5.13 y 4.45 para el relleno de Ajakanga y Awotan, respectivamente, indicando que los bajos valores del ICLmp son consistentes con los hallazgos del relleno sanitario de Harewood Whin en el Reino Unido (Kumar y Alappat, 2005). Los resultados obtenidos en L1 y L2 del ICLmp son bajos, debido a la baja concentración de metales, estos resultados son similares a los reportados por los autores antes mencionados.

De acuerdo a Maiti et al (2016), el valor estándar para el ICLmp es de 7.89. Angmo et al. (2023) presenta un valor estándar de 6.94, Hoai et al. (2021) indica que el valor estándar para el ICLmp es de 5.0, los resultados en L1 y L2 superan estos valores estándar para el ICLmp.

5.3.4 ICL Total Del Relleno Sanitario de Andahuaylas (ICLtotal).

El Índice de Contaminación por Lixiviado (ICL) proporciona un método para evaluar el potencial de contaminación de diferentes vertederos y rellenos sanitarios. Para lo cual se analizó el ICL total y el ICLvd (índice de contaminación para países en vías de desarrollo) en ambas temporadas.

Los resultados de ICL total en la temporada 1 y 2, se observa en la Tabla 50. Para la temporada 1, el valor del ICL total en el punto L1es de 25.690, mientras que en el punto L2, valor es de 22.152, siendo mayor el valor del punto L1. Para la temporada 2, los valores del ICL total son de 26.976 y 23.693 para el punto L1 y L2, respectivamente, donde le L1 también es mayor.

Tabla 50

Cálculo del ICL total para la Temporada 1 y Temporada 2, de acuerdo a, Kumar y Alappat (2003)

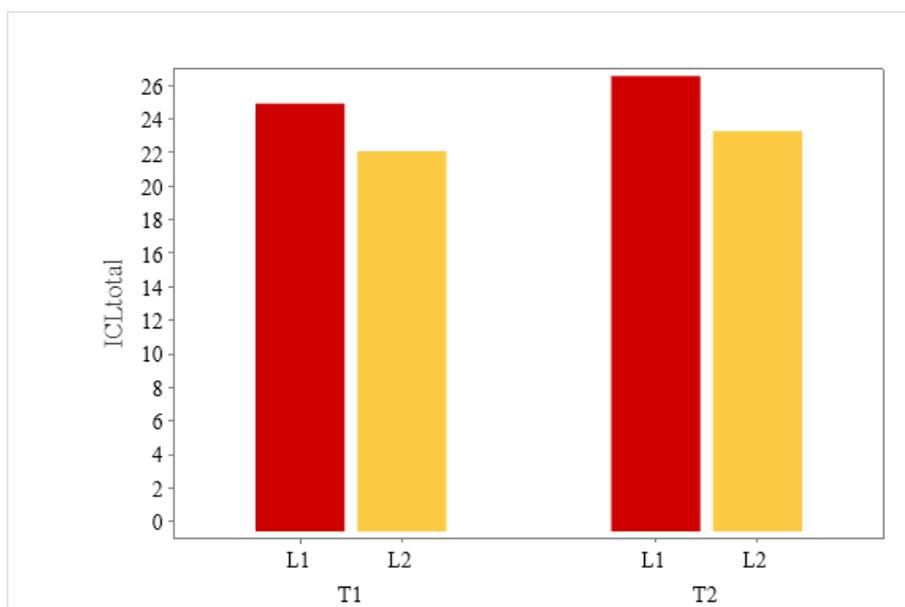
P	TEMPORADA 1								TEMPORADA 2							
	Concentración mg/L		p_i		w_i		Índice general de contaminación $w_i \times p_i$		Concentración mg/L		p_i		w_i		Índice general de contaminación $w_i \times p_i$	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DQO	9446.67	7633.33	78	73	0.062	0.062	4.526	4.836	6806.67	5016.8	70	65	0.062	0.062	4.340	4.030
DBO ₅	5960	3110	53	49	0.061	0.061	3.233	2.989	3220	2470	54	43	0.061	0.061	3.294	2.623
CT*	1780	1200	75	73	0.052	0.052	3.900	3.796	1230	710	71	66.1	0.052	0.052	3.692	3.437
pH*	7.268	7.463	5	4	0.055	0.055	0.275	0.220	7.641	7.95	4	3.5	0.055	0.055	0.220	0.193
NA	647.667	213.33	75	20	0.051	0.051	3.825	1.020	1243.333	560	100	60	0.051	0.051	5.100	3.060
TDS	7784	8568	15.5	17	0.050	0.050	0.775	0.850	8361	8621	17	18.3	0.050	0.050	0.850	0.915
Cl ⁻	2320	2400	16.1	18	0.048	0.048	0.773	0.864	2680	3220	20	26	0.048	0.048	0.960	1.248
Cr	0.0648	0.0614	5	5	0.064	0.064	0.320	0.320	0.0663	0.0678	5	5	0.064	0.064	0.320	0.320
Pb	0.3701	0.3171	6	6	0.063	0.063	0.378	0.378	0.467	0.510	6	7	0.063	0.063	0.378	0.441
Hg	0.4355	0.4135	45.1	50	0.062	0.062	2.796	3.100	0.442	0.451	51	50	0.062	0.062	3.162	3.100
As	1.7481	1.7648	7	5	0.061	0.061	0.427	0.305	1.466	1.543	6	6.5	0.061	0.061	0.366	0.397
CN ⁻	0.0633	0.0017	5	5	0.058	0.058	0.290	0.290	0.026	0.0033	5	5	0.058	0.058	0.290	0.290
Zn	0.0343	0.0069	5	5	0.056	0.056	0.280	0.280	0.290	0.276	5	5	0.056	0.056	0.280	0.280
Ni	0.0061	0.0039	5	5	0.052	0.052	0.260	0.260	0.0038	0.0036	5	5	0.052	0.052	0.260	0.260
Cu	0.135	0.1403	5	5.5	0.050	0.050	0.250	0.275	0.0847	0.0810	5	5	0.050	0.050	0.250	0.250
Fe	1.937	1.970	5	5	0.044	0.044	0.220	0.220	4.607	1.837	5	5	0.044	0.044	0.220	0.220
TOTAL						0.889	22.528	20.003					0.889		23.982	21.063
ICL							25.690	22.152							26.976	23.693

Donde: ICL el Índice de Contaminación por Lixiviados Total, L1 es el primer pozo de lixiviación, L2 en el segundo pozo de lixiviación, w_i es el peso del contaminante, p_i es el valor del subíndice, P es el parámetro.

En la Figura 20, donde se observa que el punto L1 es mayor en ambas temporadas, debido a que es el primer pozo de lixiviación que está conectado directamente del drenaje de lixiviación, lo que favorece la actividad bacteriana. Además, la descomposición de residuos orgánicos dentro del relleno puede generar calor, dando lugar a temperaturas elevadas en el lixiviado, lo que provoca el aumento en el DQO, el DBO y la actividad microbiana. Por lo tanto, los valores altos del ICL están relacionados a la alta concentración en los componentes orgánicos (Hussein et al., 2019). Asimismo, Hossain et al. (2016), en su investigación calculó el ICL orgánico, inorgánico y metales pesados del relleno de Dhaka, indicando que el ICL inorgánico era alto, debido a una alta concentración de DQO y DBO, por lo tanto, sugiere que el DQO tiene mayor efecto en el aumento del ICL total. Mientras que en L2, que es el segundo pozo, existe mayor tiempo de residencia, donde la materia orgánica disminuye con el tiempo.

Figura 20

Gráfico del ICL total para la Temporada 1 y Temporada 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

El ICL total en la temporada 2 (L1 y L2) es mayor que la temporada 1, estos valores se atribuyen a altas concentraciones de DBO, DQO y ciertos componentes metálicos (As, Cr y Fe), ya que los parámetros fisicoquímicos del lixiviado tienen un impacto significativo en el cálculo del ICL (Mor et al., 2018). En la temporada 1, los valores de ICL son menores debido a que los contaminantes presentes en el lixiviado se diluyen con la lluvia, lo que provoca una menor concentración de estos parámetros en el

período de mayor precipitación (Abunama et al., 2021). La disminución de la concentración de los parámetros afecta el valor del subíndice y el valor de ICL total. Por otro lado Abunama y Nilam (2021), reportó el ICL para 2 rellenos sanitarios, en Malasia, en zonas húmedas y zonas semiáridas con valores de 25.1 y 29.5, respectivamente, indicando que los valores del ICL para el relleno en zonas semiáridas son más altas que en zonas húmedas, informando que los parámetros como el carbono total y la conductividad disminuyen con el aumento de la lluvia. Además, los resultados de este estudio concuerdan con los estudios de Abunama y Nilam (2021), donde los altos niveles de lluvia en climas húmedos tienen un efecto significativo en el DQO, Carbono total, NA y metales pesados donde la concentración se reduce debido a la lluvia.

Umar et al. (2010) calcularon ICL para dos rellenos activos y uno cerrado en Malasia, reportando valores de 19.50 y 21.77 para los dos rellenos activos y 16.44 para el relleno cerrado. Los valores de ICL fueron bajos, en comparación con los resultados observados en este estudio. Por otra parte, Ofomola et al. (2017) y Salami et al. (2015) también calcularon el ICL para vertederos activos en Ughelli y Lagos, Nigeria, presentando valores 11.95 y 11.32, respectivamente. Asimismo, Ibezute y Erhunmwunse (2018), reportó un ICL de 22.31 para el relleno activo de Ikhueniro en la ciudad de Benin, Nigeria. Por otro lado, Simon y Adianimovie (2022) presento valores de ICL total para el vertedero de Central de Yenagoa, Nigeria, que oscilan de 15.757 a 17.004. Sin embargo, los valores reportados por Kumar y Alappat (2005b) fueron 36.48 y 39.04 para rellenos activos. Los valores de ICL de este último son muy superiores a los reportados en este estudio, debido a las concentraciones relativamente más altas de la DBO y el DQO en el lixiviado.

Los valores altos de ICL indican que el lixiviado tiene la capacidad de contaminar las aguas subterráneas en las inmediaciones del relleno, por lo cual se debe tomar medidas para prevenir la contaminación al medio ambiente (Hussein et al., 2019).

La Tabla 51, donde se observa los resultados de Índice de Contaminación por Lixiviados para países en vías de desarrollo (ICLvd) en la temporada 1 y 2. Para la temporada 1, el valor del ICLvd en el punto L1 es de 26.083, mientras que en el punto L2, valor es de 22.698, siendo mayor el valor del punto L1. Para la temporada 2, los valores del ICLvd son de 26.651 y 24.198 para el punto L1 y L2, respectivamente, donde el L1 es mayor.

Tabla 51

Cálculo del ICLvd para la temporada 1 y temporada 2, de acuerdo, a Sundara et al. (2020)

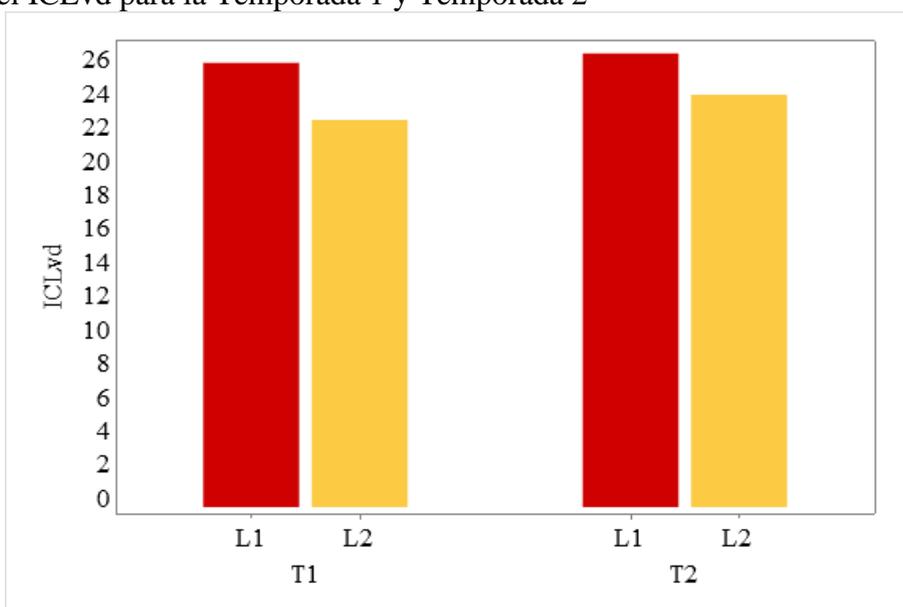
P	TEMPORADA 1								TEMPORADA 2							
	Concentración mg/L		p_i		w_i		Índice general de contaminación $w_i \times p_i$		Concentración mg/L		p_i		w_i		Índice general de contaminación $w_i \times p_i$	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DQO	9446.67	7633.33	78	75	0.054	0.054	4.212	4.050	6806.7	5016.8	70	65	0.054	0.054	3.780	3.510
DBO ₅	5960	3110	53	49	0.053	0.053	2.809	2.597	3220	2470	54	43	0.053	0.053	2.862	2.279
CT*	1780	1200	75	73	0.045	0.045	3.375	3.285	1230	710	71	66. 1	0.045	0.045	3.195	2.975
TSS	202	49	5	5	0.043	0.043	0.215	0.215	119.3	89.3	5	5	0.043	0.043	0.215	0.215
NA	647.667	213.33	75	20	0.044	0.044	3.300	0.880	1243.3	560	100	60	0.044	0.044	4.400	2.640
TDS	7784	8568	15.5	17	0.043	0.043	0.667	0.731	8361	8621	17	18. 3	0.043	0.043	0.731	0.787
Cl ⁻	2320	2400	16.1	18	0.042	0.042	0.676	0.756	2680	3220	20	26	0.042	0.042	0.840	1.092
Cr	0.0648	0.0614	5	5	0.055	0.055	0.275	0.275	0.0663	0.055	5	5	0.055	0.055	0.275	0.275
Pb	0.3701	0.3171	6	6	0.055	0.055	0.330	0.330	0.467	0.055	6	7	0.055	0.055	0.330	0.385
Hg	0.4355	0.4135	45.1	50	0.054	0.054	2.435	2.700	0.442	0.054	51	50	0.054	0.054	2.754	2.700
As	1.7481	1.7648	7	5	0.053	0.053	0.371	0.265	1.466	0.053	6	6.5	0.053	0.053	0.318	0.345
CN ⁻	0.0633	0.0017	5	5	0.050	0.050	0.250	0.250	0.026	0.05	5	5	0.050	0.050	0.250	0.250
Zn	0.0343	0.0069	5	5	0.049	0.049	0.245	0.245	0.29	0.049	5	5	0.049	0.049	0.245	0.245
Ni	0.0061	0.0039	5	5	0.045	0.045	0.225	0.225	0.0038	0.045	5	5	0.045	0.045	0.225	0.225
Cu	0.135	0.1403	5	5.5	0.043	0.043	0.215	0.237	0.0847	0.043	5	5	0.043	0.043	0.215	0.215
Fe	1.937	1.97	5	5	0.039	0.039	0.195	0.195	4.607	0.039	5	5	0.039	0.039	0.195	0.195
Cd	0.279	0.184	35	23	0.055	0.055	1.925	1.265	0.221	0.055	26	29	0.055	0.055	1.430	1.595
Vol.	330.19	330.19	45	45	0.061	0.061	2.745	2.745	330.19	330.19	45	45	0.061	0.061	2.745	2.745
Rev.	Aprox. 5 años	Aprox. 5 años	5	5	0.068	0.068	0.340	0.340	Aprox. 5 años	Aprox. 5 años	5	5	0.068	0.068	0.340	0.340
TOTAL					0.951		24.805	21.586					0.951		25.345	23.012
ICLvd							26.083	22.698							26.651	24.198

Donde: ICLvd el Índice de Contaminación por Lixiviados para países en vías de desarrollo, Total, L1 es el primer pozo de lixiviación, L2 en el segundo pozo de lixiviación, w_i es el peso del contaminante, p_i es el valor del subíndice, P es el parámetro.

En la Figura 21, se observa que el ICLvd en L1 es mayor en ambas temporadas, debido a la concentración de los contaminantes y al volumen de descarga que también es un factor muy importante en el ICLvd. Por lo tanto, es importante que el volumen de lixiviado también se tenga en cuenta al determinar el potencial de contaminación del lixiviado. Sin embargo, el RSA no tenía datos sobre la descarga diaria de lixiviados. Esto se debe a que la relleno no tiene un control del sistema de recolección de lixiviados; por lo tanto, no se puede determinar la cantidad precisa de volumen de lixiviado (Sundara et al., 2020). Por otro lado, se observa que el ICLvd en la temporada 2 es mayor que la temporada 1, debido a la concentración de contaminantes y al volumen de descarga del lixiviado. En la temporada 1, los valores de ICLvd son menores, ya que la lluvia diluye los contaminantes presentes en el lixiviado. Esto provoca una menor concentración de estos parámetros en el lixiviado (Abunama et al., 2021).

Figura 21

Gráfico del ICLvd para la Temporada 1 y Temporada 2



Donde: T1 es la temporada 1, correspondiente a la época de lluvias y T2 es la temporada 2, correspondiente al periodo de estiaje, L1 es el primer pozo de muestreo, L2 es el segundo pozo de muestreo.

El ICLvd tiene en cuenta el volumen de lixiviado, lo que ayuda a determinar el verdadero impacto de contaminación del lixiviado. Otro aspecto importante que se considera al evaluar el índice de la contaminación por lixiviados es la presencia de revestimientos en los sitios de disposición de residuos. Sin revestimientos, el lixiviado no tratado se infiltrará directamente en las aguas subterráneas, causando una contaminación ecológica. Todos los vertederos evaluados en Bhalla et al.(2014); Ofomola et al. (2017) y

Salami et al. (2015) no tenían revestimientos, algo que siempre se pasa por alto cuando se utiliza el ICL total para evaluar el impacto de los lixiviados.

Por otra parte, Sundara et al. (2020), señala que el ICL_{vd} es más preciso que el ICL total, ya que, este solo cuenta con la concentración de componentes orgánico, inorgánicos y metales pesados en el lixiviado pero no incluye el volumen ni el revestimiento del relleno o vertedero. además, el relleno puede variar por las condiciones climáticos, el tipo de residuo y la edad del relleno. Además, un relleno con un ICL alto puede no tener un impacto ambiental significativo si el volumen del lixiviado es bajo, mientras que un vertedero con un ICL bajo puede tener un impacto ambiental significativo si el volumen del lixiviado es alto, el revestimiento son barreras que se colocan en el fondo del relleno para evitar que el lixiviada se infiltre en las aguas subterráneas. Los botaderos que no cuentan con revestimiento son más propensos a contaminar las aguas subterráneas.

Maiti et al. (2016), presentó un ICL estándar (India), en base a los límites de eliminación de lixiviados tratados para aguas superficiales de 7.37, por otro lado, Angmo et al. (2023), reportó un ICL estándar (India) para lixiviados tratados con un valor de 7.31, asimismo Hoai et al. (2021), presento un ICL estándar (Vietnam) en base al reglamento técnico nacional sobre aguas residuales en los rellenos de residuos sólidos con un valor de 9.6.

Por lo tanto, los resultados obtenidos en L1 y L2 en ambas temporadas, superan el ICL estándar (7.37) propuesto por Kumar y Alappat (2003), lo que indica que el lixiviado tiene el potencial de contaminar las aguas subterráneas en las inmediaciones del relleno, por lo cual se debe tomar medidas para prevenir.

Tabla 52

Comparación de los ICL de rellenos y vertederos para los distintos países internacional

N°	Localización	Tipo	País	Estado	ICL Calculado	Referencia
1	Relleno sanitario de Vissershok	Relleno Sanitario	África	Activo	46.55	(Sundara et al., 2020)
2	Relleno sanitario de Okhla, Nueva Delhi	Relleno Sanitario	India	Activo	42.18	(Kumar y Alappat, 2003)
3	Relleno sanitario de Varanasi	Relleno Sanitario	India	Activo	37.91	(Sundara et al., 2020)
4	Relleno sanitario de Turbhe,	Relleno Sanitario	India	Activo	37.55	(Sundara et al., 2020)
5	Relleno Sanitario de Turbhe	Relleno sanitario	India	-	36.83	(Wijekoon et al., 2022)
6	Relleno sanitario Sungai Sedu	Relleno Sanitario	Malasia	Activo	35.13	(Sundara et al., 2020)
7	Relleno sanitario de Guanajuato	Relleno sanitario	México	Activo	34.84	(Rodríguez, 2014)
8	Vertedero de Dhapa, Kolkata	Vertedero	India	Activo	34.02	(Maiti et al., 2016)
9	Vertedero de Chandigarh	Vertedero	India	-	33.18	(Mor et al., 2018)
10	Relleno sanitario de Okhla, Nueva Delhi	Relleno Sanitario	India	-	32.50	(Angmo et al., 2023)
11	Brahmapuram (Kochi), Kerala	Planta de compostaje	India	Activo	31.99	(Arunbabu et al., 2017)
12	Relleno sanitario de Jamalpur de la ciudad de Ludhiana, Punjab	Relleno sanitario	India	Activo	26.45	(Bhalla et al., 2014)
13	Relleno Sanitario SAS Nagar	Vertedero	India	-	26.17	(Mor et al., 2018)
	Relleno Sanitario Turbhe, ciudad de Maharashtra	Relleno sanitario municipal	India	-	25.10	(Naveen y Malik, 2019)
14	Vertedero de residuos sólidos de Pune	vertedero	India	Activo	24.67	(Kale et al., 2010)
15	Relleno sanitario Air Hitam	Relleno Sanitario	Malasia	Activo	24.63	(Sundara et al., 2020)
16	Relleno Sanitario de Andahuaylas	Relleno sanitario	Perú	Activo	24.628	En el estudio
17	Relleno Sanitario Nam Son en Hanoi	Relleno sanitario	Vietnam	Activo	24.60	(Hoai et al., 2021)
18	Relleno sanitario Pulau Burung	Relleno sanitario	Malasia	Activo	23.45	(Umar et al., 2010)
19	Relleno Sanitario Air Hitam	Relleno sanitario	Malasia	Activo	22.71	(Wijekoon et al., 2022)
20	Vertedero de Ikhueni, ciudad de Benin del Estado de Edo	Vertedero	Nigeria	Activo	22.31	(Ibezute y Erhunmwunse, 2018)
21	Relleno Sanitario Panchkula	Vertedero	India	-	21.94	(Mor et al., 2018)
22	Vertedero de Baggrian en Lahore	Vertedero	Pakistán	-	21.68	(Munir et al., 2014)
23	Vertedero de Kuala Sepetang	Vertedero	Malasia	Activo	19.50	(Umar et al., 2010)
24	Relleno sanitario de Toluca	Relleno sanitario	México	Activo	18.46	(Rodríguez, 2014)
25	Vertedero de Sky hill	Vertedero	Brasil	Cerrado	17.94	(Mahler y Almeida, 2020)
26	Relleno sanitario Awotan, en Ibadan	Relleno Sanitario	Nigeria	-	17.55	(Sunday y Baldwin, 2021)
27	Vertedero central de Yenagoa, estado de Bayelsa	Vertedero	Nigeria	Activo	17.004	(Ebinimitei y Opololaoluwa, 2022)
28	Vertedero de Ampang Jajar	Vertedero	Malasia	Cerrado	16.44	(Umar et al., 2010)
29	Relleno sanitario Ajakanga, en Ibadan	Relleno Sanitario	Nigeria	-	15.67	(Sunday y Baldwin, 2021)
30	Ulu Maaso, distrito de Kuala Pilah	Vertedero	Malasia	Activo	15.28	(Hussein et al., 2019)
31	Terra Firma Biotechnologies Ltd, Gundlahalli	Relleno Sanitario	India	Cerrado	13.22	(Naveen et al., 2016)
32	Pajam estado de Negeri Sembilan	Vertedero	Malasia	Cerrado	12.91	(Hussein et al., 2019)

La Tabla 52, se presentan 31 estudios sobre los datos del ICL total de varios vertederos y rellenos de distintas ubicaciones geográficas calculado por varios investigadores.

Por otro lado, en la Tabla 52, se observa que los vertederos y rellenos de india ocupan los puestos del 2° al 11°, esta agrupación observada es debido a las características únicas de la región, que incluyen las condiciones climáticas, geológicas, el nivel de avance tecnológico, estilo de vida de la población y las estrategias de gestión de residuos sólidos. La clasificación de estos vertederos y rellenos de una misma zona geográfica tienden a tener índices de contaminación similares (Sunday y Baldwin, 2021). Asimismo el nitrógeno y los contaminantes orgánicos son los que más contribuyen al ICL total en el presente estudio, seguidos de los sólidos disueltos (Arunbabu et al., 2017). Por otro lado, para el presente estudio se determinó el promedio del ICL de los puntos 1 y L2 de las temporadas 1 y 2 que tuvo un valor medio de 24.628 ubicando al Perú en el puesto 16°.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio de investigación permitieron concluir que:

- El Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) fue evaluado para el Relleno Sanitario de la Provincia de Andahuaylas, (RSA), donde la temporada 1 obtuvo un ICL total que oscila entre 25.690 a 22.152 y en la temporada 2 oscila de 26.976 a 23.693, superando el valor estándar internacional del ICL (7.378), además el ICLor tuvo mayor presencia en el ICLtotal, indicado que la mayor parte de los lixiviados es generada por la presencia de residuos orgánicos en el relleno.
- El Índice de Contaminación por Lixiviado de los compuestos orgánicos (ICLor) evaluado en el RSA, mostraron valores para la temporada 1 de 51.565 y 48.730 y para la temporada 2 de 48.796 y 43.47 para L1 y L2 respectivamente, superando el ICLor estándar de 7.03.
- El Índice de Contaminación por Lixiviado de los compuestos inorgánicos (ICLin) evaluado en el RSA, mostraron valores para la temporada 1 de 21.953 y 11.497 y para la temporada 2 de 27.711 y 21.059 para L1 y L2 respectivamente, superando el ICLin estándar de 6.57.
- El Índice de Contaminación por Lixiviado de los metales pesados (ICLmp) evaluado en el RSA, mostraron valores de ICLmp para la temporada 1 de 10.210 y 10.617 y para la temporada 2 de 10.808 y 10.870 para L1 y L2 respectivamente, superando el ICLmp estándar de 7.89.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a las autoridades municipales que ejecuten mayor sensibilización a la población andahuaylina para una mejor gestión de los residuos sólidos y permitir la reducción en la producción de lixiviados.

2. La municipalidad provincial debe mejorar en la gestión y manejo de los residuos orgánicos, inorgánicos y reciclables (especialmente plásticos y metales para reducir la carga inorgánica y de metales pesados a través de los lixiviados) que genera la población.

3. Se requiere una atención inmediata, ya que los lixiviados suponen una amenaza para los ecosistemas circundantes y la salud humana. Es esencial realizar un seguimiento regular para evitar la contaminación del subsuelo y de los recursos hídricos. También se deben fomentar los procesos de tratamiento de los lixiviados para mitigar futuros problemas medioambientales.

4. La municipalidad provincial de Andahuaylas debe tomar medidas preventivas de la lixiviación, ya que contiene altos contaminantes orgánicos e inorgánicos perjudiciales para las fuentes hídricas, además que se controle continuamente las aguas subterráneas cercas al pozo de lixiviación.

5. Se recomienda a la municipalidad provincial de Andahuaylas implementar un tratamiento biológico para lixiviados, debido a que se obtuvo mayor contenido orgánica presente en el lixiviado, asimismo, muchos autores mencionan que es el mejor tratamiento en esta fase del relleno.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review on landfill leachate treatments. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 672–684. <https://doi.org/10.3844/ajas.2009.672.684>
- Abunama, T., Moodley, T., Abualqumboz, M., Kumari, S., & Bux, F. (2021). Chemosphere Variability of leachate quality and polluting potentials in light of leachate pollution index (LPI) – A global perspective. *Chemosphere*, 282(June), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131119>
- Abunama, T., & Nilam, T. (2021). Comparison of landfill leachate generation and pollution potentials in humid and semi-arid climates. *Int. J. Environment and Waste Management*, 27(January), 79–92. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.10033674>
- Al-Wabel, M. I., Al Yehya, W. S., AL-Farraaj, A. S., & El-Maghraby, S. E. (2011). Characteristics of landfill leachates and bio-solids of municipal solid waste (MSW) in Riyadh City , Saudi Arabia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 10(2), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2011.03.009>
- Alemayehu, E. (2004). Solid and Liquid Waste Management. En *Health Extension Workers Esayas*.
- Aluko, O. O., Sridhar, M. K. C., & Oluwande, P. A. (2003). Characterization of leachates from a municipal solid waste landfill site in Ibadan , Nigeria. *Journal of Environmental Health Research*, vOL 2, 1–7.
- Amokrane, A., Comel, C., & Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research*, 31(11), 2775–2782. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00147-4)
- Angmo, S., Kharayat, Y., & Shah, S. (2023). Assessment of Contamination Potential in Okhla Landfill , New Delhi by using Leachate Pollution Index. *Current World Environment*, 18, 116–132.
- APHA, AWWA, W. (2012). *Standard Methods for Examination of Water and Waste Water* (22nd Editi). American Public Health Association.
- APHA; AWWA; WEF. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. En *American Public Health Association* (20th Editi).
- Arunbabu, V., Indu, K. S., & Ramasamy, E. V. (2017). Leachate pollution index as an effective tool in determining the phytotoxicity of municipal solid waste leachate.

- Waste Management*, 68, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.012>
- Aziz, H. A., Othman, O. M., & Amr, S. S. A. (2013). The performance of Electro-Fenton oxidation in the removal of coliform bacteria from landfill leachate. *Waste Management*, 33(2), 396–400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.016>
- Babic, J., Pavko, A., Andreja, Z., & Kalc, G. (2014). Fungal and enzymatic treatment of mature municipal landfill leachate. *Waste Management*, 34, 798–803. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.017>
- Baig, S., Coulomb, I., Courant, P., & Liechti, P. (1999). Treatment of landfill leachates: Lapeyrouse and Satrod case studies. *Ozone: Science and Engineering*, 21(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/01919519908547255>
- Betancourt, R. A., & Martínez, J. A. (2012). Análisis de aprovechabilidad del lixiviado de un relleno sanitario de una ciudad intermedia de Colombia. *Revista Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL)*, 231, 25–32.
- Bhalla, B., Saini, M. S., & Jha, M. K. (2014). Assessment of Municipal Solid Waste Landfill Leachate Treatment Efficiency by Leachate Pollution Index. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(1), 8447–8454. [https://www.nswai.org/docs/Assessment of Municipal Solid Waste Landfill Leachate Treatment Efficiency by Leachate Pollution Index.pdf](https://www.nswai.org/docs/Assessment%20of%20Municipal%20Solid%20Waste%20Landfill%20Leachate%20Treatment%20Efficiency%20by%20Leachate%20Pollution%20Index.pdf)
- Bilgili, M. S., Demir, A., Akkaya, E., & Ozkaya, B. (2008). COD fractions of leachate from aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.055>
- Caroline, E., Kozak, C., Garcia, H., & Mansur, M. (2020). Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization. *Chemosphere*, 251, 126414. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126414>
- Change, M. of E. F. and C. (2016). *Solid Waste Management Rule (SWM Rule)*.
- Chaudhary, S. (2022). Leachate Characterization Generated from Municipal Solid waste at Landfill Site Ghazipur, New Delhi. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10(XI), 344–349. <https://doi.org/https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.47342>
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Bjerg, P. L., Jensen, D. L., Christensen, J. B., Baun, A., Albrechtsen, H., & Heron, G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16, 659–718. [https://doi.org/doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- Consorcio Fichtner S.A.S. (2016). *Proyecto de Infraestructura de Disposición Final y*

- Reaprovechamiento - Municipalidad Provincial de Andahuaylas* (Vol. 1, Número 610).
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia. (2010). Protocolo de Toma de Muestras de Aguas Residuales. *Código I-SMA-01*, 20 p.
https://www.corpoamazonia.gov.co/files/protocolo_para_toma_de_muestras_de_aguas_residuales.pdf
- Cuba, O. C., & Surco, R. G. C. (2022). Estimación Temporal y Espacial de las Sequías e Inundaciones Meteorológicas con índice China-Z en la Intercuenca Alto Apurímac, Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1), 57–67. <https://doi.org/10.1590/0102-7786370013>
- Daabes, M. A., Qdais, H. A., & Alsyouri, H. (2013). Assessment of Heavy Metals and Organics in Municipal Solid Waste Leachates from Landfills with Different Ages in Jordan. *Scientific Research*, 2013(April), 344–352.
- Danthurebandara, M., Passel, S. Van, Nelen, D., Tielemans, Y., & Acker, K. (2012). Environmental and socio-economic impacts of landfills. *Linnaeus ECO-TECH 2012*, April 2017, 40–52.
- Decreto Supremo N° 148. (2004). Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. *Gobierno de Chile*, 1–76.
- Ebinimitei, C. S., & Opololaoluwa, O. O. (2022). Assessment of Leachate Pollution Potential of Unlined Landfill Using Leachate Pollution Index (LPI), Nigeria. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 3(2), 67–76.
<https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0044>
- Edokpayi, J. N., Durowoju, O. S., & Odiyo, J. (2018). Assessment of Heavy Metals in Landfill Landfill Leachate : A Case Study of of Thohoyandou Landfill, Limpopo South Africa Africa and. *IntechOpen*, 219–232.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.74009>
- El-Fadel, M., Bou-Zeid, E., Chahine, W., & Alayli, B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*, 22, 269–282.
https://www.redalyc.org/journal/6378/637869117002/html/#redalyc_637869117002_ref29
- El Peruano. (2021). *Peruanos generamos 21 mil toneladas diarias de basura*.
- EPA. (2011). Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills. En *Environmental Protection*

- Agency (Número June).
- EPA. (2019). Environmental management of landfill facilities Solid waste disposal. En *Environmental Protection Agency* (pp. 1–95).
[https://www.iiardjournals.org/get/IJGEM/VOL. 4 NO. 5 2018/SANITARY LANDFILLS.pdf](https://www.iiardjournals.org/get/IJGEM/VOL.4.NO.5.2018/SANITARY_LANDFILLS.pdf)
- Farhana, Z., & Abdul, H. (2017). Characteristic of leachate at Alor Pongsu Landfill Site , Perak , Malaysia : A comparative study Characteristic of leachate at Alor Pongsu Landfill Site , Perak , Malaysia : A comparative study. *Earth and Environmental Science*, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012013>
- Fernandes, A., Pacheco, M. J., Ciríaco, L., & Lopes, A. (2015). Applied Catalysis B : Environmental Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates : Present and future. “*Applied Catalysis B, Environmental*”, 176–177, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.052>
- Ferraz, F. M., Bruni, A. T., Povinelli, J., & Vieira, E. M. (2016). Leachate/domestic wastewater aerobic co-treatment: A pilot-scale study using multivariate analysis. *Journal of Environmental Management*, 166, 414–419.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.034>
- Franco, H. A., Silva, M. E. R. V. da, Silveira, M. F. da, Marques, M. R. D. C., & Thode Filho, S. (2017). Impact of landfill leachate on the germination of Cucumber (Cucumis sativus). *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 21, 32. <https://doi.org/10.5902/2236117029719>
- Ghani, Z. A., Suffian, M., Qamaruz, N., Faiz, M., & Ahmad, M. (2017). Optimization of preparation conditions for activated carbon from banana pseudo-stem using response surface methodology on removal of color and COD from landfill leachate. *Waste Management*, 62, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.026>
- Guerrero, D. R., Sánchez, J. M., Buenrostro, O. D., & Márquez, L. B. (2014). Phytotoxic Effect of Landfill Leachate with Different Pollution Indexes on Common Bean. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225(6), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2002-1>
- Harmsen, J. (1983). Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. *Water Research*, 17(6), 699–705. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90239-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90239-7)
- Hernández, R. S. (2018). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: LAS RUTAS CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y MIXTA. En *McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES: Vol. I*.

- Hoai, S. T., Lan, H. N., Tran, N., Viet, T., Hoang, G. N., & Kawamoto, K. (2021). Characterizing Seasonal Variation in Landfill Leachate Using Leachate Pollution Index (LPI) at Nam Son Solid Waste Landfill in Hanoi , Vietnam. *Environmental*.
- Hossain, D., Mostazi, M. A., & Ferdaush, J. (2016). Computation of leachate pollution index of Matuail landfill. *Int. J. Civ. Eng*, 3(1), 1–9.
- Hussein, M., Yoneda, K., Zaki, Z. M., Othman, N. A., & Amir, A. (2019). Leachate characterizations and pollution indices of active and closed unlined landfills in Malaysia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 12(February), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100232>
- Ibezute, A. C., & Erhunmwunse, O. (2018). Assessment of Leachate Characteristics and Pollution Index of Ikhueniro Dumpsite in Benin City , Edo State , Nigeria. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 12(6), 38–44. <https://doi.org/10.9790/2402-1206013844>
- Instituto de Toxicología de la Defensa. (2016). *Analisis de aguas, condiciones generales para la toma de muestras*. (p. 10). <https://bit.ly/2C1IKaH>
- Iraivanian, A., & Ravari, S. O. (2020). Types of Contamination in Landfills and Effects on The Environment : A Review Study. *Earth and Environmental Science*, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012083>
- Ireaja, N. A., Okeke, O. C., & Opara, A. I. (2018). Sanitary Landfills : Geological and Environmental Factors that Influence Their Siting , Operation and Management. *International Journal of Geography and Environmental Managemen*, 4(5), 1–9. [https://www.iiardjournals.org/get/IJGEM/VOL.4.NO.5.2018/SANITARY LANDFILLS.pdf](https://www.iiardjournals.org/get/IJGEM/VOL.4.NO.5.2018/SANITARY_LANDFILLS.pdf)
- ISO 4832. (2021). *Coliformes ISO 4832:2006 Recuento de colonias (Revisado y confirmado en 2021)*. https://www.analisisavanzados.com/modules/mod_tecdata/Coliformes-recuento ISO 4832_2006 .pdf
- Kale, S. S., Kadam, A. K., Kumar, S., & Pawar, N. J. (2010). Evaluating pollution potential of leachate from landfill site , from the Pune metropolitan city and its impact on shallow basaltic aquifers. *Environ Monit Assess*, 327–346. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0799-7>
- Kang, K. H., Shin, H. S., & Park, H. (2002). Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. *Water Research*, 36(16), 4023–4032. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00114-8)

- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate : A Review. *Environmental Science and Technology*, 3389, 297–336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- Krishnamurthi, S., & Chakrabarti, T. (2013). Diversity of Bacteria and Archaea from a landfill in Chandigarh , India as revealed by culture-dependent and culture-independent molecular approaches. *Systematic and Applied Microbiology*, 36(1), 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2012.08.009>
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2005a). Analysis of leachate pollution index and formulation of sub-leachate pollution indices. *Waste Management & Research*, 230–239. <https://doi.org/10.1177/0734242X05054875>
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2005b). Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index. *Clean Techn Environ Policy*, 7, 190–197. <https://doi.org/10.1007/s10098-004-0269-4>
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2015). Analysis of Leachate Contamination Potential of a Municipal Landfill using Leachate Pollution Index Analysis of Leachate Contamination Potential of a Municipal Landfill using Leachate Pollution Index. *Workshop on Sustainable Landfill Management, January 2003*, 147-153 Analysis.
- Kumar, D., & Alappat, J. B. (2003). Analysis of Leachate Contamination Potential of a Municipal Landfill Using Leachate Pollution Index. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2(1), 147–153. <https://doi.org/10.9790/2402-0211639>
- Kylefors, K. (2002). *Predictions of Leaching from Municipal Solid Waste (MSW) and Measures to Improve Leachate Management at Landfills*. Tesis doctoral.
- Lagas, P., Loch, J. P. G., & K., H. (1982). The behaviour of cyanide in a landfill and the soil beneath it. *Global. Agricultural Research Knowledge*. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/68526>
- Lippi, M., Gaudie Ley, M. B. R., Mendez, G. P., & Felix Cardoso Junior, R. A. (2018). State of Art of Landfill Leachate Treatment: Literature Review and Critical Evaluation. *Ciência e Natura*, 40, 78. <https://doi.org/10.5902/2179460x35239>
- Mahler, C. F., & Almeida, J. R. De. (2020). Index to evaluate closed landfills based on leachate parameters. *Multidisciplinary Journal For Waste Resources & Residues*, 10, 200–211.

- Maiti, S. K., Hazra, T., Debsarkar, A., & Dutta, A. (2016). Leachate characterization and identification of dominant pollutants using leachate pollution index for an uncontrolled landfill site. *Global J. Environ. Sci. Manage*, 2(2), 177–186. <https://doi.org/10.7508/gjesm.2016.02.008>
- Mandal, P., Dubey, B. K., & Gupta, A. K. (2017). Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. *Waste Management*, 69, 250–273. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.034>
- Manimekalai, M. B., & Vijayalakshmi, P. (2012). Analysis of Leachate Contamination Potential of a Municipal Landfill Using Leachate Pollution Index. *Journal Of Environmental Science*, 2(1), 16–39.
- Méndez, I. R., Castillo, E. R., Sauri, M. R., Quintal, C. A., Giácoman, G., & Blanca, J. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de Lixiviados. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 25(3), 133–145.
- Méndez, R., Medina, E., Quintal, C., & Castillo, E. R. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Universidad Autónoma de Yucatán México*, 6, 119–127. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46760302>
- Ministry of Environment and Forests. (2013). Municipal solid waste management and handling rules. New Delhi. *Government of India*, 1–41. <https://eptrienvis.nic.in/All PDF Files/LEGSLA/Municipal Solid Waste Management Rules 2013.pdf>
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2012). QCVN 40:2011/BTNMT; National Technical Regulation on Industrial Wastewater. En *Ministry of Natural Resources and Environment*.
- Mishra, A. R., Misha, S. A., & Tiwari, A. (2014). Solid Waste Management-Case study. *International Journal of Research in Advent Technolog*, 2(1), 396–399.
- Montalvo, J. S., & Quispe, M. (2018). Contaminación del agua superficial por lixiviados de un relleno sanitario [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. En *Repositorio UCV*. [https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23043/Montalvo Quiroz Jose Smith - Quispe Becerra Miguel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23043/Montalvo%20Quiroz%20Jose%20Smith%20-%20Quispe%20Becerra%20Miguel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Montenegro, D. L. C., Torres, A. S. M., & Lobatón, J. F. O. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Mutis*, 10(1), 25–45. <https://doi.org/10.21789/22561498.1601>
- Moody, C. M., & Townsend, T. G. (2017). A comparison of landfill leachates based on waste composition. *Waste Management*, 63, 267–274.

- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.020>
- Mor, S., Negi, P., & Khaiwal, R. (2018). Assessment of groundwater pollution by landfills in India using leachate pollution index and estimation of error. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 10(September), 467–476.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.09.002>
- MPA. (2022). *Programa Municipal de educación, cultura y ciudadanía ambiental de la Municipal Provincial de Andahuaylas 2019-2022*.
<https://portal.munipuno.gob.pe/index.php/es/node/1349>
- MPA. (2023). *Informe N° 073-2023-MPA-GM-UGRS- RRS-DRA*.
- Munir, S., Tabinda, A. B., Ilyas, A., & Mushtaq, T. (2014). Characterization of Leachate and Leachate Pollution Index from Dumping Sites in Lahore , Pakistan. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 4(January), 165–170. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*
- Ñahui, G. L. M., & Acosta, R. D. C. (2021). *Efecto de la descarga de lixiviado del exbotadero El Edén en el cuerpo de agua adyacente, sector Yauris, distrito de El Tambo, Provincia de Huancayo, 2021*. Tesis de Pregrado, Universidad Continental.
- Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y redacción de tesis. En *Ediciones de la U: Vol. 5ta edición*.
- Naveen, B. P., & Malik, R. K. (2019). Assessment of Contamination Potential of Leachate from Municipal Solid Waste Landfill Sites for Metropolitan Cities in India. *Pollution*, 5(2), 313–322. <https://doi.org/10.22059/poll.2018.266991.527>
- Naveen, B. P., Sivapullaiah, P. V., & Sitharam, T. G. (2016). Effect of aging on the leachate characteristics from municipal solid waste landfill. *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(56), 1940–1945. <https://doi.org/10.3208/jgssp.ind-06>
- Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. (2004). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y. En *Diario Oficial* (p. 28).
- Ofomola, M. O., Umayah, O. S., & Akpoyibo, O. (2017). Contamination assessment of dumpsites in Ughelli, Nigeria using the Leachate Pollution Index method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21(1), 77.
<https://doi.org/10.4314/jasem.v21i1.8>
- Organización Mundial de la salud. (2021). Compendium of WHO and other UN guidance

- on health and environmen: Solid waste. *World Health Organization 2021. S, 2021, 0–7.*
- Peixoto, A. L. C., Salazar, R. F., Barboza, J. C. S., & Izário, H. J. (2018). Characterization of controlled landfill leachate from the city of Guaratinguetá - SP , Brazil. *Journal of Applied Sciences, 13*, 1–16. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2136>
- Peng, Y. (2013). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031>
- Pérez, R. A. C. (2017). Plan de cierre y recuperación de areas degradadas por residuos sólidos municipales en el botadero de “San José” - Andahuaylas, Apurímac. En *Universidad Nacional Agraria La Molina*.
- Ponthieu, M., Pinel-raffaitin, P., Le, I., Mazeas, L., Amouroux, D., Donard, O. F. X., & Potin-gautier, M. (2007). Speciation analysis of arsenic in landfill leachate. *Water Re, 41*, 3177–3185. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.04.026>
- Poznyak, T., Bautista, G. L., Chaírez, I., Córdova, R. I., & Ríos, L. E. (2008). Decomposition of toxic pollutants in landfill leachate by ozone after coagulation treatment. *Journal of Hazardous Materials, 152*(3), 1108–1114. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.098>
- Pozo, J., García, J., & Vázquez, Y. (2020). Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales , Pinar del Río. *Instituto de Información Científica y Tecnológica, 22, n*, 1–11. https://www.redalyc.org/journal/6378/637869117002/html/#redalyc_637869117002_ref29
- Qarani, S., Abdul, H., Suf, M., Bashir, M. J. K., & Umar, M. (2010). Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary land fi lls : A comparative study. *Journal of Environmental Management, 91*, 2608–2614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.042>
- Rakesh, kumar D., & Gayathri, V. (2012). Landfill Planning and Design considerations. *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies, January 2012, 755–772.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00035-8>
- Rashid, S. W., Shwan, D. M. S., & Rashid, K. A. (2022). Physicochemical Characterization and Evaluation of Seasonal Variations of Landfill Leachate and Groundwater Quality around Tanjaro Open Dump Area of Sulaymaniyah City , Kurdistan , Iraq. *Journal of Chemistry, 2022, 12.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/8574935>

- Rathod, M., Mishra, H., & Karmakar, S. (2013). Leachate Characterization and Assessment of Water Pollution near Municipal Solid Waste Landfill Site. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2(March), 186–199.
- Real Decreto 1481 / 2001. (2002). Que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Ministerio del medio Ambiente*, 1–47. Ref. BOE-A-2020-7438
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment : Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468–493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- Rodríguez, D. G. (2014). Relación del índice de contaminación de Lixiviados con el impacto Fitotóxico de un Lixiviado [Tesis de Postgrado, Universidad Michocana de San Nicolás de Hidalgo]. En *Repositorio UMSNH*. <https://doi.org/10.22201/ceiach.24485691e.2016.17.58151>
- Saavedra, K. A. (2019). Contaminación del suelo por lixiviados generados en el botadero de Cuñumbuque, San Martín, 2019 [Tesis de Pregrado]. En *Repositorio Institucional - UCV*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58600/B_Saavedra_LT_KA-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Saha, A., Zaman, S., & Mitra, A. (2017). Assessment of Coastal Water Quality using Aquatic Health Index (AHI). *Parana Journal of Science and Education (PJSE)*, 3(6), 34–41. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26048.17927>
- Salami, L., Fadayini, O., Patinvoh, R. J., & Koleola, O. (2015). Evaluation of Leachate Contamination Potential of Lagos Dumpsites Using Leachate Pollution Index. *British Journal of Applied Science & Technology*, 5(1), 48–59. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/11707>
- Siddiqi, S. A., Al-Mamun, A., Sana, A., Baawain, M. S., & Choudhury, M. R. (2022). Characterization and pollution potential of leachate from urban landfills during dry and wet periods in arid regions. *Water Supply*, 22(3), 3462–3483. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.392>
- SIGERSOL. (2023). *Resumen de Reportes Anuales de Residuos Sólidos-Sigersol*. Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos. <https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/resumenes>
- Simon, C. E., & Adianimovie, S. (2022). Estimating the Temporal Leachate Contamination Potential of Yenagoa Central Waste Dumpsite , Using Leachate Pollution Index , Abanigi Road. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*,

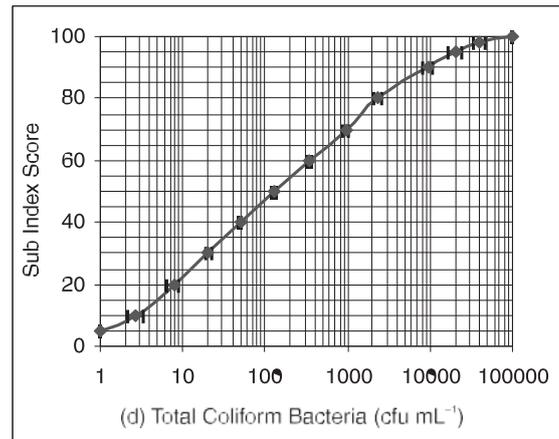
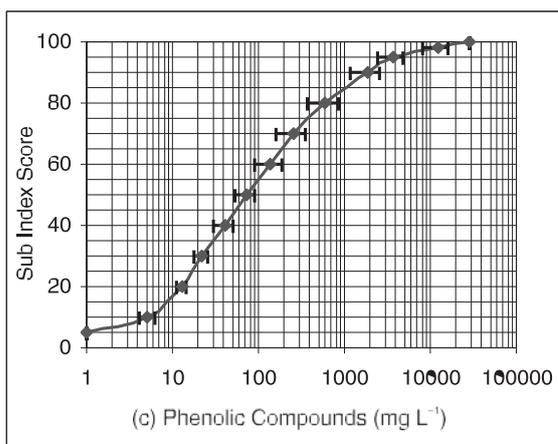
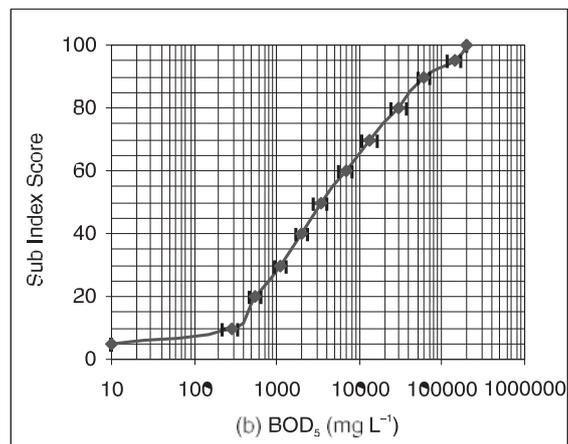
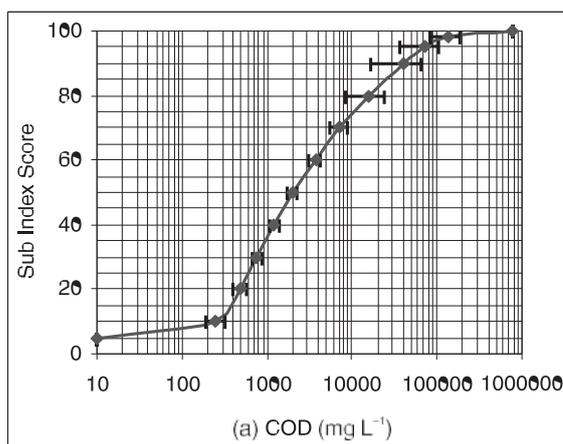
- 16(7), 31–39. <https://doi.org/10.9734/AJARR/2022/v16i730484>
- Sundara, K., Singh, D., Ismail, A., & Arifin, A. (2020). Evaluating the leachate contamination impact of landfills and open dumpsites from developing countries using the proposed Leachate Pollution Index for Developing Countries (LPIDC). *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14(September), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100372>
- Sunday, O. A., & Baldwin, O. O. (2021). Assessment of leachate contamination potential of landfills in Ibadan, Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5), 179–187. <https://doi.org/10.5897/ajest2021.3009>
- Umar, M., Aziz, H. A., & Yusoff, M. S. (2010). Variability of Parameters Involved in Leachate Pollution Index and Determination of LPI from Four Landfills in Malaysia. *International Journal of Chemical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2010/747953>
- Valverde, R. K. (2021). *Influencia del hipoclorito de calcio sobre los parámetros fisicoquímicos de lixiviado de un relleno sanitario - Región la Libertad* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/29110>
- Wijekoon, P., Koliyabandara, P. A., Cooray, A. T., Lam, S. S., Athapattu, B. C. L., & Vithanage, M. (2022). Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 421(July 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126627>
- Yu, D. (2007). *Landfill Leachate Treatment Case Study, SRV Atervinning, Sweden*. Master of Science Thesis.
- Zavaleta, J. L. F. (2021). *Impacto del lixiviado del relleno sanitario de Cajamarca en la calidad del agua del Río Cajamarquino, Distrito de Jesús, en el año 2021* [Tesis de Postgrado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/31260>
- Zeng, Y., Guardia, A. De, Ziebal, C., Junqueira, F., Macedo, D., & Dabert, P. (2013). Biore source Technology Impact of biodegradation of organic matters on ammonia oxidation in compost. *Bioresource Technology*, 136, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.038>
- Zurbrugg, C. (2003). Solid Waste Management in Developing Countries *. *Eawag Sandec*, 1–5.

ANEXOS

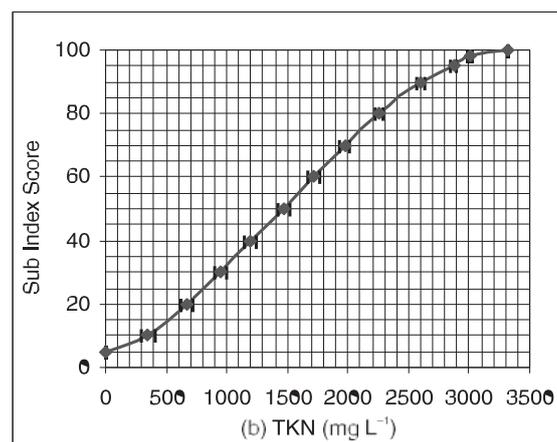
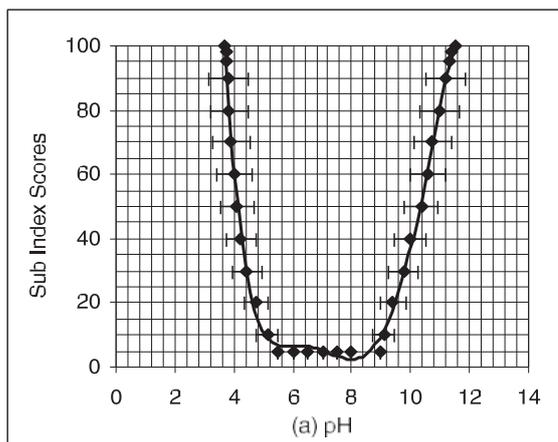
ANEXO 1

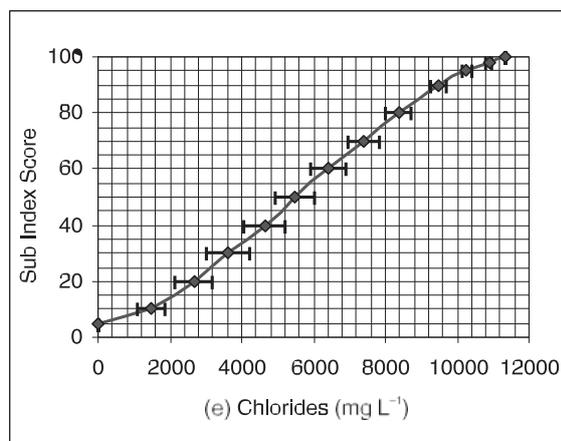
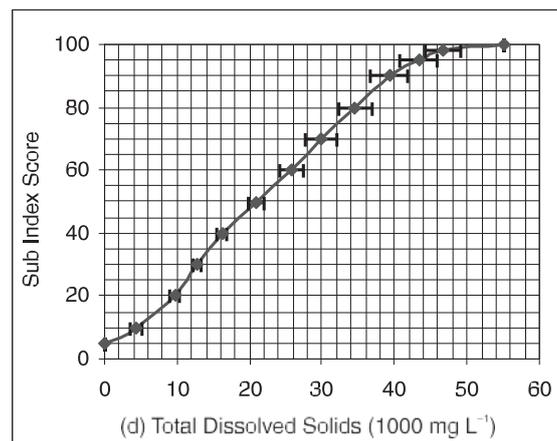
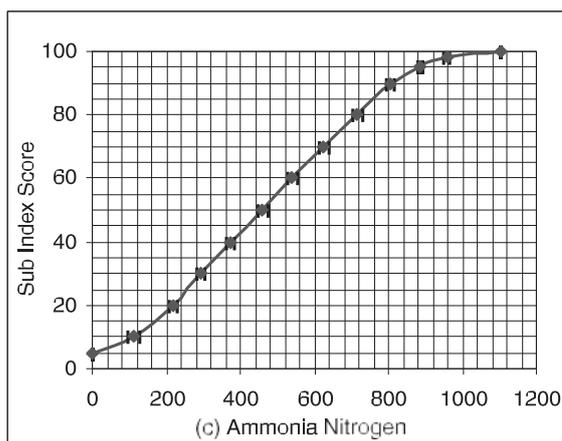
Curva de los subíndices de los contaminantes del Lixiviado

Curvas medias del subíndice ICL orgánico (ICL_{or}) con límite de confianza del 90% para (a) DQO; (b) DBO₅; (c) compuestos fenólicos; y (d) coliformes totales.

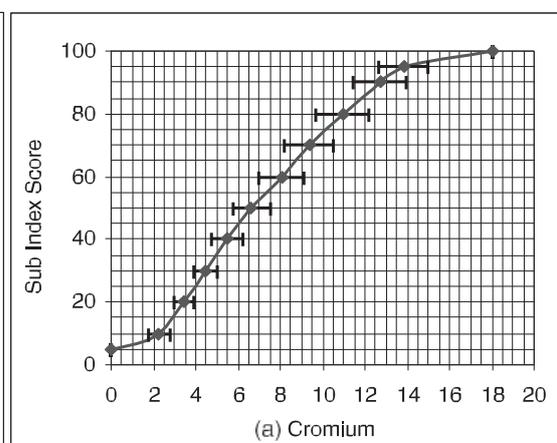
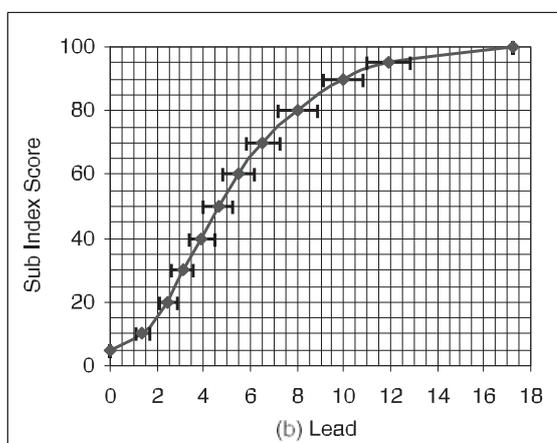


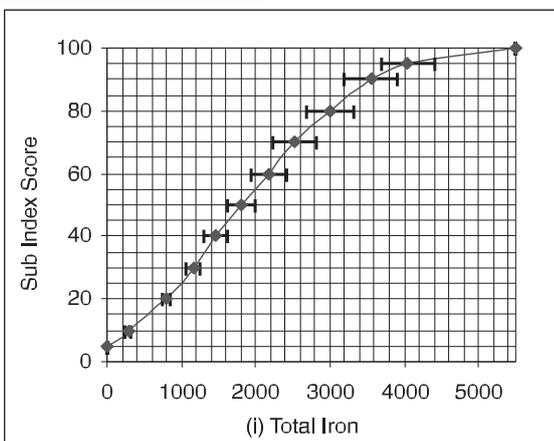
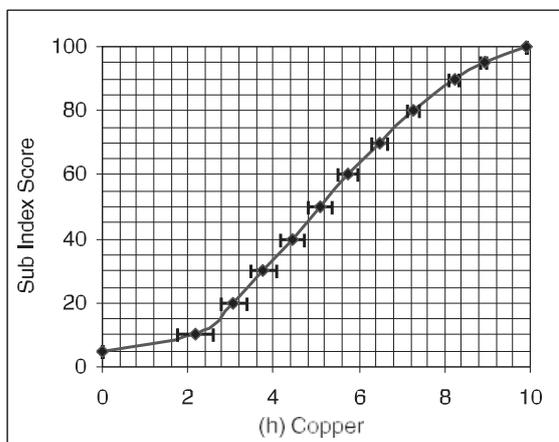
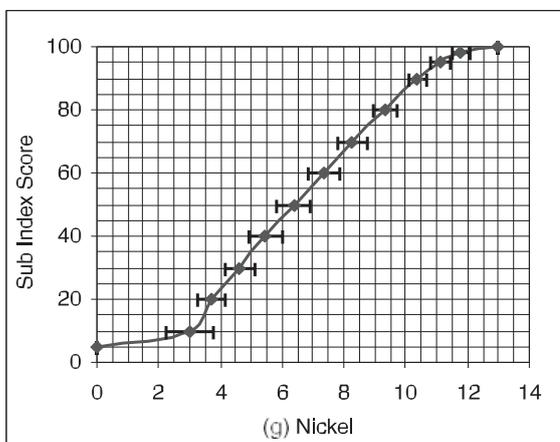
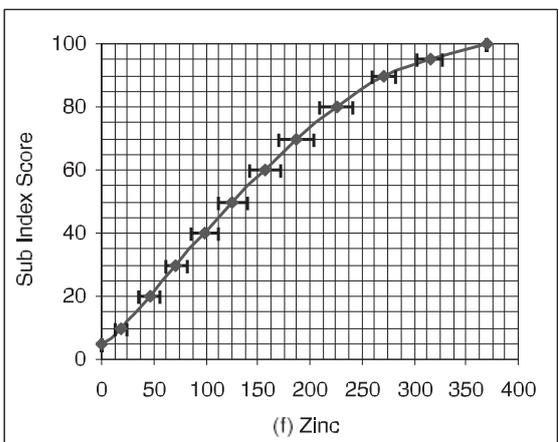
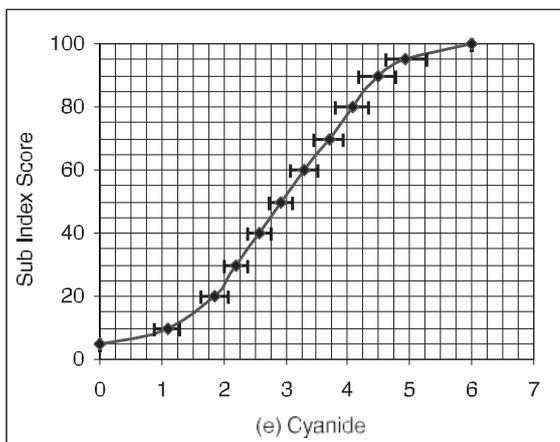
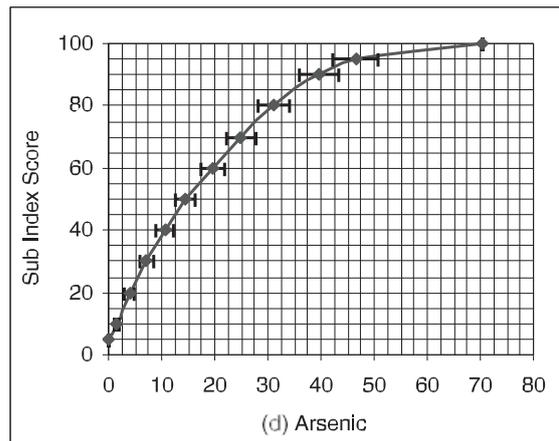
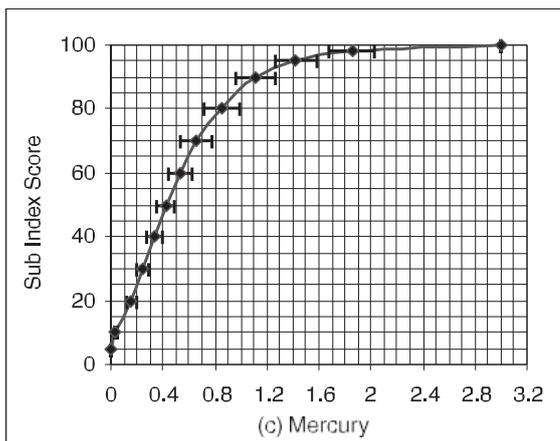
Curvas de medias del Subíndice ICL inorgánico (ICL_{in}) con un límite de confianza del 90% para (a) pH; (b) nitrógeno total Kjeldhal; (c) nitrógeno amoniacal; (d) sólidos disueltos totales; y (e) cloruros.



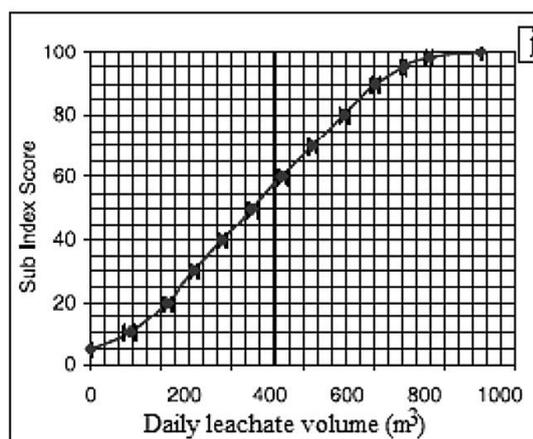
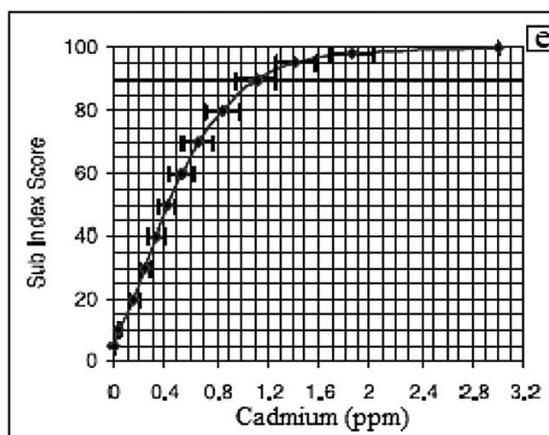
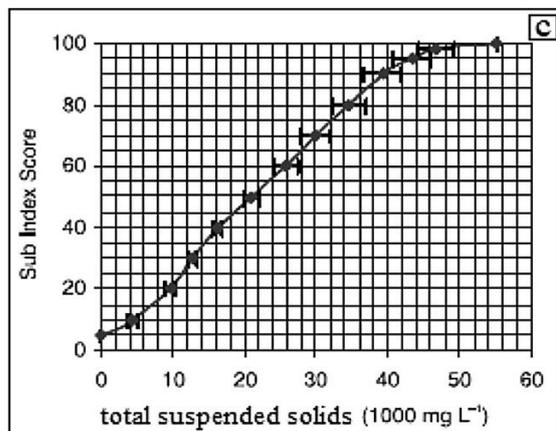


Curvas de medias del Subíndice ICL metales pesados (ICL mp) con límite de confianza del 90% para (a) cromo; (b) plomo; (c) mercurio; (d) arsénico; (e) cianuro; (f) zinc; (g) níquel; (h) cobre; y (i) hierro total (todas las concentraciones están en mg/L)





Curvas medias del subíndice ICL para c) sólidos suspendidos totales, e) cadmio y j) volumen diario de lixiviados.



ANEXO 2

Datos medidos por triplicado del DQO

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
DQO	mg O ₂ /L	9480	9446.667	7660	7633.333	6870	6806.667	5000.2	5016.800
		9450		7630		6710		5030.2	
		9410		7610		6840		5020	

ANEXO 3

Análisis de Varianza para el DQO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	20723357	20723357	9776.00	0.000
Punto	1	9737288	9737288	4593.45	0.000
Error	9	19078	2120		
Falta de ajuste	1	413	413	0.18	0.685
Error puro	8	18665	2333		
Total	11	30479723			

ANEXO 4Datos medidos por triplicado del DBO₅

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
DBO ₅	mgO ₂ /L	2320	2320	2400	2400	2680	2680.0	3220	3220.0
		2320		2400		2680		3220	
		2320		2400		2680		3220	

ANEXO 5Análisis de Varianza para el DBO₅

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	8568300	8568300	23.32	0.001
Punto	1	9720000	9720000	26.45	0.001
Error	9	3307500	367500		
Falta de ajuste	1	3307500	3307500	*	*
Error puro	8	0	0		
Total	11	21595800			

ANEXO 6

Datos medidos por triplicado del pH

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
pH	-	7.261	7.268	7.464	7.463	7.627	7.641	7.951	7.950
		7.265		7.463		7.643		7.950	
		7.279		7.461		7.653		7.950	

ANEXO 7

Análisis de Varianza para el pH

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.555130	0.555130	478.25	0.000
Punto	1	0.190260	0.190260	163.91	0.000
Error	9	0.010447	0.001161		
Falta de ajuste	1	0.009919	0.009919	150.28	0.000
Error puro	8	0.000528	0.000066		
Total	11	0.755837			

ANEXO 8

Datos medidos por triplicado de los coliformes totales

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)			T2 (Estiaje)				
		L1		L2	L1		L2		
Coliformes totales	NMP/100	1900	1780	1270	1200	1200	1230	600	700
		1660		1100		1100		800	
		1780		1230		1390		700	

ANEXO 9

Análisis de Varianza para coliformes totales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
temporada	1	826875	826875	67.73	0.000
punto	1	924075	924075	75.69	0.000
Error	9	109875	12208		
Falta de ajuste	1	1875	1875	0.14	0.719
Error puro	8	108000	13500		
Total	11	1860825			

ANEXO 10

Datos medidos por triplicado del Cloruro

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)			T2 (Estiaje)				
		L1		L2	L1		L2		
Cloruro	mg/L	2320	2320.0	2400	2400.0	2680	2680.0	3220	3220.0
		2320		2400		2680		3220	
		2320		2400		2680		3220	

ANEXO 11

Análisis de Varianza para cloruro

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	1044300	1044300	59.22	0.000
Punto	1	288300	288300	16.35	0.003
Error	9	158700	17633		
Falta de ajuste	1	158700	158700	*	*
Error puro	8	0	0		
Total	11	1491300			

ANEXO 12

Datos medidos por triplicado de la serie de sólidos

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
Sólidos disueltos totales (TDS)	mg/L	7832	7784.00	8688	8568.00	8584	8361.33	8612	8621.33
		7760		8496		8240		8604	
		7760		8520		8260		8648	
Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	mg/L	184	202.00	56	49.33	108	119.33	94	89.33
		220		52		130		98	
		202		40		120		76	
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/L	164	167.00	28	27.33	70	70.00	58	56.00
		170		30		76		60	
		167		24		64		50	
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/L	20	35.00	28	22.00	38	49.33	36	33.33
		50		22		54		38	
		35		16		56		26	
Sólidos Totales (ST)	mg/L	8200	8188.00	8800	8666.67	8800	8600.0	8800	8800.00
		8200		8600		8500		8800	
		8164		8600		8500		8800	

ANEXO 13

Análisis de Varianza para Sólidos disueltos totales (TDS)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	298305	298305	8.75	0.016
Punto	1	817452	817452	23.97	0.001
Error	9	306945	34105		
Falta de ajuste	1	205932	205932	16.31	0.004
Error puro	8	101013	12627		
Total	11	1422703			

ANEXO 14

Análisis de Varianza para Sólidos Suspendidos Totales (TSS)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	1365	1365.3	0.98	0.349
Punto	1	25025	25025.3	17.89	0.002
Error	9	12589	1398.8		
Falta de ajuste	1	11285	11285.3	69.24	0.000
Error puro	8	1304	163.0		
Total	11	38980			

ANEXO 15

Análisis de Varianza para Sólidos Totales Volátiles (STV)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	3502.1	3502.1	2.62	0.140
Punto	1	17710.1	17710.1	13.27	0.005
Error	9	12008.8	1334.3		
Falta de ajuste	1	11844.1	11844.1	575.42	0.000
Error puro	8	164.7	20.6		
Total	11	33220.9			

ANEXO 16

Análisis de Varianza para Sólidos Totales Fijos (STF)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	494.08	494.083	5.52	0.043
Punto	1	630.75	630.750	7.04	0.026
Error	9	806.08	89.565		
Falta de ajuste	1	6.75	6.750	0.07	0.801
Error puro	8	799.33	99.917		
Total	11	1930.92			

ANEXO 17

Análisis de Varianza para Sólidos Totales (ST)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	786432	786432	77.16	0.000
Punto	1	30000	30000	2.94	0.120
Error	9	91728	10192		
Falta de ajuste	1	30000	30000	3.89	0.084
Error puro	8	61728	7716		
Total	11	908160			

ANEXO 18

Datos medidos por triplicado del nitrógeno amoniacal

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
Nitrógeno amoniacal	mg/L	650	646.667	210	213.333	1230	1243.333	560	560.000
		640		210		1250		560	
		650		220		1250		560	

ANEXO 19

Análisis de Varianza para nitrógeno amoniacal

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	667408	667408	127.06	0.000
Punto	1	935208	935208	178.04	0.000
Error	9	47275	5253		
Falta de ajuste	1	46875	46875	937.50	0.000
Error puro	8	400	50		
Total	11	1649892			

ANEXO 20

Datos medidos por triplicado del níquel

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
Níquel	mg/L	0.00612	0.0061	0.0039	0.0039	0.00383	0.0038	0.00366	0.0036
		0.0061		0.00392		0.00385		0.0036	
		0.00597		0.00391		0.00386		0.00362	

ANEXO 21

Análisis de Varianza para el níquel

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.000005	0.000005	14.96	0.004
Punto	1	0.000004	0.000004	13.49	0.005
Error	9	0.000003	0.000000		
Falta de ajuste	1	0.000003	0.000003	1419.41	0.000
Error puro	8	0.000000	0.000000		
Total	11	0.000012			

ANEXO 22

Datos medidos por triplicado del cianuro

PARÁMETROS	Unid.	T1 (Lluvias)				T2 (Estiaje)			
		L1		L2		L1		L2	
Cianuro	mg/L	0.065	0.0633	0.001	0.0017	0.026	0.026	0.003	0.0033
		0.064		0.002		0.026		0.003	
		0.061		0.002		0.026		0.004	

ANEXO 23

Análisis de Varianza para cianuro

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.000954	0.000954	7.46	0.023
Punto	1	0.005334	0.005334	41.72	0.000
Error	9	0.001151	0.000128		
Falta de ajuste	1	0.001141	0.001141	912.60	0.000
Error puro	8	0.000010	0.000001		
Total	11	0.007439			

ANEXO 24

Datos medidos por triplicado de los metales pesados

PARÁMETROS	Unid .	T1 (Lluvias)			T2 (Estiaje)				
		L1		L2	L2		L2		
Cromo total	mg/L	0.0652	0.065	0.0614	0.061	0.0664	0.066	0.0681	0.068
		0.0650		0.0615		0.0662		0.068	
		0.0641		0.0613		0.0663		0.0678	
Plomo	mg/L	0.3701	0.370	0.3141	0.317	0.44	0.467	0.49	0.510
		0.3699		0.3169		0.47		0.51	
		0.3703		0.3203		0.49		0.53	
Mercurio	mg/L	0.4351	0.436	0.4131	0.414	0.443	0.442	0.451	0.451
		0.4358		0.4128		0.444		0.452	
		0.4356		0.4146		0.440		0.449	
Arsénico	mg/L	1.701	1.748	1.731	1.765	1.430	1.466	1.520	1.543
		1.752		1.772		1.475		1.555	
		1.792		1.792		1.493		1.553	
Zinc	mg/L	0.0362	0.034	0.0017	0.0053	0.289	0.290	0.275	0.275
		0.0339		0.0065		0.29		0.275	
		0.0329		0.0077		0.292		0.276	
Cobre	mg/L	0.131	0.1350	0.136	0.1403	0.077	0.085	0.075	0.081
		0.135		0.141		0.085		0.081	
		0.139		0.144		0.092		0.086	
Hierro	mg/L	1.759	1.938	1.795	1.970	4.58	4.607	1.83	1.837
		1.948		1.982		4.59		1.83	
		2.106		2.134		4.65		1.85	
Cadmio	mg/L	0.3119	0.2789	0.1839	0.1836	1.7591	1.9378	1.794	1.970
		0.2608		0.1728		1.9483		1.982	
		0.264		0.194		2.1059		2.134	

ANEXO 25

Análisis de Varianza para cromo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.000049	0.000049	22.40	0.001
Punto	1	0.000002	0.000002	0.99	0.347
Error	9	0.000020	0.000002		
Falta de ajuste	1	0.000019	0.000019	196.56	0.000
Error puro	8	0.000001	0.000000		
Total	11	0.000071			

ANEXO 26

Análisis de Varianza para plomo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.062843	0.062843	62.52	0.000
Punto	1	0.000070	0.000070	0.07	0.798
Error	9	0.009046	0.001005		
Falta de ajuste	1	0.006960	0.006960	26.69	0.001
Error puro	8	0.002086	0.000261		
Total	11	0.071959			

ANEXO 27

Análisis de Varianza para mercurio

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.001452	0.001452	18.52	0.002
Punto	1	0.000140	0.000140	1.79	0.214
Error	9	0.000706	0.000078		
Falta de ajuste	1	0.000690	0.000690	357.25	0.000
Error puro	8	0.000015	0.000002		
Total	11	0.002298			

ANEXO 28

Análisis de Varianza para arsénico

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.191016	0.191016	147.27	0.000
Punto	1	0.006533	0.006533	5.04	0.051
Error	9	0.011673	0.001297		
Falta de ajuste	1	0.002700	0.002700	2.41	0.159
Error puro	8	0.008973	0.001122		
Total	11	0.209223			

ANEXO 29

Análisis de Varianza para zinc

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.207533	0.207533	10439.25	0.000
Punto	1	0.001454	0.001454	73.15	0.000
Error	9	0.000179	0.000020		
Falta de ajuste	1	0.000148	0.000148	37.85	0.000
Error puro	8	0.000031	0.000004		
Total	11	0.209166			

ANEXO 30

Análisis de Varianza para cobre

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	0.009075	0.009075	269.26	0.000
Punto	1	0.000001	0.000001	0.04	0.847
Error	9	0.000303	0.000034		
Falta de ajuste	1	0.000065	0.000065	2.20	0.177
Error puro	8	0.000238	0.000030		
Total	11	0.009380			

ANEXO 31

Análisis de Varianza para hierro

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	4.8209	4.82094	7.22	0.025
Punto	1	5.6197	5.61975	8.41	0.018
Error	9	6.0124	0.66804		
Falta de ajuste	1	5.8912	5.89121	388.98	0.000
Error puro	8	0.1212	0.01515		
Total	11	16.4530			

ANEXO 32

Análisis de Varianza para el cadmio

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temporada	1	8.90257	8.90257	605.22	0.000
Punto	1	0.00299	0.00299	0.20	0.663
Error	9	0.13239	0.01471		
Falta de ajuste	1	0.01220	0.01220	0.81	0.394
Error puro	8	0.12018	0.01502		
Total	11	9.03794			

ANEXO 33

Matriz de Consistencia

Tema: EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023.

PROBLEMA	OBJETIVO	VARIABLE	METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL ¿Qué significado tiene el valor del índice de contaminación por lixiviados que generan los residuos en el relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL Evaluar el valor del índice de contaminación por lixiviados del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023</p>	<p>Variable de estudio: Índice de Contaminación por Lixiviados. Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Parámetros del índice de contaminación por lixiviados de los compuestos orgánico - Parámetros del índice de contaminación por lixiviados orgánico de los compuestos inorgánicos. - Parámetros del índice de contaminación por lixiviados de los metales pesados. 	<p>Tipo Tipo de investigación es básica, con un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo. Diseño: Diseño no experimental, transversal Material de estudio: Población. – Las pozas de lixiviación del relleno sanitario de Andahuaylas. Muestra. – 2 pozos de lixiviación (2 Litros por muestra) Muestreo. -No probabilístico Técnica. - - Observación directa Instrumentos - Libreta de campo - Ficha de registro - Cuaderno de apuntes - Fotografías Instrumentos de medición - Equipos e instrumentos de análisis: Materiales, reactivos y equipos de laboratorio para la determinación de los indicadores de contaminación: DBO5, DQO, Coliformes totales (CT), pH, Nitrógeno amoniacal (AN), Sólidos Disueltos Totales (TDS), Cloruro, hierro, Cobre, Níquel, Zinc, Plomo, Cromo total, Mercurio, Arsénico, Cianuro. Cadmio (ANEXO 34). Trabajo en gabinete - Aplicación de la fórmula para determinar el ICL, ICLor, ICLin y ICLmp.</p>
<p>PROBLEMA ESPECÍFICO ¿Cuál es el valor del Índice de Contaminación de Lixiviados de los compuestos orgánicos del Relleno Sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?</p>	<p>OBJETIVO ESPECÍFICO Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los compuestos orgánicos del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023</p>		
<p>¿Cuál es el Índice de Contaminación de Lixiviados de los compuestos inorgánicos del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023</p>	<p>Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los compuestos inorgánicos del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023</p>		
<p>¿Cuánto es el valor del Índice de Contaminación de Lixiviados de los metales pesados del Relleno Sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023?</p>	<p>Determinar el valor del índice de contaminación por lixiviados de los metales pesados del relleno sanitario de la provincia de Andahuaylas, Apurímac-2023</p>		

ANEXO 34

Métodos y equipos para los análisis en laboratorio

Parámetro	Método	Equipo	Unidad	Referencia
DBO₅	método Respirométrico/ Manométrico oxitop	Sensores Oxitop	mgO ₂ /L	5210D, Métodos estándar (APHA, AWWA, 2012)
DQO	Reflujo cerrado, método colorimétrico	Espectrofotómetro iris HI 801	mgO ₂ /L	5220D, Métodos estándar (APHA, AWWA, 2012)
Coliformes totales (CT)	Recuento de E.coli/coliformes Método ISO 4832	Incubadora	NMP/100	Placas Petrifilm 3M (ISO 4832, 2021)
pH	Electrodo Selectivo	Potenciómetro de mesa HI5522	-	Multiparámetro Hanna -HI HI5522
Nitrógeno amoniacal (NA)	Método Nessler	Espectrofotómetro iris HI 801	mg/L	(APHA, AWWA, 2012)
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	Método Gravimétrico	Espectrofotómetro iris HI 801	mg/L	Método 2540 B (APHA, AWWA, 1998)
Sólidos Suspendidos Totales (TDS)	Método Gravimétrico	Mufla	mg/L	Método 2540 B (APHA, AWWA, 1998)
Cloruro	Método de tiocianato de mercurio (II).	Espectrofotómetro iris HI 801	mg/L	(APHA, AWWA, 2012)
Cianuro (CN⁻)	Método Piridina-Pirazalona	Espectrofotómetro iris HI 801	mg/L	(APHA, AWWA, 2012)
hierro (Fe) Cobre (Cu) Cadmio (Cd) Zinc (Zn) Plomo (Pb) Cromo total (Cr) Mercurio (Hg) Arsénico (As) Níquel (Ni)	La cuantificación de metales se analizó en un Espectrómetro de Emisión Óptica-Plasma de Acoplamiento Inductivo, ICP-OES 9820 Shimadzu.	Espectrómetro de Emisión Óptica-Plasma de Acoplamiento Inductivo	mg/L	ICP-OES 9820

ANEXO 35

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALAS DE MEDICIÓN	MEDIDAS DE MEDICIÓN	
Parámetro del Índice de Contaminación de Lixiviados (ICL)	El Índice de Contaminación por Lixiviados (ICL) es una medida de la contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios, se utiliza para evaluar el riesgo potencial de contaminación que representan los lixiviados. Se calcula analizando las concentraciones de varios contaminantes encontrados en las muestras de lixiviados. El ICL se calcula asignando a cada contaminante un valor numérico basado en los niveles de toxicidad del contaminante y sumando después los valores para obtener un índice global. Cuanto mayor sea el ICL, más contaminado estará el relleno sanitario y mayor será el riesgo potencial para el medio ambiente. El ICL puede utilizarse para evaluar el riesgo medioambiental potencial de un relleno sanitario y ayudar a identificar áreas de preocupación e informar sobre el desarrollo de planes para la gestión de lixiviados. (Kumar y Alappat, 2005a)	El ICL es una variable cuantitativa que se utiliza para evaluar la calidad de los lixiviados, los cuales provienen de líquidos que se filtran a través de la basura. Se calcula a partir de la concentración de los contaminantes, mediante factores de ponderación. Operacionalmente $ICL = \frac{\sum_{i=1}^m w_i p_i}{\sum_{i=1}^m w_i}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> w_i, peso del parámetro. p_i, puntuación del subíndice para el parámetro. m, número de parámetros del lixiviado para los que se dispone de datos, pero en ese caso m < 18 y $\sum_{i=1}^m w_i < 1$. (Kumar y Alappat, 2005). Formula general: $ICL_{total} = 0.232 ICL_{or} + 0.257 ICL_{in} + 0.511 ICL_{mp}$	ICL orgánico (ICL or)	DBO ₅	Razón	mg O ₂ /L	
				DQO	Razón	mgO ₂ /L	
				Coliformes totales (CT)	Razón	NMP/100 m	
			ICL inorgánico (ICL in)	pH	Razón	-	
				Nitrógeno amoniacal (AN)	Razón	mg/L	
				Sólidos Disueltos Totales (TDS)	Razón	mg/L	
				Cloruro	Razón	mg/L	
				ICL metales pesados (ICL mp)	hierro	Razón	mg/L
					Cobre	Razón	mg/L
			Níquel		Razón	mg/L	
			Zinc		Razón	mg/L	
			Plomo		Razón	mg/L	
Cromo total	Razón	mg/L					
Mercurio	Razón	mg/L					
Arsénico	Razón	mg/L					
Cadmio	Razón	mg/L					
Cianuro	Razón	mg/L					

ANEXO 36

Panel Fotográfico

Fotografía 01
Recojo de muestras L1



Fotografía 02
Muestras en el laboratorio



Fotografía 03
Medición del pH

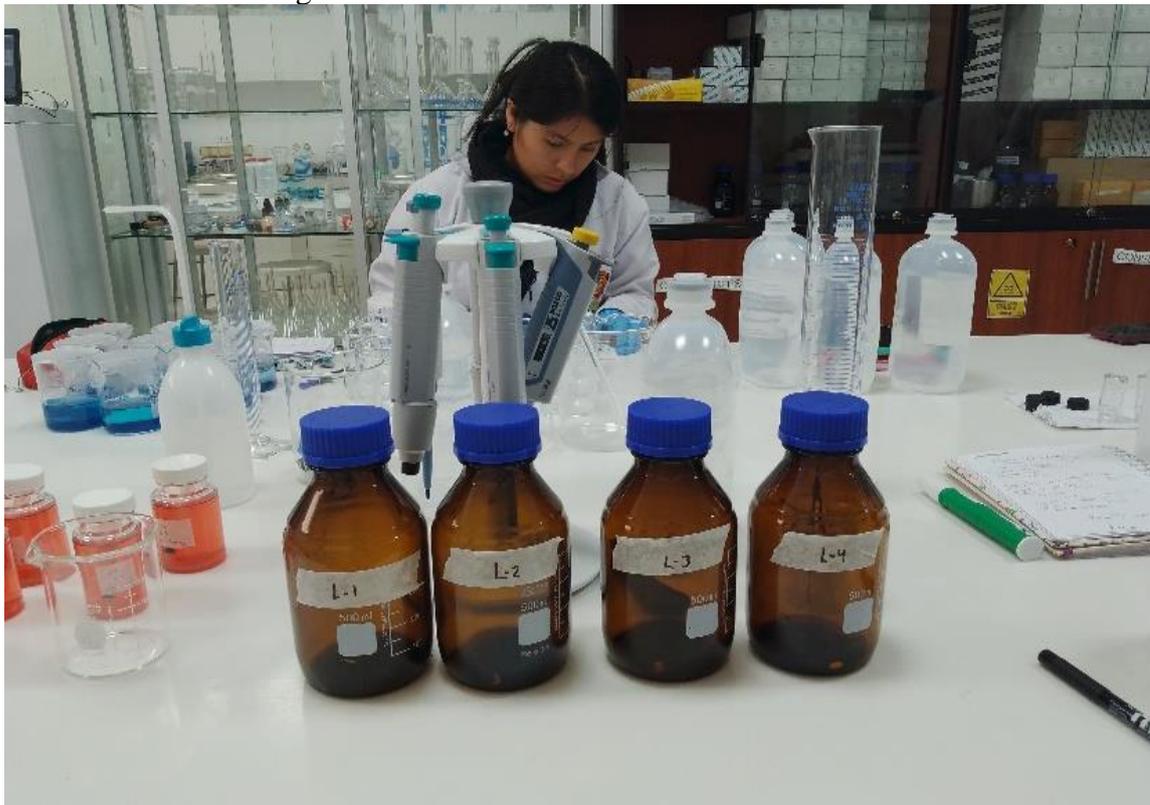


Fotografía 04
Medición de DBO₅



Fotografía 05

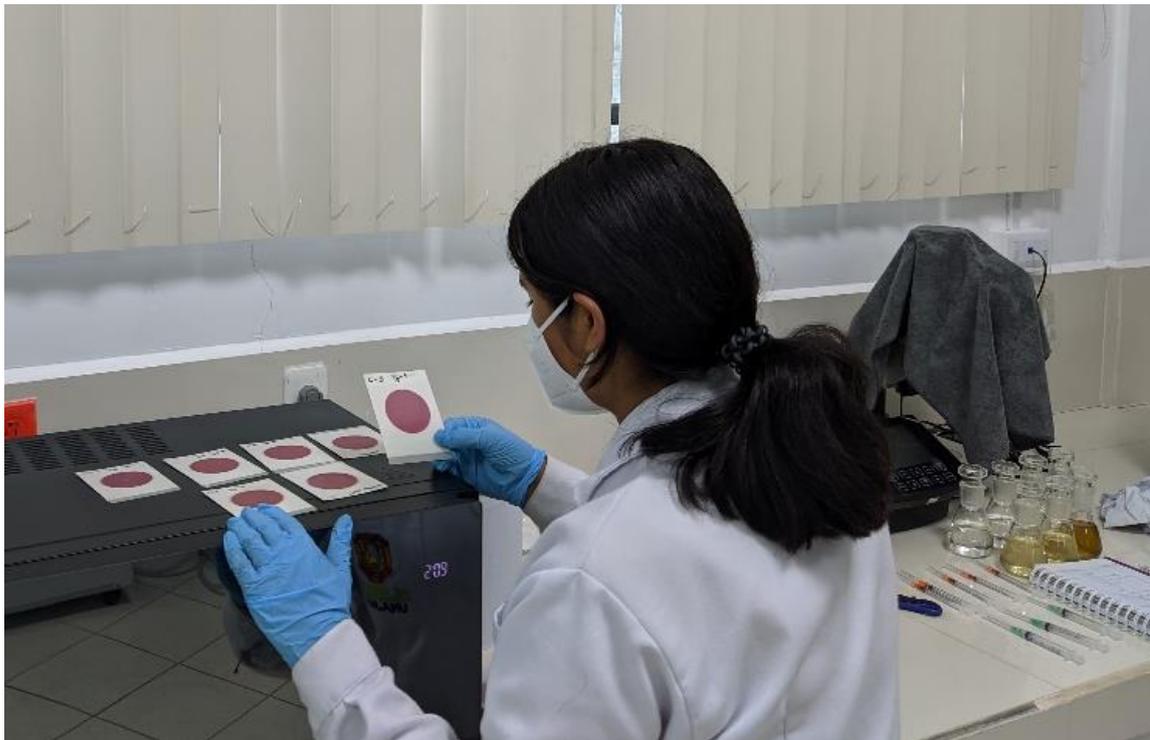
Determinación de nitrógeno total

**Fotografía 06**

Determinación de la serie de sólidos



Fotografía 07
Recuento de coliformes



Fotografía 08
Determinación de Metales con el equipo ICPE



Fotografía 09
Segundo muestreo en el L1



Fotografía 10
Determinación de Niquel con el espectrofotometro



Fotografía 11
Incubación de muestras de coliformes



Fotografía 12
Determinación del nitrógeno amoniacal



Fotografía 13
Recojo de muestras L2



Fotografía 14
Medición del Cloruro en el lixiviado



Fotografía 15

Medición de la absorbancia en el Espectrofotómetro

**Fotografía 16**

Determinación de coliformes totales



Fotografía 17
Filtración de las muestras



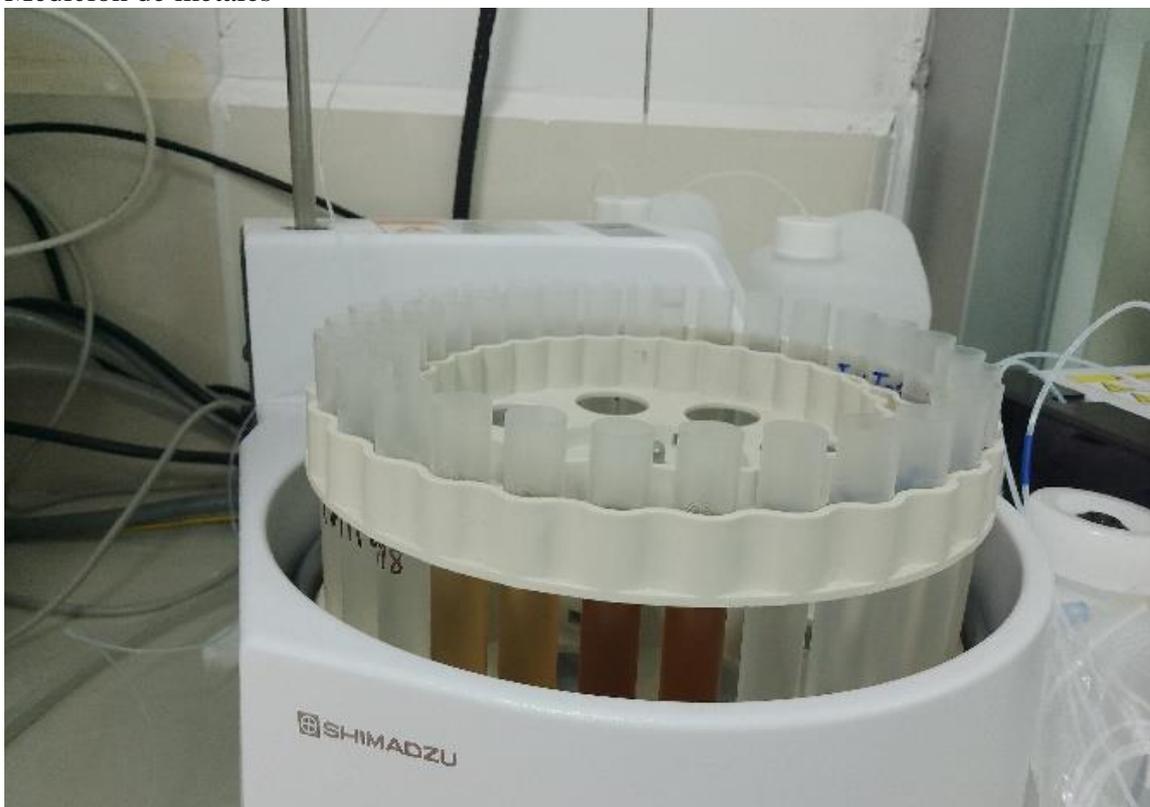
Fotografía 18
Determinación de sólidos sedimentables



Fotografía 19
Muestras para determinar microorganismos



Fotografía 20
Medición de metales



Fotografía 21
Segundo muestreo en el L2



Fotografía 22
Preparación de las muestras para los análisis





FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNAJMA

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de José María Arguedas, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 0203-2021 que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de José María Arguedas.

1. DATOS DEL AUTOR:

Nombres y Apellidos: Liliana Rodriguez Cardenas

DNI / Carnet de Extranjería: 77291389

Pasaporte N°:

Correo Institucional: 1000820181@unajma.edu.pe

Teléfono/Celular: 925810869

Correo Electrónico: brysaalarcon@gmail.com

2. GRADO, TÍTULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magíster	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

Tesis	Trabajo Académico	Trabajo de investigación	Trabajo de Suficiencia profesional
X			



4. DATOS DE LA PUBLICACION:

Título: EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR LIXIVIADOS (ICL) EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PROVINCIA ANDAHUAYLAS, 2023

Fecha de Publicación: 01/06/2024

5. DATOS DEL ASESOR:

Nombres y Apellidos: Yudith Choque Quispe

DNI/Pasaporte/Cédula: 42933337

ORCID: 0000-0002-3690-7267

.....
Firma

DOCUMENTO DE IDENTIDAD: 77291389

NOMBRES Y APELLIDOS: Liliana Rodriguez Cardenas



LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito de mi trabajo de investigación otorgo a la Universidad Nacional de José María Arguedas, una Licencia No Exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAJMA, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la Universidad Nacional de José María Arguedas, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Nacional de José María Arguedas consignará el nombre del/los autores/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

() SI autorizo que se deposite inmediatamente.

() No autorizo.

Fecha: 01/06/2024



.....
Firma

Documento de identidad: 77291389

Nombres y apellidos: Liliana Rodríguez Cardenas

