



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES

**Evaluación del comportamiento hidráulico de los lixiviados de la
fase norte I del relleno sanitario de Cuenca**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Autores:

CONTO ANDRADE OSWALDO ANDRÉS
TIPAN LOZANO DARWIN JAVIER

Director:

CÉSAR VINICIO ARÉVALO VÉLEZ

Cuenca, Ecuador

2018

DEDICATORIA

Al finalizar mi carrera universitaria quiero dedicar este trabajo de titulación a las personas que hicieron que este sueño sea una realidad, de manera muy especial a mis padres: Subp. Manuel Tipan López y Sra. Rosa Lozano López que, gracias al sacrificio realizado, al trabajo constante, al amor, al cariño, y apoyo incondicional en la parte moral y económica, he tenido la dicha y la facilidad de cursar esta carrera universitaria, ustedes son todo en mi vida padres, amigos, un ejemplo a seguir es por ello siento una gran admiración y respeto, me han demostrado que no hay obstáculo que no se pueda superar.

A mi madre, la persona que más amo en este mundo, por ser un confidente, por cada consejo brindado por ser una guerrera de la vida.

A mis hermanos Rubén, Nayely y Lady, quienes son mi motivación para cumplir mis metas, decirles que jamás se rindan y que con esfuerzo y constancia podemos realizar nuestros sueños.

Darwin Tipan L.

Siempre confiado en Dios, y gracias al apoyo de mis padres, he llegado a concluir esta etapa de mi vida. Dedico este trabajo de titulación a ellos, a Marcelo que me ha guiado por el camino de la honradez, a Juany mi madre, siendo el pilar fundamental en todos los días de mi vida y a mi abuelo Oswaldo Porfirio Andrade en el cual encontré la fuerza, a un amigo y a mi consejero. A mis hermanos Walter, Juan Pablo y Alan que son el soporte de mi vida; a mis amigos, entre ellos a Darwin, por haber podido encontrar en él un ejemplo de constancia y sinceridad.

Andrés Conto A.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer infinitamente a DIOS por darme la fuerza y la valentía para salir adelante, por darme estos padres maravillosos, y las reflexiones a cada instante.

Al Ingeniero César Arévalo M. Sc., a quien me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento por las tutorías, orientación y todo el apoyo que supo brindar para la elaboración de nuestra tesis.

A la universidad del Azuay por su acogida durante mi carrera universitaria y a sus docentes por impartir sus conocimientos de la mejor manera, e incentivarme a ser un profesional.

A la empresa EMAC-EP Y EMAC-BGP ENERGY CEM, estoy enteramente agradecido, por facilitarnos datos, materiales y equipos. De manera especial al ingeniero Santiago Vázquez, representante de las mismas, quien fue el técnico que asumió la responsabilidad de guiarnos para poder realizar nuestra investigación.

Darwin Tipan L.

A nuestro tutor de trabajo de titulación, el Ingeniero César Vinicio Arévalo Vélez, M. Sc., por habernos impulsado a dar un paso más y demostrarnos que el esfuerzo siempre vale la pena, por el tiempo dedicado y todas las facilidades que supo brindarnos.

A la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca y a EMAC-BGP ENERGY que a través del Ingeniero Santiago Vázquez y al técnico de la planta de biogás Iván Quizhpi, ofrecieron todo el apoyo necesario para la elaboración de este trabajo.

A la Universidad del Azuay y sus docentes, de manera especial al Ingeniero José Vázquez Calero, M. Sc., quien aparte de compartir sus conocimientos, nos colaboró desde el primer día en que iniciamos este proyecto.

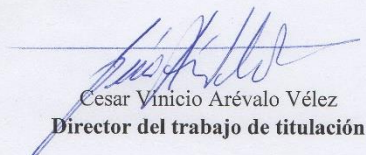
Andrés Conto A.

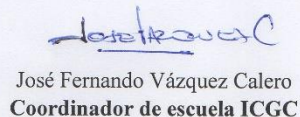
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS LIXIVIADOS DE LA FASE NORTE I DEL RELLENO SANITARIO DE CUENCA

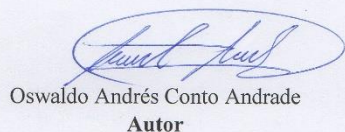
RESUMEN

El comportamiento hidráulico de lixiviados dentro de una masa de basura comprende algunas variables, después de determinarlas, estas son válidas exclusivamente para el relleno estudiado puede servir como modelo para otros sistemas. El presente estudio se realiza en el relleno sanitario de Pichacay, la observación diaria estableció los parámetros que rigen la dinámica del lixiviado, llegando a conocer la magnitud de cambio en la circulación interna que provoca bombear este líquido. Utilizando otros métodos que no son los convencionales para la extracción del lixiviado utilizamos; dos sistemas y concluimos cual es el más apto para este trabajo. Se utilizó primero el sistema con aire comprimido aplicando el principio de Venturi, el segundo fue la utilización de una bomba sumergible resistente. Se detalla los resultados de cada una de ellas.

Palabras clave: relleno sanitario, lixiviados, comportamiento hidráulico, sistema de bombeo.


Cesar Vinicio Arévalo Vélez
Director del trabajo de titulación


José Fernando Vázquez Calero
Coordinador de escuela ICGC


Oswaldo Andrés Conto Andrade
Autor

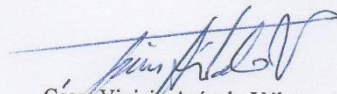
Darwin Javier Tipan Lozano
Autor

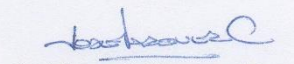
EVALUATION OF THE HYDRAULIC BEHAVIOR OF THE LEACHATE OF THE NORTH I PHASE OF THE SANITARY LANDFILL OF CUENCA

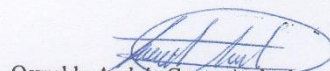
ABSTRACT

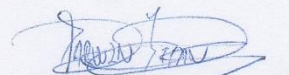
The hydraulic behavior of leachates inside a mass of garbage comprises some variables, after determining them, these are valid exclusively for the filling studied, but can serve as a model for other systems. The present study was performed in the sanitary landfill of Pichacay. The daily observation established the parameters that rule the leachate dynamics. The magnitude of change in the internal circulation that caused pumping this liquid was determined. Using non-conventional methods for the extraction of leachate, two systems were used and it was concluded which is the most suitable for this work. The first system used compressed air applying the Venturi principle and the second system used a resistant submersible pump. The results of each of them were detailed.

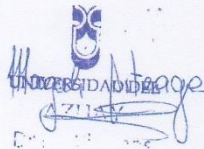
Keywords: sanitary landfill, leachates, hydraulic behavior, pumping system.

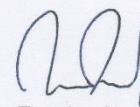

César Vinicio Arévalo Vélez
Thesis Director


José Fernando Vázquez Calero
ICGC School Coordinator


Oswaldo Andrés Conto Andrade
Author


Darwin Javier Tipan Lozano
Author


UNIVERSIDAD DE CUENCA
2011



Translated by:

Ing. Paúl Arpi

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RSM	Rellenos sanitarios municipales.
RSU	Residuos sólidos urbanos.
CO ₂	Dióxido de carbono.
H ₂ O	Molécula de agua.
CH ₄	Metano.
DQO	Demanda química de oxígeno.
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno.
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días.
pH	Coeficiente que indica el grado de acidez.
H ₂	Dihidrógeno.
VFA	Ácidos grasos volátiles.
COT	Carbono orgánico total.
DOC	Demanda de oxígeno químico.
CaCO ₃	Carbono de calcio.
SO ₄	Óxido de azufre.
Ca	Calcio.
C	Carbono.
O	Oxígeno
H	Hidrógeno.
S	Azufre.
N	Nitrógeno.

Mg	Magnesio.
Fe	Hierro.
Mn	Manganeso.
Zn	Zinc.
Sr	Estroncio.
NH ₃	Amoniaco.
MOFBD	Materia orgánica fácilmente biodegradable.
TVA	Ácidos volátiles totales.
p	Precipitación.
J	Riego o lixiviado de recirculación.
r	Escorrentía superficial.
R *	Escorrentía de áreas externas.
ET	Evapotranspiración.
U _s	Contenido de agua en suelo.
U _w	Contenido de agua en los desechos.
s	Agua añadida por eliminación de lodos.
B	Agua causada por degradación de la materia orgánica.
L _s	Agua de acuíferos naturales
L _G	Agua de acuíferos naturales
L ₁	Infiltración en acuíferos.
L _R	Lixiviado recogido por los desagües.
Q	Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/seg).
P	Precipitación media anual (mm/año).

A	Área superficial del relleno(m ²).
t	tiempo en segundos.
K*	Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura.
ΔS_{RS}	Variación de la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno sanitario (m ³).
W_{RS}	Agua (humedad) de los residuos sólidos entrantes (m ³ /año).
W_{MC}	Agua (humedad) en el material de cobertura (m ³ /año).
$W_{A(u)}$	Agua filtrada superiormente (para la capa superior del vertedero el agua desde arriba procede la lluvia) (m ³ /año).
W_{GV}	Agua perdida en la formación de gas de vertedero (m ³ /año).
W_{VA}	Agua perdida como vapor de agua (m ³ /año).
$W_{F(L)}$	Agua que sale inferiormente(m ³ /año).
M	Contenido de humedad, porcentaje.
W	Peso inicial de la muestra según se entrega (kg).
D	Peso de la muestra después de secarse a 105°C (kg).
w_r	Peso de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario (kg).
δ_{H_2O}	Densidad del agua(kg/m ³)
M	Masa (kg).
V	Volumen (m ³).
CC	Capacidad de campo.
w_{mc}	Peso del material de cobertura (m ³ /año).

CC_{MC}	Capacidad de campo del material de cobertura.
w_{GV}	La cantidad de agua consumida (Kg H ₂ O/m ³ biogás).
w_{VA}	La cantidad de vapor de agua (Kg H ₂ O/m ³ biogás)
$V_{biogás}$	Volumen de biogás (m ³).
p_v	Presión de vapor del H ₂ O a una temperatura T, en atm.
n	Nunero de moles.
R	Constante universal de los gases 1/°k.
T	Temperatura
NMOC	Compuestos orgánicos no metamos.
LFG	Landfill Gas.
Q_1	Cantidad total del biogás generado (m ³ normales).
N	Número total de años modelado.
t_{lag}	Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación del metano.
% vol	Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.
L_0	Volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho sólido.
K	Tasa estimada de descomposición del desecho orgánico.
M_w	Megavatios.
W	Vatios.
BHP	Boiler Horse Power (Caldera caballos de fuerza).
BTU	British thermal unit (Unidad térmica británica).

HDPE	Poliestireno de alta densidad de 1 milímetro de espesor.
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero).
PSI	Libras por pulgada cuadrada.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLA.....	xix
INDICE DE ANEXOS	xxi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
1 General	2
1.1 Evaluar el comportamiento hidráulico de los lixiviados de la fase Norte I del Relleno Sanitario de Cuenca.....	2
2 Específicos.....	2
2.1 Calcular el caudal teórico de los lixiviados que se generan en la Fase Norte I.2	
2.2 Determinar el caudal real o volumen extraído, transportado efectivamente, que se generan en la Fase Norte I.	2
2.3 Determinar un balance entre los caudales teóricos y reales de los lixiviados. .	2

2.4	Determinar el tiempo de recarga de los lixiviados en los pozos de extracción de biogás. 2	
CAPÍTULO I.....		3
1	DESCRIPCIÓN DEL COMPLEJO DE DESARROLLO HUMANO Y AMBIENTAL PICHACAY.	3
1.1	Localización y ubicación.	3
1.2	Área de estudio.	4
1.3	Características generales.	5
1.3.1	Componentes del Complejo.	5
1.3.1.1	Relleno Sanitario.	6
1.3.1.2	Piscinas de lixiviados.	7
1.3.1.3	Planta de esterilización de residuos infecciosos.....	8
1.3.1.4	Estación Meteorológica.....	9
1.3.1.5	Planta de Biogás.....	10
1.4	Descripción técnica del sistema de recolección de biogás.	12
1.4.1	Pozos.....	13
1.4.2	Conexión hacia la línea principal	14
1.4.3	Línea principal.....	15
1.4.4	Colector de gas.	15
1.4.5	Condensador de gas.	15
CAPÍTULO II.....		17
2	BASE TEÓRICA.....	17
2.1	Relleno sanitario o vertedero.	17
2.1.1.	Procesos bioquímicos básicos en los rellenos sanitarios.	17

2.1.2.	Ecología de la formación del metano.	18
2.1.3.	Factores abióticos gobernantes.	19
2.1.4.	Modelo para la producción de lixiviado y gas en un relleno sanitario.	20
2.1.4.1	Fase I: Ajuste inicial.	20
2.1.4.2	Fase II: Fase de transición.	20
2.1.4.3	Fase III: Fase ácida.	21
2.1.4.4	Fase IV: Fase de fermentación del metano.	21
2.1.4.5	Fase V: Fase de maduración.	22
2.2	Lixiviado.	23
2.2.1.	Composición de lixiviado.	24
2.2.2.	Variaciones en la composición del lixiviado.	26
2.2.3.	Recirculación de lixiviado.	27
2.2.4.	Generación de lixiviado.	29
2.2.5.	Cantidad de los lixiviados.	30
2.2.5.1	El área rellena.	30
2.2.5.2	La cantidad de infiltración.	31
2.2.5.3	Sistema de drenaje e impermeabilización.	31
2.2.6.	Caudal teórico.	31
2.2.6.1	Método suizo.	32
2.2.6.2	Método del balance hídrico.	32
2.2.6.2.1	Agua filtrada superiormente.	34
2.2.6.2.2	Agua aportada por los residuos sólidos.	35
2.2.6.2.3	Agua aportada por el material de cubrición.	36
2.2.6.2.4	Lixiviado evacuado por los drenes.	37

2.2.6.2.5	Agua consumida en la formación del gas de vertedero.	38
2.2.6.2.6	Agua perdida como vapor de agua.....	41
2.2.7	Caudal real.....	42
2.3	Biogás.....	42
2.3.1	Composición del biogás.	42
2.3.2	Producción del biogás.....	43
2.3.2.1	Modelo de biogás	44
2.3.2.2	Parámetros del modelo.....	45
2.3.2.2.1	Tasa estimada de descomposición del desecho orgánico (K).....	45
2.3.2.2.2	Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno (%vol). 46	
2.3.2.2.3	Volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho sólido (L_0).....	46
2.3.2.2.4	Eficiencia del sistema de recolección.	48
CAPÍTULO III		49
3	INVESTIGACIÓN.....	49
3.1	Muestreo.....	49
3.2	Fecha en la que se realizó la investigación.....	49
3.3	Método de recopilación de la información.....	49
3.4	Metodología de trabajo.....	50
3.5	Materiales y equipo.	51
3.5.1	Equipo de seguridad.	51
3.5.2	Nivel de lixiviados.....	53
3.6	Presión del gas.....	56

3.7	Estabilización del nivel de lixiviado.....	56
3.8	Datos obtenidos.	58
CAPÍTULO IV		65
4	CÁLCULOS Y RESULTADOS.	65
4.1	Estimación de la generación de gas de vertedero.	65
4.2	Proyección de la generación de biogás.....	66
4.3	Caudal teórico.....	69
4.3.1	Cálculo del caudal teórico mediante el método suizo.	69
4.3.2	Cálculo del caudal teórico mediante el balance hídrico.	70
4.3.2.1	Agua filtrada superiormente ($W_{A(u)}$).....	71
4.3.2.2	Agua aportada por los residuos sólidos (W_{RS}).	71
4.3.2.3	Agua aportada por el material de cubrición (W_{MC}).....	73
4.3.2.4	Lixiviado evacuado por los drenes ($W_{F(L)}$).	73
4.3.2.5	Agua consumida en la formación del gas de vertedero (W_{GB}).	74
4.3.2.6	Agua perdida como vapor de agua (W_{VA}).....	76
4.4	Cálculo del caudal real de lixiviado.	79
CAPITULO V		80
5	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.	80
CONCLUSIONES.....		89
RECOMENDACIONES		92
BIBLIOGRAFÍA.....		93
ANEXOS.....		95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización del Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay...	3
Figura 1.2: Relleno Sanitario de Pichacay – Fase Norte II.	4
Figura 1.3: Relleno Sanitario de Pichacay – Fase Norte I.	7
Figura 1.4: Piscinas para la recolección de lixiviados.	7
Figura 1.5: Planta de esterilización de residuos infecciosos.	8
Figura 1.6: Autoclaves Tuttnaver.	9
Figura 1.7: Estación Meteorológica.	10
Figura 1.8: Bioprocesador.	12
Figura 1.9: Motor para la generación eléctrica a través de la combustión de metano....	12
Figura 1.10: Pozo 17 – Fase Norte I.	14
Figura 1.11: Condensador de gas.	15
Figura 2.1: Etapas de la digestión anaerobia.	19
Figura 2.2: Fases generales en la generación de gases y lixiviado en un vertedero.	22
Figura 2.3: Esquema del balance hidrológico general en un vertedero sanitario completo con sistema de drenaje de lixiviado.	30
Figura 2.4: Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación de lixiviado en un vertedero.	33
Figura 3.1: Plano de la georreferenciación del sistema para el aprovechamiento de biogás – fase Norte I.	61
Figura 4.1: Proyecciones de generación y recuperación método gráfico.	68
Figura 5.1: Caudal teórico de lixiviado.	80
Figura 5.2: Caudal real de lixiviado.	81
Figura 5.3: Caudal teórico vs Caudal real.	82

Figura 5.4: Altura por día de lixiviado (pozos 1 al 7).	83
Figura 5.5: Altura por día de lixiviado (pozos 8 al 15).	83
Figura 5.6: Altura por día de lixiviado (pozos 16 al 23).	84
Figura 5.7: Comportamiento por día del lixiviado pozos del 1 al 7.	84
Figura 5.8: Comportamiento por día del lixiviado pozos del 8 al 15.	86
Figura 5.9: Comportamiento por día del lixiviado pozos del 16 al 23.	87
Figura 0.1: Excavación mediante retroexcavadora Case 580N para extraer la cabeza temporal del pozo.	118
Figura 0.2: Extracción de la cabeza temporal.....	118
Figura 0.3: Estado en el que se encontraba el pozo de 160 milímetros.....	119
Figura 0.4: Cabeza utilizada para cubrir el tubo de 160 milímetros.	119
Figura 0.5: Colocación de la cabeza del pozo sobre el tubo de 160mm.....	120
Figura 0.6: Verificación, de la correcta colocación , de la cabeza de pozo mediante niveles.....	120
Figura 0.7: Compactación de arcilla al alrededor del el pozo de biogás.	121
Figura 0.8: Término de la compactación mediante apisonador.....	121
Figura 0.9: Excavación de la línea principal de biogás.	122
Figura 0.10: Conexión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la cabeza del pozo.	122
Figura 0.11: Conexión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la nueva tubería de biogás.....	123
Figura 0.12: Cortes realizados en la tubería.	123
Figura 0.13: Unión de la nueva tubería a la línea principal.....	124
Figura 0.14: Unión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la tubería conectada a la línea principal.	124
Figura 0.15: Accesorios de electrofusión.	125

Figura 0.16: Maquina de soldadura por electrofusión.....	125
Figura 0.17: Generador a diésel utilizado para la maquina soldadora.....	125
Figura 0.18: Aplicación de la maquina soldadora mediante electrofusión.....	126
Figura 0.19: Pozo de biogás en el cual se va a trabajar.	127
Figura 0.20: Generador y compresor utilizados en la extracción del lixiviado.	127
Figura 0.21: Vehículo utilizado para transportar los instrumentos y equipos utilizados durante la extracción del lixiviado.....	129
Figura 0.22: Instrumentos y equipos transportados.....	129
Figura 0.23: Mediante el juego de llaves destapamos el pozo de biogás.	130
Figura 0.24: Pozo de biogás sin la tapa.	130
Figura 0.25: Mediante una cuerda determinamos la altura inicial del lixiviado.	131
Figura 0.26: Descarga de la bomba sumergible con la cual se va a trabajar.	132
Figura 0.27: Colocación de la bomba en el pozo de biogás.	132
Figura 0.28: Altura del lixiviado después del bombeo.....	133
Figura 0.29: Cierre del pozo de biogás.....	133
Figura 0.30: Tubería de acero inoxidable con los controles de presión.	134
Figura 0.31: Líneas de biogás del norte I Y II.....	134
Figura 0.32: Casa de máquinas.....	135
Figura 0.33: Biprocesador.	135
Figura 0.34: Quemador de gas.....	137
Figura 0.35: Motor de combustión interna.	138
Figura 0.36: Subestación electica.	139
Figura 0.37: Paneles de control.	140

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.1. Composición de los residuos sólidos de la fase norte 1 del relleno sanitario de Pichacay.....	5
Tabla 2.1: Clasificación de lixiviados, características vs edad del relleno.....	23
Tabla 2.2. Datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.	25
Tabla 2.3: Valores de análisis de lixiviados para los parámetros con las diferencias entre acético y fase metanogénicas.....	27
Tabla 2.4: Efecto de la recirculación del lixiviado sobre las características de los lixiviados durante las fases acetogénica y fase Metanogénica Todos los valores en mg / L.....	28
Tabla 2.5: Capacidad de campo (CC) para varias clasificaciones de suelo.	37
Tabla 2.6: Constituyentes orgánicos rápidamente y lentamente biodegradables en los RSU	39
Tabla 2.7: Constituyentes orgánicos rápidamente descomponibles.	39
Tabla 2.8: Constituyentes orgánicos lentamente descomponibles.	40
Tabla 2.9: Composición molar de los elementos despreciando la ceniza.	40
Tabla 2.10: Valores estequiométricos correspondientes al aporte hídrico de la reacción a los lixiviados.....	40
Tabla 2.11: Composición del gas de relleno sanitario.....	43
Tabla 2.12: Tabla para calcular L_0 y k	47
Tabla 2.13: Parámetros utilizados para la generación de biogás analizando distintos métodos.....	47
Tabla 2.14: Valores sugeridos de la eficiencia de recolección de rellenos sanitarios en Ecuador.....	48
Tabla 3.1: Implementos para la seguridad industrial.....	51
Tabla 3.2: Herramientas utilizadas para determinar el nivel del lixiviado.....	53

Tabla 3.3: Herramientas utilizadas para determinar la presión del gas.	56
Tabla 3.4: Herramientas utilizadas en la estabilización del gas.	56
Tabla 3.5: Valores de las precipitaciones.	58
Tabla 3.6: Peso de los residuos sólidos.	58
Tabla 3.7: Volumen de material de cobertura.	59
Tabla 3.8: Volúmenes de lixiviado.....	59
Tabla 3.9: Altura teórica y real de los pozos.	60
Tabla 3.10: Nivel de lixiviados antes y después del bombeo.	62
Tabla 3.11: Presión del gas después del bombeo.	63
Tabla 3.12: Nivel de lixiviados y tiempo de estabilización.....	64
Tabla 4.1: Ingreso de datos en el archivo de Microsoft Excel.	65
Tabla 4.2: Ingreso de datos en el archivo de Microsoft Excel.	65
Tabla 4.3: Proyecciones de generación y recuperación de biogás del relleno sanitario de Pichacay.....	66
Tabla 4.4: Proyecciones de generación anual de biogás en el relleno sanitario de Pichacay.	66
Tabla 4.5: Caudal teórico de lixiviado.....	69
Tabla 4.6: Caudal teórico mediante método suizo.	70
Tabla 4.7: Cálculo del agua aportada por los residuos sólidos.....	72
Tabla 4.8: Volumen de lixiviado extraídos del relleno sanitario.....	73
Tabla 4.9: Caudal real de lixiviado.....	79

INDICE DE ANEXOS

ANEXOS 1: Persona que colaboro en la obtención de datos	95
ANEXOS 2: Modelo de una tabla utilizada para la recopilación de datos.....	97
ANEXOS 3: Control diario de los pozos de biogás considerando el incremento o decremento en cada uno de ellos	99
ANEXOS 4: Gráficos de los niveles de lixiviado y presiones en los pozos de biogás	106
ANEXOS 5: Recopilación fotográfica de las actividades realizadas durante el transcurso del proyecto	117
ANEXOS 6: Planos	141

Conto Andrade Oswaldo Andrés

Tipan Lozano Darwin Javier

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS LIXIVIADOS DE LA FASE NORTE I DEL RELLENO SANITARIO DE CUENCA

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos urbanos sólidos es tan importante hoy en día que su estudio ha generado varios métodos o sistemas para que éstos reciban una disposición final correcta, buscando causar el menor impacto en el ambiente; el relleno sanitario de Pichacay, ubicado en Cuenca, provincia del Azuay, implantó un sistema de tratamiento para el biogás generado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica, presente en los residuos que son acumulados en el vertedero, este sistema consiste en la generación de energía eléctrica a través de la combustión del metano.

La extracción del biogás depende de varios factores, uno de ellos es el nivel que alcanza el lixiviado dentro de la masa de basura; éste fluido, necesario para la generación del gas, debe mantener un nivel óptimo dentro del relleno para permitir que el gas circule sin mayor dificultad hacia las tuberías que lo transportan al motor de combustión; por lo que es necesario conocer la dinámica del lixiviado.

El nivel de este líquido percolado está en dependencia de algunas características propias de cada relleno, estas son: su edad, las precipitaciones en la zona, la infiltración del agua lluvia en la capa de cobertura del relleno, la temperatura ambiente y los sistemas de drenaje.

Este trabajo permitirá la elaboración de un balance hídrico, con lo que se determinará el comportamiento hidráulico del lixiviado de la fase norte I del relleno sanitario de Cuenca.

OBJETIVOS

1 General

- 1.1** Evaluar el comportamiento hidráulico de los lixiviados de la fase norte I del relleno sanitario de Cuenca.

2 Específicos

- 2.1** Calcular el caudal teórico de los lixiviados que se generan en la fase norte I.
- 2.2** Determinar el caudal real o volumen extraído, transportado efectivamente, que se generan en la fase norte I.
- 2.3** Determinar un balance entre los caudales teóricos y reales de los lixiviados.
- 2.4** Determinar el tiempo de recarga de los lixiviados en los pozos de extracción de biogás.

CAPÍTULO I

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPLEJO DE DESARROLLO HUMANO Y AMBIENTAL PICHACAY.

1.1 Localización y ubicación.

El Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay, se encuentra localizado en la comunidad de Pichacay de la parroquia Santa Ana, a 21 kilómetros del núcleo urbano de la ciudad de Cuenca, a una altura de 2619 msnm. El sitio tiene las siguientes coordenadas geográficas:

$2^{\circ}57'56.10''\text{S}$

$78^{\circ}55'47.96''\text{O}$

En general, el clima de la zona se caracteriza por ser del tipo templado – seco, como muchas de las áreas andinas ubicadas en altitudes entre los 2.600 a los 2.750 msnm (INGA AGUAYZA & ROMERO PACHECO , 2011).

El complejo se encuentra conectado a la ciudad de Cuenca por la carretera camino al Valle – Santa Ana recorriendo 11.60 kilómetros, luego se toma un desvío de 4 kilómetros por una carretera secundaria que se dirige directamente hacia el relleno, en la figura 1.1 se muestra la ubicación del complejo mediante fotografía satelital.

Figura 1.1. Localización del Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay.



Fuente. Google Earth, 2017.

En general, el clima de la zona se caracteriza por ser del tipo templado – seco, como muchas de las áreas andinas ubicadas en altitudes entre los 2.600 a los 2.750 msnm (INGA AGUAYZA & ROMERO PACHECO , 2011).

1.2 Área de estudio.

El complejo cuenta con un área de 123 hectáreas, se espera que en este espacio se pueda desarrollar las tres fases que contempla el proyecto, que tiene una vida útil de 30 años. La primera, fase norte I, inició su operación en septiembre del 2001 y fue clausurada el 11 de mayo de 2009 (INGA AGUAYZA & ROMERO PACHECO , 2011), para iniciar con la fase norte II, que se observa en la figura 1.2 y que se encuentra activa en la actualidad. Una vez culminada esta fase se iniciará con la fase sur, la cual está proyectada hasta el 2031, donde la vida útil del relleno sanitario llega a su fin.

Figura 1.2. Relleno sanitario de Pichacay – fase norte II.



Fuente. Autores, 2017.

Para el estudio se seleccionó la fase norte I, debido a que por ser una fase clausurada presenta mayor estabilidad en todos sus componentes, con lo que se precisa que el estudio sea lo más exacto posible. A continuación, en la tabla 1.1 se detalla la composición de los desechos domésticos para los que fue diseñada la fase norte I.

Tabla 1.1. Composición de los residuos sólidos de la fase norte 1 del relleno sanitario de Pichacay.

Composición	Cantidad (%)
Materia orgánica	62.94
Papel y cartón	8.83
Metales	1.22
Plásticos	3.99
Materia inerte	10.73
Papel higiénico	4.74
Otros	7.55
Total	100

Fuente. EMAC-EP, 2016.

1.3 Características generales.

El Complejo de Pichacay fue diseñado para recolectar los desechos sólidos urbanos de la ciudad de Cuenca y de poblaciones cercanas dentro de la zona austral del país, entendiéndose por desechos sólidos urbanos a todo desperdicio que es generado en domicilios, comercios, instituciones, construcciones y demoliciones, mercados, hospitales, podas de jardín, etc. Aquí llegan alrededor de 400 toneladas diarias de desechos sólidos y para poder darles un tratamiento adecuado a todos estos residuos el complejo cuenta con varios componentes, que permiten manejar los desechos de una manera segura y amigable con el medio ambiente.

1.3.1 Componentes del complejo.

El Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay está conformado por el relleno sanitario que se divide en tres fases, la fase norte I (clausurada), fase norte II (activa) y fase sur (inactiva); también cuenta con dos piscinas para la recolección de lixiviados y una piscina adicional que se utiliza en el caso de una producción excesiva de lixiviados o

en situaciones de emergencias; además aquí se encuentra la planta para el tratamiento y esterilización de residuos infecciosos, la planta de aprovechamiento de biogás y generación de energía, la estación de reciclaje y la finca integral.

1.3.1.1 Relleno sanitario.

Este equipamiento del complejo utiliza el método de disposición final en el suelo para los desechos sólidos, siendo un relleno mecanizado, el cual maneja técnicas de ingeniería para reducir su volumen y prevenir cualquier tipo de contaminación a las aguas, el aire y al ambiente general.

La fase norte I y norte II inician con la impermeabilización del suelo de fondo, en donde lo primero fue colocar una cobertura de arena de entre 6 y 8 centímetros de profundidad sobre el terreno original, sobre esta capa se colocó geomembrana PHDE (poliestireno de alta densidad de 1 milímetro de espesor), y en donde se encuentran los drenes en forma de cola de pescado. Desde aquí inician las celdas del relleno donde los desechos son depositados, compactados y cubiertos diariamente con una capa de arcilla de 15 a 20 cm de espesor.

Para la fase norte I, que se muestra en la figura 1.3, como aliviaderos de los gases generados en la masa de basura, se utilizaron chimeneas que quemaban el gas, pero en el año 2014 se produjo un cambio en la manera en la que esté era tratado, captándolo a través de pozos ubicados específicamente en la masa de basura para posteriormente trasladarlo a través de un sistema de tuberías hacia un motor.

Figura 1.3. Relleno sanitario de Pichacay – fase norte I.



Fuente. Autores, 2017.

1.3.1.2 Piscinas de lixiviados.

La putrefacción natural de los residuos urbanos produce un líquido de color negro y olor desagradable llamado lixiviado, que sumado a la infiltración de las aguas lluvias a través de la cobertura vegetal del relleno llegan a la cota de arranque del proyecto. El propio diseño del relleno permite que los drenajes recolecten el lixiviado y que, por gravedad, éste sea conducido a las partes bajas del relleno, donde están ubicadas las piscinas como se observa en la figura 1.4.

Figura 1.4. Piscinas para la recolección de lixiviados.



Fuente. EMAC, 2016.

Entre las dos piscinas, que están en uso continuo, se tienen una capacidad de 2.400 metros cúbicos aproximados, aquí el lixiviado es colocado en tanqueros a través de una bomba y manguera, para ser transportado hacia los tanques herméticos de ferrocemento y tanques de tormenta, que dirigen el líquido percolado hacia la planta de tratamiento de aguas residuales de ETAPA.

1.3.1.3 Planta de esterilización de residuos infecciosos.

La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca, EMAC EP, brinda el servicio de recolección selectiva, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos biopeligrosos. Este equipamiento da tratamiento a más de 2.500 kilogramos diarios de desechos sanitarios infecciosos provenientes de hospitales, consultas médicas, veterinarias, centros estéticos y farmacias, que por sus características físicas, químicas o bacteriológicas representan un peligro o riesgo para la salud de las personas o del ambiente.

Figura 1.5. Planta de esterilización de residuos infecciosos.



Fuente. EMAC, 2016.

Los desechos infecciosos son esterilizados en la planta, donde se eliminan las características de peligrosidad, a través de los siguientes equipos:

2 autoclaves Tuttnaver de 2.000 litros de capacidad cada una (figura 1.6).

2 calderos Lattner de 40 BHP.

Figura 1.6. Autoclaves Tuttnaver.



Fuente. EMAC, 2016.

1.3.1.4 Estación meteorológica.

Este equipamiento permite el monitoreo constante de las condiciones climáticas de los sectores cercanos a la comunidad de Pichacay, incluyendo el relleno.

Figura 1.7: Estación meteorológica.



Fuente. Autores, 2017.

1.3.1.5 Planta de biogás.

El proyecto para el aprovechamiento de biogás, inicio en el año 2012, cuando se constituyó la compañía mixta EMAC-BGP ENERGY, donde la EMAC EP participó con un capital del 51% y BGP-HOLANDA con el 49%.

La planta de energía se encuentra ubicada en un lugar estratégico con respecto al complejo, ya que esta aproximadamente en el punto medio entre las tres fases que llegará a tener el relleno, esto con la finalidad de que las líneas para transportar el gas sean lo más cortas posibles.

Con esta planta se prevé reducir la contaminación atmosférica gracias a la captación y aprovechamiento del gas metano que se genera en el relleno sanitario de Pichacay, por la descomposición de los desechos orgánicos que son sepultados en celdas y terrazas previstas para esta disposición, conocido como el sistema anaeróbico.

Este equipamiento cuenta con los siguientes dispositivos: el bio-procesador que se muestra en la figura 1.8, que es un extractor de biogás generado en la masa de basura; un

refrigerante, que condensa el gas, disminuyendo su humedad y aumentando su calidad; el cerebro del equipo, desde donde se controlan las revoluciones del motor, la extracción, calidad y flujo del gas. Dentro de la casa de máquinas se encuentra también el motor y la chimenea para quemar el metano o su exceso, un sistema incorporado en la matriz de las líneas de gas para monitorear el mismo, y un escape de gases.

Todos estos dispositivos sirven para controlar los parámetros como el porcentaje de metano que ingresa al motor, sus condiciones óptimas para el funcionamiento de la planta, que son de un porcentaje mayor al 50% de metano y un porcentaje menor al 1% de oxígeno.

La casa de máquinas tiene espacio suficiente para albergar dos motores, esto debido a que se espera implementar otro motor en el año 2019 y llegar a operar al 100% de su capacidad de generación de energía eléctrica, la cual es de 2Mw de potencia, con lo que se planea brindar servicio eléctrico a un aproximado de 8.000 familias.

Desde la casa de máquinas partes dos líneas principales que se dirigen hacia el norte I y norte II, en cada una de estas fases existen pozos para la extracción del biogás, en la primera fase existen 23 pozos, que se conectan a tres líneas que conducen el gas hacia la línea principal que va hacia la casa de máquinas, esta fase aporta con un promedio de 20m³/h de gas.

Cada pozo cuenta con tres válvulas en la parte superior, con el fin de tener un control más preciso del gas.

Figura 1.8. Bioprocesador.



Fuente. Autores, 2017.

1.4 Descripción técnica del sistema de recolección de biogás.

“En el caso de un vertedero activo, la presión interna normalmente es mayor que la presión atmosférica y el gas de vertedero saldrá mediante difusión y flujo convectivo (conducido por presión)” (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Gestión Integral de Residuos Sólidos , 1994).

Para el aprovechamiento de biogás en este relleno, se optó por captar el CH₄ para que luego este sirva de combustible al motor de la figura 1.9 y genera electricidad. El sistema para la recolección del metano está constituido por pozos, contruidos y ubicados estratégicamente, cada uno de estos presenta en la parte superior una conexión hacia una línea de tuberías, que recoge el gas de cada pozo que se encuentra dentro de esa línea y lo dirige hacia el colector de gas, esta línea de transporte es la encargada de llevar todo el gas generado en cada una de las fases, hacia el eje condensador, para luego ingresar por una tubería a la casa de máquinas donde se le dará el uso esperado.

Figura 1.9. Motor para la generación eléctrica a través de la combustión de metano.



Fuente. Autores, 2017.

1.4.1 Pozos.

Estos elementos del sistema de extracción se encuentran ubicados en diferentes terrazas del relleno, espaciados en una longitud de 50 metros, cada uno de ellos tiene un calado diferente, que va desde los seis metros hasta los 35 metros, el cual está en dependencia de su propia ubicación, siendo los más profundos aquellos que se encuentran en las terrazas superiores y los más cortos aquellos que se ubiquen en terrazas cuya altura es la más cercana a la cota de arranque de la fase.

La parte más profunda del pozo está constituida por una cerca, formada por cuatro pingos de madera que sirven de soporte para la malla de acero hexagonal, dentro de este cerramiento se coloca grava con un diámetro de entre 16 a 32 milímetros. Estos cerramientos son superpuestos hasta alcanzar una altura, que será de tres metros menor que la altura total del pozo. Una tubería PHDE perforada de 160 milímetros se coloca en el centro del cerramiento, esta tendrá una longitud de 2,5 metros menor que la cota del pozo.

La figura 1.10 muestra la configuración de los pozos, la parte superior del pozo está conformada por la conexión a la línea la cual es una brida perforada en el tubo exterior, el cual tiene una longitud de tres metros y un diámetro de 315 milímetros, en la parte baja

de esté se introduce la cabeza de la tubería PHDE perforada de 160 milímetros. El pozo está cerrado herméticamente gracias a un empaque de 315 milímetros de diámetro interno y 445 milímetros de diámetro externo, que es presionado por una brida ciega de 445 milímetros de diámetro, ajustada por 12 pernos.

Figura 1.10. Pozo 17 – fase norte I.



Fuente. Autores, 2017.

1.4.2 Conexión hacia la línea principal.

Un empate en la brida del tubo exterior, acopla una tubería de acero inoxidable AISI 304, que tiene al inicio una válvula bola que permite controlar la calidad y otras características del metano que se encuentra en el relleno, tiene una longitud de 67 centímetros, soldada al reductor excéntrico, el cual proporciona la unión con la válvula mariposa, dicha válvula permite o interrumpe el flujo del gas hacia la línea principal. Conectada a está, el siguiente reductor excéntrico que enchufa la válvula mariposa con el siguiente segmento de tubería AISI 304, donde está la segunda válvula bola que permite conocer las características del gas en ese punto, pero dentro de la línea principal. La conexión finaliza con la manguera flexible, que sirve de paso al gas para llegar finalmente a la línea principal.

1.4.3 Línea principal.

Constituida por una tubería de 160 milímetros de diámetro que conecta todos los pozos que se encuentran en una misma terraza y las lleva hacia el colector de gas.

1.4.4 Colector de gas.

Es el punto donde se encuentran las líneas principales de cada fase, disponen de una misma configuración que la conexión hacia la línea principal, es decir presentan dos válvulas bolas para controlar las propiedades del CH₄ y una válvula mariposa que permite el paso del gas en cada línea existente. Estas se acoplan a la tubería de 200 milímetros que es la que llevará todo el gas de la fase hacia el condensador.

1.4.5 Condensador de gas.

Es la parte del sistema que permite descargar todo el gas condensado que se acumula a lo largo de las tuberías por las cuales recorre el metano, éste está construido bajo tierra. En el inferior del condensador se encuentra un sifón, aquí se drenará, por gravedad, todo el líquido condensado del sistema. De esta manera se logra un combustible más puro para el motor y a la vez se impide el ingreso de agua hacia el mismo.

Figura 1.11. Condensador de gas.



Fuente. Autores, 2017.

Para finalizar con el sistema la última tubería AISI 304 conduce el gas desde el condensador hacia los sistemas de mejora de calidad del gas y finalmente hacia el motor.

La fase norte I está constituida por un total de 23 pozos, configurados de la siguiente manera: siete de ellos se unen a la primera línea, otros siete están conectado al colector de gas por la segunda línea y 8 de ellos aportan gas a través de la tercera línea, existe un pozo que se encuentra completamente aislado de las líneas. El sistema de tuberías de las líneas principales, en este norte, tiene una longitud aproximada total de 995 metros.

La fase norte II está compuesta por siete pozos, conectados a una única línea principal, que tiene una longitud de 281 metros. Esta fase solo cuenta con un pozo condensador para retirar el líquido de las tuberías y de aquí se dirige directamente al colector de gas.

CAPÍTULO II

2 BASE TEÓRICA

2.1 Relleno sanitario o vertedero.

El método de disposición final de prácticamente todos los RSM lo constituye el relleno sanitario. Es el único admisible, ya que no representa peligro alguno ni riesgos para la salud pública. Además, minimiza la contaminación y otros impactos negativos en el ambiente. (Jaramillo, 2002, pág. 29)

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica. (Jaramillo, 2002, pág. 42)

2.1.1. Procesos bioquímicos básicos en los rellenos sanitarios.

Según los autores Christensen, Cossu, & Stegmann (1989) señalan que los procesos de degradación en el relleno sanitario son la clave para entender y controlar los impactos ambientales. Procesos físicos, químicos y microbianos están teniendo lugar en los residuos y resultan en la liberación de compuestos gaseosos y disueltos en términos de gas de vertedero y lixiviados. En la mayoría de los vertederos, suponiendo que reciben algunos desechos orgánicos, los procesos microbianos dominan la estabilización.

Las más importantes reacciones biológicas que ocurren en los rellenos sanitarios son realizadas por los microorganismos aerobios y anaerobios, y están asociadas con la fracción orgánica contenida en los RSM. El proceso de descomposición empieza con la

presencia del oxígeno (fase aerobia); una vez que los residuos son cubiertos, el oxígeno empieza a ser consumido por la actividad biológica. Durante esta fase se genera principalmente dióxido de carbono. Una vez consumido el oxígeno, la descomposición se lleva a cabo sin él (fase anaerobia): aquí la materia orgánica se transforma en bióxido de carbono, metano y cantidades traza de amoníaco y ácido sulfhídrico. (Jaramillo, 2002, pág. 51)

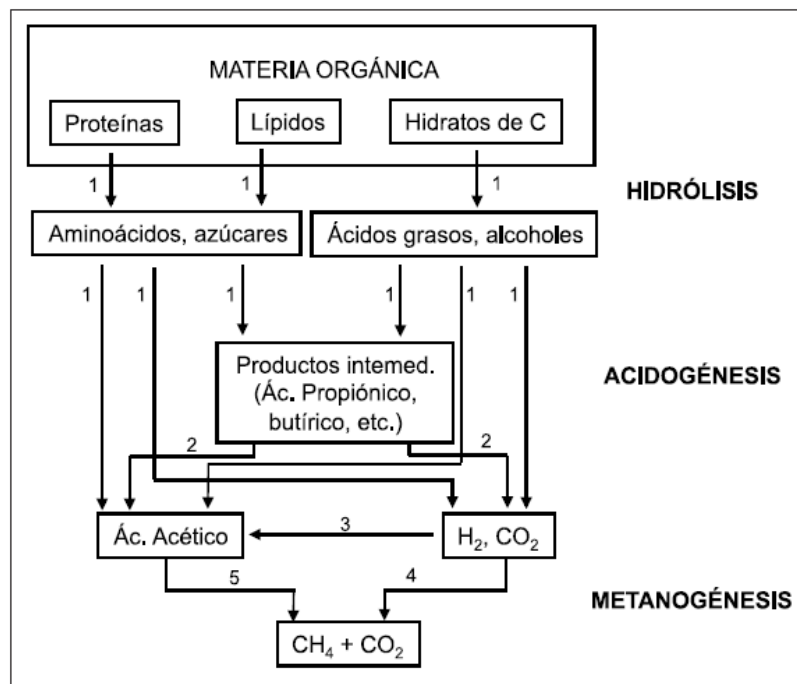
2.1.2. Ecología de la formación del metano.

La parte predominante de los residuos del vertedero pronto se convertirá en anaeróbica y un consorcio de bacterias comenzará a degradar el carbono orgánico sólido, eventualmente a dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Sin embargo, los procesos microbianos que convierten el carbono orgánico en el residuo son bastante complejos y una breve presentación del consorcio es necesaria para comprender el proceso global. (Christensen, Cossu, & Stegmann, 1989)

Según los autores Christensen, Cossu, & Stegmann (1989) indican que la degradación anaeróbica se desarrolla en tres etapas consistentes. En la figura 2.1 se ilustra las interacciones más importantes entre los grupos involucrados de bacterias, los substratos envueltos y productos del intermedio. En la primera etapa sólida y compleja, compuestos orgánicos disueltos son hidrolizados y fermentados principalmente a ácidos grasos volátiles, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. En la segunda etapa, un grupo acetogénico de bacterias convierte los productos de la primera etapa en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. En la etapa final el metano es producido por las bacterias metanogénicas. Esto se puede hacer por las bacterias acetogénicas que convierten el ácido acético a metano y a dióxido de carbono o por la bacteria hidrogenófilas que convierte el hidrógeno y el dióxido de carbono a metano.

Figura 2.1. Etapas de la digestión anaerobia.

Bacterias responsables de la digestión: 1) Bacterias hidrolíticas–acidogénicas, 2) Bacterias acetogénicas, 3) Bacterias homoacetogénicas, 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas, 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.



Fuente. Pilar, A. y otros, 2008.

2.1.3. Factores abióticos gobernantes.

El consorcio esbozado de grupos bacterianos que participan en el ecosistema de formación de metano está expuesto a una variedad de factores abióticos altamente variables en los residuos depositados en rellenos sanitarios. La heterogeneidad de los residuos depositados en vertederos puede hacer que sea un ecosistema muy diverso, pero bastante ineficiente. Los principales factores abióticos que afectan la formación de metano en el vertedero: oxígeno, hidrógeno, pH / alcalinidad, sulfato, nutrientes, inhibidores, temperatura y contenido de agua. (Christensen, Cossu, & Stegmann, 1989)

2.1.4. Modelo para la producción de lixiviado y gas en un relleno sanitario.

Farquhar & Rovers (1973) describen un patrón que se supone típico y que describe la secuencia de eventos durante la producción de gas y lixiviado en un vertedero, se presenta en la figura 2.2. Su desarrollo se basó en los supuestos de que, tras la colocación, no se produce una posterior aireación de los desechos y que las condiciones dentro de los desechos despejados son suficientes para estimular y sostener la producción de CH_4 .

“Se considera que la generación de los principales gases del vertedero se produce en 5 o menos fases secuenciales, a continuación, se describe cada una de estas fases”. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 433)

2.1.4.1 Fase I: ajuste inicial.

La fase I es la etapa de ajuste inicial, en la que los componentes orgánicos biodegradables de los RSU sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un vertedero. En esta fase se produce la descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapada dentro del vertedero. La fuente principal de organismos, ambos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cubrición diaria y final. Otras fuentes de organismos son los fangos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales evacuados en muchos vertederos de RSU, y el lixiviado reciclado. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 433)

2.1.4.2 Fase II: fase de transición.

En la fase II, identificada como fase de transición, desciende el oxígeno y comienza a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el vertedero se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversiones biológicas a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfato de hidrógeno. El

comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación/reducción que tiene el residuo. Las condiciones de reducción suficientes para producir la reducción del nitrato y del sulfato se dan aproximadamente entre -50 a -100 milivoltios. El metano se produce cuando los valores del potencial de oxidación/reducción están dentro del rango del -150 a -300 milivoltios. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los RSU en metano y dióxido de carbono empieza un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III. En la fase II, el pH del lixiviado, si es que esté se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del vertedero (ver figura 2.2). (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 435).

2.1.4.3 Fase III: fase ácida.

“La concentración de ácidos en los lixiviados es máxima, lo que implica un aumento importante de la materia orgánica (DQO) y un pH en muchos casos inferior a 5. Las concentraciones de CO_2 y de H_2 en el gas aumentan” (Pilar, y otros, 2008).

2.1.4.4 Fase IV: fase de fermentación del metano.

En la fase IV, la fase de fermentación del metano, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos e la fase ácida en CH_4 y CO_2 , llegan a ser más predominantes. En algunos casos, estos organismos comienzan a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. En la fase IV la formación de metano y ácido se producen simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 453)

Como los ácidos y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH_4 y CO_2 en la fase IV, el pH dentro del vertedero subirá a valores más

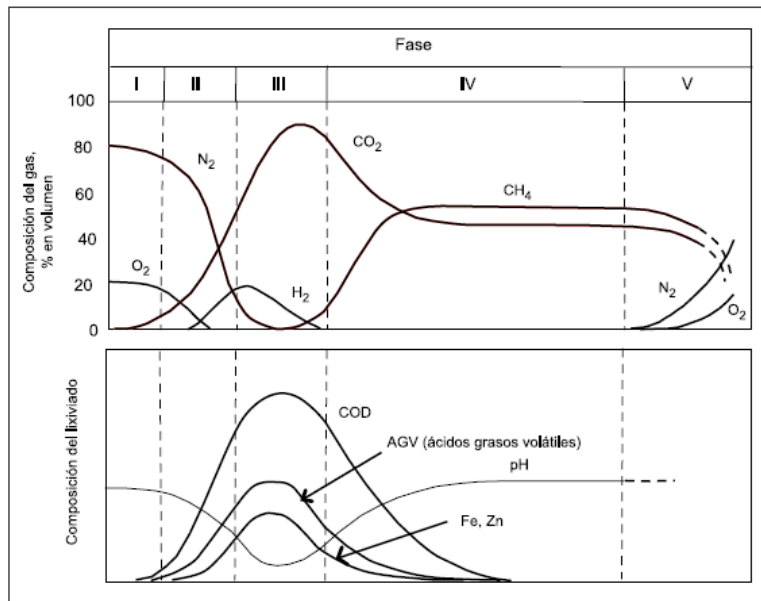
neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá y se reducirán las concentraciones de DBO_5 y DQO y el valor de conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 436)

2.1.4.5 Fase V: fase de maduración.

La fase V, fase de maduración, se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH_4 y CO_2 durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase 5 la velocidad de generación del gas de vertedero disminuye significativamente porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que queda en el vertedero son de una degradación lenta (...) Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmico y fúlvico, que son difíciles de degradar biológicamente. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 436)

En la figura 2.2 se aprecia las cinco fases para la generación de gases y lixiviados mencionadas anteriormente.

Figura 2.2. Fases generales en la generación de gases y lixiviado en un vertedero.



Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994

2.2 Lixiviado.

La descomposición o putrefacción natural de la basura produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado. (Jaramillo, 2002, pág. 51)

“El lixiviado, esto es, el líquido contaminado que drena de un relleno sanitario, varia ampliamente en cuanto a su composición, según la antigüedad del relleno y tipo de residuo que contiene”. (Henry & Heinke, 1999, pág. 603)

En la tabla 2.1, se presentan las características de los lixiviados de acuerdo a la edad del relleno sanitario.

Tabla 2.1. Clasificación de lixiviados, características vs edad del relleno.

	Reciente	Intermedio	Viejo
Edad(años)	<5	5 a 10	>10
pH	6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO(mg/L)	>10000	4000-10000	<4000
DBO5 /DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1

Compuestos orgánicos	80% Ácidos grasos volátiles(VFA)	5-30% VFA+ Ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
Metales pesados	Bajo-medio		Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Medio	Bajo

Fuente. Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2008

Segun los autores Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, aunque la composición de los lixiviados puede variar ampliamente dentro de las sucesivas etapas de estabilización de la evolución del residuo aeróbico, acetogénico, metanogénico, se han definido tres tipos de lixiviados según la edad del relleno sanitario (tabla 2.1).

2.2.1. Composición de lixiviado.

Según Farquhar G, (1989) los tipos, cantidades y tasas de producción de los contaminantes que aparecen en el lixiviado en un vertedero están influenciados por varios factores: tipo de basura y composición; densidad de basura, pretratamiento, secuencia de colocación y profundidad; carga de humedad a la basura; temperatura, y tiempo.

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la tabla 2.2 se presentan datos representativos sobre las características de los lixiviados en vertederos nuevo y antiguos. Como el rango de los valores de concentración observados para varios constituyentes presentados en la tabla 2.2 es bastante grande, especialmente en vertederos nuevos, se debe tener mucho cuidado en la utilización de los diversos valore que se presentan. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 469)

Tabla 2.2. Datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.

Constituyente	Valor, mg/l ^a		
	Vertedero nuevo (menos de 2 años)		Vertedero maduro (mayor a 10 años)
	Rango ^c	Típico ^d	
DOB₅	2000-30000	10000	100-200
COT	1500-20000	6000	80-160
DOC	3000-60000	18000	100-500
Total de sólidos en suspensión	200-2000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-100
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	05-40	25	5-10
Total fósforo	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO₃	1000-10000	3000	200-1000
Ph	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total como CaCO₃	300-10000	3500	200-500
Calcio	200-3000	1000	100-400
Magnesio	50-1500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2500	500	100-200
Cloro	200-3000	500	100-400
Sulfatos	50-1000	300	20-50
Total Hierro	50-1200	60	20-200

^a. Excepto el pH, que no tiene unidades.

^b. Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura del tema de valores maximos más altos para alguno de los constituyentes

^c. Los valores típicos para los vertederos variarán según el estado metabólico del vetedero.

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

2.2.2. Variaciones en la composición del lixiviado.

Hay que resaltar que la composición química de los lixiviados varía mucho según la antigüedad del vertedero y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición (ver figura 1.3) el pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, CTO, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano (ver figura 1.3), el pH estará en el rango de 6,5 a 7,5 y los valores de concentración DBO₅, CTO, DQO y de algunos nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO₂ en el gas de vertedero que esta en contacto con el lixiviado (...) (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 471)

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se puede supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación DBO₅/ DQO. Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0,5 o más. Las relaciones en el rango de 0,4 a 0,6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los vertederos antiguos, la relación DBO₅/ DQO está a menudo en el rango de 0,05 a 0, la relación cae por que los lixiviados procedentes de vertederos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 472)

Tabla 2.3. Valores de análisis de lixiviados para los parámetros con las diferencias entre acético y fase metanogénicas.

Parámetros	Promedio	Rango
Fase acética		
pH (-)	6.1	4.5-7.5
DBO ₅ (mg/l)	13000	4000-40 000
DQO (mg/l)	22 000	6000-60 000
DBO ₅ /DQO (-)	0.58	-
SO ₄ (mg/l)	500	70-1750
Ca (mg/l)	1200	10-2500
Mg (mg/l)	470	50-1150
Fe (mg/l)	780	20-2100
Mn (mg/l)	25	0.3-65
Zn (mg/l)	5	0.1-120
Sr (mg/l)	7	0.5-15
Fase metanogénicas		
pH (-)	8	7.5-9
DBO ₅ (mg/l)	180	20-550
DQO (mg/l)	3000	500-4500
DBO ₅ /DQO (-)	0.06	-
SO ₄ (mg/l)	80	10-420
Ca (mg/l)	60	20-600
Mg (mg/l)	180	40-350
Fe (mg/l)	15	3-280
Mn (mg/l)	0.7	0.03-45
Zn (mg/l)	0.6	0.03-4
Sr (mg/l)	1	0.3-7

Fuente. Christensen, Cossu, & Stegmann, 1989.

La tabla 2.3 contiene los valores medios y la gama de los parámetros que cambian entre la fase acética y la fase metanogénica.

2.2.3. Recirculación de lixiviado.

El concepto de recirculación de lixiviados como una alternativa al entierro de desechos no es nuevo, existen numerosos estudios sobre esta práctica operacional llevados a cabo

durante las últimas tres décadas. El concepto consiste en recuperar el lixiviado y volver a recircularlo a través de la parte superior del vertedero. El objetivo principal de esta práctica es saturar los desechos, a su vez mejorando la actividad microbiana y acelerando la degradación y estabilización de los desechos. La estabilización se puede describir cuando los parámetros de medición del desempeño ambiental (composición de gases de relleno sanitario y tasa de generación y concentraciones de los componentes del lixiviado) se mantienen en niveles estables y no deberían aumentar en caso de fallas parciales del sistema. Otras ventajas de la recirculación de lixiviados incluyen el aumento de la producción de metano bajo condiciones controladas y la aceleración del hundimiento de residuos, lo que puede conducir a reducciones en los costos de operación de vertederos. (Jason, Donia, Ros, & Gary, 2005)

Tabla 2.4. Efecto de la recirculación del lixiviado sobre las características de los lixiviados durante las fases acetogénica y fase metanogénica Todos los valores en mg /l.

Parámetros	Fase acetogénica		Fase metanogénica	
	Convencional	Recirculación	Convencional	Recirculación
pH	4.7-7.7	5.4-7.4	7.1-8.8	7.4-8.3
DBO₅	1000-57700	0-28000	4-120	100
DQO	1500-71000	11600-34550	31-900	770-1000
DBO₅/DQO	0.4-0.8	0.45-0.95	0.02-0.13	0.05-0.08
TVA	3000-18800	0-30730	0	-
NH₃ (mg/L N)	2-1030	0-1800	6-430	420-580
Conducta (μS/cm)	1600-17100	10000-18000	1400-4500	-

Fuente. Jason, Donia, Ros, & Gary, 2005

La tabla 2.4 indica que tanto los rellenos sanitarios recirculantes como los vertederos convencionales experimentan tanto una fase acetogénica como una fase metanogénica. Los datos sugieren que los contaminantes no se concentran notablemente en el lixiviado bajo condiciones de recirculación. La fase acetogénica tendía a ser más pronunciada en el ambiente recirculantes. Es decir, el vertedero exhibía consistentemente concentraciones de contaminantes en el extremo superior de los rangos dados en comparación con los vertederos convencionales.

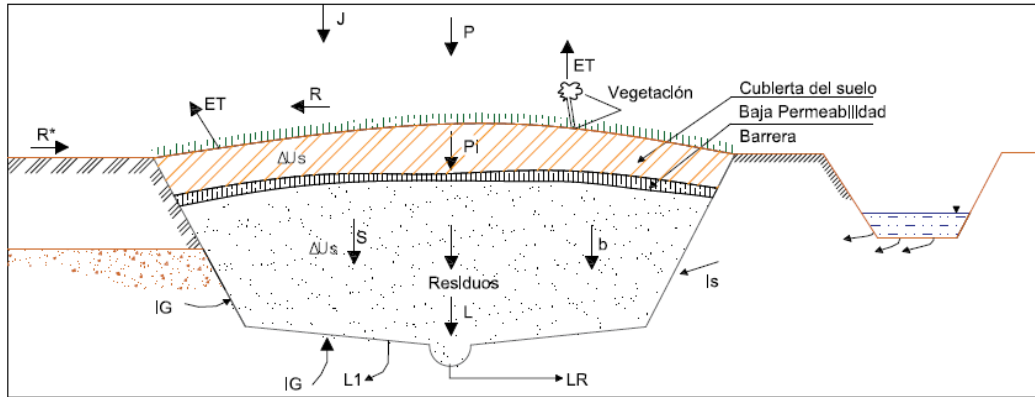
2.2.4. Generación de lixiviado.

Es líquido que percola a través de los residuos, formado por el agua proveniente de precipitaciones, pluviales o escorrentías. Él puede provenir además de la humedad de los residuos, por reacción o descomposición de los mismos y que arrastra sólidos disueltos o en suspensión y contaminantes que se encuentran en los mismos residuos. (MAE, 2012, pág. 233)

La figura 2.3 presenta un resumen general de los componentes que constituyen el balance hidrológico de un vertedero. Los principales factores que rigen la formación de lixiviados son los siguientes:

- Disponibilidad de agua lluvia, las lluvias representan la mayor contribución a la producción de lixiviados, y la cantidad de lixiviado producida por un relleno sanitario está altamente correlacionada con la cantidad de precipitación alrededor del vertedero.
- Los informes de Christensen, Cossu, & Stegmann, sobre rellenos sanitarios en Alemania Occidental mostraron que los máximos estacionales de producción de lixiviados se observaron siempre al final del invierno y en primavera, enfatizando indirectamente la importancia de la evapotranspiración para reducir la producción de lixiviados durante los meses de verano.
- Características de la cubierta final de suelo y vegetación, presencia de material de cubierta impermeable, pendientes u otras características topográficas.
- Características de la densidad de residuos, métodos de depósito, contenido de humedad de los residuos cuando se depositan en vertederos.
- Método de impermeabilización del sitio y características del suelo del sitio.

Figura 2.3. Esquema del balance hidrológico general en un vertedero sanitario completo con sistema de drenaje de lixiviado.



Fuente. Christensen, Cossu, & Stegmann, 1989.

La figura 2.3 nos presenta los siguientes factores que intervienen en la generación de lixiviado p : precipitación; J : riego o lixiviado recirculación; r : escorrentía superficial; R^* : escorrentía de áreas externas; ET : actual Evapotranspiración; U_s : contenido de agua en suelo; U_w : contenido de agua en los desechos; S : agua añadida por eliminación de lodos; b : agua causada por degradación de la materia orgánica; L_s , L_G : agua de acuíferos naturales; L_1 = infiltración en acuíferos; L_R : lixiviado recogido por los desagües.

2.2.5. Cantidad de los lixiviados.

Según Giraldo, la cantidad de los lixiviados en un relleno sanitario también es un punto importante a considerar en el momento de la selección de la tecnología para su tratamiento. La cantidad de los lixiviados es función de tres variables principales. El área rellenada, la cantidad de infiltración que se permita, y el sistema de drenaje, impermeabilización.

2.2.5.1 El área rellenada.

El área rellenada afecta porque es a través de ella que se realiza la entrada y el contacto del agua de infiltración con la basura. Al aumentar el área rellenada, aumenta paralelamente la cantidad de

lixiviados. Teniendo en cuenta que los rellenos son sistemas que duran lustros y décadas en su funcionamiento, igualmente se espera que la cantidad de lixiviados aumente. Este aumento es un aumento gradual, lento, con los años. (Giraldo , 2001, pág. 46)

2.2.5.2 La cantidad de infiltración.

La cantidad de infiltración que se permita al relleno depende de numerosas variables tales como: la operación que se le dé al relleno como por ejemplo la desviación de aguas de esorrentía, la cantidad de precipitación directa que se tenga en la zona, y la presencia de infiltraciones subterráneas. Usualmente las variaciones en la producción de lixiviados asociados a las infiltraciones, son variaciones rápidas, asociadas a la lluvia, por ejemplo, y que hacen oscilar notablemente la cantidad de lixiviados que se debe tratar. (Giraldo , 2001, pág. 46)

2.2.5.3 Sistema de drenaje e impermeabilización.

Los sistemas de drenaje e impermeabilización son importantes porque son los que permiten que los lixiviados no contaminen los suelos y las aguas subterráneas, y además que el lixiviado que se produce en realidad se recoja y se permita su tratamiento. De la misma manera, una vez se hace el cerramiento de las diferentes áreas de los rellenos, los caudales de infiltración disminuyen notablemente, generando una caída abrupta en la cantidad de lixiviado a tratar. Se tienen entonces dos dinámicas distintas que afectan la cantidad de los lixiviados a tratar, una lenta que afecta el caudal medio y una rápida que afecta los caudales diarios. (Giraldo , 2001, pág. 46)

2.2.6. Caudal teórico.

Para determinar el caudal teórico utilizaremos los siguientes procedimientos: el método del balance hídrico y el método suizo, presentados a continuación.

2.2.6.1 Método suizo.

El volumen de lixiviado está fundamentalmente en función de la precipitación pluvial. No solo la escorrentía puede generarlo, también las lluvias que caen en el área del relleno hacen que su cantidad aumente, ya sea por la precipitación directa sobre los residuos depositados o por el aumento de infiltración a través de las grietas en el terreno. (Jaramillo, 2002, pág. 114)

Para el cálculo el método suizo establece la siguiente ecuación. Que permite determinar de manera rápida y sencilla el caudal generado por los lixiviados.

$$Q = \frac{P * A * K^*}{t} \text{ Ecuación 1.}$$

Donde:

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/seg).

P = Precipitación media anual (mm/año).

A = Área superficial del relleno(m²).

t = Número de segundos en un año.

K* = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura:

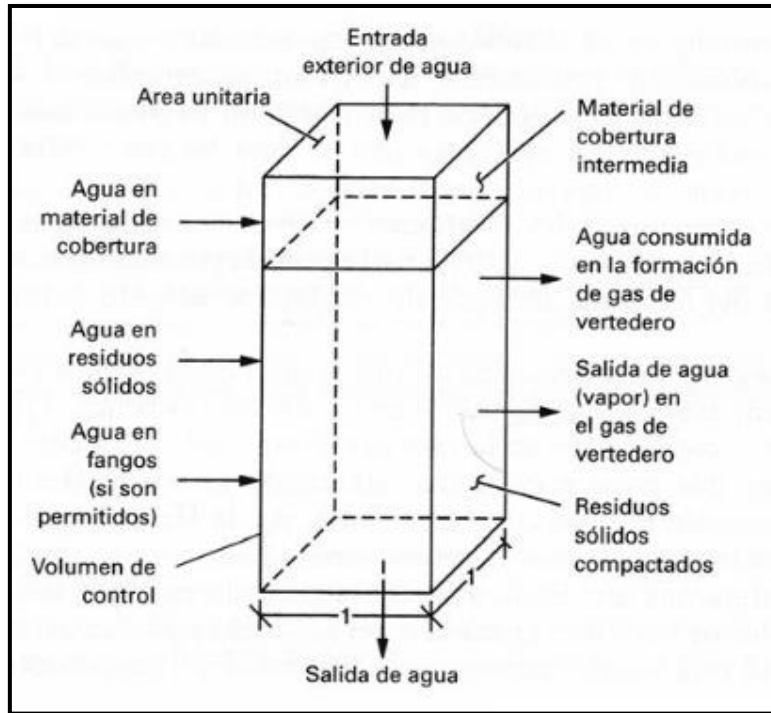
Para rellenos fuertemente compactados con peso específico > 0,7 t/m³, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% (k = 0,15 a 0,25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno. (Jaramillo, 2002, pág. 115)

2.2.6.2 Método del balance hídrico.

El potencial de formación de lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del vertedero. Implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el vertedero y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención

de humedad del material en el vertedero. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 473)

Figura 2.4. Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación de lixiviado en un vertedero



Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

Los componentes que conforman el balance de aguas para una celda de vertedero se identifican en la figura 2.4 las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cubrición y la humedad de los fangos si se permite la evacuación de fangos. Las principales salidas son: el agua que abandona el vertedero formando parte del gas de vertedero (es decir el agua utilizada para la formación del gas), el vapor de agua saturado en el gas de vertedero y el lixiviado. (...) (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 473)

Los términos que componen el balance de aguas pueden colocarse en forma de ecuación de la siguiente forma.

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_{VA} - W_{F(L)} \text{ Ecuación 2.}$$

Donde:

ΔS_{RS} = Variación de la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno sanitario (m³).

W_{RS} = Agua (humedad) de los residuos sólidos entrantes (m³/año).

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura (m³/año).

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (para la capa superior del vertedero el agua desde arriba procede la lluvia) (m³/año).

W_{GV} = Agua perdida en la formación de gas de vertedero (m³/año).

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua (m³/año).

$W_{F(L)}$ = Agua que sale inferiormente (lixiviado evacuado a través de los drenes) (m³/año).

2.2.6.2.1 Agua filtrada superiormente.

En la capa superior del vertedero el agua que entra desde arriba procede de la precipitación atmosférica que se ha filtrado a través del material de cobertura. En las capas por debajo de la capa superior, el agua que entra desde arriba procede del agua que se ha filtrado a través de los residuos sólidos situados sobre la capa en cuestión. Uno de los aspectos más críticos en la preparación de un balance hidrológico para un vertedero es determinar la cantidad de lluvia que se filtra a través de la cubrición del vertedero. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 474)

$$W_{A(u)} = \frac{P \cdot A}{1000} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (m³/año).

P= Precipitaciones anuales (mm/m²).

A= Área útil (m²).

2.2.6.2.2 Agua aportada por los residuos sólidos.

El agua que entra al vertedero con los materiales residuales es tanto el agua intrínseca de los residuos como la humedad que se absorbió de la atmósfera o de la lluvia (cuando los contenedores de almacenamiento no están correctamente cerrados). En climas secos se puede perder algo de humedad intrínseca contenida en los residuos por las condiciones de almacenamiento. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 474)

2.2.6.2.2.1 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de los residuos expresa mediante el método de medición peso-húmedo, la humedad de una muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo. El método peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de gestión de residuos sólidos. La forma de ecuación, el contenido de humedad peso-húmedo se expresa de la siguiente forma. El contenido de humedad de los residuos de los RSU domésticos y comerciales es aproximadamente del 20 por 100. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994)

$$M = \left(\frac{W - d}{w} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

M= Contenido de humedad, porcentaje.

w= Peso inicial de la muestra según se entrega (kg).

d= Peso de la muestra después de secarse a 105°C (kg).

Con las ecuaciones anteriores podemos calcular el agua aportada por los residuos sólidos, queda expresada de la siguiente manera.

$$W_{RS} = w_r \cdot 0.20 \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

W_{RS} = Agua (humedad) de los residuos sólidos entrantes ($m^3/año$).

w_r = Peso de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario (kg).

Mediante la ecuación de la densidad vamos a obtener el volumen de lixiviado por metro cúbico.

$$\delta_{H_2O} = \frac{M}{V} = 1000 \frac{Kg}{m^3} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

δ_{H_2O} = Densidad del agua(kg/m^3)

M = Masa (kg).

V = Volumen (m^3).

2.2.6.2.3 Agua aportada por el material de cubrición.

La cantidad de agua que entra con el material de cubrición dependerá del tipo y del origen del material de cubrición y de la estación del año. La cantidad máxima de humedad que el material de cubrición puede contener se define como capacidad de campo (CC) del material, o sea, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad. Los valores para suelos varían del 6 al 12 por 100 para arena, y del 23 al 31 por 100 para marga arcillosa (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 475)

La tabla 2.5 muestra la capacidad de campo para varios tipos de suelo y el valor recomendable a usar.

Tabla 2.5. Capacidad de campo (CC) para varias clasificaciones de suelo.

Tipo de suelo	Valor en porcentaje	
	Capacidad de campo	
	Rango	Típico
Arena	6-12	6
Arena fina	8-16	8
Marga arenosa	10-18	14
Marga arenosa fina	14-22	18
Marga	18-26	22
Marga lodosa	19-28	24
Marga ligera de arcilla	20-30	26
Marga de arcilla	23-31	27
Arcilla lodosa	27-35	31
Marga pesada de arcilla	26-36	32
Arcilla	31-39	35

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

Para el calcular el agua aportada por el material de cubrición lo realizamos con la siguiente ecuación.

$$W_{MC} = w_{mc} * CC_{MC} \text{ Ecuación 7.}$$

Donde:

w_{mc} = Peso del material de cobertura ($m^3/año$).

CC_{MC} = Capacidad de campo del material de cobertura.

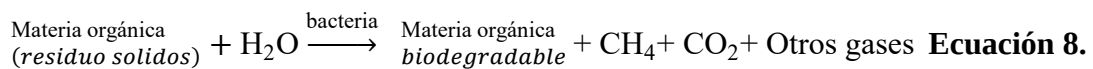
2.2.6.2.4 Lixiviado evacuado por los drenes.

Se trata del líquido que se acumulado mediante un sistema de recolección de lixiviado para cálculo de esta variable nos basaremos en datos de la empresa EMAC-EP y se

consideraron los datos generados durante el tiempo en el que se realizó el estudio de campo (mayo hasta agosto).

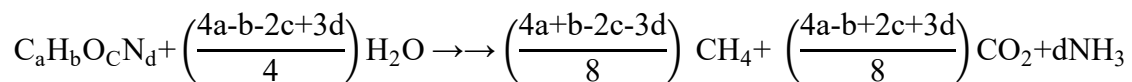
2.2.6.2.5 Agua consumida en la formación del gas de vertedero.

Se consume agua durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los RSU. La cantidad de, agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la fórmula.



Hay que resaltar que la reacción requiere la presencia de agua. Se han encontrado vertederos que carecen de un contenido de humedad suficiente en un estado (momificado) con papel de periódico de hace décadas en condiciones legibles. Entonces, aunque la cantidad total del gas que se produce a partir de residuos sólidos se derive directamente de una reacción estequiométrica, las condiciones hidrológicas locales afectan significativamente a la velocidad y al período de tiempo en el que tiene lugar la producción del gas. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 437)

El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias formas. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales encontrados en los RSU (con la excepción de plásticos) se representan de una forma generalizada con la fórmula $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$, entonces se puede estimar el volumen total del gas utilizando la Ecuación 5, suponiendo la conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en CO_2 y CH_4 . (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994, pág. 437)



Ecuación 9.

Los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos: se pueden dividir en dos clasificaciones:

- Aquellos materiales que se descomponen rápidamente (tres meses a cinco años)

- Aquellos materiales que se descomponen lentamente (hasta 50 años o más).

La tabla 2.6 presenta los tipos de componentes orgánicos y su clasificación en categorías dependiendo del tiempo en el que éstos se biodegradan.

Tabla 2.6. Constituyentes orgánicos rápidamente y lentamente biodegradables en los RSU

Componente de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradables	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	si	
Periódicos	si	
Papel de oficina	si	
Cartón	si	
Plásticos ^a		
Textiles		si
Goma		si
Cuero		si
Residuos de jardín	si ^b	si ^c
Madera		si
Orgánicos misceláneos		si

^a Los plásticos generalmente son considerados como no biodegradables.

^b Hojas y recortes de césped. Normalmente, el 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como biodegradables.

^c Porciones leñosas de los residuos de jardín.

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

La tabla 2.7 muestra la categoría de componentes que se biodegradan de manera rápida, así como también su peso y composición.

Tabla 2.7. Constituyentes orgánicos rápidamente descomponibles.

Componente	Peso húmedo, kg	Peso seco, kg	Composición, kg					
			C	H	O	N	S	Cenizas
Residuos de comida	9.0	2.7	1.30	0.17	1.02	0.07	0.01	0.14
Papel	34.0	32.0	13.92	1.92	14.08	0.10	0.06	1.92
Cartón	6.0	5.7	2.51	0.34	2.54	0.02	0.01	0.29
Residuos de jardín	11.1	4.4	2.10	0.26	1.67	0.15	0.01	0.20
Total	60.1	44.8	19.83	2.69	19.31	0.34	0.09	2.55

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

La tabla 2.8 muestra la categoría de componentes que se biodegradan de manera lenta, así como también su peso y composición.

Tabla 2.8. Constituyentes orgánicos lentamente descomponibles.

Componente	Peso húmedo, kg	Peso seco, kg	Composición, kg					
			C	H	O	N	S	Cenizas
Textiles	2.0	1.8	0.99	0.12	0.56	0.08	-	0.05
Goma	0.5	0.5	0.39	0.05	-	0.01	-	0.05
Cuero	0.5	0.4	0.24	0.03	0.05	0.04	-	0.04
Residuos de jardín	7.4	3.0	1.43	0.18	1.14	0.10	0.01	0.13
Madera	2.0	1.6	0.79	0.10	0.69	-	-	0.02
Total	12.4	7.3	3.84	0.48	2.44	0.23	0.01	0.29

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

La tabla 2.9 y 2.10 muestran la composición molar de los componentes antes clasificados y los valores estequiométricos para éstos.

Tabla 2.9. Composición molar de los elementos despreciando la ceniza.

	C	H	O	N	S
g/mol	12.01	1.01	16.00	14.01	32.06
Total moles					
Rápidamente descomponibles	16.511	2.6634	1.2069	0.0241	0.0028
Lentamente descomponibles.	0.3197	0.4752	0.1525	0.0164	0.0003

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

Tabla 2.10. Valores estequiométricos correspondientes al aporte hídrico de la reacción a los lixiviados.

Componente	Reacción molar (nitrógeno=1)	
	Rápidamente descomponibles	Lentamente descomponibles.
Carbono	69.8	19.5
Hidrogeno	110.5	29.0
Oxigeno	50.1	9.2
Nitrógeno	1.0	1.0

Fuente. Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994.

El agua se consume durante la descomposición anaeróbica de los componentes orgánicos en residuos sólidos municipales. La cantidad de agua consumida por la reacción de descomposición se puede estimar usando la siguiente ecuación.

$$W_{GV} = w_{GV} * V_{\text{biogás}} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

W_{GV} = Agua consumida en la formación del gas de vertedero ($\text{m}^3/\text{año}$)

w_{GV} = . La cantidad de agua consumida ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{m}^3$ biogás)

$V_{\text{biogás}}$ = Volumen de biogás (m^3)

2.2.6.2.6 Agua perdida como vapor de agua.

El gas de vertedero normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad del vapor de agua que se escapa del vertedero se determina suponiendo que el gas del vertedero está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases perfectos de la forma siguiente.

$$p_v V = nRT \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

p_v = Presión de vapor del H_2O a una temperatura T, en atm.

V = Volumen .

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases $1/^\circ\text{K}$

T = Temperatura. $^\circ\text{K}$

$$W_{VA} = w_{VA} * V_{\text{biogás}} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua ($m^3/año$)

w_{VA} = La cantidad de agua consumida ($Kg\ H_2O/m^3$ biogás)

$V_{biogás}$ = Volumen de biogás (m^3)

2.2.7 Caudal real.

La estimación del caudal real se obtiene a través de los datos históricos registrados en los rellenos sanitarios.

2.3 Biogás.

“La materia orgánica que contienen los residuos se degrada en condiciones anaerobias, una vez depositada en el relleno sanitario, generando lo que se llama gas de vertedero.” (Pilar, y otros, 2008, pág. 246)

Un vertedero de desechos sólidos puede ser conceptualizado como un reactor bioquímico, con los residuos sólidos y el agua como los principales insumos, y con el gas de vertedero y el lixiviado como los principales productos. El material almacenado en el vertedero incluye material orgánico parcialmente biodegradado y los otros materiales inorgánicos originalmente depositados en el vertedero. Los sistemas de control de gas de relleno sanitario se emplean para evitar el movimiento no deseado de los gases de vertedero en la atmósfera. El gas de relleno recuperado puede usarse para producir energía o quemarse en condiciones controladas para eliminar la descarga de componentes nocivos a la atmósfera. (Tchobanoglous & Kreith, 2002, pág. 678)

2.3.1 Composición del biogás.

El gas de vertedero se conoce generalmente como gas natural o metano; Sin embargo, hay distinciones notables entre ellos. El termino metano está mal utilizado, ya que

implica que el gas de vertedero es simplemente este. El metano es un gas hidrocarbonado cuya fórmula química es CH_4 , es un gas de efecto invernadero y es explosivo, se genera por la descomposición de la materia orgánica. El gas natural es aproximadamente del 80 al 99% de metano, siendo el resto otros hidrocarburos (etano, propano, butano, etc.), así como nitrógeno, oxígeno, CO_2 , azufre, vapor de agua y diversos contaminantes. (Cheremisinoff, 2003)

Tabla 2.11. Composición del gas de relleno sanitario

Gas constituyente	Concentración de gas de vertedero	
	Rango	Promedio
Metano (CH_4)	30-60 %	50%
Dióxido de carbono (CO_2)	35-55 %	45%
Nitrógeno (N_2)	0-20 %	5%
Oxígeno (O_2)	0-2.5 %	< 1 %
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	1-1700 ppmv	21 ppmv
Haluros	Na	132 ppmv
Vapor de agua (H_2O)	1-10 ppmv	Na
Compuestos orgánicos no metálicos (NMOCs)	237-14,294 ppmv	2700 ppmv

Fuente. Cheremisinoff, 2003.

En la tabla 2.11 se presenta un desglose típico de la composición del gas de vertedero. El gas de vertedero es aproximadamente 50% de metano. El resto del gas de vertedero es en su mayor parte dióxido de carbono con cantidades variables de nitrógeno, oxígeno y diversos contaminantes conocidos como compuestos orgánicos no metanos o NMOC. Los NMOC suelen representar menos del 1% del gas de vertedero. Muchos de ellos son productos químicos tóxicos, tales como benceno, tolueno, cloroformo, cloruro de vinilo, tetracloruro de carbono y tricloroetano.

2.3.2 Producción del biogás.

Para el cálculo de la producción del biogás que se genera en el relleno sanitario de Cuenca utilizamos el software Ecuador Landfill Gas Model versión 1.0 que nos proporciona una

herramienta de estimación automatizada para cuantificar la generación y recuperación de gas de relleno sanitario en vertederos de residuos sólidos municipales (RSU) en Ecuador.

El principal propósito del modelo de Ecuador LFG Model es proveer al Ministerio de Ambiente, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, y a través de ellos los municipios de Ecuador, algunos operadores de vertederos también son beneficiarios de este modelo, ocupándolo como una herramienta para evaluar la factibilidad y los beneficios potenciales de recolectar y usar el generado gas de vertedero para recuperación de energía u otros usos. Para lograr este propósito, este modelo proporciona estimaciones de las tasas potenciales de recuperación de gas de relleno sanitario. Esto se logra utilizando las tasas de generación de gas de vertedero estimadas por el modelo y las estimaciones de la eficiencia del sistema de recolección en la captura de gas generado, conocida como la eficiencia de recolección(...). (Siliezar & Urquizo, 2009)

El gas de vertedero es generado por la descomposición de basura en el vertedero, y puede ser recuperado a través del funcionamiento de las instalaciones de recolección de gas instaladas en el vertedero. La siguiente información es necesaria para estimar la generación y recuperación del biogás de un vertedero. (Siliezar & Urquizo, 2009)

- La capacidad de diseño del vertedero.
- La cantidad de basura en su lugar en el vertedero y la tasa anual de aceptación de basura para el vertedero.
- La tasa de generación de metano (k) constante.
- La potencial capacidad de generación de metano (L_0).
- La eficiencia de recolección del sistema de recolección de gas.
- Los años que el vertedero ha estado y estará en funcionamiento.

2.3.2.1 Modelo de biogás.

Tanto el modelo patentado de Carbon Trade Ltd. como el modelo U.S. EPA México LFG Model se basan en la siguiente ecuación que emplea una función de decaimiento exponencial de primer orden que asume que la generación de gas de relleno sanitario está

en su pico después de un retardo de tiempo que representa el período anterior a la generación del metano. (Siliezar & Urquizo, 2009)

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\% \text{ vol}} k M L_0 e^{-K(t-t_{\text{lag}})} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde:

Q_1 = Cantidad total del biogás generado (m^3 normales).

N = Número total de años modelado.

t = Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de los desechos.

t_{lag} = Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación del metano.

$\% \text{ vol}$ = Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

L_0 = Volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho sólido.

K = Tasa estimada de descomposición del desecho orgánico.

M = Masa de desecho en el lugar por año t (toneladas).

2.3.2.2 Parámetros del modelo.

De las variables descritas anteriormente analizaremos las que mayor influencia tienen para realizar el modelado de la cantidad de total de biogás.

2.3.2.2.1 Tasa estimada de descomposición del desecho orgánico (K).

La velocidad a la que la fracción orgánica de residuos se descompone dentro de la masa de desecho, puede variar entre 0,1 y 0,01. Esta amplia variación (un factor de 10) es el resultado de la disponibilidad de carbono orgánico en los residuos y depende del contenido de humedad dentro del residuo. (Siliezar & Urquizo, 2009)

2.3.2.2.2 Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno (%vol).

Según los autores Siliezar & Urquizo, el modelo del Ecuador LFG estima la generación de gas de vertedero resultante de la biodegradación de basura en vertederos. La descomposición anaeróbica de basura en vertederos de residuos sólidos produce generación de gas de vertedero. El modelo considera que la composición del gas de vertedero de residuos sólidos municipales es de aproximadamente 50 por ciento de metano (CH_4) y 50 por ciento de otros gases, incluyendo dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros compuestos.

2.3.2.2.3 Volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho sólido (L_0).

La cantidad final de metano generada, varía de 60 m^3/t a 120 m^3/t para los residuos domésticos típicos. En los residuos más inertes este valor puede ser significativamente menor. El factor potencial de dos en esta variable depende principalmente de la cantidad de carbono orgánico dentro de los residuos y de la disponibilidad de ese carbono orgánico. (Siliezar & Urquizo, 2009)

El modelo de LFG de Ecuador requiere datos específicos del sitio para toda la información necesaria para producir estimaciones de generación. El modelo proporciona valores por defecto para k y L_0 . Los valores predeterminados se basan en datos específicos del sitio que se reunieron de los rellenos sanitarios en Ecuador como resultado de la cooperación técnica de M2M's con el país.

Como resultado de los datos obtenidos en los ensayos de bombeo de gas de Pichacay y Las Iguanas en 2007, se presenta una gama de valores sugeridos de L_0 y k en el modelo de Ecuador. El proceso de determinar estos valores se describe en un documento separado que describe el desarrollo del modelo de gas de Ecuador. La tabla 2.12 y 2.13 muestran la búsqueda predeterminada para los valores de L_0 , k y %vol para el modelo de Ecuador.

Tabla 2.12. Tabla para calcular L_0 y k .

Precipitación (mm/año)	k Contenido medio de residuos de comida o alimenticios = $\leq 50\%$	k Alto contenido de residuos de comida o alimenticios= $>60\%$	L_0 (m ³ / Tonelada métrica) Contenido medio de residuos de comida o alimenticios = $\leq 50\%$	L_0 (m ³ / Tonelada métrica) Alto contenido de residuos de comida o alimenticios = $\geq 60\%$
0-249	0,04	0,043	60	62
250-499	0,05	0,053	80	83
500-999	0,065	0,69	84	87
1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87
2000+ o Saturado	0,08	0,085	84	87

Fuente. Siliezar & Urquiza, 2009.

Tabla 2.13. Parámetros utilizados para la generación de biogás analizando distintos métodos.

Parámetro	Fuente	Valor	Fundamento
Lo	Carbon Trade, Ltd	90 m ³	Orgánicos altos con lluvias moderadas.
	U.S. EPA México	84 m ³	Lluvias moderadas.
	Guía IPCC	70.8 m ³	Calculado del contenido de carbón disponible, promedio para otros sitios en Ecuador.
K	Carbon Trade, Ltd	0.062	Calibrado para sitios similares.
	U.S. EPA México	0.08	Lluvias moderadas.
	Guía IPCC	0.05	Lluvias moderadas.
% vol	Carbon Trade, Ltd	50 % v/v	Norma aceptada para concentración promedio de metano en biogás de relleno bajo condiciones de extracción.
	U.S. EPA México	50 % v/v	
	Guía IPCC	50 % v/v	

Fuente. Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd, 2007.

Nota: Para el cálculo del volumen de biogas nos basaremos en los datos empleados por Carbon Trade.

2.3.2.2.4 Eficiencia del sistema de recolección.

El modelo también sugiere que la tecnología utilizada para la capa de cobertura del vertedero tendrá un efecto sobre la eficiencia de la recolección. Cuando una capa de tapado no proporciona un buen sellado entre el residuo y la atmósfera, normalmente es necesario recoger el gas usando un vacío inferior al normal. Esto reducirá la cantidad de gas recogido y, por lo tanto, reducirá la eficiencia de la recogida.

Los sitios examinados en Ecuador tenían capas de arcilla seca (no saturada) o húmeda (saturada) y la eficiencia de recolección para estos dos, así como cualquier sitio que usan revestimientos de cobertura de geomembrana (plástico). La tabla 2.14 proporciona un valor sugerido de la eficiencia de recolección para Ecuador.

Tabla 2.14. Valores sugeridos de la eficiencia de recolección de rellenos sanitarios en Ecuador

Sistema de Recolección	Arcilla saturada / geomembrana	Arcilla no-saturada
Pozos verticales de gas perforados o colectores horizontales	80%	70%
Pozos de venteo pasivos convertidos/modificados (existentes)	60%	40%

Fuente. Siliezar & Urquiza, 2009.

CAPÍTULO III

3 INVESTIGACIÓN

3.1 Muestreo.

Se tomó en consideración la totalidad de pozos existentes en la fase norte I, para así poder determinar la dinámica de cambio que sufría toda la masa de basura existente en dicha fase.

3.2 Fecha en la que se realizó la investigación.

El tiempo durante el cual se realizó la investigación de campo tuvo lugar desde el mes de mayo hasta el mes de agosto del año 2016.

3.3 Método de recopilación de la información.

La revisión y observación diaria de cada uno de los pozos nos permitió recabar la información necesaria para poder determinar la dinámica del lixiviado dentro de cada uno de ellos, entre tiempos de 24 horas.

Para la recopilación de datos sobre la presión del gas era necesario el control en la cabeza del pozo inmediatamente después de realizado el bombeo.

A través del registro de datos de la estación meteorológica, se accedió a las condiciones pluviométricas y climatológicas del complejo.

3.4 Metodología de trabajo.

Para iniciar con la investigación fue necesario realizar la medición de los niveles de lixiviado dentro de cada uno de los pozos, luego se procedió con el bombeo de cada uno de ellos. La toma de datos iniciaba con el cierre de las válvulas ubicadas en la cabeza de los pozos, después se destapaba la cabeza del pozo para medir la altura del lixiviado en su interior, esto con ayuda de una cuerda sujeta a una pesa que llegaba al fondo del pozo. Se extraía la cuerda del pozo y se procedía a medir la parte humedecida de la cuerda.

Dos métodos fueron los usados para realizar la extracción del lixiviado de la masa de basura, el primero, consistía en un compresor de aire conectado a un motor de gasolina o diésel, y una manguera con refuerzo helicoidal. La manguera del aire comprimido se introducía por un orificio en la manguera helicoidal y esta parte de la manguera iba hasta el fondo del pozo, luego el aire comprimido salía por la sección ubicada en el tope del pozo y generaba presión negativa en el conducto de la manguera lo que provocaba el ascenso del lixiviado a través de ésta, es decir se aplicaba el sistema Venturi.

El segundo, consistía en introducir en el pozo una bomba sumergible, extrayendo el lixiviado hacia el sistema de drenaje del relleno, a través de una manguera de caucho.

Al finalizar el bombeo se volvía a medir la altura a la que quedaba el lixiviado, y para finalizar se tapaba el pozo y se abrían las válvulas; cada pozo era sometido a un seguimiento diario hasta que éste tenga una altura de lixiviados constante. Así se determinó los volúmenes y tiempos de recargar de cada uno de los pozos.

La presión en cada pozo era medida antes de iniciar el bombeo de cada uno de ellos. Cuando el proceso de extracción de gas finalizaba, se procedía a tomar la presión del gas inmediatamente después de que el pozo se cerraba herméticamente, y con la válvula mariposa de conexión a la línea principal, completamente cerrada. La presión era tomada cada cinco minutos, hasta llegar al minuto 20, tiempo en el cual la presión presentaba poca variación, alcanzando una estabilidad.

Para el cálculo del caudal real de lixiviado generado en el relleno se utilizaron los datos históricos que se obtuvieron en la misma planta.

Para calcular el caudal teórico se utilizó el método suizo y el balance hídrico para diseño de rellenos.

Una vez concluida la etapa de toma de datos y cálculos comparamos los resultados obtenidos, los caudales, tiempos de recarga e incremento de lixiviados para determinar cuál era el comportamiento hidráulico de lixiviados dentro del relleno.

3.5 Materiales y equipo.

De acuerdo a las actividades realizadas en campo, se utilizaron los siguientes materiales y equipos.

3.5.1 Equipo de seguridad.

Al estar expuestos directamente a sustancias tóxicas y corrosivas fue necesario el uso de los siguientes implementos:

Tabla 3.1. Implementos para la seguridad industrial.

Material - equipo	Descripción	Uso	Imagen
Gafas protectoras.	Con forma especial para ofrecer protección frontal y lateral, fabricadas de materiales resistentes al ataque de vapores y sustancias corrosivas.	Indispensable para evitar el contacto directo del biogás con los ojos, y protegerlos de salpicaduras de lixiviado.	

Mascara de aire	Mascara que permite un sellado facial, a través de su junta de silicona, cuenta con válvulas de alta ventilación.	Evitar accidentes provocados por los fuertes olores emanados por el lixiviado y el propio olor del gas.	
Overol	Es una prenda de una sola pieza, esta prenda va sobre la ropa de trabajo.	Su uso función es proteger de sustancias toxicas como en lixiviado.	
Faja para levantar peso.		Utilizada para manipular los equipos pesados.	
Guantes de algodón látex/corrugado.	Usados para la manipulación de vidrios y recolección de basura.	Restringir al mínimo el contacto de las manos con todas las sustancias del relleno.	

Botas de seguridad antideslizantes, con punta de acero.		Evitar caídas y fracturas o golpes en los pies.	
Impermeable de seguridad.		Para la protección ante las inclemencias del clima.	

Fuente. Autores, 2017.

3.5.2 Nivel de lixiviados.

Para determinar el nivel del lixiviado, fueron necesarios las siguientes herramientas:

Tabla 3.2. Herramientas utilizadas para determinar el nivel del lixiviado.

Material – equipo	Descripción	Uso	Imagen
Llave inglesa	Herramienta usada para apretar o aflojar tuercas.	Se utilizó para soltar y apretar los pernos de la brida ciega de cada pozo.	

Pesa	Tubo de acero de aproximadamente 10 kilogramos.	Amarrada a una cuerda de algodón, permitía el acceso al fondo del pozo.	
Cuerda de algodón	Varias cuerdas de longitudes variables.	Junto con la pesa llegaba al tope del pozo, dejando una marca de la altura del lixiviado.	
Cinta métrica	Cinta de 50 metros de longitud.	Utilizada para medir las alturas de lixiviado en la cuerda.	
Generador porten PG6500E	Potencia: 5800 W Cuenta con encendido eléctrico y funciona a gasolina.	Proveía de energía eléctrica a la bomba sumergible y al compresor de aire.	
Generador LDG 12 deluxe	Cuenta con un motor de 20 hp funciona a diésel, una potencia de 1000w y un peso de 190 kilogramos.	Proveía de energía eléctrica a la bomba sumergible y al compresor de aire.	

Bomba sumergible Bonasa YY7667	Potencia: 370 W. Flujo máximo: 70 l/min. Altura máxima: 40 metros.	La bomba sumergible fue utilizada para la evacuación del lixiviado de los distintos pozos.	
Compresor rong long W125275	Cuenta con una presión máxima de 130 PSI y una recarga de 100 PSI.	El compresor fue utilizado en el sistema venturi.	
Manguera para el aire comprimido.	Manguera de ½ pulgada.	Junto con la manguera plástica, formaban el sistema venturi, para succionar el lixiviado de los pozos.	
Manguera plástica, reforzada con sistema helicoidal.	Fabricada en P.V.C., y de varias longitudes.	Conectada al compresor de aire,	
Manguera de caucho.	Especial, para uso en obras civiles.	Conectada a la bomba sumergible, permitía la extracción del lixiviado en la masa de basura.	

Fuente. Autores, 2017.

3.6 Presión del gas.

La presión del gas se tomaba cuando la extracción de lixiviado terminaba, inmediatamente se cerraba la brida ciega y se conectaba el manómetro.

Tabla 3.3. Herramientas utilizadas para determinar la presión del gas.

Material – equipo	Descripción	Uso	Imagen
Manómetro y termómetro digital, con conexión especial para válvula de bola.	Medidor de presión y temperatura portátil	Permitía conocer las condiciones internas de los pozos, una vez terminada la extracción del lixiviado.	

Fuente. Autores, 2017.

3.7 Estabilización del nivel de lixiviado.

Proceso que duraba aproximadamente 14 días consecutivos en cada pozo, hasta alcanzar el nivel de estabilización de lixiviado en cada uno de ellos.

Tabla 3.4. Herramientas utilizadas en la estabilización del gas.

Material - equipo	Descripción	Uso	Imagen
Llave inglesa	Herramienta usada para apretar o aflojar tuercas.	Se utilizó para soltar y apretar los pernos de la brida ciega de cada pozo.	

Pesa	Tubo de acero de aproximadamente 10 kilogramos.	Amarrada a una cuerda de algodón, permitía el acceso al fondo del pozo.	
Cuerda de algodón	Varias cuerdas de longitudes variables.	Junto con la pesa llegaba al tope del pozo, dejando una marca de la altura del lixiviado.	
Cinta métrica	Cinta de 50 metros de longitud.	Utilizada para medir las alturas de lixiviado en la cuerda	

Fuente. Autores, 2017.

3.8 Datos obtenidos.

Los valores de las tablas 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 muestran información recolectada por EMAC-EP, a lo largo del tiempo en el que ha operado el relleno sanitario.

Tabla 3.5. Valores de las precipitaciones.

Año	Precipitación (mm/año)
2007	938.2
2008	1052.1
2009	712.6
2010	920.5
2011	998.3
2012	905.5
2013	743.9
2014	687.8
2015	569.9
2016	838
Promedio	836.68

Fuente. EMAC-EP, 2016.

Tabla 3.6. Peso de los residuos sólidos.

Año	Tonelada/año
2001	33262,00
2002	103636,30
2003	106541,52
2004	109246,57
2005	112005,18
2006	114780,53
2007	117600,20
2008	121039,48
2009	123975,30

Fuente. EMAC-EP, 2016.

Tabla 3.7. Volumen de material de cobertura.

Año	Anual (m³)	Diario (m³)
2001	16073,44	44,04
2002	16526,53	45,28
2003	16989,82	46,55
2004	17421,19	47,73
2005	17861,09	48,93
2006	18303,67	50,15
2007	18753,31	51,38
2008	19301,76	52,88
2009	19769,93	54,16
Promedio	17888,97	49,01

Fuente. EMAC-EP, 2016.

Tabla 3.8. Volúmenes de lixiviado.

Año	Lixiviados		
	m³/año	m³/h.	lt/seg.
2007	28446,95	3,25	0,90
2008	34437,46	3,93	1,09
2009	26270,92	3,00	0,83
2010	17674,45	2,02	0,56
2011	15568,57	1,78	0,49
2012	11456,47	1,31	0,36
2013	1653,82	0,19	0,05
2014	3279,16	0,37	0,10
2015	4303,34	0,49	0,14
2016	7085,69	0,81	0,22

Fuente. EMAC-EP, 2016.

Debido al asentamiento de los lodos y demás materiales que se encuentran presentes en los lixiviados, la cota con la que se construyeron los pozos ha cambiado a lo largo de estos años, esto se refleja en los datos que se obtuvieron aplicando la metodología de trabajo y que muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Altura teórica y real de los pozos.

Pozos	Altura teórica	Altura real
	Metros.	Metros.
1	8	8,55
2	18	18
3	20	20,2
4	20	15,2
5	20	15,37
6	20	17
7	10	9,43
8	8,5	9,3
9	18	18,3
10	25	24,28
11	32	30,85
12	35	32,25
13	35	31,1
14	20	16,97
15	15	11,95
16	7	7,75
17	18	17,9
18	20	20,2
19	20	20,7
20	20	20,4
21	20	19,5
22	15	10,7
23	9	8,96

Fuente. Autores, 2017.

Nota.

Altura teórica: profundidad del pozo, al inicio del proyecto, en donde no existían sedimentos.

Altura real: profundidad del pozo en la actualidad, donde ya se han depositado lodos y sedimentos.

En la siguiente figura se muestra la posición georreferenciada de los pozos de la tabla 3.9.

Figura 3.1. Plano de la georreferenciación del sistema para el aprovechamiento de biogás – fase norte I.

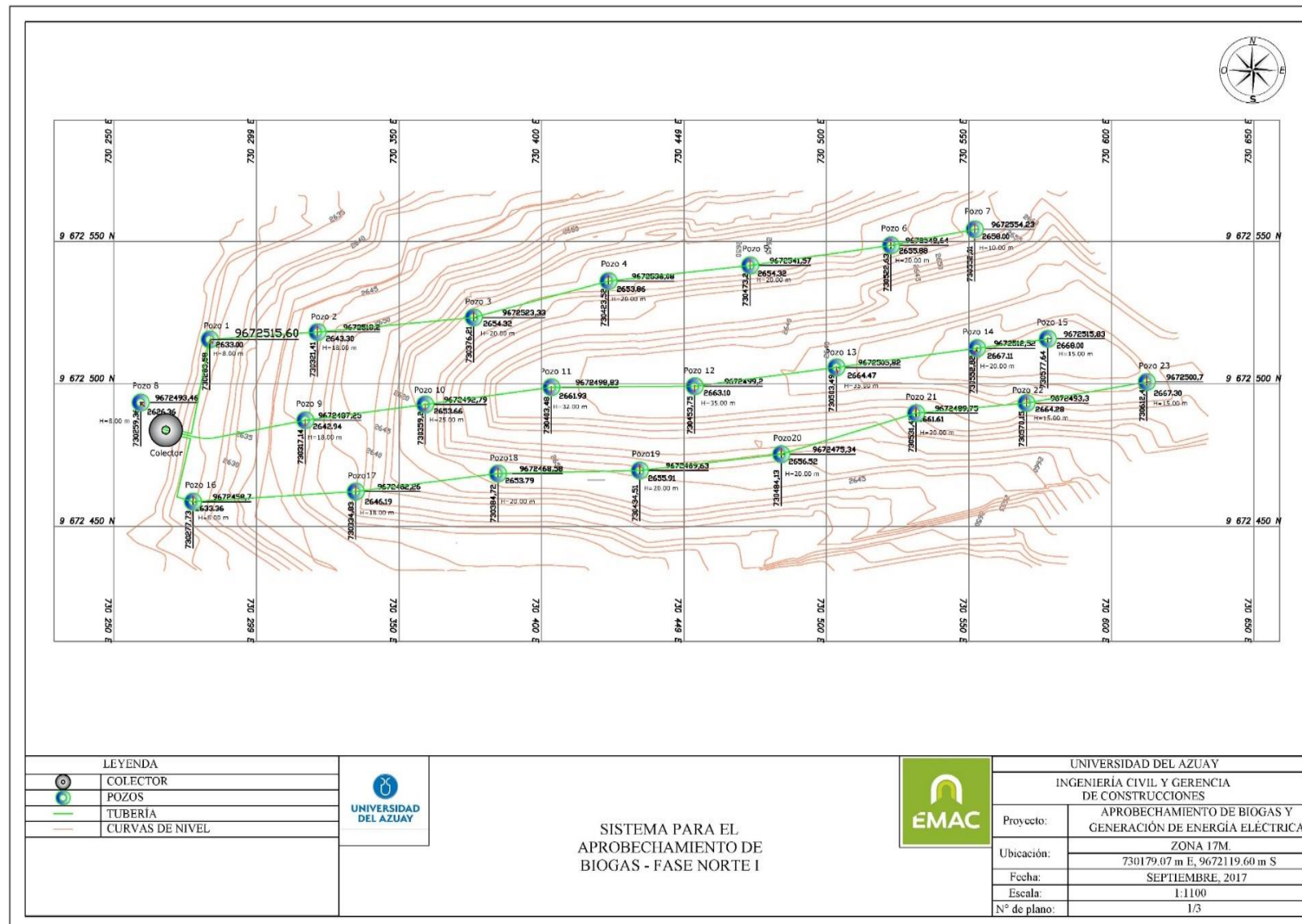


Tabla 3.10. Nivel de lixiviados antes y después del bombeo.

Pozo	Altura del lixiviado (metros).	Altura del lixiviado después de bombeo (metros).	Tiempo de bombeo (min)	Observaciones
1	2,60	2,60	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
2	8,70	2,45	60	Bomba sumergible
3	5,40	4,16	240	Bomba sumergible
4	3,60	1,98	20	Bomba sumergible
5	7,00	2,45	270	Bomba sumergible
6	8,30	2,60	320	Bomba sumergible
7	1,72	1,72	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
8	2,50	2,50	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
9	6,00	0,90	95	Bomba sumergible
10	12,60	3,10	60	Bomba sumergible
11	10,85	5,90	70	Bomba sumergible
12	12,70	1,40	60	Bombeo sumergible
13	14,15	1,33	165	Bomba sumergible
14	3,20	3,20	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
15	1,60	1,60	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
16	2,00	2,00	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
17	1,30	1,30	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
18	10,65	1,30	150	Bomba sumergible
19	11,20	1,44	155	Bomba sumergible
20	5,85	1,17	60	Bomba sumergible
21	6,75	1,50	60	Bomba sumergible
22	1,08	1,08	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
23	3,45	3,45	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo

Fuente. Autores, 2017.

De la tabla 3.10 podemos acotar que existen pozos en los cuales no es posible realizar el bombeo, esto se debe a que el nivel de lixiviado no es el óptimo para que la bomba sumergible extraiga el mismo.

En la siguiente tabla se muestran los valores de la presión del gas dentro de los pozos.

Tabla 3.11. Presión del gas después del bombeo.

Pozos	Tiempo 0 min	Tiempo 5 min	Tiempo 10 min	Tiempo 15 min	Tiempo 20 min
1	-	-	-	-	-
2	4	12	16	18	19
3	-	-	-	-	-
4	3	8	11	13	15
5	15	36	47	53	56
6	4	14	19	22	25
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	0	1	1	1	1
10	10	25	32	37	41
11	16	22	23	24	24
12	4	16	20	24	26
13	6	9	10	10	10
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
16	5	15	18	20	22
17	1	10	14	17	20
18	12	24	28	30	31
19	4	11	13	14	14
20	2	17	24	29	34
21	13	31	40	29	24
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-

Fuente. Autores, 2017.

A continuación, se muestran los datos finales después de terminado el proceso de extracción de lixiviados y el tiempo de recarga hasta llegar a la cota de estabilización.

Tabla 3.12. Nivel de lixiviados y tiempo de estabilización.

Pozos	Altura del lixiviado después de bombeo (metros)	Nivel de estabilización (metros)	Tiempo de estabilización (días)
2	2,45	7,2	5
3	4,16	4,7	7
4	1,98	3,25	5
5	2,45	6,33	8
6	2,60	8,25	12
9	0,90	4,75	5
10	3,10	10,25	9
11	5,90	11,4	9
12	1,40	8,6	9
13	1,33	7,75	15
18	1,30	9,35	5
19	1,44	9,3	6
20	1,17	4,44	7
21	1,50	4,7	7

Fuente. Autores, 2017.

Nota. En la tabla 3.12 los pozos 1, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 22, 23, no se encuentran porque no se realizó el bombeo de estos, debido a que por su nivel de lixiviado no requería.

CAPÍTULO IV

4 CÁLCULOS Y RESULTADOS.

4.1 Estimación de la generación de gas de vertedero.

El programa es una hoja de cálculo de Microsoft Excel, que permite realizar cambios dependiendo el relleno sanitario a analizarse, los datos que podemos modificar son de color verde. El modelo tiene tres hojas de trabajo, las tres hojas de trabajo son las siguientes:

- Un modelo donde se introduce una hoja de trabajo.
- Un modelo emite una hoja de cálculo en formato de tabla.
- Un modelo emite una hoja de trabajo en un formato gráfico.

Tabla 4.1. Ingreso de datos en el archivo de Microsoft Excel.

Relleno sanitario de Pichacay		
Año de inicio de operaciones	2001	
Año de término de operaciones	2009	
Precipitación promedio anual	837	mm/año
Contenido de metano en el biogás	50%	
Índice de generación de metano (k)	0,062	1/año
Generación potencial de metano (L0)	71	m3/ton

Fuente. Autores (Uso del software Landfill Gas Model versión 1.0).

Tabla 4.2. Ingreso de datos en el archivo de Microsoft Excel.

Año	Toneladas dispuestas (ton/año)	Toneladas acumuladas (ton)	Toneladas masa disponibles	Eficiencia del sistema de recolección
2001	33.262	33.262	100%	80%
2002	103.636	136.898	100%	80%
2003	106.542	243.440	100%	80%
2004	109.247	352.686	100%	80%
2005	112.005	464.692	100%	80%
2006	114.781	579.472	100%	80%
2007	117.600	697.072	100%	80%
2008	121.039	818.112	100%	80%
2009	123.975	942.087	100%	80%

Fuente. Autores (Uso del software Landfill Gas Model versión 1.0).

Nota: el valor del 80% tomado como eficiencia del Sistema de recolección, es tomado porque el relleno es construido con geomembrana, como está indicado en la tabla 2.14.

4.2 Proyección de la generación de biogás.

Una vez ingresados los datos en el archivo de Microsoft Excel obtuvimos los resultados de la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Proyecciones de generación y recuperación de biogás del relleno sanitario de Pichacay.

Año	Índice de disposición (ton/año)	Toneladas acumuladas (ton)	Generación de biogás			Eficiencia del sistema de recolección (%)	Recuperación de biogás del sistema existente/planeado		
			m³/min	m³/hr	mmBTU/año		m³/min	m³/hr	mmBTU/año
2001	33.262	33.262	0,0	0	0	80%	0,0	0	0
2002	103.636	136.898	2,1	128	20.077	80%	1,7	103	16.062
2003	106.542	243.440	4,2	252	39.514	80%	3,4	202	31.611
2004	109.247	352.686	6,2	373	58.360	80%	5,0	298	46.688
2005	112.005	464.692	8,2	489	76.613	80%	6,5	392	61.290
2006	114.781	579.472	10,0	603	94.317	80%	8,0	482	75.454
2007	117.600	697.072	11,9	712	111.511	80%	9,5	570	89.208
2008	121.039	818.112	13,7	819	128.232	80%	10,9	655	102.585
2009	123.975	942.087	15,4	924	144.633	80%	12,3	739	115.706
2010	0	942.087	17,1	1.026	160.633	80%	13,7	821	128.506
2011	0	942.087	16,1	964	150.976	80%	12,9	772	120.781
2012	0	942.087	15,1	907	141.900	80%	12,1	725	113.520
2013	0	942.087	14,2	852	133.369	80%	11,4	682	106.695
2014	0	942.087	13,3	801	125.351	80%	10,7	641	100.281
2015	0	942.087	12,5	753	117.815	80%	10,0	602	94.252
2016	0	942.087	11,8	707	110.733	80%	9,4	566	88.586

Fuente. Uso del software Landfill Gas Model versión 1.0.

La estimación de volumen generado de biogás en el relleno mostradas en la tabla 4.4 fueron calculados y generados por la EMAC-EP.

Tabla 4.4. Proyecciones de generación anual de biogás en el relleno sanitario de Pichacay.

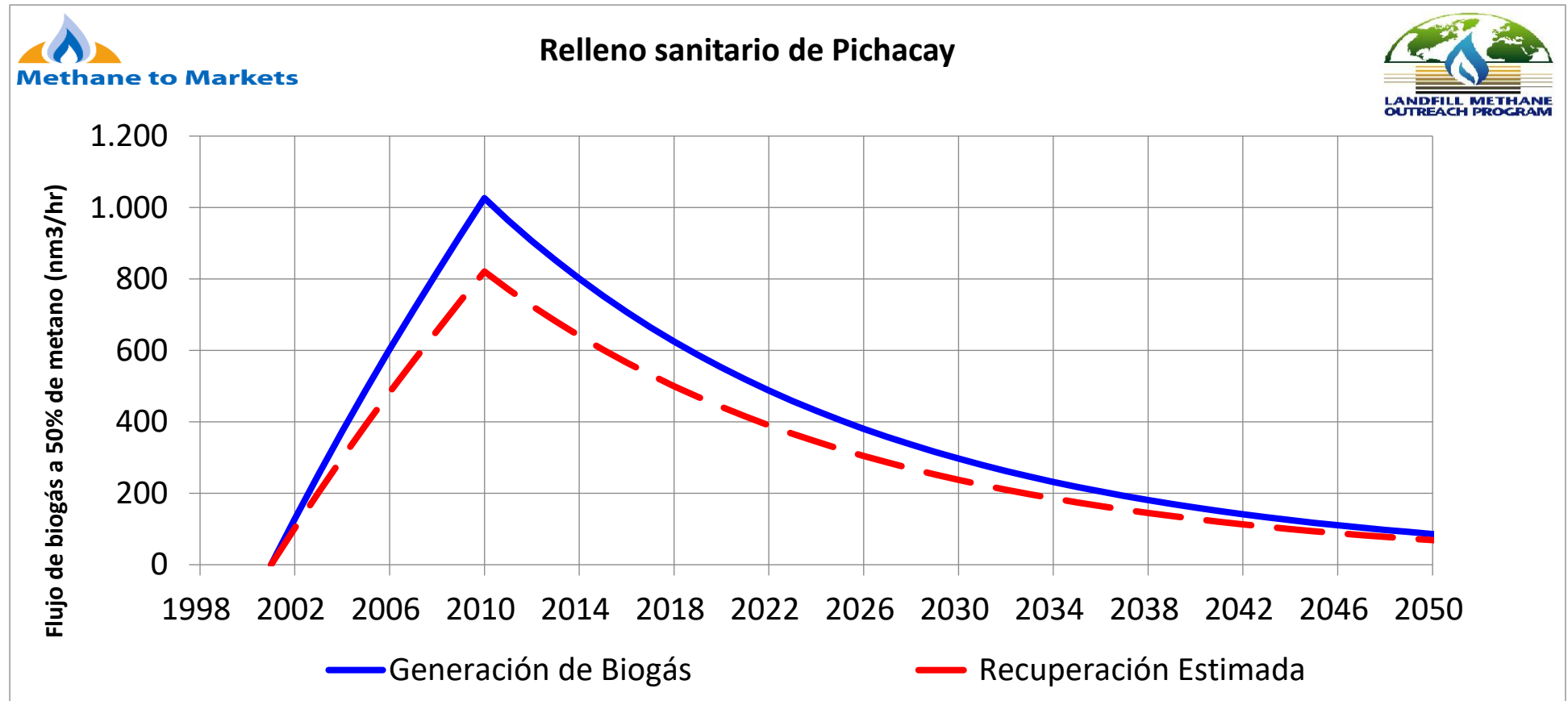
Año	m³/año
2001	0
2002	370776,05

2003	1503734,00
2004	2600966,71
2005	3662390,57
2006	4690755,21
2007	5688234,81
2008	6657179,99
2009	7606213,15
2010	8530919,18
2011	8018064,94
2012	7536042,02
2013	7082996,93
2014	6657187,60
2015	6256976,70
2016	5880825,32
Promedio	5171453,95

Fuente. EMAC-EP, 2016.

En la figura 4.1, se puede observar el estimado de la generación y recuperación de biogás desde 2002 hasta el 2050.

Figura 4.1. Proyecciones de generación y recuperación método gráfico.



Fuente. Uso del software Landfill Gas Model versión 1.0.

4.3 Caudal teórico.

Para determinar el caudal teórico, realizamos una medida de tendencia central entre los caudales determinados anualmente, desde 2001 hasta el 2016, mediante los métodos del balance hídrico y el método suizo, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.5. Caudal teórico de lixiviado.

Año	Caudal generado por las lluvia	Caudal generado por los residuos sólidos	Caudal generado por el material de cobertura	Caudal generado por la formación de biogás	Caudal generado por vapor de agua	Lixiviado que sale inferiormente	Balance hídrico	Método suizo	Caudal teórico
2001	1,4070	0,0002	0,1784	0,0000	0,0000	0,2699	1,3157	0,2814	0,7986
2002	1,4070	0,6573	0,1834	0,2629	0,0013	0,2699	1,7136	0,2814	0,9975
2003	1,4070	0,6757	0,1886	0,5174	0,0025	0,2699	1,4815	0,2814	0,8814
2004	1,4070	0,6928	0,1933	0,7642	0,0036	0,2699	1,2555	0,2814	0,7684
2005	1,4070	0,7103	0,1982	1,0032	0,0048	0,2699	1,0377	0,2814	0,6595
2006	1,4070	0,7279	0,2031	1,2350	0,0059	0,2699	0,8273	0,2814	0,5543
2007	1,5777	0,7458	0,2081	1,4601	0,0070	0,2699	0,7947	0,3155	0,5551
2008	1,7693	0,7676	0,2142	1,6791	0,0080	0,2699	0,7941	0,3539	0,5740
2009	1,1984	0,7862	0,2194	1,8939	0,0090	0,2699	0,0312	0,2397	0,1354
2010	1,5480	0,6404	0,1985	2,1034	0,0100	0,2699	0,0036	0,3096	0,1566
2011	1,6788	0,6404	0,1985	1,9769	0,0094	0,2699	0,2615	0,3358	0,2986
2012	1,5227	0,6404	0,1985	1,8581	0,0089	0,2699	0,2249	0,3045	0,2647
2013	1,2510	0,6404	0,1985	1,7464	0,0083	0,2699	0,0654	0,2502	0,1578
2014	1,1566	0,6404	0,1985	1,6414	0,0078	0,2699	0,0765	0,2313	0,1539
2015	0,9584	0,6404	0,1985	1,5427	0,0074	0,2699	0,0226	0,1917	0,0845
2016	1,4092	0,6404	0,1985	1,4500	0,0069	0,2699	0,5214	0,2818	0,4016

Fuente. Autores, 2017.

4.3.1 Cálculo del caudal teórico mediante el método suizo.

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación propia del método suizo.

$$Q = \frac{P * A * K}{t}$$

Donde:

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/seg).

P = Precipitación media anual (mm/año).

A = Área superficial del relleno: 53033.015 (m²).

t = Número de segundos en un año (31.536.000 seg/año).

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura: 0.9 toneladas/m³

K = 0.2 valor promedio

Aplicando la ecuación anterior, se determinaron los valores del caudal teórico aplicando el método suizo, los cuales se reflejan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Caudal teórico mediante método suizo.

Año	Área	T	K	Precipitación (mm/año)	Caudal teórico (m3/año)	Caudal teórico (l/s)
2007	53033,015	31536000	0,2	938,2	9951,11	0,316
2008	53033,015	31536000	0,2	1052,1	11159,21	0,354
2009	53033,015	31536000	0,2	712,6	7558,27	0,240
2010	53033,015	31536000	0,2	920,5	9763,38	0,310
2011	53033,015	31536000	0,2	998,3	10588,57	0,336
2012	53033,015	31536000	0,2	905,5	9604,28	0,305
2013	53033,015	31536000	0,2	743,9	7890,25	0,250
2014	53033,015	31536000	0,2	687,8	7295,22	0,231
2015	53033,015	31536000	0,2	569,9	6044,70	0,192
2016	53033,015	31536000	0,2	838	8888,33	0,282
Promedio					8874,33	0.281

Fuente. Autores, 2017.

4.3.2 Cálculo del caudal teórico mediante el balance hídrico.

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación propia del método del balance hídrico.

$$Q_{LL} = W_{RS} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_{VA} - W_{F(L)}$$

4.3.2.1 Agua filtrada superiormente ($W_{A(u)}$).

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación número 3 y la tabla número 2.4.

$$W_{A(u)} = \frac{P * A}{1000}$$

Dónde:

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (m³/año).

P = Precipitaciones anuales: 836.68 (mm/año m²).

A = Área útil: 53033.015 (m²).

$$W_{A(u)} = \frac{817.55 \text{ mm/año m}^2 * 53033.015 \text{ m}^2}{1000}$$

$$W_{A(u)} = 43357.51 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$W_{A(u)} = 1.37 \frac{1}{s}$$

4.3.2.2 Agua aportada por los residuos sólidos (W_{RS}).

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación número 5.

$$W_{RS} = w_r * 0.20$$

$$W_{RS} = 100984260,1 \text{ kg} * 0.20$$

$$W_{RS} = 20196852,02 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

Donde:

W_{RS} = Agua (humedad) de los residuos sólidos entrantes (m³/año).

w_r = Peso de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario tabla 2.5 (kg).

Tabla 4.7. Cálculo del agua aportada por los residuos sólidos.

Año	Kg	Kg H2O
2001	33262	6652,4
2002	103636296,3	20727259,26
2003	106541519,6	21308303,92
2004	109246574,3	21849314,86
2005	112005177,2	22401035,44
2006	114780532,6	22956106,53
2007	117600197,2	23520039,43
2008	121039480,5	24207896,09
2009	123975301,2	24795060,24
Promedio		20196852,02

Fuente. EMAC-EP, 2016.

Mediante la ecuación de la densidad determinamos el volumen del agua producida por los residuos sólidos.

$$\delta_{H_2O} = \frac{M}{V}$$

$$V = \frac{20196852,02 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 20196,85202 \text{ m}^3$$

Donde:

δ_{H_2O} = Densidad del agua: 1000 Kg/m^3

M: Masa= 20196852, 02 (kg).

V= Volume (m^3).

$$W_{RS} = 20196,85 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$W_{RS} = 0,64 \text{ l/s}$$

4.3.2.3 Agua aportada por el material de cubrición (W_{MC}).

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación número 7.

$$W_{MC} = w_{mc} * CC_{MC}$$

$$W_{MC} = 17888,97 \text{ m}^3/\text{año} * 0,35$$

$$W_{MC} = 6261,14 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$W_{MC} = 0,198 \frac{1}{s}$$

Donde:

w_{mc} = Peso del material de cobertura: 17888,97 (m³/año).

CC_{MC} = Capacidad de campo del material de cobertura: 35%.

4.3.2.4 Lixiviado evacuado por los drenes ($W_{F(L)}$).

Tabla 4.8. Volumen de lixiviado extraídos del relleno sanitario.

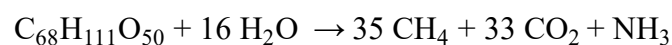
Mayo		Junio		Julio		Agosto	
Fecha	Volumen (m3/día)	Fecha	Volumen (m3/día)	Fecha	Volumen (m3/día)	Fecha	Volumen (m3/día)
1/5/2016	28,8	1/6/2016	21,6	1/7/2016	21,6	1/8/2016	14,4
2/5/2016	28,8	2/6/2016	43,2	2/7/2016	21,6	2/8/2016	14,4
3/5/2016	43,2	3/6/2016	86,4	3/7/2016	21,6	3/8/2016	14,4
4/5/2016	43,2	4/6/2016	43,2	4/7/2016	21,6	4/8/2016	14,4
5/5/2016	43,2	5/6/2016	43,2	5/7/2016	17,28	5/8/2016	14,4
6/5/2016	43,2	6/6/2016	43,2	6/7/2016	17,28	6/8/2016	14,4
7/5/2016	43,2	7/6/2016	43,2	7/7/2016	17,28	7/8/2016	14,4

8/5/2016	43,2	8/6/2016	43,2	8/7/2016	21,6	8/8/2016	14,4
9/5/2016	28,8	9/6/2016	43,2	9/7/2016	21,6	9/8/2016	14,4
10/5/2016	28,8	10/6/2016	28,8	10/7/2016	21,6	10/8/2016	14,4
11/5/2016	28,8	11/6/2016	28,8	11/7/2016	14,4	11/8/2016	14,4
12/5/2016	28,8	12/6/2016	28,8	12/7/2016	14,4	12/8/2016	14,4
13/5/2016	28,8	13/6/2016	43,2	13/7/2016	14,4	13/8/2016	14,4
14/5/2016	28,8	14/6/2016	28,8	14/7/2016	14,4	14/8/2016	14,4
15/5/2016	28,8	15/6/2016	21,6	15/7/2016	14,4	15/8/2016	14,4
16/5/2016	21,6	16/6/2016	43,2	16/7/2016	14,4	16/8/2016	14,4
17/5/2016	21,6	17/6/2016	21,6	17/7/2016	14,4	17/8/2016	14,4
18/5/2016	21,6	18/6/2016	21,6	18/7/2016	14,4	18/8/2016	14,4
19/5/2016	21,6	19/6/2016	21,6	19/7/2016	14,4	19/8/2016	10,8
20/5/2016	21,6	20/6/2016	21,6	20/7/2016	12,34	20/8/2016	10,8
21/5/2016	21,6	21/6/2016	28,8	21/7/2016	12,34	21/8/2016	10,8
22/5/2016	28,8	22/6/2016	28,8	22/7/2016	12,34	22/8/2016	10,8
23/5/2016	28,8	23/6/2016	28,8	23/7/2016	12,34	23/8/2016	8,64
24/5/2016	28,8	24/6/2016	28,8	24/7/2016	12,34	24/8/2016	8,64
25/5/2016	28,8	25/6/2016	28,8	25/7/2016	43,2	25/8/2016	8,64
26/5/2016	28,8	26/6/2016	21,6	26/7/2016	12,34	26/8/2016	8,64
27/5/2016	21,6	27/6/2016	21,6	27/7/2016	12,34	27/8/2016	8,64
28/5/2016	21,6	28/6/2016	21,6	28/7/2016	12,34	28/8/2016	8,64
29/5/2016	21,6	29/6/2016	21,6	29/7/2016	43,2	29/8/2016	8,64
30/5/2016	21,6	30/6/2016	21,6	30/7/2016	12,34	30/8/2016	8,64
31/5/2016	86,4			31/7/2016	12,34	31/8/2016	8,64
Promedio	31,12		32,40		17,50		12,26
Volumen	23,32 (m3/día)						
Volumen	8512,15 (m3/año)						
Volumen	0,27 (l/s)						

Fuente. EMAC-EP, 2016.

4.3.2.5 Agua consumida en la formación del gas de vertedero (W_{GB}).

Mediante las tablas 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 y la ecuacion 8 obtenesmos la masa de agua absorbida por kilogramo de residuo orgánicos secos consumidos, esta se puede expresar de la siguiente forma:



$$1741.0 + 288.0 \quad 560.0 + 1452.0 + 17$$

La masa de agua de agua por kilogramo de residuos sólidos volátiles rápidamente biodegradables (SVRB) secos y destruidos es:

$$\text{Agua consumida} = \frac{288,0 \text{ kg H}_2\text{O}}{1741,0 \text{ kg SVRB destruidos}}$$

$$\text{Agua consumida} = 0,165 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg SVRB destruidos}}$$

$$\text{Agua consumida} = \frac{0,165 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg SVRB destruidos}}{223,61 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ SVRB destruidos}}$$

$$\text{Agua consumida} = 7,3789 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{m}^3 \text{ de biogás}$$

$$W_{GV} = w_{GV} * V_{\text{biogás}}$$

$$W_{GV} = 5645299,487 \text{ (m}^3\text{)} * 7,3789 \text{ kg de H}_2\text{O} / \text{m}^3$$

$$W_{GV} = 41656100,39 \text{ kg de H}_2\text{O/año}$$

Donde:

W_{GV} = Agua consumida en la formación del gas de vertedero: 5645299,487 (m³/año).

w_{GV} = La cantidad de agua consumida: 7,3789(Kg H₂O/m³ biogás).

Mediante la ecuación 6 determinamos el volumen del agua consumida en la formación de biogás.

$$\delta_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M}{V}$$

$$V = \frac{41656100,39 \text{ kg}}{1000 \text{ Kg} / \text{m}^3}$$

$$V = 41656,10 \text{ m}^3$$

Donde:

$\delta \text{ H}_2\text{O}$ = Densidad del agua: 1000 Kg/m^3

M= Masa= 38159641, 56 (kg).

V= Volume (m^3).

$$W_{GV} = 41656,10039 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$W_{GV} = 1,32 \text{ l/s}$$

4.3.2.6 Agua perdida como vapor de agua (W_{VA}).

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación número 11

$$p_v V = nRT$$

$$n = \frac{p_v V}{RT}$$

$$n = \frac{4,82 * 1}{0,82 * 305}$$

$$n = 0,0019 \text{ mol}$$

$$w_{VA} = 0,0019 \text{ mol} * 18 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$w_{VA} = 0,0352 \text{ Kg H}_2\text{O/m}^3$$

Donde:

p_v = Presión de vapor del H_2O a una temperatura T, en atm: 4,82 KN/ m^2 .

V= Volumen 1.

n= Número de moles.

R= Constante universal de los gases 0,082 atm 1/ $^\circ\text{K}$

T= Temperatura. 305°K

Para realizar este cálculo utilizaremos la ecuación número 12.

$$W_{VA} = w_{VA} * V_{biogás}.$$

$$W_{VA} = 5645299,487 \text{ (m}^3\text{)} * 0,0352 \text{ Kg H}_2\text{O/m}^3$$

$$W_{GV} = 211962,17 \text{ kg de H}_2\text{O/año}$$

Donde

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua (m³/año).

w_{VA} = La cantidad de agua consumida (Kg H₂O/m³ biogás).

$V_{biogás}$ = Volumen de biogás (m³).

$$\delta_{H_2O} = \frac{M}{V}$$

$$V = \frac{211962,18 \text{ kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V = 211,96 \text{ m}^3$$

Donde

W_{GV} = Agua consumida en la formación del gas de vertedero = 5645299,487 (m³/año)

w_{GV} = La cantidad de agua consumida = 0,0352 (Kg H₂O/m³ biogás)

$V_{biogás}$ = Volumen de biogás (m³)

$$W_{GV} = 211,96 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$W_{GV} = 0,0063 \text{ l/s}$$

$$Q_{LL} = 20196,85 \text{ m}^3/\text{año} + 6261,14 \text{ m}^3/\text{año} + 43357,51 \text{ m}^3/\text{año} - 41656,10 \text{ m}^3/\text{año} - 211,96 \text{ m}^3/\text{año} - 8512,15 \text{ m}^3/\text{año}$$

Donde:

Q_{LL} = Caudal teórico o variación de la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno sanitario (m³).

W_{RS} = Agua (humedad) de los residuos sólidos entrantes = 20196,85 (m³/año).

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura = 6261,14 (m³/año).

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (para la capa superior del vertedero el agua desde arriba procede la lluvia) = 43357.51 (m³/año).

W_{GV} = Agua perdida en la formación de gas de vertedero = 41656,10039 (m³/año).

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua = 211,96 (m³/año).

$W_{F(L)}$ = Lixiviado evacuado por los drenes = 8512,15 (m³/año).

$$Q_{LL} = 19448.53 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q_{LL} = 0,616 \text{ l/s}$$

Una vez realizado los cálculos mediante el método suizo y el balance hídrico podemos observar que hay una variación entre ellos por lo que utilizaremos un valor promedio para el caudal teórico.

$$Q = \left(\frac{Q + Q_{LL}}{2} \right)$$

$$Q = \left(\frac{8874,33 \text{ m}^3/\text{año} + 19448.53 \text{ m}^3/\text{año}}{2} \right)$$

$$Q = 14161.43 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q = 0,449 \text{ l/s}$$

4.4 Cálculo del caudal real de lixiviado.

Tabla 4.9. Caudal real de lixiviado.

Año	Caudal real (m³/año)	Caudal real (l/s)
2007	28446,95	0,902
2008	34437,46	1,092
2009	26270,92	0,833
2010	17674,45	0,560
2011	15568,57	0,493
2012	11456,47	0,363
2013	1653,82	0,052
2014	3279,16	0,103
2015	4303,34	0,136
2016	7085,69	0,224
Promedio	15017,683	0,476

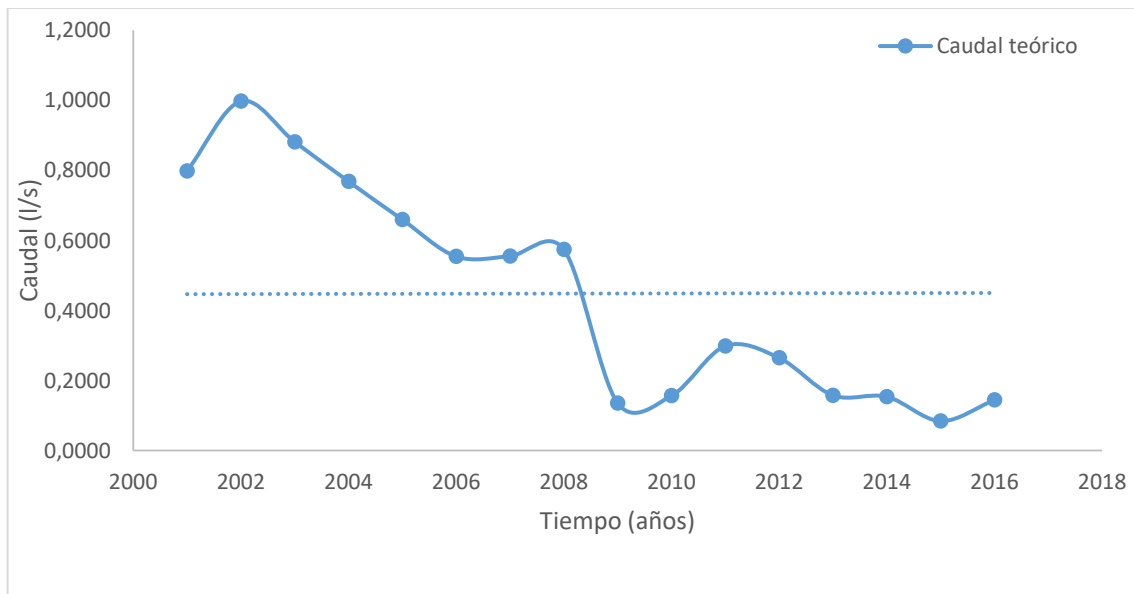
Fuente. EMAC-EP, 2016.

CAPITULO V

5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

A continuación, se realiza el respectivo análisis e interpretación de los resultados.

Figura 5.1. Caudal teórico de lixiviado.



Fuente. Autores, 2017.

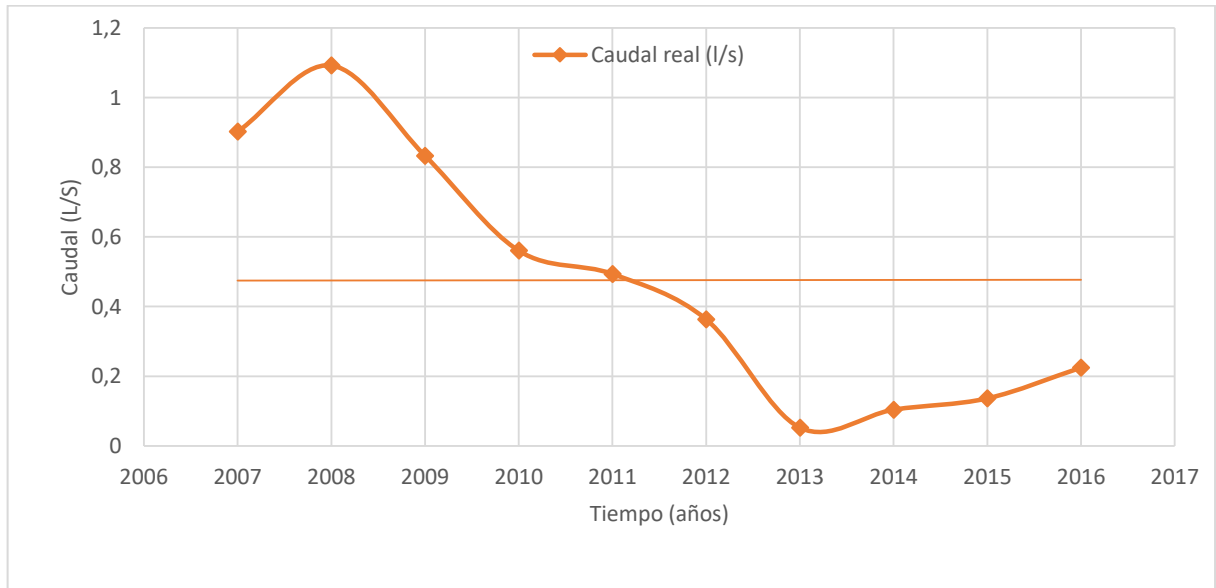
Para calcular el caudal teórico nos basamos en el método suizo y el balance hídrico estos procedimientos nos lanzan diferentes valores del caudal teórico, esto se debe a las variables que son distintas para cada método, por este motivo tomamos un valor promedio en el cual el caudal teórico tiende a 0,465 l/s, durante los años del 2001 hasta el 2016.

$$Q = \left(\frac{8874,33 \text{ m}^3/\text{año} + 19448,53 \text{ m}^3/\text{año}}{2} \right)$$

$$Q = 14161,43 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q = 0,449 \text{ l/s}$$

Figura 5.2. Caudal real de lixiviado.

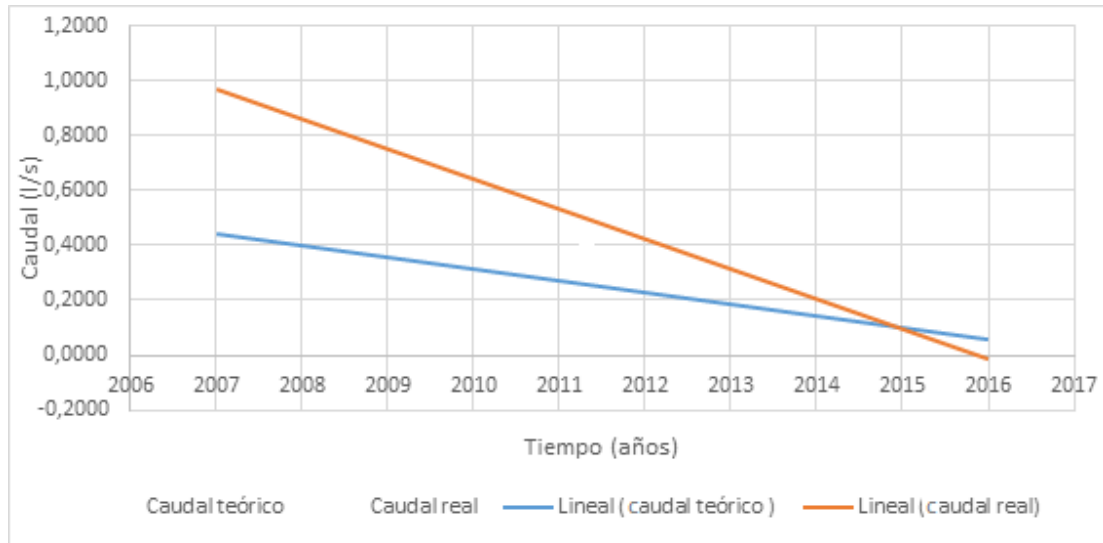


Fuente. Autores, 2017.

En la figura 5.2 se puede observar el caudal real del lixiviado para determinar estos valores se recurrió a la empresa EMAC-EP, para el cálculo del caudal real utilizamos datos de los volúmenes extraídos del relleno sanitario de Pichacay, el valor promedio de obtuvimos fue 0,476 l/s, los años a considerar son desde el 2007 hasta el 2016.

Tanto en el caudal real como en el caudal teórico se obtuvieron valores similares, siendo 0,476 l/s y 0,465 l/s respectivamente, el motivo por el cual obtuvimos estos valores es por el tiempo en el que se tomaron los datos para el análisis. El caudal real está compuesto por datos tomados en el periodo 2007 al 2016, y el caudal teórico tiene datos desde el 2001 al 2016.

Figura 5.3. Caudal teórico vs caudal real.

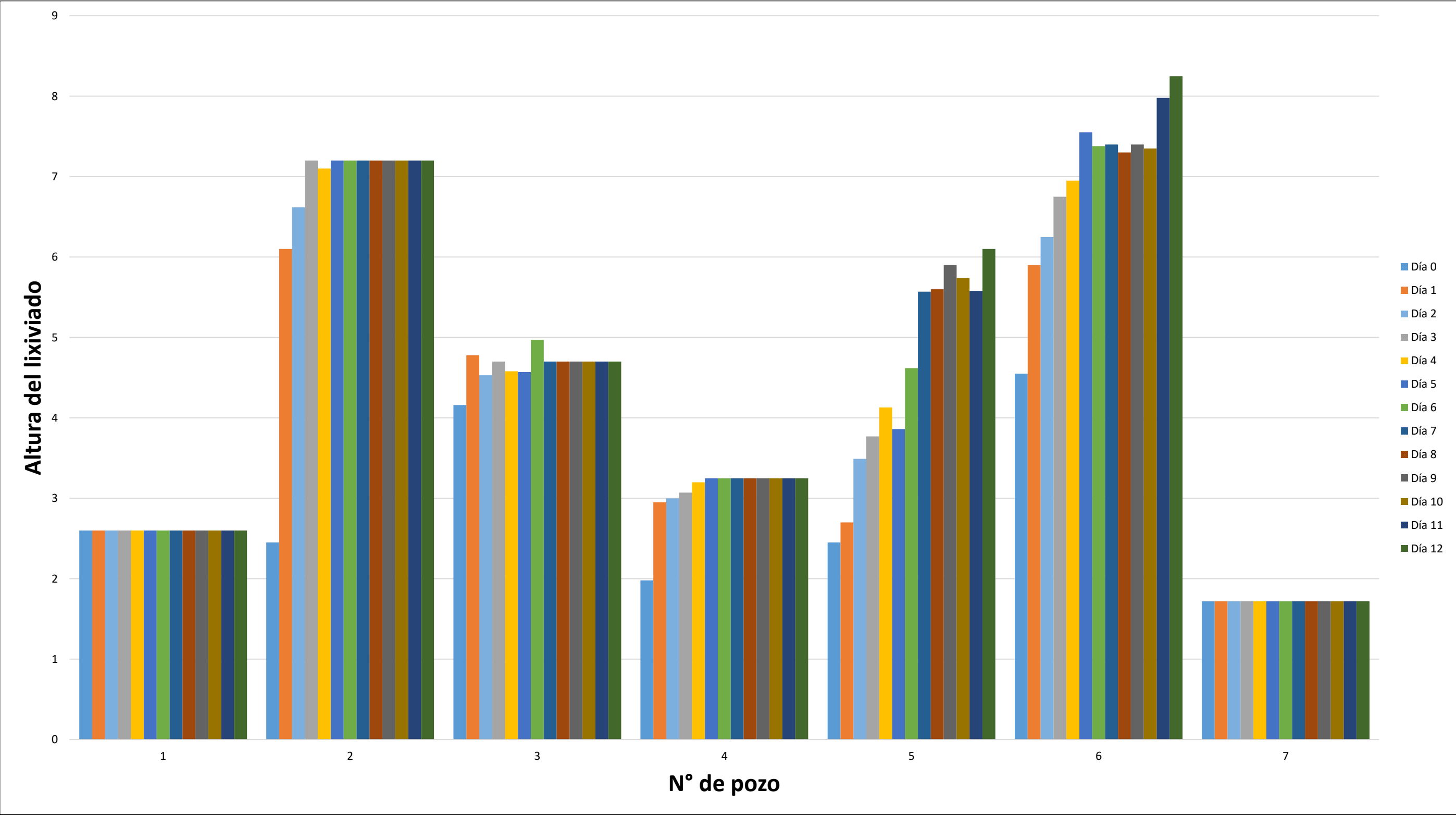


Fuente. Autores, 2017.

En la figura 5.3 tratamos de hacer una comparación entre el caudal real y el caudal teórico para realizar este análisis trabajaremos con los años 2007 al 2016 la razón principal es que no se pudo obtener los valores del caudal real del año 2001 al 2006, con un valor promedio de 0,476 l/s para el caudal real y de 0,278 l/s para el caudal teórico

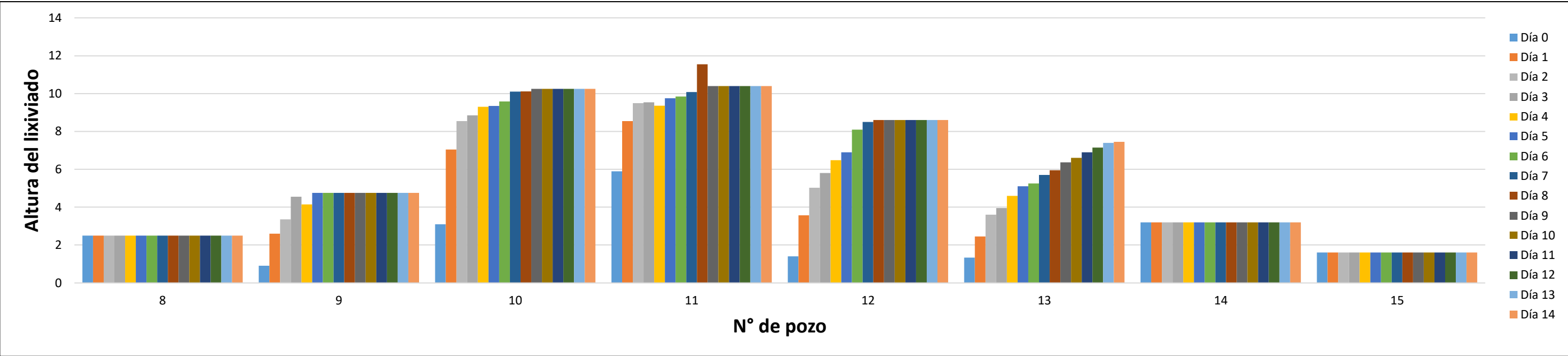
En los 2007 al 2012 el caudal real es superior al caudal teórico, esta parte de la gráfica nos da a conocer que el lixiviado que se debería extraer si se lo está extrayendo, pero a partir del año 2012 el caudal real es inferior al caudal teórico lo que quiere decir que el lixiviado no se lo está extrayendo completamente y esta se está quedando dentro del relleno sanitario.

Figura 5.4. Altura por día de lixiviado (pozos 1 al 7).



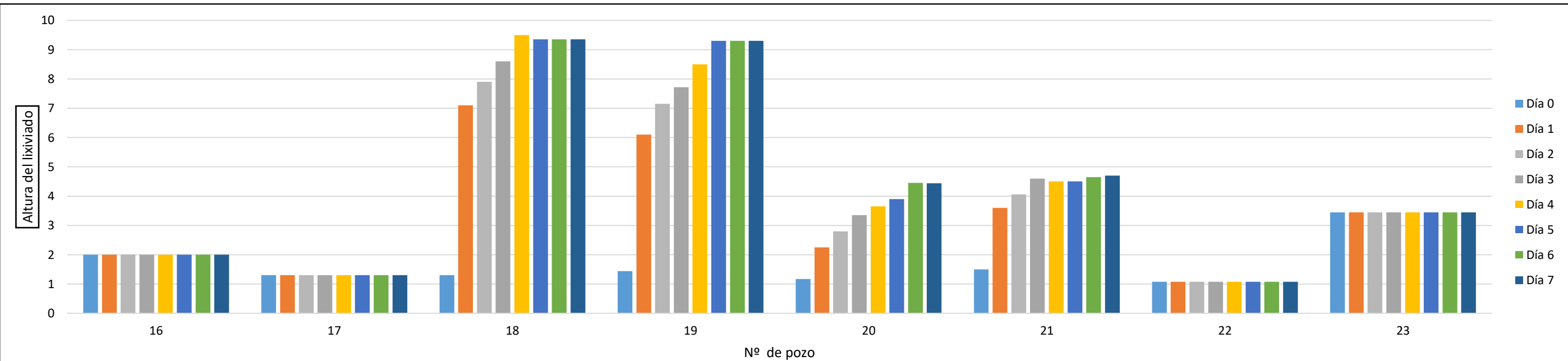
Fuente: Autores, 2017.

Figura 5.5. Altura por día de lixiviado (pozos 8 al 15).



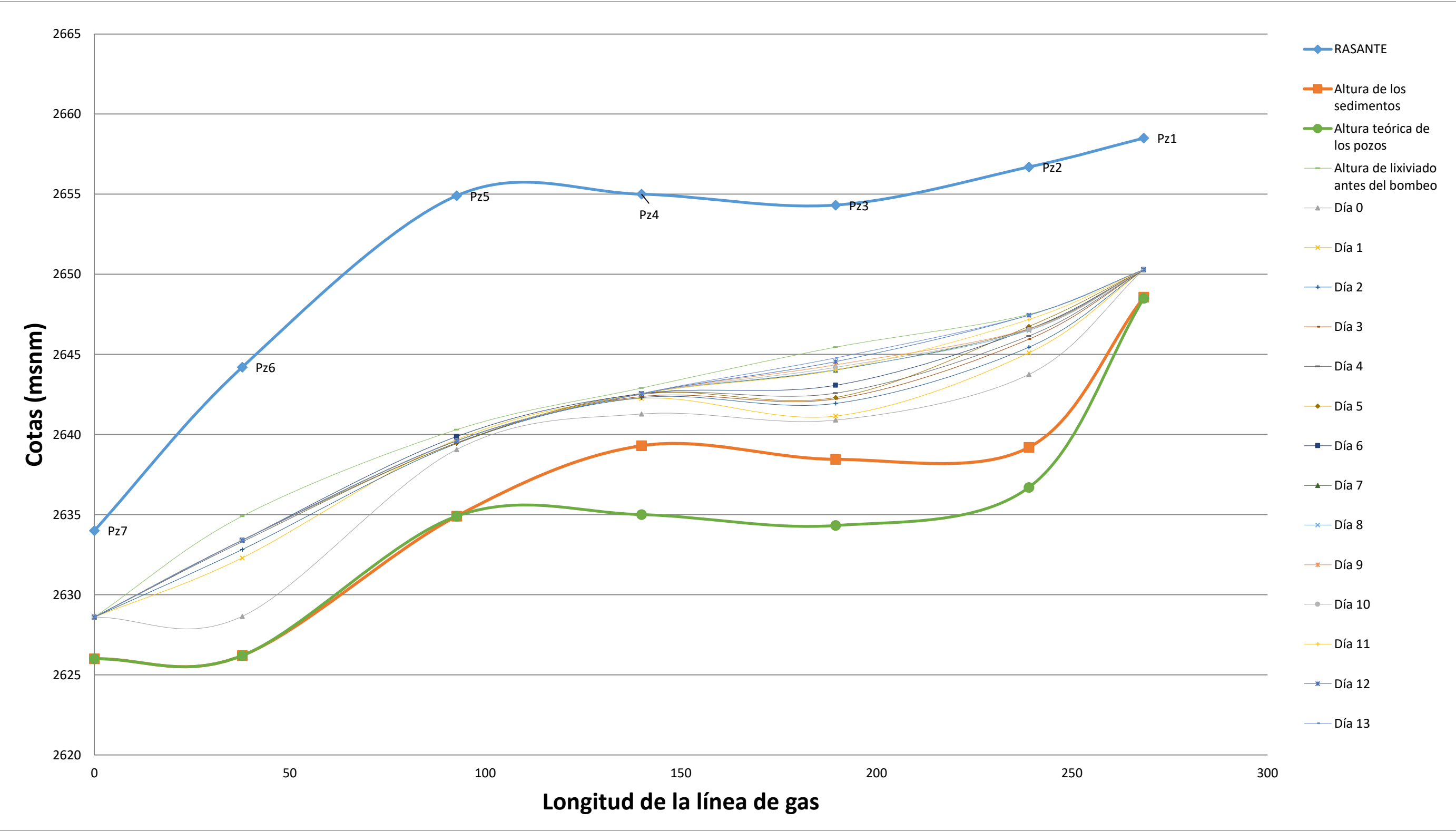
Fuente. Autores, 2017.

Figura 5.6. Altura por día de lixiviado (pozos 16 al 23).



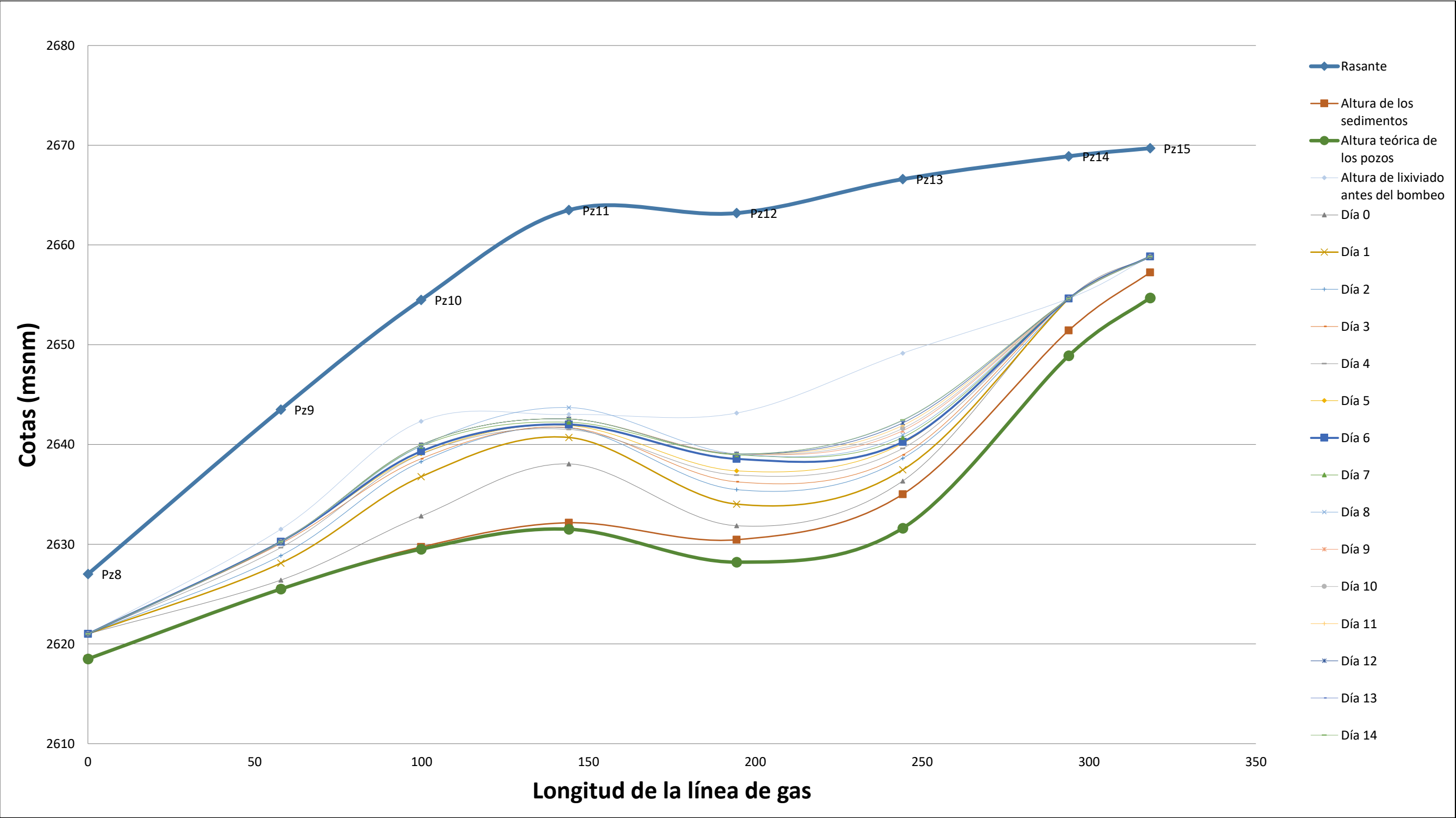
Fuente. Autores, 2017.

Figura 5.7. Comportamiento por día del lixiviado pozos del 1 al 7.



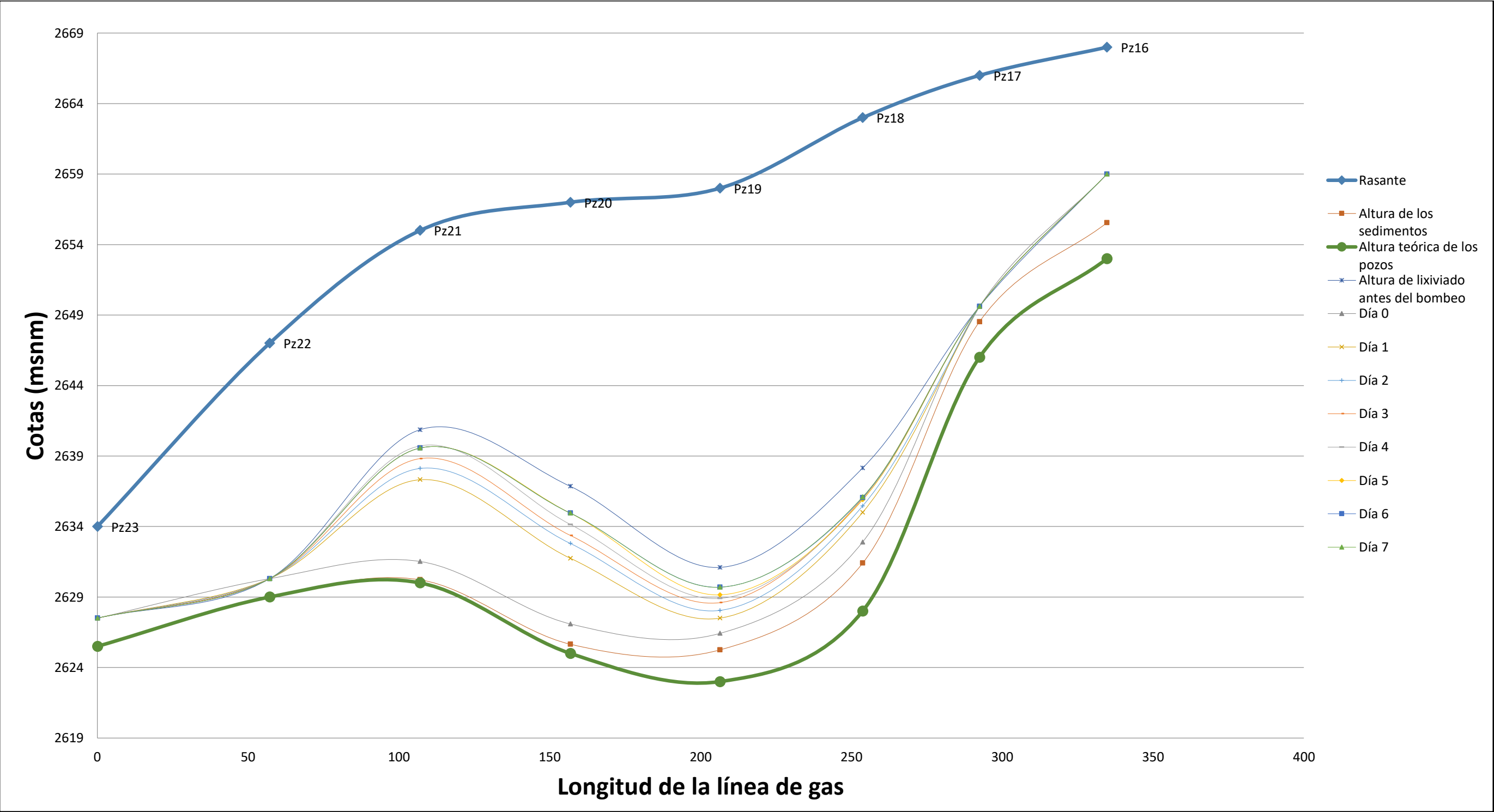
Fuente. Autores, 2017

Figura 5.8. Comportamiento por día del lixiviado pozos del 8 al 15.



Fuente. Autores, 2017

Figura 5.9. Comportamiento por día del lixiviado pozos del 16 al 23.



Fuente: Autores, 2017

La figura 5.4 describen el comportamiento del lixiviado en lo que se considera la primera línea principal para el sistema de recolección de gas en la fase norte I; en esta línea aportan metano desde el pozo uno, hasta el pozo 7. La primera figura muestra en columnas como va incrementando el nivel del líquido percolado en la basura, y el tiempo en que tardan en llegar a su nivel aproximado de estabilización, es decir desde que día la altura del líquido deja de variar excesivamente. Dentro de esta línea los pozos 1 y 7 presentan un nivel constante durante todo el tiempo en que se realizó el estudio, el pozo 6 en cambio, presenta variaciones durante todos los días, llegando a tardar 12 días en recuperar el nivel de lixiviado.

La figura 5.5 aborda a los pozos que van desde el numero 8 hasta el 15, en la línea intermedia del sistema se encuentran los pozos con mayor profundidad, está alcanza su estabilidad en mayor tiempo que las otras, tardando 14 días; al igual que en la línea 1, los pozos ubicados en los extremos, el 8 y el 15, se mantienen con un nivel constante. El pozo 11 muestra un nivel máximo durante el octavo día, para luego reducir su cota unos metros y mantenerse. Por las actividades desarrolladas en campo y gracias a la inspección diaria que se daba a cada uno de los pozos, concluimos que esta última reducción fue resultado del bombeo en los pozos que circundan a esté.

La figura 5.6 trata de los niveles de los pozos 16 al 23 colocados en la tercera línea, siendo los pozos 18 y 19 los que presentan una subida brusca en la cota de lixiviado, al siguiente día de realizado el bombeo, indicando que en este punto del relleno el líquido se acumula con mayor facilidad y que cuando se realiza el bombeo en estos pozos el nivel en el punto medio de la línea dos, reduce su nivel. La línea 3 es la que menos tiempo demora en llegar a su punto de estabilidad, tardando 7 días.

La figura 5.7 muestra cómo va cambiando el nivel de lixiviado a lo largo de los días en la línea principal uno, con respecto a la cota de arranque del proyecto y la rasante del relleno. Recordando que la separación entre cada pozo es de 50 metros. Lo mismo reflejan las figuras 5.8 y 5.9, mostrando el resultado de la observación diaria de la línea intermedia y la línea 3, respectivamente.

CONCLUSIONES

- El caudal teórico, para el análisis, se determinó anualmente utilizando dos métodos; dentro del periodo analizado, que inicia en el 2001 y finaliza en el 2016, el caudal promedio durante este intervalo de tiempo fue de 0.465 l/s., el máximo se alcanzó en el año 2002, siendo este de 0.9975 l/s. y el caudal mínimo sucedió en el 2015 con un valor de 0.0845 l/s.
- Por otra parte, el caudal real, el cual es considerado como el que se capta mediante los drenes y se transporta, presenta variaciones más significativas; analizado entre los años 2007 al 2016, el caudal máximo fue de 1.092 l/s. durante el 2008, en el año 2013 el caudal reportado fue el mínimo con un total de 0.052 l/s., dándonos un promedio de 0.476 l/s.
- Comparando el promedio del caudal real contra el caudal teórico, en los años 2007 al 2016, se pudo observar que son valores semejantes, la diferencia entre estas cantidades es mínima, siendo 2.3% el porcentaje de variación.
- Al cotejar los datos del caudal teórico con el caudal real, dentro del lapso de tiempo desde el año 2007 al 2016, la diferencia en los primeros años es evidente. En el 2008 el caudal teórico es de 0.5740 l/s., mientras que en el mismo año el caudal real es de 1.092 l/s., esta diferencia ocurrió debido a que el método escogido para el cálculo del caudal teórico toma como una de las variables principales las precipitaciones en la zona del relleno. Es importante señalar que, a pesar de la diferencia existente entre el caudal teórico y real, los datos muestran claramente que uno de los principales factores en la generación de lixiviados son las precipitaciones, ya que en 2008 estas alcanzaron los 1,052.10 mm, siendo el valor más significativo dentro del rango en el que analizamos los datos, y es el año en el que se alcanza el máximo caudal tanto teórico como real.
- Podemos acotar que la extracción de gas en los pozos, depende en gran parte del nivel de lixiviados que hay dentro de estos, ya que, al realizar el control de presiones en las cabezas de los pozos, estas aumentaban considerablemente. En los pozos 11, 13 y 18 la presión se duplicó, en los pozos 21, 19, 5, 10, 2, 4, 6, y

12 la presión se incrementó entre 3 y 7 veces más de lo que fue el valor inicial y en el caso de los pozos 20 y 17 la presión llegó a aumentar 20 veces.

- En el año 2012 el caudal real (captado y transportado) es inferior al caudal teórico, por lo que se concluye que no se está drenando el volumen de lixiviados esperado y que este se está acumulando dentro del relleno y por ende en los pozos de extracción de biogás.
- El nivel necesario de lixiviados para que la extracción del gas sea óptima se encuentra entre 1.60m. y 2.60m., por lo que se vuelve indispensable el proceso de bombeo y el drenaje continuo de este líquido.
- La cota de estabilización del nivel de lixiviados es diferente para cada pozo, aunque la mayor cota siempre se alcanzará en la línea 2, donde los pozos son mucho más profundos.
- Debido al comportamiento hidráulico del lixiviado dentro del relleno, los tiempos de recarga en los puntos de control dependen mayormente del área y la ubicación del pozo.
- Al realizar el bombeo de los pozos en el orden secuencial de cada línea de gas, concluimos que este proceso afecta a la recuperación de la cota de lixiviados de la siguiente manera: aquellos pozos ubicados en el sector este de la fase norte 1 llegan a estabilizarse alrededor de quince días, los que se encuentran en la zona central de la fase tardan entre siete y nueve días, y los que se encuentran ubicados al oeste de la fase son los que presentan un menor tiempo de estabilización, el cual es de cinco días. De esta manera concluimos que el lixiviado tiende a moverse hacia la parte oeste de la fase.
- De otra manera, al realizar un bombeo aleatorio, se determinó que cuando se extrae el lixiviado de los pozos más profundos, que son aquellos que se encuentran en la línea 2 de la fase, el nivel de lixiviados también se reduce en aquellos que son próximos a él, sin que sea necesario realizar el proceso en estos otros.

- Con estas dos últimas conclusiones determinamos que los pozos en los que se deben priorizar el bombeo son aquellos que se ubican en la línea 2 y que están en la zona oeste de la fase.

RECOMENDACIONES

Finalizado el estudio de la fase norte I y luego de tomar en cuenta las conclusiones, podemos concluir lo siguiente:

- El sistema que debe usarse para la extracción de lixiviado en los pozos debe ser el que tiene como componente la bomba sumergible Bonasa YY7667 con una potencia de 370 watts y un flujo máximo de 70 l/min., ya que este método es el más rápido y el que menos inconvenientes presenta durante su uso.
- En lo posible se debe bombear los pozos de la zona oeste del relleno con una frecuencia de 5 días, ya que los datos de la presión del gas tomados aquí, cuando el nivel de lixiviado es bajo, muestran que la emanación de gas se incrementa significativamente (aumentando hasta 20 veces la presión del gas).
- Se debe revisar los diseños de los drenes de fondo, para mejorar la evacuación de lixiviados y reducir el bombeo.
- Realizar un estudio más detallado para determinar puntos de bombeo centralizado para la evacuación de lixiviado, ya que esta investigación concluyó que el líquido se concentra en el sector suroeste de la fase norte I.

BIBLIOGRAFÍA

- Cheremisinoff, N. (2003). *Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies*. New York : Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Science.
- Christensen, T. H., Cossu, R., & Stegmann, R. (1989). *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. San Diego: ACADEMIC PRESS.
- Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd. (2007). *Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás: Relleno Pichacay Cuenca, Ecuador*. Cuenca: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos -USEPA Programa de Acercamiento de Metano de Rellenos -LMOP-.
- Farquhar, G. (1989). Leachate: production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(3), 317-325.
- Farquhar, G., & Rovers, F. (1973). Gas production during refuse decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 483–495.
- Giraldo , E. (2001). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*(14), 44-55.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental* (2da ed.). México, D.F., México: Pearson Educación.
- INGA AGUAYZA , M. D., & ROMERO PACHECO , L. F. (2011). PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY, PARROQUIA SANTA ANA, CANTON CUENCA. CUENCA.
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. *Colombia: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (ops/cepis)*, 287.
- Jason, S., Donia, B., Ros, A., & Gary, L. (2005). Landfill Management, Leachate Generation, and Leach Testing of Solid Wastes in Australia and Overseas. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 239-332.
- MAE. (14 de Agosto de 2012). *Ministerio del Ambiente*. Obtenido de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/TEXTO-UNIFICADO-LEGISLACION-SECUNDARIA-MEDIO-AMBIENTE-PARTE-I-I.pdf>

- Pilar, A., Rodríguez Pérez, R., Alcañiz Baldellou, J. M., Bach Plaza, J., Bonmatí, A., Comas, J., . . . Vila Subirós, J. (2008). *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*. Girona: Documenta Universitaria.
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 468–493.
- Siliezar , C., & Urquizo, R. (2009). *User's Manual Ecuador Landfill Gas Model*. Washington, DC: Carbon Trade Ltd Latin-American on behalf of Eastern Research Group.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. Nueva York: McGraw Hill Professional.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos* . Madrid : McGRAW-HILL.

ANEXOS

ANEXOS 1

PERSONA QUE COLABRÓ EN LA OBTENCIÓN DE DATOS

Información	Obrero de EMAC-BGP ENERGY CEM
Nombre: Iván Vinicio Quishpi Nugra Sexo: Masculino Edad: 27 CI: 0105409296 Tiempo de trabajo: 1 año 11 meses.	

ANEXOS 2

MODELO DE UNA TABLA UTILIZADA PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS.

Resumen general								
Informacion				Medidas			Bombeo	Observaciones
Pozos	Fecha	Hora	Clima	Altura pozo	Altura lixiviado	Altura lixiviado después de bombeo	Tiempo total	
				Metros.	Metros.	Metros.	Min.	
1	19/7/2016	9:40:00	Soleado	8,55	2,60	2,60	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
2	25/7/2016	9:40:00	Soleado	18,00	8,70	2,45	60	Bombeo sumergible
3	24/05/2016	10:12:00	Nublado	20,20	5,40	4,16	20	Bombeo sumergible
4	14/7/2016	11:56:00	Parcialmente nublado	15,20	3,60	1,98	20	Bomba sumergible
5	18/5/2016	10:41:00	Nublado	15,37	7,00	2,45	55	Bomba sumergible
6	10/5/2016	11:41:00	Nublado	17,00	8,30	2,60	90	Bomba sumergible
7	16/05/2016	8:57:00	Nublado	9,43	1,72	1,72	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
8	19/7/2016	15:30:00	Soleado	9,30	2,50	2,50	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
9	25/7/2016	14:10:00	Soleado	18,30	6,00	0,90	95	Bomba sumergible
10	15/7/2016	9:17:00	Soleado	24,28	12,60	3,10	60	Bomba sumergible
11	15/7/2016	12:35:00	Parcialmente nublado	30,85	10,85	5,90	70	Bomba sumergible
12	18/7/2016	9:15:00	Soleado	32,25	12,70	1,40	60	Bombeo sumergible
13	9/7/2016	13:40:00	Soleado	31,10	14,15	1,33	165	Bomba sumergible
14	19/7/2016	9:48:00	Soleado	16,97	3,20	3,20	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
15	19/7/2016	9:55:00	Soleado	11,95	1,60	1,60	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
16	19/7/2016	15:45:00	Soleado	7,75	2,00	2,00	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
17	15/7/2016	9:00:00	Parcialmente nublado	17,90	1,30	1,30	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
18	27/7/2016	9:10:00	Lluvia leve	20,20	10,65	1,30	150	Bomba sumergible
19	26/7/2016	12:55:00	Lluvia leve	20,70	11,20	1,44	155	Bomba sumergible
20	13/7/2016	9:40:00	Soleado	20,40	5,85	1,17	60	Bomba sumergible
21	13/7/2016	11:00:00	Lluvia leve	19,50	6,75	1,50	60	Bomba sumergible
22	13/7/2016	12:00:00	Lluvia leve	10,70	1,08	1,08	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo
23	13/7/2016	14:00:00	Parcialmente nublado	8,96	3,45	3,45	0	Nivel de lixiviado bajo para bombeo

ANEXOS 3

CONTROL DIARIO DE LOS POZOS DE BIOGÁS CONSIDERANDO EL INCREMENTO O DECREMENTO EN CADA UNO DE ELLOS

Pozo 1					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	19/7/2016	Soleado	9:40:00	2,60	0,00
Pozo 2					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	25/7/2016	Soleado	9:40:00	2,45	0,00
1	26/7/2016	Lluvia leve	12:25:00	6,10	3,65
2	27/7/2016	Soleado	13:55:00	6,62	0,52
3	28/7/2016	Nublado	11:50:00	7,20	0,58
4	29/7/2016	Parcialmente nublado	10:00:00	7,10	-0,10
5	30/7/2016	Lluvia leve	14:33:00	7,20	0,10
Pozo 3					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	24/05/2016	Nublado	10:12:00	4,16	0,00
1	25/5/2016	Nublado	9:42:00	4,78	0,62
2	26/5/2016	Soleado	10:49:00	4,53	-0,25
3	27/5/2016	Soleado	10:29:00	4,7	0,17
4	30/5/2016	Soleado	10:28:00	4,58	-0,12
5	31/5/2016	Soleado	13:25:00	4,57	-0,01
6	1/6/2016	Soleado	13:12:00	4,97	0,40
7	2/6/2016	Lluvia leve	10:51:00	4,7	-0,27
Pozo 4					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	14/7/2016	Parcialmente nublado	11:56:00	1,98	0,00
1	15/7/2016	Parcialmente nublado	9:42:00	2,95	0,97
2	16/7/2016	Soleado	10:49:00	3	0,05
3	18/7/2016	Parcialmente nublado	10:29:00	3,07	0,07
4	19/7/2016	Parcialmente nublado	10:28:00	3,2	0,13
5	20/7/2016	Nublado	13:25:00	3,25	0,05
Pozo 5					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	18/5/2016	Nublado	10:41:00	2,45	0,00

1	19/5/2016	Nublado	11:06:00	2,70	0,25
2	20/5/2016	Soleado	10:04:00	3,49	0,79
3	21/5/2016	Soleado	11:15:00	3,77	0,28
4	22/5/2016	Soleado	11:00:00	4,13	0,36
0	23/5/2016	Nublado	10:41:00	3,86	-0,27
1	24/5/2016	Nublado	10:38:00	4,62	0,76
2	25/5/2016	Nublado	10:06:00	5,57	0,95
3	26/5/2016	Soleado	11:00:00	5,6	0,03
4	27/5/2016	Soleado	10:43:00	5,9	0,30
5	30/5/2016	Soleado	10:49:00	5,74	-0,16
6	31/5/2016	Soleado	13:38:00	5,58	-0,16
7	1/6/2016	Nublado	13:27:00	6,1	0,52
8	2/6/2016	Lluvia leve	11:04:00	6,33	0,23
Pozo 6					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	16/05/2016	Nublado	10:07:00	4,55	0,00
1	17/05/2016	Soleado	13:30:00	5,90	1,35
2	18/05/2016	Soleado	0:00:00	6,25	0,35
3	19/05/2016	Soleado	9:30:00	6,75	0,50
4	20/05/2016	Soleado	11:40:00	6,95	0,20
5	23/05/2016	Nublado	11:25:00	7,55	0,60
6	24/05/2016	Nublado	11:25:00	7,38	-0,17
7	25/5/2016	Soleado	14:24:00	7,4	0,02
8	26/5/2016	Soleado	11:16:00	7,3	-0,10
9	27/5/2016	Soleado	10:59:00	7,4	0,10
10	30/5/2016	Soleado	11:07:00	7,35	-0,05
11	1/6/2016	Soleado	13:49:00	7,98	0,63
12	2/6/2016	Nublado	11:19:00	8,25	0,27
Pozo 7					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	16/05/2016	Nublado	8:57:00	1,72	0,00
Pozo 8					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	19/7/2016	Soleado	15:30:00	2,50	0,00
Pozo 9					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	25/7/2016	Soleado	14:10:00	0,90	0,00
1	26/7/2016	Lluvia leve	12:30:00	2,60	1,70

2	27/7/2016	Soleado	13:50:00	3,35	0,75
3	28/7/2016	Nublado	12:05:00	4,55	1,20
4	29/7/2016	Lluvia leve	9:45:00	4,15	-0,40
5	30/7/2016	Lluvia leve	14:20:00	4,75	0,60
Pozo 10					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	15/7/2016	Soleado	9:17:00	3,10	0,00
1	16/7/2016	Parcialmente nublado	11:26:00	7,05	3,95
2	18/7/2016	Parcialmente nublado	11:26:00	8,55	1,50
3	19/7/2016	Soleado	10:50:00	8,85	0,30
4	20/7/2016	Nublado	12:55:00	9,30	0,45
5	21/7/2016	Parcialmente nublado	10:50:00	9,35	0,05
6	22/7/2016	Nublado	15:35:00	9,59	0,24
7	23/7/2016	Parcialmente nublado	10:00:00	10,10	0,51
8	25/7/2016	Soleado	14:40:00	10,12	0,02
9	26/7/2016	Parcialmente nublado	9:35:00	10,25	0,13
Pozo 11					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	15/7/2016	Parcialmente nublado	12:35:00	5,90	0,00
1	16/7/2016	Parcialmente nublado	12:36:00	8,55	2,65
2	18/7/2016	Parcialmente nublado	11:42:00	9,50	0,95
3	19/7/2016	Soleado	11:05:00	9,54	0,04
4	20/7/2016	Nublado	12:15:00	9,36	-0,18
5	21/7/2016	Nublado	10:00:00	9,75	0,39
6	22/7/2016	Nublado	15:25:00	9,85	0,10
7	23/7/2016	Parcialmente nublado	9:30:00	10,08	0,23
8	25/7/2016	Soleado	15:15:00	11,55	1,47
9	26/7/2016	Parcialmente nublado	11:40:00	10,40	-1,15
Pozo 12					

Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	18/7/2016	Soleado	9:15:00	1,40	0,00
1	19/7/2016	Soleado	10:04:00	3,57	2,17
2	20/7/2016	Nublado	12:04:00	5,02	1,45
3	21/7/2016	Nublado	9:55:00	5,80	0,78
4	22/7/2016	Nublado	15:10:00	6,48	0,68
5	23/7/2016	Parcialmente nublado	9:15:00	6,90	0,42
6	25/7/2016	Soleado	15:10:00	8,10	1,20
7	26/7/2016	Soleado	11:06:00	8,50	0,40
8	27/7/2016	Parcialmente nublado	14:10:00	8,60	0,10
9	28/7/2016	Nublado	11:00:00	8,60	0,00
Pozo 13					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	9/7/2016	Soleado	13:40:00	1,33	0,00
1	20/7/2016	Nublado	11:53:00	2,45	1,12
3	21/7/2016	Nublado	9:49:00	3,60	1,15
4	22/7/2016	Nublado	14:50:00	3,95	0,35
5	23/7/2016	Parcialmente nublado	9:00:00	4,60	0,65
6	25/7/2016	Soleado	15:00:00	5,10	0,50
7	26/7/2016	Parcialmente nublado	12:35:00	5,25	0,15
8	27/7/2016	Soleado	14:15:00	5,70	0,45
9	28/7/2016	Nublado	10:45:00	5,95	0,25
10	29/7/2016	Parcialmente nublado	14:33:00	6,37	0,42
11	30/7/2016	Lluvia leve	14:50:00	6,60	0,23
12	1/8/2016	Parcialmente nublado	14:50:00	6,90	0,30
13	2/8/2016	Parcialmente nublado	10:35:00	7,15	0,25
14	3/8/2016	Parcialmente nublado	7:00:00	7,40	0,25
15	4/8/2016	Parcialmente nublado	10:00:00	7,45	0,05
Pozo 14					

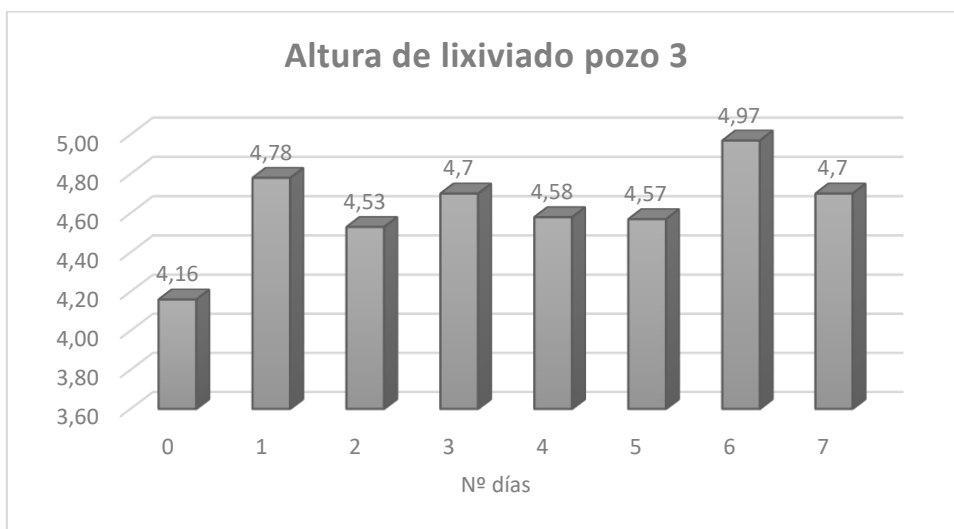
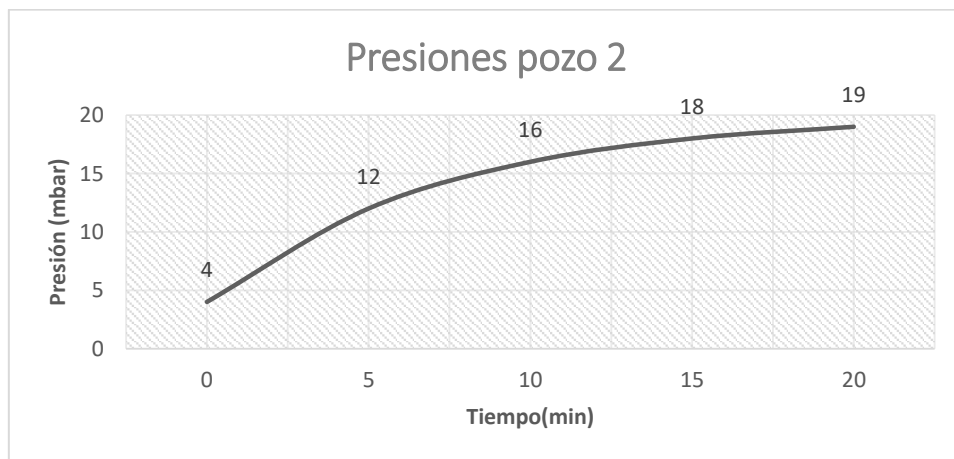
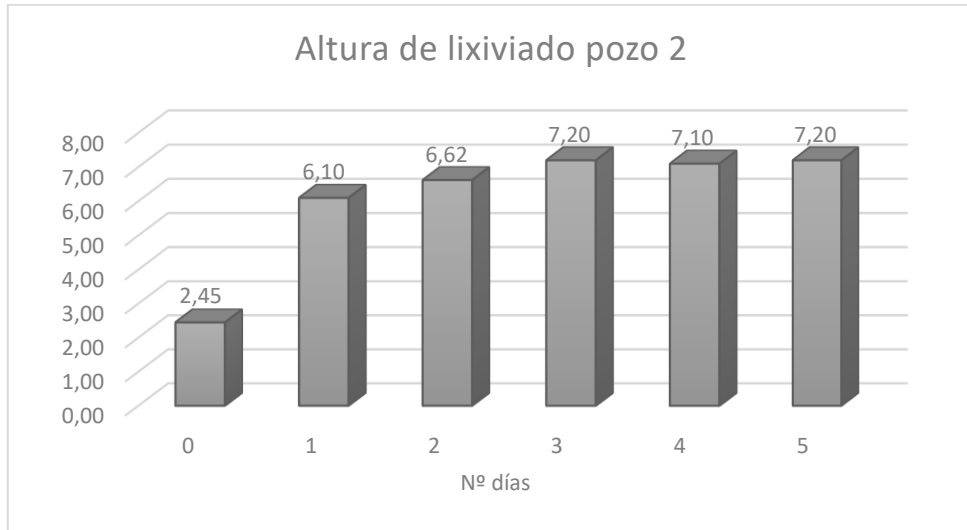
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	19/7/2016	Soleado	9:48:00	3,20	0,00
Pozo 15					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	19/7/2016	Soleado	9:55:00	1,60	0,00
Pozo 16					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	19/7/2016	Soleado	15:45:00	2,00	0,00
Pozo 17					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	15/7/2016	Parcialmente nublado	9:00:00	1,30	0,00
Pozo 18					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	27/7/2016	Lluvia leve	9:10:00	1,30	0,00
1	28/7/2016	Nublado	11:15:00	7,10	5,80
2	29/7/2016	Parcialmente nublado	10:35:00	7,90	0,80
3	30/7/2016	Lluvia leve	14:10:00	8,60	0,70
4	1/8/2016	Parcialmente nublado	14:40:00	9,50	0,90
5	2/8/2016	Parcialmente nublado	10:15:00	9,35	-0,15
Pozo 19					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	26/7/2016	Lluvia leve	12:55:00	1,44	0,00
1	27/7/2016	Soleado	13:20:00	6,10	4,66
2	28/7/2016	Nublado	11:35:00	7,15	1,05
3	29/7/2016	Parcialmente nublado	10:20:00	7,72	0,57
4	30/7/2016	Parcialmente nublado	14:00:00	8,50	0,78
5	1/8/2016	Parcialmente nublado	14:30:00	9,30	0,80

6	2/8/2016	Parcialmente nublado	9:55:00	9,30	0,00
Pozo 20					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	13/7/2016	Soleado	9:40:00	1,17	0,00
1	14/7/2016	Parcialmente nublado	10:34:00	2,25	1,08
2	15/7/2016	Parcialmente nublado	10:35:00	2,80	0,55
3	16/7/2016	Soleado	11:52:00	3,35	0,55
4	18/7/2016	Soleado	10:56:00	3,65	0,30
5	19/7/2016	Soleado	10:21:00	3,90	0,25
6	20/7/2016	Nublado	12:35:00	4,45	0,55
7	21/7/2016	Parcialmente nublado	10:26:00	4,44	-0,01
Pozo 21					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
0	13/7/2016	Lluvia leve	11:00:00	1,50	0,00
1	14/7/2016	Parcialmente nublado	10:49:00	3,60	2,10
2	15/7/2016	Parcialmente nublado	10:47:00	4,06	0,46
3	16/7/2016	Soleado	12:15:00	4,60	0,54
4	18/7/2016	Parcialmente nublado	11:10:00	4,50	-0,10
5	19/7/2016	Soleado	10:35:00	4,50	0,00
6	20/7/2016	Nublado	12:45:00	4,65	0,15
7	21/7/2016	Parcialmente nublado	10:42:00	4,70	0,05
Pozo 22					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	13/7/2016	Lluvia leve	12:00:00	1,08	0,00
Pozo 23					
Día	Fecha	Clima	Hora	Altura de lixiviado	Incremento
1	13/7/2016	Parcialmente nublado	14:00:00	3,45	0,00

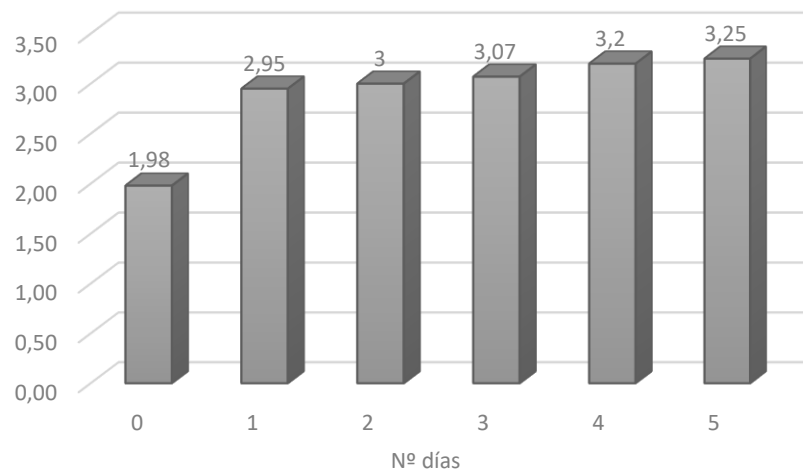
ANEXOS 4

GRÁFICOS DE LOS NIVELES DE LIXIVIADO Y PRESIONES EN LOS POZOS DE BIOGÁS

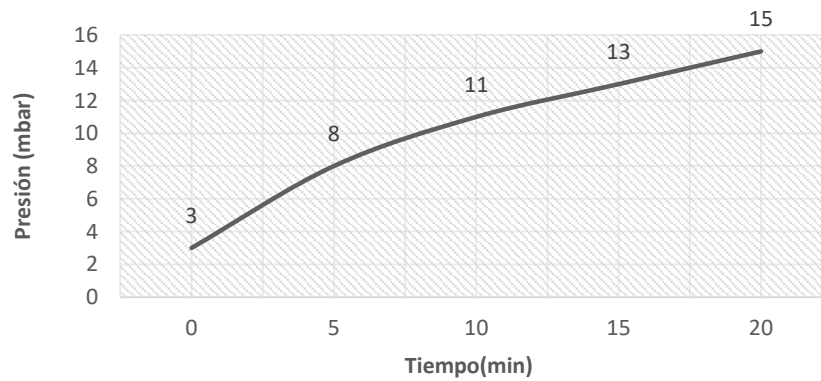
Nota: los pozos en los cuales el nivel se mantiene constante desde el día 0 y las presiones cuyos valores sean de cero, no se representan mediante gráfico.



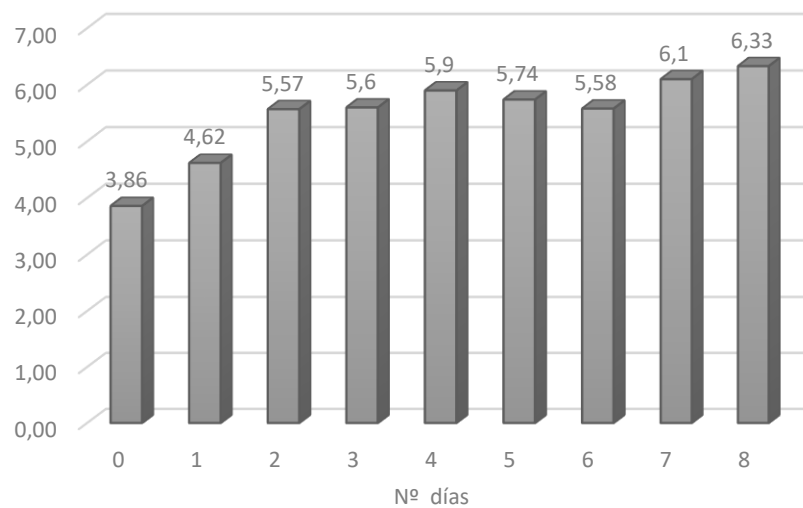
Altura de lixiviado pozo 4

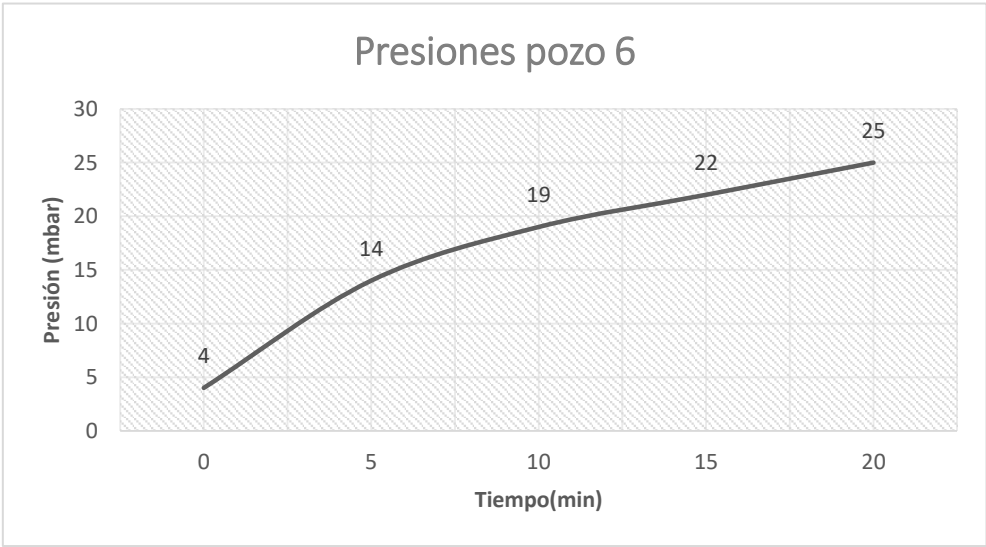
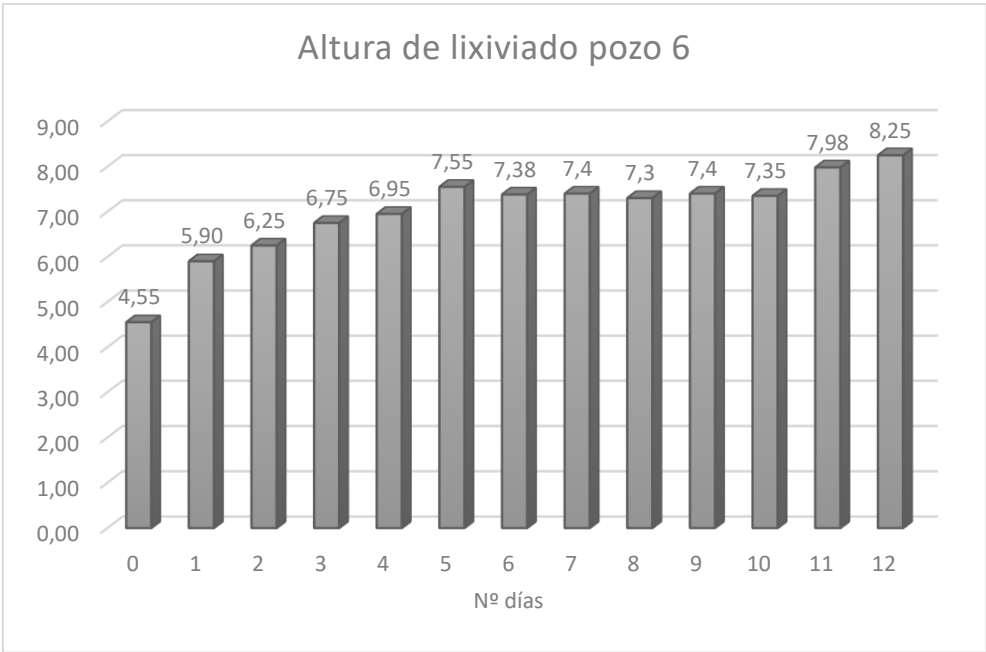
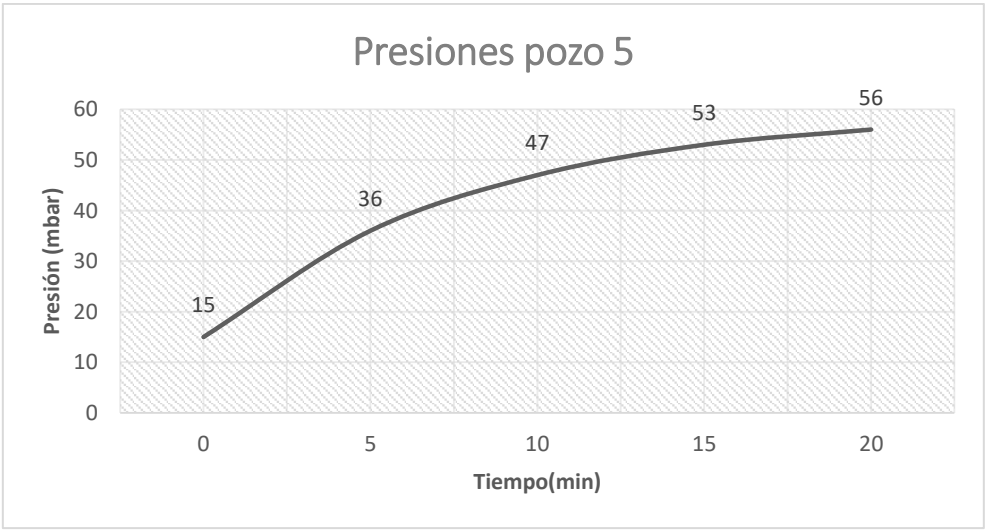


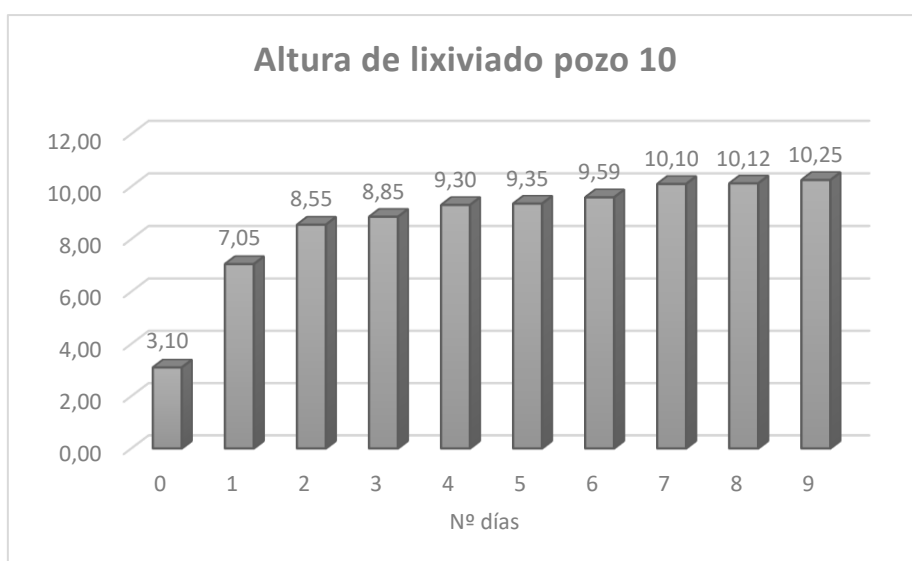
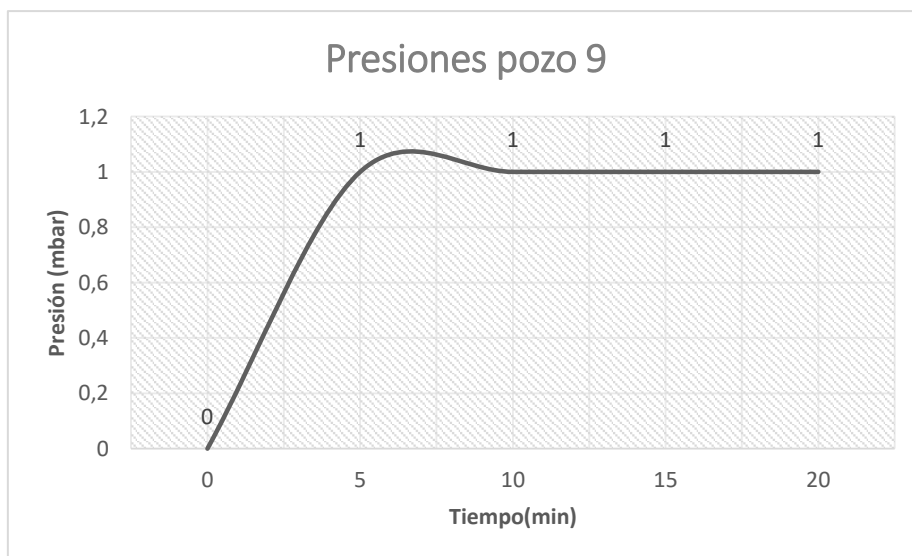
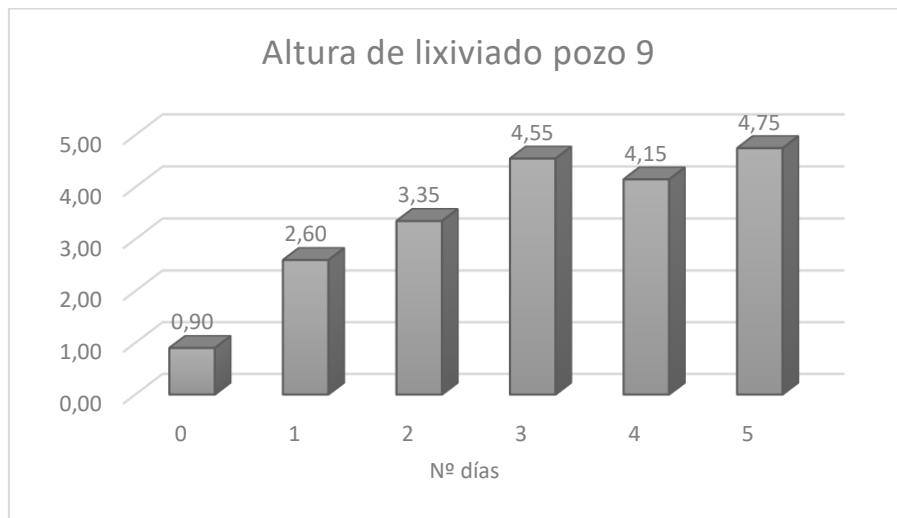
Presiones pozo 4

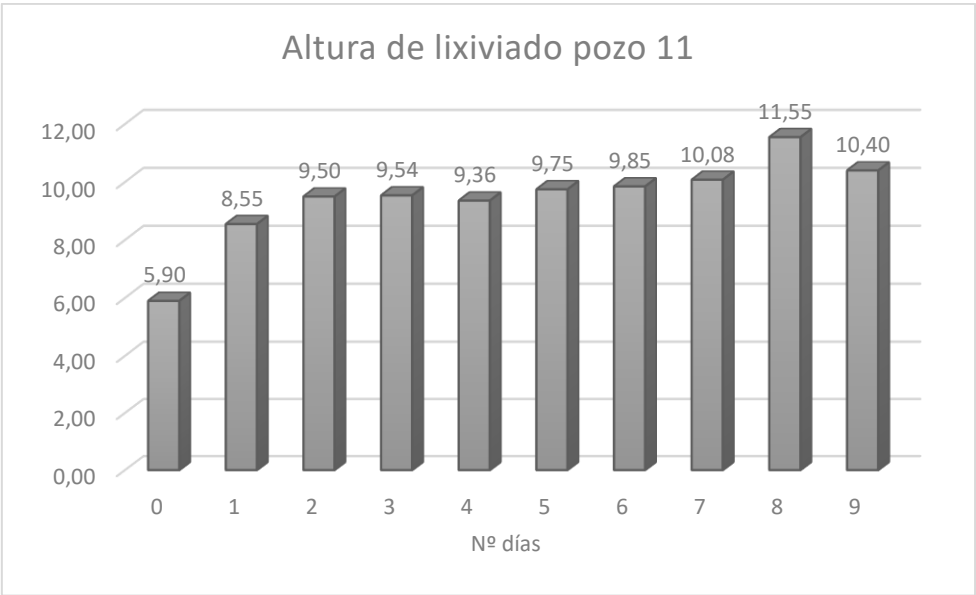
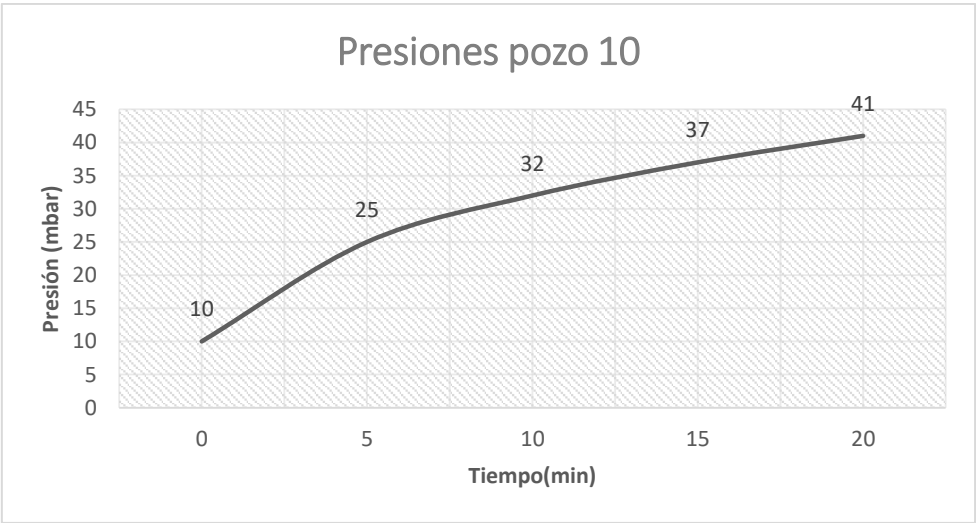


Altura de lixiviado pozo 5

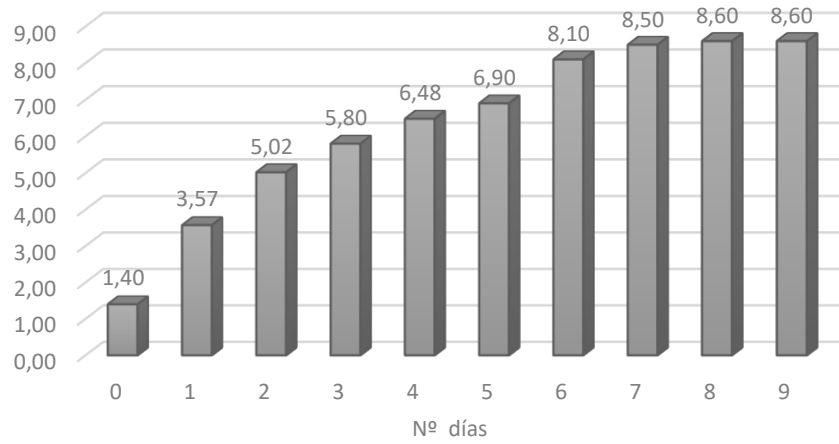




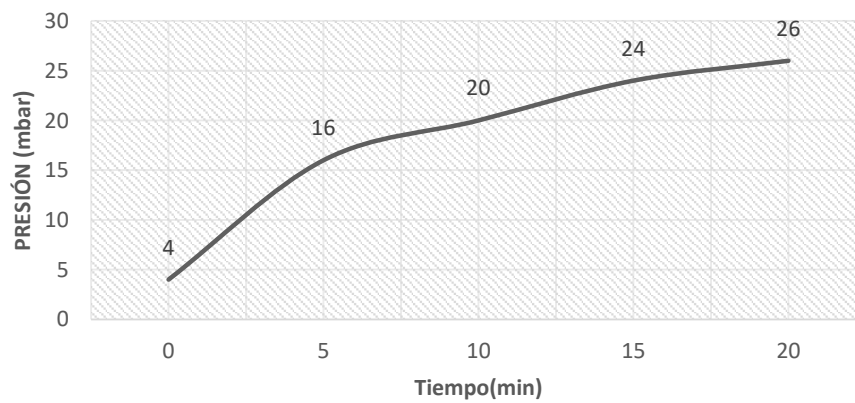




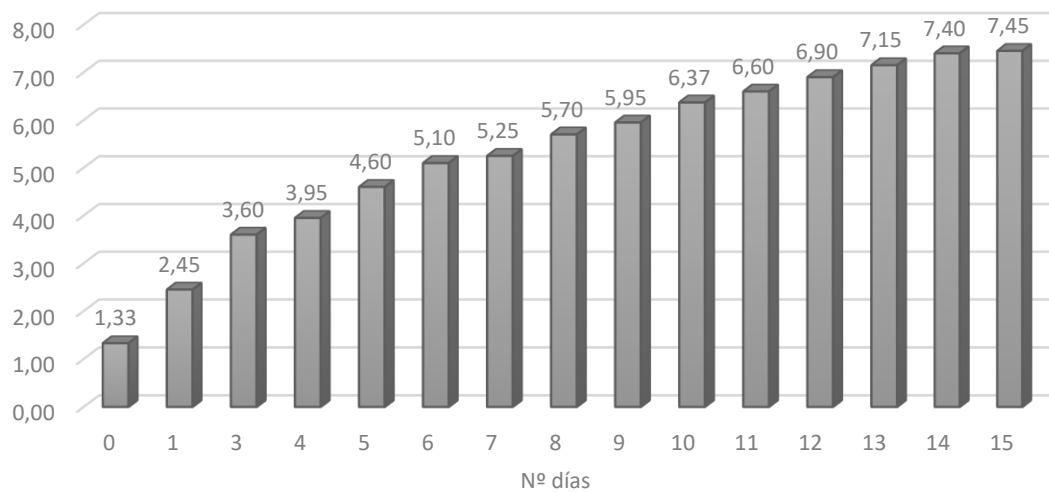
Altura de lixiviado pozo 12

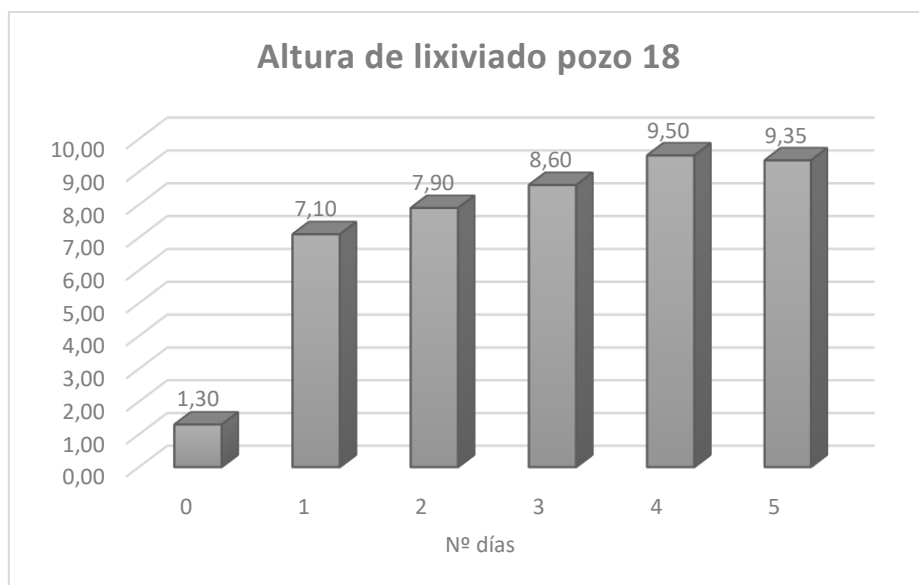
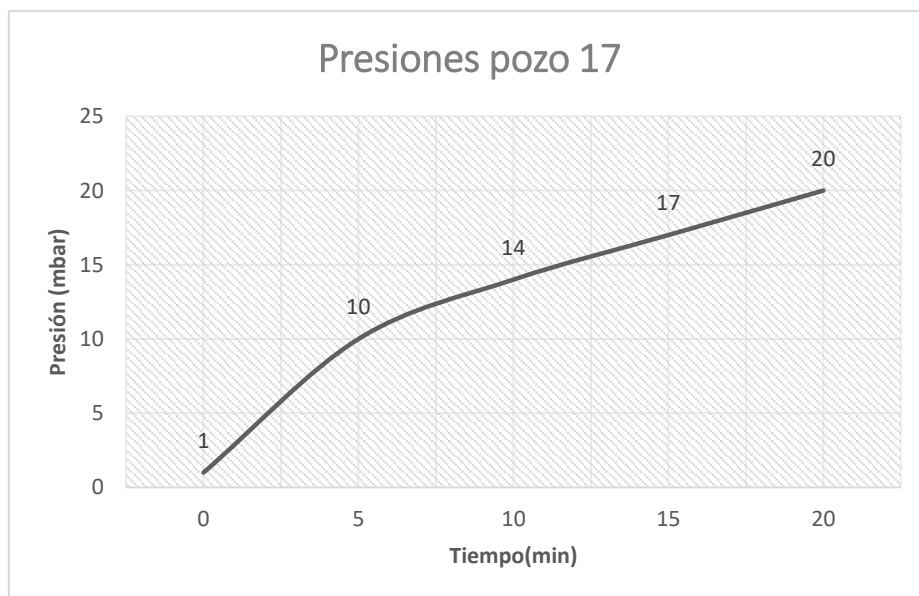
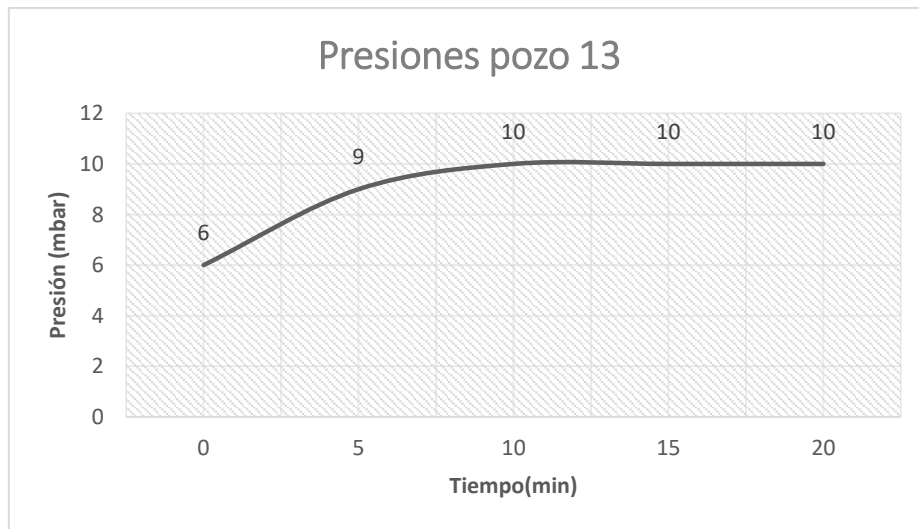


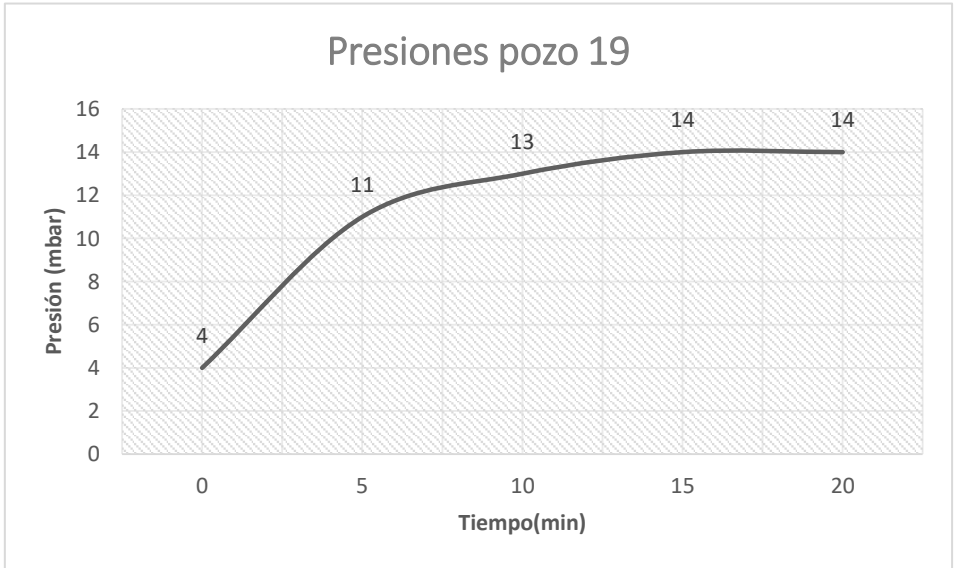
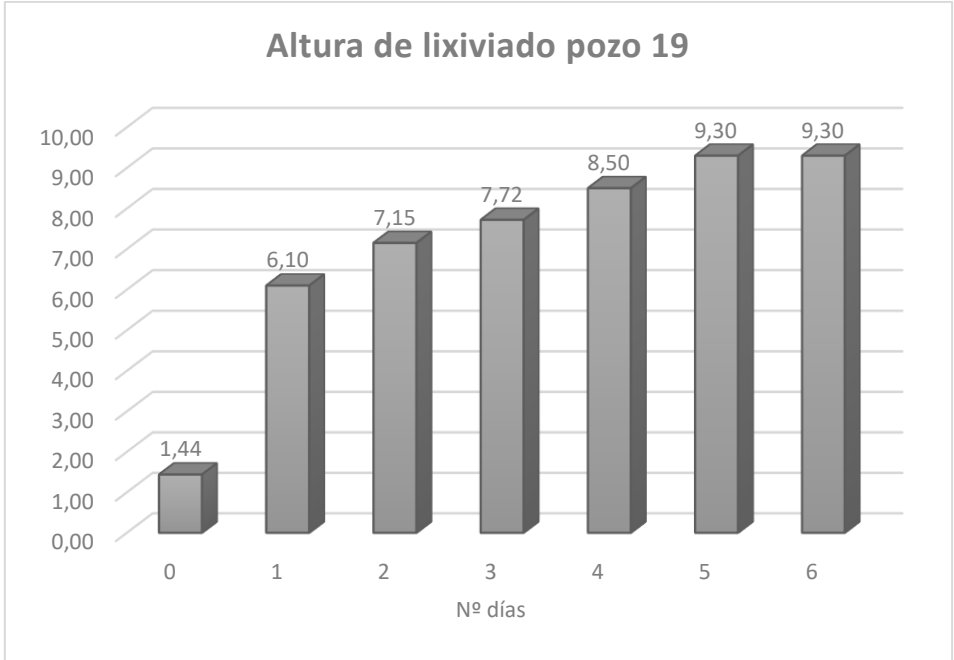
Presiones pozo 12

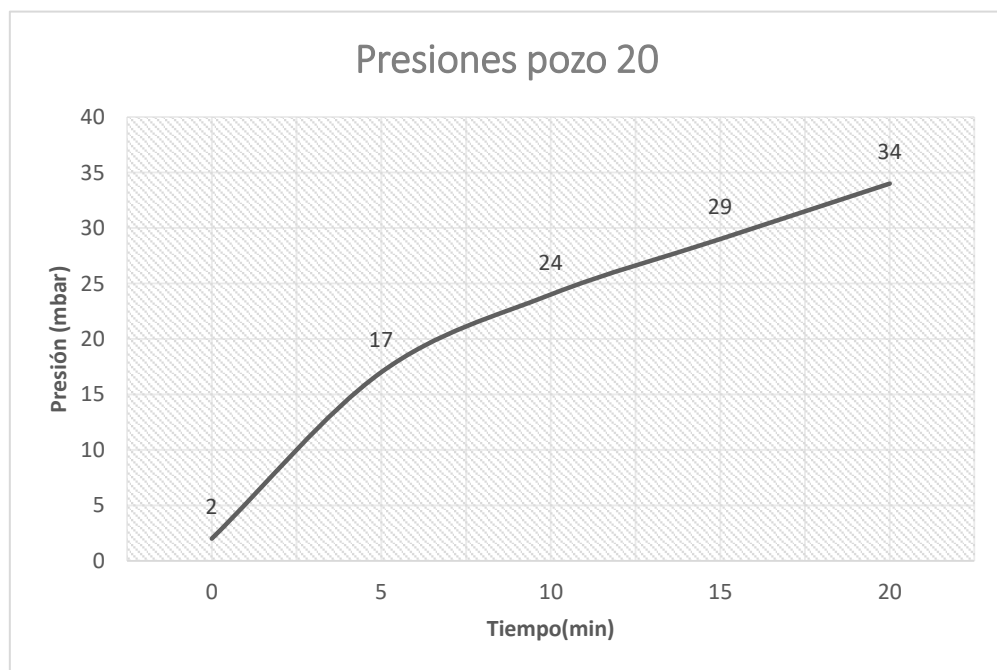
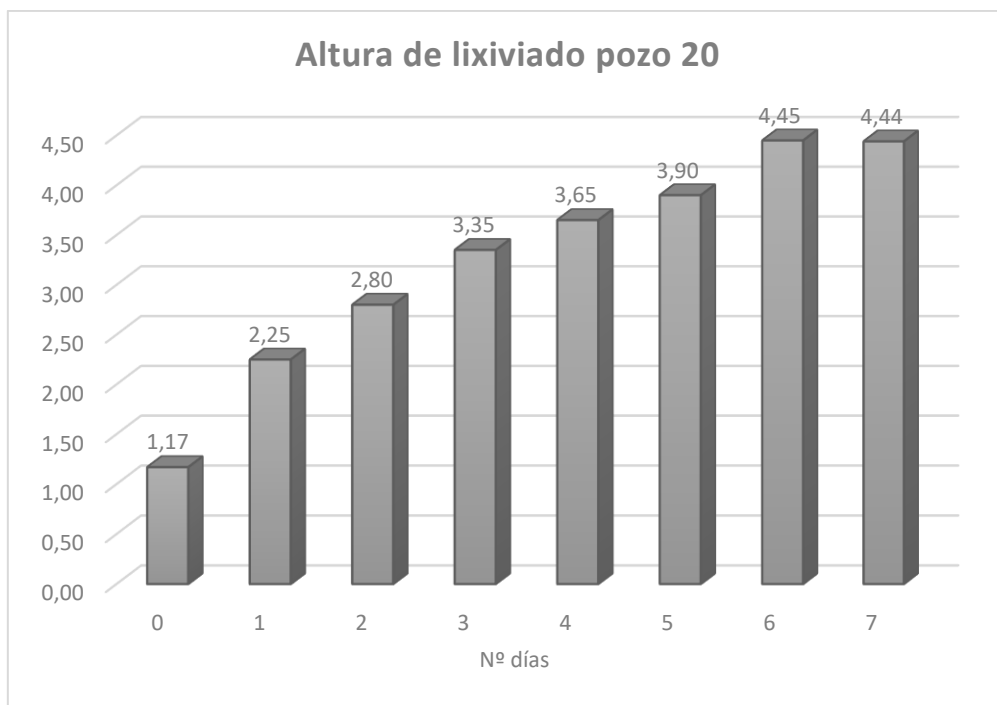


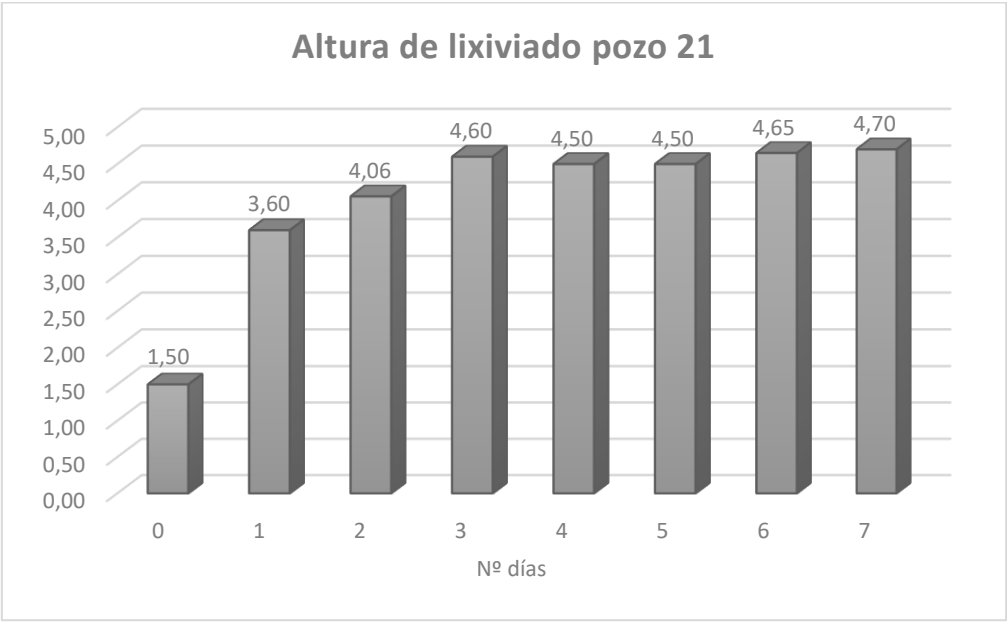
Altura de lixiviado pozo 13











ANEXOS 5

RECOPIACIÓN FOTOGRÁFICA DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE EL TRANCURSO DEL PROYECTO.

Instalación de un pozo de biogás

Figura 0.1. Excavación mediante retroexcavadora Case 580N para extraer la cabeza temporal del pozo.



Figura 0.2. Extracción de la cabeza temporal.



Figura 0.3. Estado en el que se encontraba el pozo de 160 milímetros.



El pozo tenía una profundidad de 2 metros, después se procedía a colocar la cabeza del pozo

Figura 0.4. Cabeza utilizada para cubrir el tubo de 160 milímetros.



Figura 0.5. Colocación de la cabeza del pozo sobre el tubo de 160mm.



El levantamiento del sistema de cabeza se hace mediante una retroexcavadora Case 580N y mediante el brazo y aplicando presión se logró instalar la cabeza del pozo.

Figura 0.6. Verificación, de la correcta colocación, de la cabeza de pozo mediante niveles.



Figura 0.7. Compactación de arcilla al alrededor del el pozo de biogás.



Figura 0.8. Término de la compactación mediante apisonador.



La compactación se lo realizo con arcilla debido a las propiedades impermeables que poseen, estas impiden filtraciones de biogás a la atmósfera.

Figura 0.9. Excavación de la línea principal de biogás.



Figura 0.10. Conexión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la cabeza del pozo.



Figura 0.11. Conexión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la nueva tubería de biogás.



Figura 0.12. Cortes realizados en la tubería.



Figura 0.13. Unión de la nueva tubería a la línea principal.



Figura 0.14. Unión de la tubería de acero inoxidable AISI 304 a la tubería conectada a la línea principal.



Figura 0.15. Accesorios de electrofusión.



Figura 0.16. Máquina de soldadura por electrofusión.



Figura 0.17. Generador a diésel utilizado para la maquina soldadora.



Figura 0.18. Aplicación de la maquina soldadora mediante electrofusión.



Aplicación del sistema Venturi

Figura 0.19. Pozo de biogás en el cual se va a trabajar.



Figura 0.20. Generador y compresor utilizados en la extracción del lixiviado.





Extracción del lixiviado mediante la bomba sumergible

Figura 0.21. Vehículo utilizado para transportar los instrumentos y equipos utilizados durante la extracción del lixiviado.



Figura 0.22. Instrumentos y equipos transportados.



Figura 0.23. Mediante el juego de llaves destapamos el pozo de biogás.



Figura 0.24. Pozo de biogás sin la tapa.



Figura 0.25. Mediante una cuerda determinamos la altura inicial del lixiviado.



Figura 0.26. Descarga de la bomba sumergible con la cual se va a trabajar.



Figura 0.27. Colocación de la bomba en el pozo de biogás.



Figura 0.28. Altura del lixiviado después del bombeo.



Figura 0.29. Cierre del pozo de biogás



Figura 0.30. Tubería de acero inoxidable con los controles de presión.



Figura 0.31. Líneas de biogás del norte I Y II.



Componentes de la casa de máquinas de la planta de generación de energía eléctrica mediante biogás

Figura 0.32. Casa de máquinas.



Figura 0.33. Biprosesor.





Figura 0.34. Quemador de gas.



Figura 0.35. Motor de combustión interna.



Figura 0.36. Subestación electica.



Figura 0.37. Paneles de control.



ANEXOS 6

PLANOS