

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Química

“Optimización del sistema de tratamiento de los lixiviados generados en el Relleno  
Sanitario del Parque Ambiental Municipalidad de Garabito”

Informe de Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de licenciatura en  
Ingeniería Ambiental

Laura Zumbado Ramos

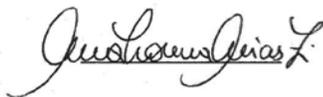
Cartago, Costa Rica

Mayo, 2012

**“Optimización del tratamiento de los lixiviados generados en el Relleno Sanitario del  
Parque Ambiental Municipalidad de Garabito”**

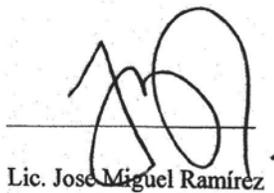
**Informe de Proyecto Final de Graduación presentado a la Escuela de Química del Instituto  
Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
ambiental con el grado en Licenciatura**

**Miembros del Tribunal**



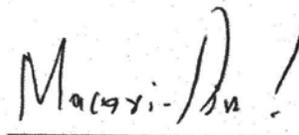
**MSc. Ana Lorena Arias**

**Directora de Tesis**



**Lic. Jose Miguel Ramirez**

**Lector 1**



**Ing. Macario Pino Gómez**

**Lector 2**

## DEDICATORIA

Al coronel Arnoldo Ramos Aguilar y su legado de fortaleza, persecución de sueños e  
ideales

## AGRADECIMIENTOS

Al ser superior que guía mis pasos y forja mi destino.

A mis padres agradezco y debo todo.

A mi hermano que me hace ser mejor y ver los errores que cometo día a día.

A mis tías, tios , prim@s, y familia por todo el cariño y ánimos que me brindaron.

A mis amig@s Pao, Luly, Mary, Leo, Alan, Tavo, Beto, Norman, Reynier por el impulso, motivación, distracción y cooperación durante este proceso.

A Ana Lorena Arias por su orientación en aspectos más allá que la generación de este documento.

A Don José Miguel Ramírez por su dirección y dedicación.

A Macario Pino por brindarme su opinión en rumbo profesional y una vez más revisar mi trabajo.

A la Municipalidad de Garabito representada por la Vicealcaldesa Karla Gutiérrez por su interés y apoyo en el proyecto; Don Gerardo Robles y Erick Fallas por la cooperación en todas las mediciones y actividades realizadas en el relleno sanitario además del suministro de información.

Empresa Enertiva por brindarme su equipo para la realización de las pruebas de concepto y apoyo.

Al CIPA, Escuela de Química, Escuela de Electrónica y Escuela de Materiales del TEC por préstamos de equipo.

A Don Oscar Monge por su interés y cooperación.

A Don Max Mena y el Instituto Meteorológico Nacional por el suministro de datos y equipo.

A todas las personas que han creído en mí y me han brindando una pizca de su conocimiento.

## RESUMEN

Los rellenos sanitarios representan la técnica de disposición final de residuos sólidos urbanos más utilizados en el mundo y en Costa Rica, principalmente por su rentabilidad, bajo costos operativos y la posibilidad de un mayor control de los impactos ambientales en comparación con otras tecnologías. En este último aspecto, uno de los más importantes es el control de los lixiviados generados en el área de relleno; a los cuales se les debe tratar física, química y biológicamente con el fin de eliminar los compuestos tóxicos que contienen, pues estos, podrían ocasionar impactos ambientales al contaminar el suelo y, eventualmente, afectar las fuentes de aguas subterráneas o superficiales, alterando su composición y calidad.

En varios rellenos sanitarios del país se utilizan sistemas que no son apropiados para el tratamiento de sus lixiviados. En particular, el Parque Ambiental de Garabito cuenta con un sistema de tratamiento cuyo diseño se basó en una menor producción de desechos y ha colapsado su capacidad volumétrica. Asimismo, las unidades construidas no tienen las dimensiones ni forma para un adecuado tratamiento físico y biológico, presentando también problemas que impiden hidráulicamente un correcto funcionamiento.

Por otra parte, los parámetros de aguas residuales presentan valores que incumplen con la normativa vigente; además, se omiten algunos aspectos de la legislación nacional con respecto al tratamiento de los lixiviados.

Para el cumplimiento de estas regulaciones, el sistema requiere diversas modificaciones y ampliaciones que incluyen pre tratamientos y tratamiento secundario. Esta necesidad motiva la realización del proyecto: “Optimización del tratamiento de los lixiviados generados en el Parque Ambiental Municipalidad de Garabito”. La propuesta pretende, por un lado, mitigar el impacto ocasionado por los lixiviados de este relleno y brindar soluciones científico-tecnológicas a la comunidad de Garabito; y por otro, proveer una herramienta de operación responsable que permita prevenir la contaminación del medio ambiente, así como posibles problemas de salud en el cantón.

De manera específica, el proyecto tiene como objetivo optimizar el tratamiento de los lixiviados generados en el relleno adecuándolo a sus condiciones actuales y a los

métodos de tratamiento más propicios para este tipo de aguas residuales, y a partir de ello, favorecer el cumplimiento de la normativa costarricense en este campo, por medio de la generación de un insumo de alta viabilidad de implementación o guía por parte de la Municipalidad de Garabito.

Se propone una mejora a las estructuras existentes, además de tres alternativas para el tratamiento de esta agua residual. Se plantean tratamientos físicos, químicos y biológicos dada la composición de los lixiviados a través del tiempo. Las alternativas propuestas son: un sistema de destilación solar activa de los lixiviados, estanques (facultativo y aerobio) y un reactor anaerobio de flujo ascendente.

## Índice de Contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| Dedicatoria.....   | 2         |
| Agradecimientos.....   | 4         |
| Resumen.....   | 5         |
| Índice de cuadros.....   | 9         |
| Índice de Figuras.....   | 11        |
| <b>Capítulo 1. Introducción.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.1. El Cantón de Garabito.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.2. Parque Ambiental Municipalidad de Garabito.....</b>                            | <b>15</b> |
| <b>Objetivos.....</b>  | <b>26</b> |
| <b>Objetivo General.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>Objetivos Específicos.....</b>  | <b>26</b> |
| <b>Capítulo 2 Marco Teórico.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.1 Rellenos Sanitarios.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.2 Lixiviados y su impacto ambiental.....</b>                                      | <b>28</b> |
| <b>2.3 Producción de lixiviados.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>2.4 Composición de los lixiviados.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>2.5 Tratamiento de lixiviados.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.6 Tratamiento de lixiviados en algunos rellenos sanitarios de Costa Rica.....</b> | <b>39</b> |
| 2.6.1 Relleno sanitario Los pinos Parque de Tecnología Ambiental Aczarri.....          | 39        |
| 2.6.2 Relleno sanitario Los Mangos.....  | 39        |
| 2.6.3 Relleno sanitario Los pinos.....   | 40        |
| 2.6.4 Relleno sanitario Río Azul.....  | 40        |
| <b>2.7 Tratamiento de lixiviados en diversos rellenos sanitarios.....</b>              | <b>42</b> |
| <b>2.8 Destilación.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>2.9 Evaporación en el tratamiento de lixiviados.....</b>                            | <b>46</b> |
| <b>2.10 Destilación por medio de energía solar.....</b>                                | <b>51</b> |
| <b>2.11 Energía solar utilizada para el tratamiento de aguas residuales.....</b>       | <b>53</b> |
| <b>2.12 Potencial de uso de energía Solar en Costa Rica.....</b>                       | <b>54</b> |
| <b>2.13 Calentadores solares.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>2.14 Disposición de lodos.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Capítulo 3 Metodología.....</b>   | <b>59</b> |
| <b>3.1 Factores Climatológicos.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>3.2 Determinación de caudales.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>3.3 Determinación de la composición de los lixiviados.....</b>                      | <b>61</b> |
| <b>3.4 Control y conducción de lixiviados.....</b>                                     | <b>61</b> |
| 3.4.1 Diseño de conducción de lixiviados.....  | 61        |
| 3.4.2 Diseño del sistema de conducción de pluviales.....                               | 61        |
| <b>3.5 Diseño del tratamiento de lixiviados.....</b>                                   | <b>62</b> |
| 3.6 Destilador solar: Prueba de concepto.....  | 63        |
| <b>3.7 Selección del sistema de tratamiento.....</b>                                   | <b>64</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Capítulo 4 Diseño del sistema de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito .....</b> | <b>66</b>  |
| <b>4.1 Información base requerida .....</b>   | <b>66</b>  |
| 4.1.1 Factores Climatológicos .....   | 66         |
| 4.1.2 Determinación de la producción de lixiviados .....  | 74         |
| 4.1.3 Determinación de la composición de lixiviados .....   | 81         |
| <b>4.2 Alternativas para el tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito 90</b>            |            |
| 4.2.1 Ingreso al sistema .....  | 93         |
| 4.2.2 Pretratamientos propuestos.....   | 93         |
| 4.2.3 Alternativa 1: Sistema de tratamiento por lagunas .....   | 94         |
| 4.2.4 Alternativa 2: reactor anaerobio .....  | 96         |
| 4.2.5 Alternativa 3: Destilación solar activa para el tratamiento de lixiviado.....                           | 100        |
| <b>Capítulo 5 Resultados .....</b>  | <b>105</b> |
| <b>5.1 Sistema de control y conducción de los lixiviados .....</b>  | <b>105</b> |
| 5.1.1 Conducción de los lixiviados.....   | 106        |
| 5.1.2 Conducción de aguas pluviales.....  | 106        |
| <b>5.2 Optimización del tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Garabito .....</b>                 | <b>108</b> |
| 5.2.1 Estructuras actuales .....  | 108        |
| 5.2.2 Disminución de la carga contaminante.....   | 109        |
| 5.2.3 Dimensionamiento para cada operación unitaria.....  | 110        |
| 5.2.4 Destilador solar: Prueba de concepto .....  | 110        |
| 5.2.5 Costos .....  | 117        |
| <b>5.3 Selección del sistema de tratamiento .....</b>   | <b>117</b> |
| <b>5.4 Opciones de reúso del agua residual.....</b>   | <b>119</b> |
| 5.4.1 Recirculación.....  | 120        |
| <b>Capítulo 6 Conclusiones.....</b>   | <b>121</b> |
| <b>Capítulo 7 Recomendaciones.....</b>  | <b>123</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>   | <b>125</b> |
| <b>Anexo 1 División Administrativa del cantón de Garabito .....</b>   | <b>135</b> |
| <b>Anexo 2 Diagrama de Destilador solar activo propuesto.....</b>   | <b>136</b> |
| <b>Anexo 3 Sistemas de tratamientos de lixiviados propuestos.....</b>   | <b>137</b> |
| <b>Anexo 4 Requerimientos adicionales de un sistema de tratamiento de agua residual .....</b>                 | <b>139</b> |
| <b>Anexo 4 Operación y mantenimiento de los sistemas propuestos.....</b>                                      | <b>143</b> |
| <b>Desarenador.....</b>   | <b>143</b> |
| <b>Sedimentador.....</b>  | <b>143</b> |
| <b>Estanques de estabilización .....</b>  | <b>145</b> |
| <b>Reactor anaerobio .....</b>  | <b>148</b> |
| <b>Humedal.....</b>   | <b>154</b> |
| <b>Lecho de secado .....</b>  | <b>156</b> |

## Índice de cuadros

|   |     |
|---|-----|
| Cuadro 1. Composiciones típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios .....  | 31  |
| Cuadro 2. Valores medios (x) y máximos (máx.) de algunos parámetros en la fase de la “fermentación acida” y de la “fermentación metanogénica” .....               | 35  |
| Cuadro 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales y obligatorios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.....                      | 36  |
| Cuadro 4. Límites máximos permisibles para el reúso de aguas residuales.....  | 37  |
| Cuadro 5. Resumen de diversos sistemas de tratamiento de lixiviados .....   | 44  |
| Cuadro 6. Materiales utilizados en la prueba de concepto .....  | 63  |
| Cuadro 7. Criterios para la selección del sistema de tratamiento.....   | 65  |
| Cuadro 8. Precipitación (mm) mensual para la estación Jaco (Lat. 9°35'N Long 84°37'O;3m) .....  | 68  |
| Cuadro 9. Caudales mínimos máximos y promedio determinados para el relleno sanitario de Garabito en el periodo de del 7 de octubre 2011 al 5 noviembre 2011 ..... | 74  |
| Cuadro 10. Caudales obtenidos para la laguna de lixiviados del relleno sanitario en el periodo del 7 de octubre 2011 al 6 de noviembre 2011 .....                 | 75  |
| Cuadro 11. Predicción de la producción de lixiviados mediante el método de balance de agua de Thornwaite .....  | 79  |
| Cuadro 12. Características fisicoquímicas del lixiviado del relleno sanitario de Garabito 2003-2011 .....   | 82  |
| Cuadro 13. Índice de biodegradabilidad para el lixiviado del relleno sanitario de Garabito 2002-20011.....  | 85  |
| Cuadro 14. Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en el agua residual..... | 90  |
| Cuadro 15. Ventajas y desventajas para los tratamientos biológicos y Físico-químicos para el tratamiento de los lixiviados .....                                  | 92  |
| Cuadro 16. Criterios de diseño para un estanque facultativo .....   | 95  |
| Cuadro 17. Criterios de diseño para un estanque aerobio .....   | 96  |
| Cuadro 18. Criterios de diseño para un proceso anaerobio de contacto.....   | 98  |
| Cuadro 19. Criterios de diseño para un humedal .....  | 99  |
| Cuadro 20. Dimensionamiento para el destilador solar activo.....  | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| Cuadro 21 .Parámetros de diseño para canal de conducción de pluviales .....   | 107 |
| Cuadro 22. Disminución de carga contaminante para las alternativas del sistema de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito.....              | 109 |
| Cuadro 23. Dimensiones para los elementos de los sistemas propuestos para el tratamiento de los lixiviados .....  | 110 |
| Cuadro 24. Calidad del lixiviado (L2) antes y después de la prueba de concepto .....  | 116 |
| Cuadro 25. Costos asociados al proyecto de construcción del tratamiento de los Lixiviados del Relleno Sanitario de Garabito .....                                   | 117 |
| Cuadro 26. Valores para los criterios ambientales, operacionales, económicos y técnicos para los tratamientos propuestos para el Relleno Sanitario de Garabito..... | 118 |
| Cuadro 27. Posibles problemas operacionales que se pueden presentar en un sedimentador .....  | 144 |
| Cuadro 28. Posibles problemas operacionales que se presentan en las lagunas.....  | 146 |
| Cuadro 29. Parámetros y frecuencia de muestreo para el control operacional.....   | 151 |
| Cuadro 30. Algunos problemas en la operación de un reactor anaerobio sus posibles causas y soluciones.....  | 152 |
| Cuadro 31. Problemas operacionales presentados para los humedales .....   | 155 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2. Ubicación Relleno Sanitario de Garabito .....  | 16 |
| Figura 1. Quebrada La Mona época lluviosa y época seca .....   | 16 |
| Figura 3 Producción de desechos sólidos en el cantón de Garabito 2007, 2009, 2010 y 2011 .....   | 18 |
| Figura 4 Composición de los desechos sólidos del cantón de Garabito 2007, 2009, 2010 y 2011. ....  | 18 |
| Figura 5. Mapa de los elementos principales del relleno sanitario de Garabito<br>Fuente: Elaboración propia .....  | 20 |
| Figura 7. Tanque de almacenamiento de lixiviados : diferencia en los niveles de lixiviados estación<br>lluviosa y seca .....                               | 23 |
| Figura 11. Factores que afectan la producción de lixiviados en el relleno sanitario de Garabito<br>Fuente: Laura Zumbado<br>Elaborado por Ángela Méndez .. | 30 |
| Figura 12. Balance DQO de la fracción orgánica en un relleno sanitario .....   | 32 |
| Figura 13. Planta de tratamiento de lixiviado PTA Aczarrí. ....  | 39 |
| Figura 18. Destilación flash simple.....   | 45 |
| Figura 19. Patente de un sistema de evaporación en el tratamiento de lixiviados .....  | 50 |
| Figura 25. Precipitación (mm) promedio , mínima y máxima mensual periodo 2000-2011 para la<br>estación Jacó (Lat 9°35'N Long 84°37'O altitud 3m ).....     | 67 |
| Figura 26. Temperatura Promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica Damas,<br>Quepos Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m .....                 | 69 |
| Figura 27. Promedio diario mensual de Brillo Solar(h) para la estación Damas (Lat, 9 ° 29' N Long<br>84 ° 12'O; 6m) .....                                  | 70 |
| Figura 28. Promedio mensual (1983-1999)de radiación para la estación Damas Lat 9 ° 29' N Long<br>84 ° 12'O; 6m .....                                       | 71 |
| Figura 29. Evapotranspiración (mm) promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica<br>Damas, Quepos (Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m).....    | 72 |
| Figura 30. Evaporación Promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica Damas,<br>Quepos Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m .....                 | 72 |
| Figura 31. Promedio mensual (1983-2004) de viento para la estación Damas Lat 9 ° 29' N Long 84<br>° 12'O; 6m ) .....                                       | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 35 Determinación de Temperatura (°C) para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito.....  | 83  |
| Figura 36. Determinación de DBO y DQO (mg/l) para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito.....                                       | 84  |
| Figura 40. Determinación de cobre, zinc, cadmio, fósforo, magnesio, hierro y sodio para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito..... | 88  |
| Figura 41 Determinación de calcio, magnesio y sodio para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito.....                                | 88  |
| Figura 42. Tipos de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito.....   | 92  |
| Figura 43. Configuración de operaciones unitarias alternativas para el sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Garabito..... | 93  |
| Figura 44. Diagrama de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB).....  | 97  |
| Figura 45 Dimensionamiento canal de pluviales .....  | 108 |
| Figura 47 Variación de la temperatura ambiente (°C) durante los días de pruebas .....  | 112 |
| Figura 48 Variación de las temperaturas (°C) en el interior del tanque durante las pruebas .....   | 114 |
| Figura 49 Variación de las temperaturas salida del vapor del tanque .....  | 114 |
| Figura 50 Variación del volumen (ml) del destilado generado en la pruebas .....  | 115 |
| Figura 51 Variación del volumen del destilado generado en la prueba L1 .....   | 115 |
| Figura 52 Sistema de tratamiento por medio de destilación solar activa y modificaciones sedimentador .....   | 137 |
| Figura 53 Sistema de tratamiento por lagunas aerobias, facultativas y modificaciones sedimentador .....  | 138 |
| Figura 54 Sistema de tratamiento por reactor anaerobio, humedal y modificaciones sedimentador .....  | 138 |
| Figura 54. Equipo y materiales básicos para la operación de la planta.....   | 139 |

## **Abreviaturas**

AOP procesos de oxidación avanzada

COT Carbono orgánico total

COV compuestos orgánicos volátiles

COX compuestos orgánicos xenobióticos

DBO Demanda bioquímica de oxígeno

DQO Demanda química de oxígeno

ETC Tubo colector al vacío (Evacuated tube collector)

pH Potencial de hidrógeno

Ton toneladas

SST Sólidos suspendidos totales

TKN Nitrogeno total de kjeldahl

VOA Ácidos orgánicos volátiles

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

### **1.1. El Cantón de Garabito**

A partir de su conformación como distrito de Puntarenas en 1974, se inician en Garabito importantes obras de infraestructura tales como la cañería inaugurada en 1976, la apertura de la carretera Costanera Sur que dio comunicación a un gran sector de la Región Pacífico Central (1978) y el alumbrado eléctrico (1981). Esto propicia el desarrollo de la zona, posibilitando un mayor dinamismo comunal, así como se dio un comienzo importante hacia el desarrollo turístico nacional, principalmente por las condiciones de transporte de la población del Valle Central, en términos de la cercanía y la disponibilidad de buenas vías (Castellón, 2009).

No obstante, fue hasta 1988 que, a partir de este crecimiento, se le otorgó el cantonato y la definición de los límites y distritos de Garabito (Castellón, 2009). El cantón cuenta con los distritos de Tárcoles y Jacó (Anexo 1) y una población de 17 311 habitantes en 10 096 viviendas (INEC, 2011) distribuidas de manera irregular en un área de 316 km<sup>2</sup>.

El cantón de Garabito es joven y ha experimentado un crecimiento exponencial en población, infraestructura, comercio y otros; atribuible al desarrollo turístico de la zona. Según los resultados generales del censo 2000, Garabito, con una población de 10 378 personas, fue el cantón con mayor tasa media anual de crecimiento intercensal (1984- 2000) con un 7.5%. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta, que este cantón posee una elevada población flotante, como turistas y trabajadores estacionales, quienes utilizan los servicios y recursos del cantón.

Por otro lado, la Cámara Costarricense de la Construcción señala que, en el año 2006, Garabito se mantuvo como el segundo cantón con mayor concentración de permisos de construcción con 468.085m<sup>2</sup>.

## 1.2. Parque Ambiental Municipalidad de Garabito

Lo anterior ha ocasionado un incremento en producción y variación en la composición de desechos sólidos generados en el cantón. En el pasado, la disposición final se realizaba en dos vertederos a cielo abierto, los cuales agotaron su vida útil en el año 1994, de acuerdo con los criterios del Ministerio de Salud; por lo tanto, la Municipalidad de Garabito decidió sustituirlos por un método adecuado de disposición final de los desechos (Taylor, 1997).

Así, en 1997 iniciaron los trámites para el financiamiento del proyecto<sup>1</sup> por medio del Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (Taylor, 1997). Durante 1999 se realiza la licitación pública y finalmente en el año 2002 la Municipalidad de Garabito logró la construcción del relleno sanitario para la disposición final de los desechos generados en el cantón.

De esta manera, cumple con el deber del Estado costarricense de garantizar, defender y preservar el derecho de un ambiente sano y ecológicamente equilibrado para todas las personas<sup>2</sup>, además de prevenir y controlar la contaminación para la salud ambiental por medio de la recolección y manejo de desechos (Ley Orgánica del Ambiente, 1995).

Ahora bien, el Parque Ambiental Municipalidad de Garabito, ubicado a 3,5 km del centro del distrito en Pueblo Nuevo de Jacó, paralelo a la Quebrada La Mona frente Urbanización F & M; posee con un área de tres hectáreas (3 Ha) dentro de la propiedad municipal de treinta y nueve hectáreas (39 Ha) (Figura 2.) Tiene en sus alrededores dos nacientes de agua y un cuerpo de agua estacional: Quebrada La Mona (Figura 1.), y se encuentra rodeado de potreros, tacotales y bosque secundario.

---

<sup>1</sup> Compra del terreno y construcción del relleno sanitario

<sup>2</sup> Según lo establece la Constitución Política de Costa Rica.



**Figura 1. Quebrada La Mona época lluviosa y época seca**

Actualmente, este relleno abastece a la población de Garabito en las comunidades de: Camboya, Quebrada Seca, Jacó, Playa azul, Tárcoles, Quebrada Ganado, Herradura, Pochotal, Agujas, INVU, Proyecto Pueblo Nuevo, Villa Caletas, Playa Hermosa, Valle Escondido y Calle Hermosa, entre otras (Ramírez, 2008).



**Figura 2. Ubicación Relleno Sanitario de Garabito**

Es un relleno mecanizado, que poseía una vida útil de 10 años, según estimaciones realizadas por Luis Zumbado, firmante de los planos de actualización del proyecto relleno sanitario para Garabito. Su jornada de operación es de 6 días a la semana, 8 horas por día (lunes-sábado, 7 a.m.-3 p.m.),

La maquinaria con la que cuenta el relleno sanitario es un Bob Cat para esparcir y compactar, una excavadora CAT 320 para la extracción del material de cobertura esparcimiento y compactación (Ramírez, 2008). El personal del relleno sanitario está compuesto por un operador, un administrador, una encargada de la balanza y cobro, cuatro peones y cinco personas encargadas de la recolección.

Este relleno sanitario fue diseñado con estimaciones del año 2000, en el que se inicia el proyecto, cuando se generaban alrededor de 91 ton/semana de desechos sólidos (Municipalidad de Garabito, 2001). Sin embargo, de acuerdo con las estadísticas del relleno del 2011, se reciben en promedio 242.7 ton/semana, el equivalente a 971 ton/mes. Con base en los registros, durante el año 2011 el índice de producción per cápita en promedio de desechos es 1.86 kg/persona/día. Pero alcanzó valores de hasta 2.5 kg/persona/día y un valor mínimo de 1.58 kg/persona/día, lo cual, se considera elevado según Jaramillo (2002)

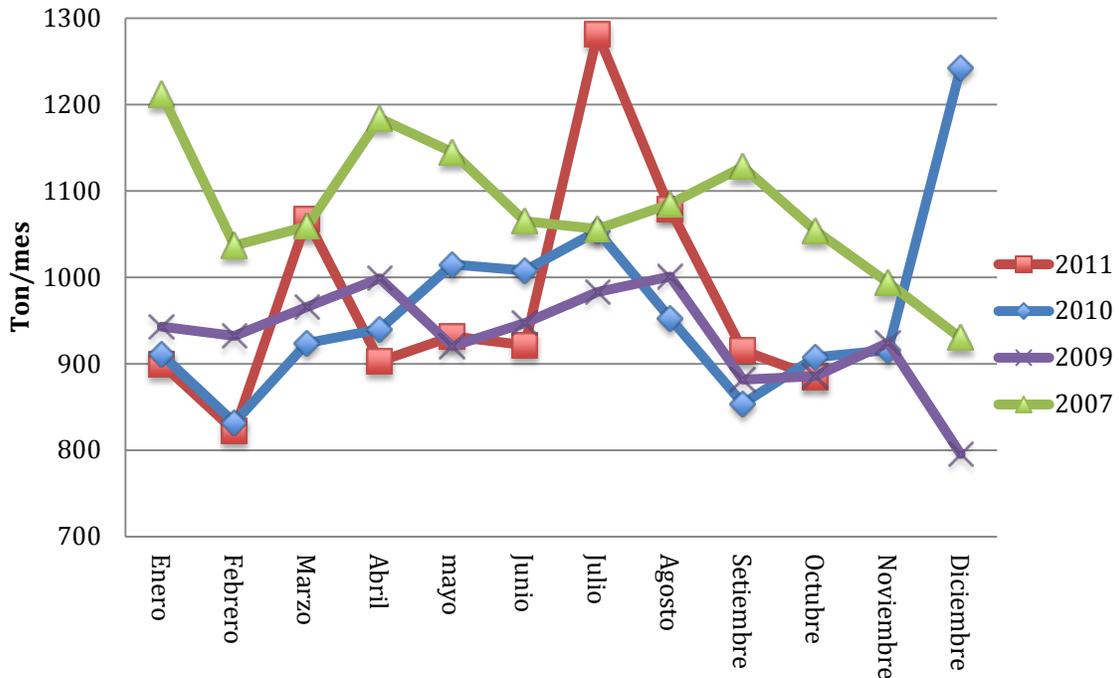
La cantidad de desechos producidos varían de acuerdo con la temporada turística (alta o baja), dado que los desechos provienen principalmente del comercio y recintos de alojamiento transitorio (hoteles, cabinas, casas de veraneo), en los que la cantidad de personas varía drásticamente en los meses de máxima ocupación (temporada alta) y los de ocupación mínima (temporada baja)<sup>3</sup>.

El relleno sanitario tiene un total de 47 307 ton de desechos en su terreno desde el 2007, compuesto de un 65% de desechos domésticos, 20% desechos vegetales y 15% escombros (Figura 4). Esta clasificación corresponde a la separación del tipo de desechos que se hace al ingresar cualquier vehículo al relleno, y de acuerdo con esto se disponen en un área específica del sitio. Estos desechos son recolectados por la municipalidad de Garabito o ingresan al relleno en transporte de particulares.

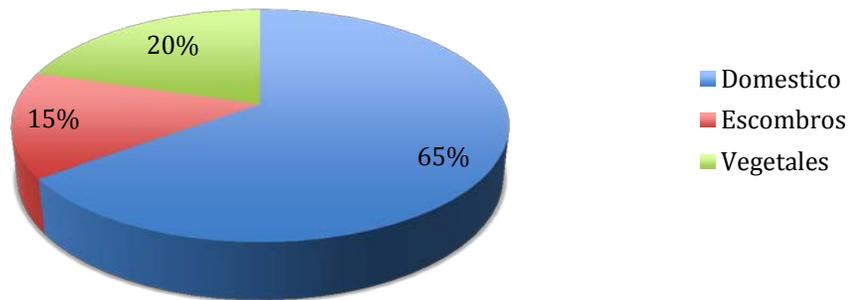
A continuación se presenta la variación y composición de los desechos sólidos generados en el cantón. Es importante resaltar que estos datos fueron obtenidos de las estadísticas del relleno, donde se pesan por medio de una balanza, con una capacidad de 60 ton, que opera desde el año 2007. Como se mencionó anteriormente, la producción de desechos de Garabito es muy variable de un mes a otro (Figura 3), debido principalmente a su dependencia en la cantidad de personas productoras de desechos que a su vez obedece a la época del año.

---

<sup>3</sup> Además del aporte regular de los desechos de las viviendas y las instituciones (escuelas, AyA, ICE etc.) del cantón



**Figura 3 Producción de desechos sólidos en el cantón de Garabito 2007, 2009, 2010 y 2011**  
**Fuente: Registros del relleno sanitario de Garabito**



**Figura 4 Composición de los desechos sólidos del cantón de Garabito 2007, 2009, 2010 y 2011**  
**Fuente: Registros del relleno sanitario de Garabito**

Las celdas están diseñadas para optimizar al máximo el volumen y los taludes formados, y así garantizar la estabilidad del terreno contra deslizamientos. Cada celda, en su diseño original, cuenta con chimeneas para la evacuación de los gases generados por los desechos, así como con tuberías para la recolección de los lixiviados. Sin embargo, algunas obras de infraestructura son requeridas, como canales para la conducción adecuada de las aguas pluviales, obras que no se han podido materializar en el área del relleno a pesar de ser indispensables en la época lluviosa.

En el sitio, también se ubican el almacenamiento de lixiviados, pozo de monitoreo, centro de acopio, estación de lavado de vehículos, balanza, oficinas administrativas, bodega y comedor; distribuidos como se muestra en la Figura 5. Mapa de los elementos principales del relleno sanitario de Garabito

Dado que el objetivo del relleno sanitario es controlar, disponer y dar un tratamiento adecuado a los desechos sólidos, uno de los aspectos más importantes es el manejo de los lixiviados generados, por lo cual se debe de verificar la calidad de los lixiviados producidos, y el adecuado tratamiento, mediante la revisión de parámetros fisicoquímicos y biológicos.

Con respecto a éstos, la legislación costarricense dicta que el relleno sanitario debe contar con un tratamiento para los lixiviados, específicamente en su artículo 10c, como parte de la memoria de diseño del relleno, y en el artículo 10b, donde se requieren los planos constructivos del sistema de recolección y tratamiento de los mismos.

Adicionalmente, la Ley Orgánica del Ambiente, en su artículo 65, establece que las aguas residuales de cualquier origen deberán ser tratadas antes de ser descargadas en ríos, además deben de alcanzar la calidad establecida para el cuerpo receptor, según su uso actual y potencial utilización en otras actividades futuras.

De acuerdo a la ley para la gestión integral de residuos 8839, en su artículo 45, la selección, construcción, operación y cierre técnico de las instalaciones de disposición final de residuos deberá realizarse de forma que se prevenga la contaminación de suelos, subsuelos, el agua, aire y ecosistemas

Con este objetivo el Reglamento de rellenos sanitarios, artículo 14, obliga a construir instalaciones para captar, tratar o recircular sobre el relleno los líquidos lixiviados. En los lineamientos establecidos en el decreto 33601; reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, se establecen los límites de vertido y reúso de aguas residuales específicamente para rellenos sanitarios. En este reglamento, en su artículo 61, se prohíbe la dilución de efluentes con aguas de otro tipo con el fin de alterar la concentración de los contaminantes.

# Ubicación de elementos encontrados en el Relleno Sanitario de Garabito

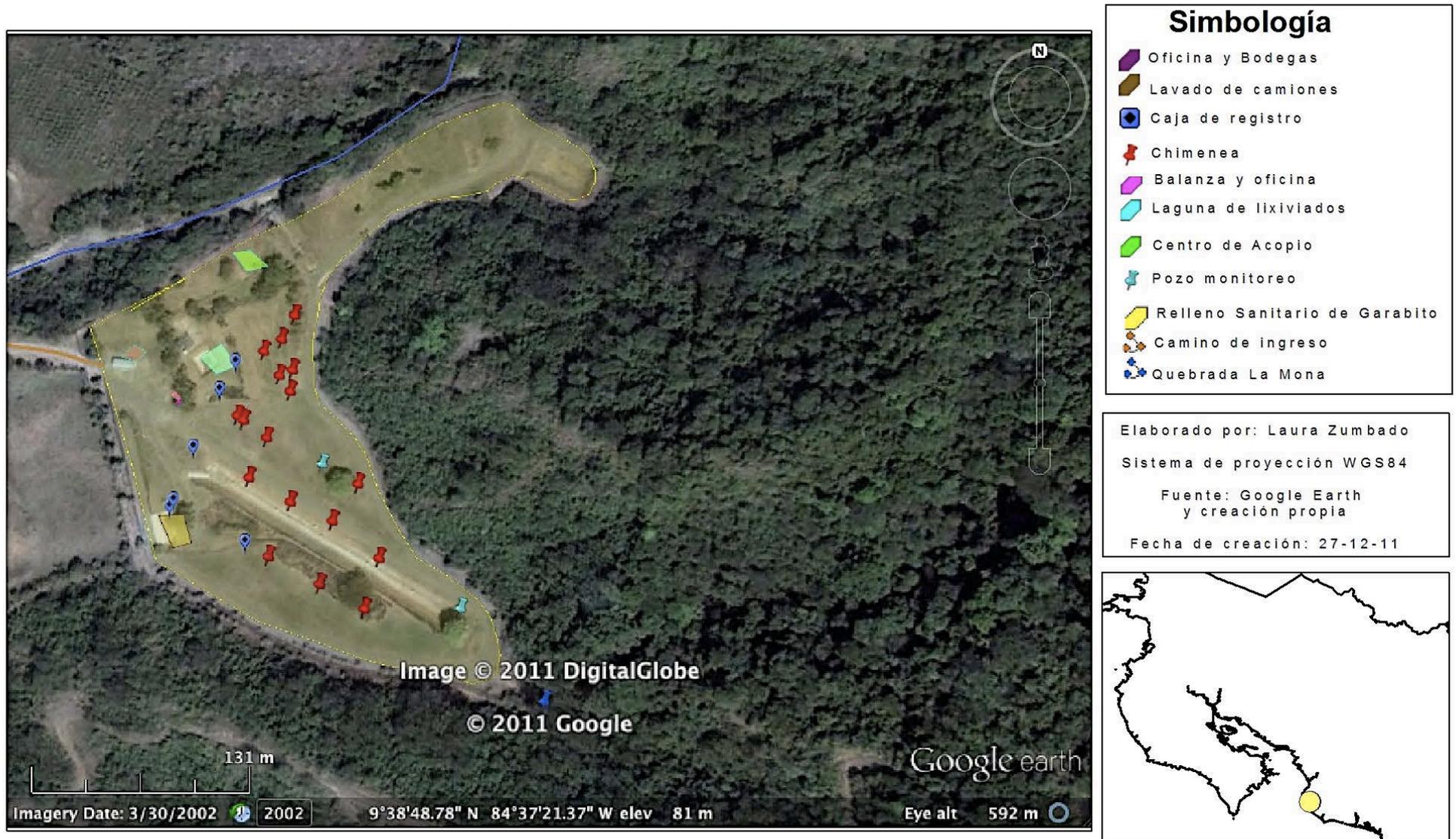


Figura 5. Mapa de los elementos principales del relleno sanitario de Garabito

Fuente: Elaboración propia

Por estas razones la municipalidad de Garabito estipuló, en su cartel licitatorio para el cumplimiento del vertido de líquidos, un método adecuado para los lixiviados en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento actual de los lixiviados (Figura 6 y 7) en el relleno sanitario del Parque Ambiental Municipalidad de Garabito consiste de: un tanque de almacenamiento<sup>4</sup>, y tres tanques<sup>5</sup> que en su diseño original contemplaban las funciones de: tanque de estabilización, filtro biológico y tanque de evaporación. Estos tienen un volumen total de 48 m<sup>3</sup> y un área de 24 m<sup>2</sup>.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestra el sistema de tratamiento original, que funcionaba enviando el lixiviado proveniente del relleno al tanque de almacenamiento, luego bombeado al tanque de estabilización y, posteriormente, al filtro biológico y tanque de evaporación para ser recirculados al tanque de almacenamiento.

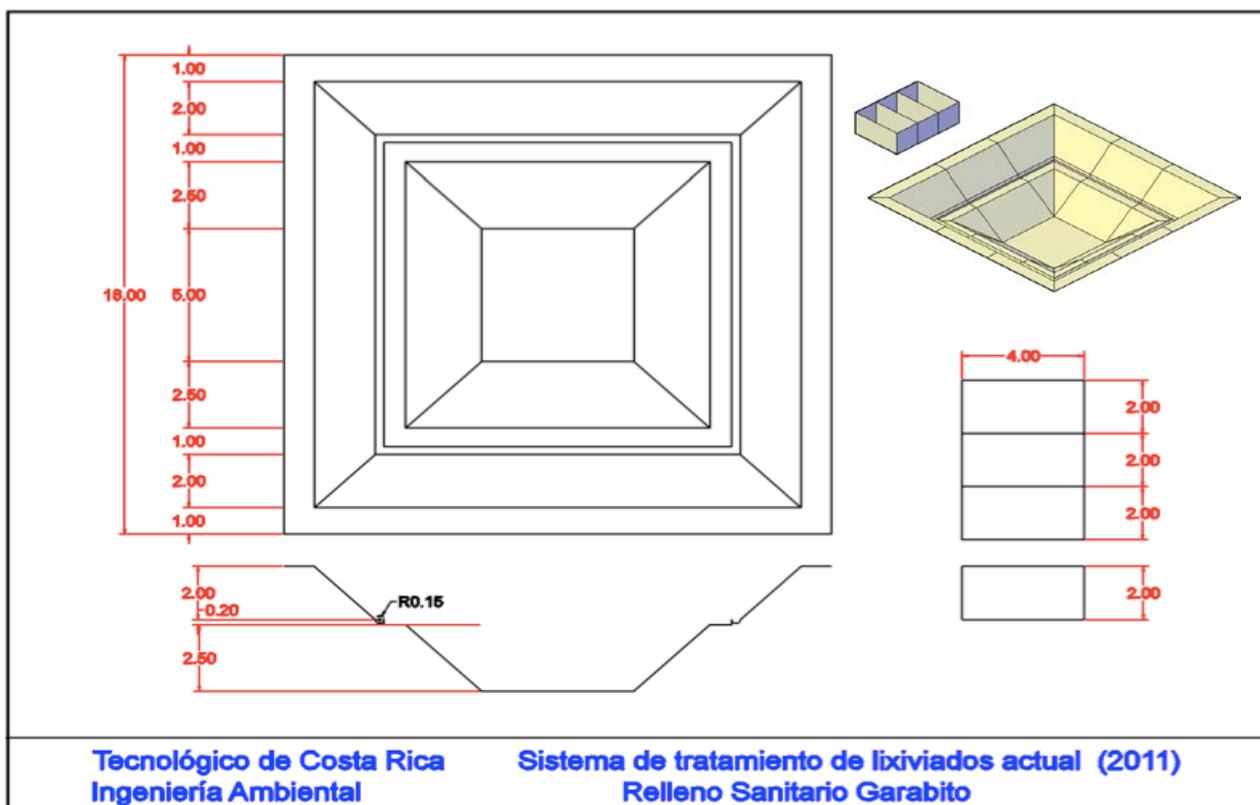


Figura 6. Diagrama del sistema de tratamiento de lixiviados existente (2011) en el Relleno Sanitario de Garabito  
Fuente Rafael Chinchilla Elaboración propia

<sup>4</sup> Tanque en forma de pirámide truncada de 16 m de largo, 16 m de ancho, y 4.5 m de alto, con un área aproximada de 177.23 m<sup>2</sup> y un volumen de 429.59 m<sup>3</sup>

<sup>5</sup> De 6 metros de largo, 4 metros de ancho y 2 metros de alto

Como se puede apreciar, diversos aspectos constructivos y de diseño impiden un funcionamiento básico del sistema actual de tratamiento, como lo son:

1. Los lixiviados son recolectados de cada celda del relleno sanitario por gravedad. Llegan a la caja de registro de aproximadamente 2 metros de profundidad e ingresan a la pileta. En esta, la única entrada de lixiviados se encuentra aproximadamente a 1.5 m de la base, por lo que al aumentar el nivel de los lixiviados en la capacidad total de la pileta, por hidráulica, la caja de registro y las tuberías de conducción se saturan del lixiviado.

Debido a esto el sistema poseía una bomba que funcionaba por boya donde al recibir el 50% de su volumen era bombeado a un canal natural de excedencias, con el fin de evitar reboses del tanque de almacenamiento o la saturación de las tuberías de conducción.

2. Sumado a estos problemas, el aumento de los desechos sólidos ocasiona un incremento en la producción de lixiviados que según don Gerardo Robles, operador del relleno, es de 0.042 l/s ; una producción mayor a la calculada para el diseño.

Como consecuencia, durante la operación, cuando la producción de lixiviados es alta y los tanques no tienen la capacidad de almacenamiento (Figura 7); el líquido es bombeado, del tanque de almacenamiento a los tres tanques adicionales. Estos tanques son iguales ya que el material filtrante fue removido por problemas operacionales, por lo que realmente se comporta como un solo tanque de almacenamiento.

De esta manera al no poseer más capacidad , el lixiviado es recirculado a la celda 3 del relleno sanitario.

3. La pileta actual no posee las dimensiones, estructuras, ni la forma requerida para realizar un tratamiento físico o biológico apropiado.
4. El sistema de bombeo, ya sea por boya o por otro tipo de bomba, ocasiona turbulencias, succión de lodo y bombeo de toda la columna de agua sin importar su estratificación vertical. Esto inhibe por completo el ecosistema formado por los microorganismos para la eliminación biológica de los contaminantes, la especialización de los microorganismos, así como la sedimentación de sólidos.

5. La conducción inadecuada de las aguas pluviales ocasiona una alta producción de lixiviados y dilución de estos en la época lluviosa



**Figura 7. Tanque de almacenamiento de lixiviados : diferencia en los niveles de lixiviados estación lluviosa y seca**

La producción elevada de lixiviados es dependiente de diversos factores, algunos de estos no controlables (ver 2.3 y 4.1), siendo uno de los principales la precipitación, que puede ser una variable controlada por medio de sistemas de conducción de las aguas pluviales. En el relleno sanitario de Garabito existen tramos cortos, en los que se dirigen las aguas pluviales, pero como se puede observar en la Figura 8 hay diversas secciones del sitio donde no se realiza una conducción.



**Figura 8. Sitios para la implementación de sistemas de conducción de aguas pluviales**

Como se explicó anteriormente, se realiza la recirculación del líquido en la celda 3, una práctica operativa aceptada (ver 5.4.1), pero de acuerdo al artículo 13r del reglamento de rellenos sanitarios es solo permitida durante la estación seca.

Esta condición genera un ingreso adicional de agua al sistema, aumentando la humedad en la celda y suelo, así como la infiltración, percolación y escorrentía (Figura 11). Como consecuencia, se generan acumulaciones de agua en el sitio (Figura 9.), generando malos olores por la falta de oxígeno, proliferación de bacterias anaeróbicas y formación de algas. Uno de los impactos derivados de esta acumulación de agua es la inconveniente alimentación de aves y otras especies de estos líquidos.



**Figura 9. Agua estancada producto de la recirculación de lixiviados**

A partir de lo explicado anteriormente, se deduce también la importancia de una correcta planificación del control y transporte de estos líquidos, así como, en primera instancia, la necesidad de un sistema que realice el tratamiento de los lixiviados generados.

En ese sentido, se requiere más que un tratamiento físico para eliminar la peligrosidad de estas emisiones al medio y realizar una adecuada disposición final. Además, se debe cumplir con el Reglamento de rellenos sanitarios, a fin de obtener una operación adecuada, conforme al Decreto 33601 Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, Ley Orgánica del Ambiente y Ley 8839 Gestión integral de residuos sólidos.

Un sistema de tratamiento de lixiviados adecuado eliminará o disminuirá el impacto ambiental, cuya peligrosidad podría afectar la salud de los operadores y recolectores in situ, contaminar fuentes de agua superficial y subterránea localizadas en el terreno sanitario, además de una posible contaminación de suelos.

La cantidad de lixiviado producido en un relleno sanitario es un dato indispensable, para determinar las dimensiones de los sistemas seleccionados para su tratamiento. En el relleno sanitario de Garabito, a pesar de que existe una laguna de lixiviados como sistema de tratamiento actual, no se conoce un caudal de entrada. Además se deben de conocer los factores que afectan su producción para definir el control requerido.

Por otra parte, las características físicas y químicas del lixiviado son necesarias para la determinación de la toxicidad de éste en la salud humana y en el ambiente. Los lixiviados, al ser una mezcla compleja de químicos orgánicos e inorgánicos, requieren determinaciones precisas de composición para un adecuado control de la contaminación y manejo de emisiones.

Es importante tomar en cuenta que, en el relleno sanitario de Garabito, se cuenta con sistemas de recolección de lixiviados para las celdas de residuos ordinarios. Sin embargo, los residuos vegetales (madera, podas, ramas), escombros (cemento, block, arenas) y chatarra (zinc, electrodomésticos) no son dispuestos en estas celdas (Figura 10). Esto se traduce en una posible diferencia de composiciones en comparación con los lixiviados de otros rellenos sanitarios.



**Figura 10.** Área de disposición de desechos escombros y vegetales

## OBJETIVOS

### **Objetivo General**

- Optimizar el sistema de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de Garabito, adecuándolo a sus condiciones actuales y a los métodos de tratamiento más propicios para este tipo de aguas residuales

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar, cuantitativa y cualitativamente, los lixiviados generados en el relleno sanitario.
- Diseñar el sistema de control y conducción de los lixiviados.
- Diseñar el tratamiento para la depuración de los lixiviados y disposición final.

## CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO

### **2.1 Rellenos Sanitarios**

La contaminación ocasionada por un relleno sanitario puede tener varias fuentes de origen: la primaria comprende el efecto inmediato del lanzamiento de desechos al ambiente, y la secundaria remite al producto de la interacción de los desechos con otros elementos del medio ambiente (Barrow, 1999).

En la contaminación primaria, los desechos pueden contener químicos orgánicos e inorgánicos, característicos de la comunidad contribuyente, tanto residencial como industrial, de los cuales, algunos pueden ser desechos peligrosos: solventes para limpieza, pinturas, thinner, aceites, pesticidas, drogas, entre otros, en cantidades variables (Nemerow, 2009). Tales compuestos pueden ocasionar una descarga directa de gases con efectos diversos, los cuales incluyen contaminación de efecto invernadero, malos olores, reacciones potenciales peligrosas -como incendios o explosiones- y problemas para la salud de las personas (Ávila, 2008).

La contaminación secundaria se produce porque los desechos vertidos interactúan con la humedad, otros contaminantes, luz solar o diversos elementos ambientales. Dicha contaminación puede ser local, regional o global, y sus efectos pueden ser directos, indirectos, acumulativos, intermitentes o constantes, inmediatos o retrasados; por lo cual afectan la atmósfera, suelo, océanos, cuerpos de agua superficial, agua subterránea o a organismos, productos o localidades. Los efectos de la contaminación pueden ser de largo o corto plazo; presentar un peligro o amenaza; ser tóxico o no tóxico y puede tomar forma química, biológica, radiación, calor, luz, ruido, polvo u olores (Barrow, 1999).

## **2.2 Lixiviados y su impacto ambiental**

En primera instancia, los lixiviados constituyen agua residual producto de la descomposición de los desechos orgánicos y disolución de desechos inorgánicos (Poder Ejecutivo de Costa Rica, 2008). Usualmente, se producen de la contaminación secundaria; este líquido pasa a través, o bien, emerge del desecho sólido y contiene materiales solubles, suspendidos o miscibles, removidos del desecho. El diseño de la cobertura y revestimientos del relleno sanitario procura minimizar o eliminar tanto la infiltración del lixiviado a las capas del suelo localizadas debajo del área rellena, como la contaminación potencial del agua subterránea y superficial (Nemerow, 2009). Al mismo tiempo, intenta reducir los riesgos hacia la salud humana y la agricultura (Ávila, 2008).

En el caso del Parque Ambiental Municipalidad de Garabito, existen 2 fuentes de agua, subterránea y superficial: el Río Las Monas. La mejor solución para este problema potencial, ocasionado por los lixiviados, se enfoca en prevenir su generación, pues no puede ser evitada completamente, sobre todo en la etapa de operación (Nemerow, 2009). Por tanto, conviene diseñar revestimientos, sistemas de recolección de lixiviados, coberturas finales, sistemas de escorrentía y cualquier otro componente en la construcción y operación, necesarios para la protección de la salud humana y el ambiente (Electronic code of federal regulations, 1991).

## **2.3 Producción de lixiviados**

La producción de lixiviados en los rellenos sanitarios se ve afectada por varios factores (Figura 11) como lo son: la compactación, el recubrimiento de los desechos, el tipo de suelo, la topografía del sitio que genera patrones de escurrimiento, infiltración, percolación, la humedad que contienen los residuos, la cantidad de residuos, la capacidad del campo del relleno, grado de compactación de los desechos (Méndez, 2004) y los factores climatológicos (precipitación, evaporación, evapotranspiración, brillo solar, viento, temperatura).

Es primordial explicar que el lixiviado se produce cuando, por diversas fuentes, la humedad entra en los desechos del relleno sanitario y extrae los contaminantes en la fase líquida hasta iniciar un flujo continuo. Las fuentes de humedad capaces de ingresar al área

de relleno pueden ser: el líquido presente en los desechos colocados, la precipitación que cae sobre la basura, la infiltración después de la aplicación de la cubierta, la introducción de las aguas subterráneas al interior del área rellena (Farquhar, 1988) y procesos bioquímicos (Jürgen, 1992).

Por otro lado, se puede aproximar la producción de lixiviados dependiendo de la técnica de operación y la precipitación (Jürgen, 1992). Sin embargo, un balance de agua para el relleno sanitario debería ser establecido como base para el diseño del control de los lixiviados y para la escorrentía óptima del agua superficial. Para esto, se debe tomar en consideración las fuertes precipitaciones, el relleno sanitario, construcción base, escorrentía adicional, infiltración y evapotranspiración (Nemerow, 2009). Para el comportamiento y modelación de los lixiviados, los resultados registrados durante una campaña anual de muestreo se comparan con los del modelado, empleando el balance hídrico propuesto por Thornwaite y Mather (Ávila, 2008), en el cual se basó Schroeder para desarrollar HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance) de la EPA.

Teóricamente los lixiviados suponen un 3% de las precipitación según Ehrig (1992), aunque también se puede estimar una producción entre 5 y 7.5 m<sup>3</sup>/Ha para una zona con precipitación media anual de 750 mm<sup>6</sup>. También se puede utilizar como punto de referencia 0.48 l/s de un relleno sanitario en Habana, 2 - 45 l/s en un país de clima mediterráneo como Grecia (Espinosa, 2010).

## **2.4 Composición de los lixiviados**

La composición del lixiviado es dependiente de diversas variables como lo son: el tipo de residuos en el sitio de disposición, la técnica de relleno sanitario utilizado, la degradabilidad y etapa de degradación de los residuos, el clima (Maximova, 2006) etapa del relleno, nutrientes, pH, temperatura, permeabilidad del suelo, vegetación, residuos líquidos y lodos (Al- Mefleh, 2003), área de relleno y oxígeno disponible (Reinhart, 1998).

---

<sup>6</sup> Para Jacó la precipitación media anual para el periodo 2005 - 2011 fue de 300 mm

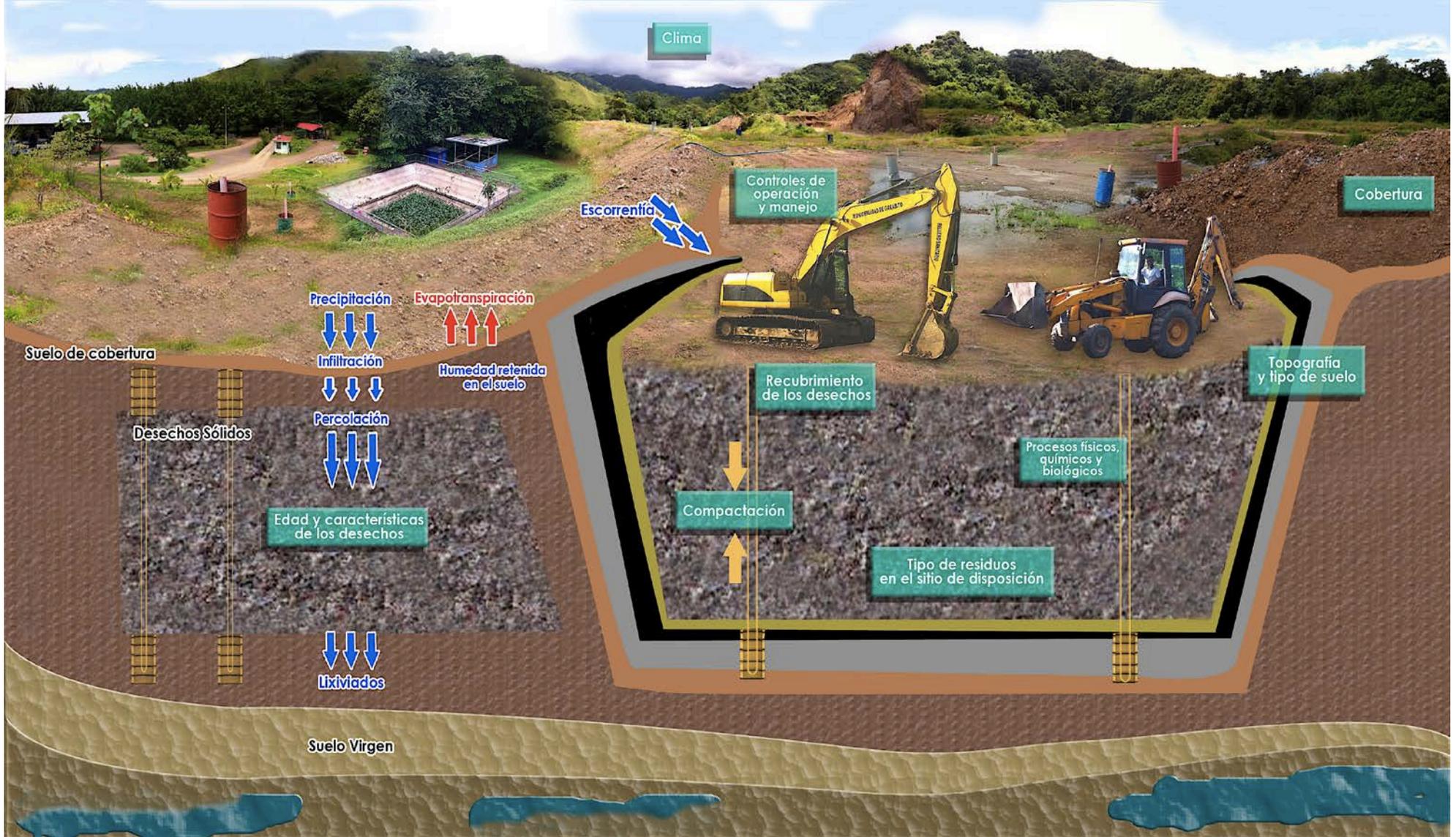


Figura 11. Factores que afectan la producción de lixiviados en el relleno sanitario de Garabito

Fuente: Laura Zumbado

Elaborado por Ángela Méndez

Todos estos factores provocan una concentración de compuestos muy variable cualitativa y cuantitativamente en el tiempo, por ende, el sistema de tratamiento de estos debe ser flexible para soportar las diversas cargas de los contaminantes en el lixiviado. Los contaminantes en el lixiviado de los residuos sólidos municipales según Kjeldsen (2002) pueden ser dividido en cuatro grupos:

- Materia orgánica disuelta: cuantificada como DBO, DQO, carbono orgánica total, ácidos grasos volátiles, compuestos húmicos y fúlvicos
- Macrocomponentes inorgánicos: calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, hierro, manganeso, cloro, sulfato.
- Metales pesados: cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel and zinc.
- Compuestos xenobióticos orgánicos: generados por el menaje de la casa o químicos de las industria (generalmente menos de 1 mg/l). Estos incluyen una variedad de compuestos como hidrocarburos aromáticos, fenoles, alifáticos clorados, pesticidas y plaguicidas.

Esta mezcla de compuestos genera un efluente de biodegradabilidad variable. Generalmente las composiciones de los lixiviados son representadas por parámetros básicos como lo son DQO, DBO, DBO/DQO, pH, sólidos suspendidos, nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N), Nitrógeno total y metales pesados (Renou, 2008).

**Cuadro 1. Composiciones típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios**

| Etapa<br>Parámetro         | Relleno sanitario nuevo<br>< 2 años <sup>2</sup> | Relleno sanitario maduro<br>> 10 años <sup>2</sup> |
|----------------------------|--|--|
| DBO (mg/l)                 | 2000-30000 <sup>1</sup>                          | 100-200 <sup>2</sup>                               |
| DQO (mg/l)                 | 3000-45000 <sup>1</sup> 60000 <sup>2</sup>       | 100-500 <sup>2</sup>                               |
| Sólidos suspendidos (mg/l) | 1500-20000 <sup>1</sup> 200-2000 <sup>2</sup>    | 100-400 <sup>2</sup>                               |
| Nitrógeno orgánico (mg/l)  | 10-600 <sup>1</sup> 5-40 <sup>2</sup>            | 10-10 <sup>2</sup>                                 |
| Nitrógeno amoniacal (mg/l) | 10-800 <sup>1</sup>                              |  |
| Fósforo (mg/l)             | 1-70 <sup>1</sup> 4-80 <sup>2</sup>              | 4-8 <sup>2</sup>                                   |
| pH                         | 5.3-8.5 <sup>1</sup> 4.5-7.5 <sup>2</sup>        | 6.5-7-5 <sup>2</sup>                               |
| Calcio (mg/l)              | 200-3000 <sup>1</sup> 200-3000 <sup>2</sup>      | 100-400 <sup>2</sup>                               |
| Magnesio (mg/l)            | 50-1500 <sup>1</sup> 50-1500 <sup>2</sup>        | 50-200 <sup>2</sup>                                |
| Potasio (mg/l)             | 200-2000 <sup>1</sup> 200-1000 <sup>2</sup>      | 50-400 <sup>2</sup>                                |
| Sodio (mg/l)               | 200-2000 <sup>1</sup> 200- 2500 <sup>2</sup>     | 100-200 <sup>2</sup>                               |
| Cloro (mg/l)               | 100-3000 <sup>1</sup> 200-3000 <sup>2</sup>      | 100-400 <sup>2</sup>                               |
| Sulfatos (mg/l)            | 100-1500 <sup>1</sup> 50-1000 <sup>2</sup>       | 20-50 <sup>2</sup>                                 |
| Hierro (mg/l)              | 50-600 <sup>1</sup> 50-1200 <sup>2</sup>         | 20-200 <sup>2</sup>                                |

<sup>1</sup> Corbitt <sup>2</sup> Tchobanoglous, 2002

En el Cuadro 1. Composiciones típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios se puede observar que las concentraciones de dicho componente se dividen por años de operación del relleno, esto se debe a que una de las variables más utilizadas para caracterizar el lixiviado es la etapa del relleno.

En cada etapa, de acuerdo a la cantidad de oxígeno libre se favorece o no una descomposición anaeróbica (Figura 12.) o aeróbica que refleja la actividad física, química y biológica en el sitio.

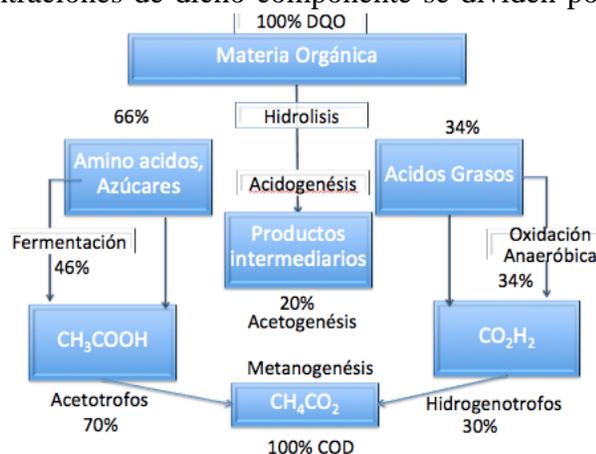


Figura 12. Balance DQO de la fracción orgánica en un relleno sanitario

Conforme Renou (2008) los rellenos sanitarios jóvenes contienen altas cantidades de materia biodegradable orgánica (95%), dando a lugar una fermentación anaeróbica que genera como productos principales ácidos grasos volátiles.

La fermentación ácida se ve optimizada por altos contenidos de humedad y agua en los desechos sólidos. De manera opuesta los rellenos sanitarios maduros presentan un desarrollo de la fase metanogénica, en la que los ácidos grasos volátiles son convertidos a biogás ( $\text{CH}_4\text{CO}_2$ ).

Es por esto que la carga orgánica presenta gran importancia para determinar la calidad de los lixiviados. La razón DBO/DQO refleja el grado de degradación de los lixiviados en el relleno y los procesos bioquímicos que se están dando en determinado momento. Este indicador muestra la porción de materia orgánica degradable y la cantidad total de materia orgánica (Reinhart,1998). Los lixiviados de rellenos jóvenes poseen elevadas concentraciones de materia orgánica e índices de biodegradabilidad (DBO/DQO) superiores a 0.4, en los que se da la fermentación ácida, que se traduce en una descomposición bioquímica en forma fácil (Ehrig, 1992), mientras que en los rellenos viejos este índice es inferior a 0.02. Para los lixiviados jóvenes estos valores hacen posible un tratamiento eficiente por procesos biológicos, pero en los viejos no son eficientes (Mendez,2002).

Además de la fase metanogénica y la formación de ácido, se han establecido etapas de acuerdo al tipo de procesos biológicos, químicos y físicos que tienen lugar en el relleno. Se clasificaron en cinco etapas descritas por Reinhart y Grosh (1998) como la fase de ajuste inicial, fase de transición, formación de ácido, fermentación de metano y maduración, las cuales detalladas a continuación:

**Fase 1 Ajuste Inicial :** Esta asociada a la acumulación inicial de humedad y colocación de desechos en el área del relleno. Se puede observar un período de aclimatación de los microorganismos hasta que poseen la suficiente humedad para desarrollarse y mantener una comunidad microbiana activa. Durante la primera etapa de descomposición, los microorganismos aeróbicos degradan la materia orgánica a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y residuos orgánicos parcialmente degradados, produciendo calor en una cantidad considerable.

**Fase 2 Transición:** En la etapa de transición la capacidad del campo se excede y se da la transformación de un ambiente aeróbico a uno anaeróbico; se evidencia la disminución del oxígeno atrapado en el área de relleno; se establece una reducción de condiciones de acuerdo con el intercambio de receptores de electrones del oxígeno en nitratos y sulfatos, así como el desplazamiento del oxígeno por dióxido de carbono. Al final de esta fase se pueden detectar concentraciones de DQO (480-1800 mg/L) y VOA (100-3000 mg/L) en el lixiviado.

**Fase 3 Formación de ácido:** En esta fase se da la producción de ácidos volátiles orgánicos, hidrógeno,  $\text{CO}_2$  y amoníaco en altas concentraciones. Estos son producto de la hidrólisis continua y de la conversión microbiológica de la materia orgánica biodegradable. La biodegradación anaerobia en la fase ácida se lleva a cabo por microorganismos estrictamente anaerobios o facultativos, que cooperan con la degradación de materiales y disminuye el potencial redox para que las bacterias metanogénicas puedan desarrollarse. Normalmente se puede observar un descenso en los valores de pH acompañada con la movilización de especies metálicas, produciendo un lixiviado agresivo. Este contiene las máximas concentraciones de DBO (1000- 57700 mg/l)

**Fase 4 Fermentación de Metano:** La transición de la fase formación de ácido a la fase de formación de metano ocurre durante en los primeros 4-10 años de operación del relleno.

Durante esta etapa los ácidos intermedios son consumidos por consorcios formadores de metano que los convierten a metano y dióxido de carbono. Si se reducen las condiciones correspondientes a esta fase, se afecta la solubilidad de los compuestos inorgánicos, resultando en la precipitación y disolución de éstos.

Fase 5 Maduración: En la etapa de estabilización, la actividad biológica se ve restringida debido a los nutrientes y los sustratos disponibles que se vuelven factores limitantes. La producción de gas cae dramáticamente y la concentración de componentes es baja manteniéndose constante. El oxígeno y las especies oxidantes pueden reaparecer, sin embargo, la degradación de las fracciones orgánicas resistentes puede continuar con la producción de sustancias húmicas.

De acuerdo con esto Ehrig (1992) menciona que las sustancias inorgánicas no muestran modificaciones al cambiar las fases de degradación y, por el contrario, muestra márgenes de variación normalmente grandes. En el caso de algunos parámetros se observa un aumento ligero al aumentar la edad del relleno, lo cual puede explicarse en virtud de mejores condiciones de solubilidad como consecuencia del material sometido a degradación bioquímica. Podría presentarse una disminución de los cationes de calcio, magnesio, hierro y manganeso en la fase metanogénica, por su incremento en el pH, también las concentraciones de sulfato son menores debido a la reducción de sulfato a sulfuro (Kjeldensen et al, 2002)

Los metales pesados son liberados de acuerdo a las características del lixiviado, tales como pH, caudal y concentración de los agentes formadores de complejos (Reinhart, 1998). La solubilidad de los metales decrece conforme aumenta el pH y se influye indirectamente por concentración del ión hidronio. Este último participa en los procesos de disociación del ácido al producir un anión precipitante y las reacciones de oxidación-reducción. Con el tiempo, sustancias similares a las húmicas de medio o alto peso molecular se forman a partir de la materia orgánica en un proceso similar al de la humidificación del suelo. Estas sustancias tienden a formar complejos de metales pesados, tendiendo a incrementar la solubilidad de los metales (Reinhart,1998).

**Cuadro 2. Valores medios (x) y máximos (máx.) de algunos parámetros en la fase de la “fermentación ácida” y de la “fermentación metanogénica” (en paréntesis valores de diferentes rellenos)**

| Parámetro (unidad) | Fermentación ácida                  |           | Fermentación metanogénica          |             |
|--------------------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------|-------------|
|                    | x                                   | máx.      | x                                  | máx.        |
| pH ( - )           | 6.1 <sup>1,2</sup>                  | 5.51      | 8 <sup>1,2</sup>                   | 8.5         |
| <b>DBO5/DQO</b>    | 0.58 <sup>1,2</sup>                 |           | 0.06 <sup>1,2</sup>                |             |
| <b>DQO (mg/l)</b>  | 22000 <sup>1,2</sup>                | 38100     | 3000 <sup>1,2</sup>                | 4340        |
| <b>DBO5 (mg/l)</b> | 13000 <sup>1,2</sup>                | 30425     | 180 <sup>1,2</sup>                 | 383         |
| <b>Fe (mg/l)</b>   | 925 <sup>1</sup> 780 <sup>2</sup>   | 2120      | 15 <sup>1,2</sup>                  | 29.3 (282)  |
| <b>Ca (mg/l)</b>   | 1300 <sup>1</sup> 1200 <sup>2</sup> | 2480      | 80 <sup>1</sup> 60 <sup>2</sup>    | 575         |
| <b>Mg (mg/l)</b>   | 600 <sup>1</sup> 470 <sup>2</sup>   | 1130      | 250 <sup>1</sup> 180 <sup>2</sup>  | 534         |
| <b>Mn (mg/l)</b>   | 24 <sup>1</sup> 25 <sup>2</sup>     | 65.5      | 0.65 <sup>1</sup> 0.7 <sup>2</sup> | 1.73 (43.5) |
| <b>Zn (mg/l)</b>   | 5.6 <sup>1</sup> 5 <sup>2</sup>     | 68.4(113) | 0.64 <sup>1</sup> 0.6 <sup>2</sup> | 3.78        |
| <b>Sr (mg/l)</b>   | 7.2 <sup>1,2</sup>                  | 14.7      | 0.94 <sup>1,2</sup>                | 7.25        |
| <b>SO4 (mg/l)</b>  | -500 <sup>2</sup>                   | 1745      | 80 <sup>2</sup>                    | 884         |

Fuente: <sup>1</sup>Ehrig 2002, <sup>2</sup>Mendez 2004

Como se observó en el Cuadro 2 la etapa del relleno es determinante en la composición del efluente. Y esta composición es esencial para determinar el tipo de disposición final del lixiviado. La cual debe de cumplir con la normativa costarricense correspondiente.

Se especifica en el Decreto N 27378-S Reglamento de Rellenos Sanitarios, artículo 13r, que la recirculación de lixiviados se puede dar solo en estación seca. Además en su artículo 10, dicta para los sistemas de tratamiento de lixiviados los requerimientos de su manual de operación y mantenimiento según la regulación respectiva. En su artículo 14, menciona que el reporte operacional de la planta de tratamiento de lixiviados deberá ser presentado conforme al Decreto 33601 – MINAE-S Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales. En este último decreto se establecen los límites máximos permisibles para el reúso de aguas residuales y para su vertido en cuerpos receptores.

También es importante considerar otros reglamentos como el 40CRF445, para el tratado de lixiviados y sustancias no peligrosas antes de su descarga en aguas superficiales establecido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)

**Cuadro 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales y obligatorios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor**

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Decreto 33601</b> | <b>40CFR445</b> |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------|
| <b>T (°C)</b>                        | 15-40                |                 |
| <b>pH</b>                            | 5-9                  | 6-9             |
| <b>DQO (mg/L)</b>                    | 150                  |                 |
| <b>DBO<sub>5,20</sub> (mg/L)</b>     | 50                   | 40              |
| <b>Grasas y aceites</b>              | 30                   |                 |
| <b>Sólidos sedimentables ( ml/l)</b> | 1                    |                 |
| <b>Sólidos suspendidos totales</b>   | 50                   | 27              |
| <b>Mercurio (mg/l)</b>               | 0.01                 |                 |
| <b>Aluminio (mg/l)</b>               | 5                    |                 |
| <b>Arsénico (mg/l)</b>               | 0.1                  |                 |
| <b>Bario (mg/l)</b>                  | 5                    |                 |
| <b>Boro (mg/l)</b>                   | 3                    |                 |
| <b>Cadmio (mg/l)</b>                 | 0.1                  |                 |
| <b>Cloro residual (mg/l)</b>         | 1                    |                 |
| <b>Color</b>                         | 15%                  |                 |
| <b>Cromo (mg/l)</b>                  | 1.5                  | 0.46            |
| <b>Cianuro total (mg/l)</b>          | 1                    |                 |
| <b>Cianuro libre (mg/l)</b>          | 0.1                  |                 |
| <b>Cobre (mg/l)</b>                  | 0.5                  |                 |
| <b>Plomo (mg/l)</b>                  | 0.5                  |                 |
| <b>Fosfatos (mg/l)</b>               | 25                   |                 |
| <b>Nitrógeno total (mg/l)</b>        | 50                   | 4.9             |
| <b>Níquel (mg/l)</b>                 | 1                    |                 |
| <b>Zinc (mg/l)</b>                   | 5                    | 0.11            |

El relleno sanitario de Garabito cuenta con agua residual especial según el Decreto 33601. Esta agua residual, según el artículo 32, deberá cumplir con las características fisicoquímicas establecidas para el vertido en cuerpo receptor, ya sea parámetro universal, seleccionado por actividad o por parámetro obligatorio complementario.

La determinación de las opciones para la disposición del efluente del tratamiento de lixiviados, alrededor de su reúso, según este reglamento podría ser de los tipos 1, 2, 7 y 8, correspondientes a:

Tipo 1 Reúso Urbano: Riego de zonas en donde haya acceso del público (zonas verdes, parques, plazas y cementerios), lavado de automóviles, inodoros, combate de incendios y otros usos con similar acceso o exposición al agua

Tipo 2 Riego con acceso restringido: Cultivo de césped, silvicultura y otras áreas donde el acceso del público es prohibido o restringido

Tipo 7 Reúso paisajístico: Aprovechamiento estético donde el contacto con el público no es permitido y dicha prohibición esté claramente rotulada

Tipo 8 Reúso en la construcción: Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

Los parámetros que se deben alcanzar de acuerdo al tipo de reúso se presenta en el Cuadro 4, en este el factor multiplicador se refiere al factor por el que se deben multiplicar DBO, DQO y SST del Cuadro 3 para tener un límite en estos parámetros.

**Cuadro 4. Límites máximos permisibles para el reúso de aguas residuales**

| Parámetro                                  | 1.Urbano | 2.Riego acceso restringido | 7.Paisajístico | 8.Reúso construcción |
|--|----------|----------------------------|----------------|----------------------|
| <b>Coliformes Fecales (CF) (NMP/100L)</b>  | 1000     | 10000                      |                | 1000                 |
| <b>Nematodos Intestinales (NI) huevo/L</b> | 1        | 1                          | 1              | 1                    |
| <b>Factor multiplicador (DBO DQO SST)</b>  | 1        | 1.2                        | 2              | 1                    |

Fuente: Decreto 33601

## 2.5 Tratamiento de lixiviados

En cuanto al tratamiento, se debe ajustar a las cantidades y composiciones de lixiviados producidos durante las etapas del relleno, para ello el sistema requiere flexibilidad. La composición de los lixiviados depende del tipo de desechos confinados, nivel de degradación de los residuos y el volumen producido (Méndez, 2004). De esa forma, existen diversos tipos de tratamiento convencionales de lixiviados y se pueden clasificar en tres grandes grupos.

Estos son: a) la transferencia del lixiviado: reciclaje y tratamiento combinado con aguas residuales domésticas, b) biodegradación: procesos aeróbicos y anaeróbicos, c) métodos químicos y físicos: oxidación química, adsorción química, precipitación, coagulación/floculación, sedimentación/flotación y separación por aire (Renou, 2008).

Entre el tercer tipo de tratamientos se encuentran los métodos químicos y físicos, en donde la oxidación es una alternativa que pueden ser utilizada para el tratamiento de agua residual, incluye el oxígeno, ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio, cloruros y dióxido de cloro, que hacen los desechos más biodegradables y más fácil de remover por adsorción. Esta oxidación puede mejorar controlando el pH y también a través de la catálisis. (Cheremisinoff, 2002)

El tratamiento de lixiviados, a pesar de estar regulado por la legislación costarricense, no se practica en todos los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos.

Como ejemplo del manejo municipal de los residuos sólidos se presentan tres casos: vertederos o botaderos de Zagala, Pérez Zeledón y Santo Domingo. Para el caso de Santo Domingo, la municipalidad del sitio desea programar cierre técnico, conforme a la legislación vigente y mejorando la emanación de gases, lixiviados, cobertura final entre otros. El vertedero Zagala ha operado alrededor de 30 años y recibe aproximadamente 180 a 200 ton/día, cuyo manejo también es municipal y tampoco cuenta con tratamiento de lixiviados, captación de gas metano ni impermeabilización de ningún tipo. Otro caso en el que los lixiviados tampoco reciben tratamiento alguno es el vertedero municipal de Pérez Zeledón, que recibe 100 ton/día de residuos (Janssen, 2010).

Por otro lado se presenta el caso de los rellenos sanitarios de Río Azul en su etapa de cierre técnico, Los Mangos, La Carpio y Aczarrí, en los que se presentan diversos tipos de tratamientos para estos líquidos así como su respectivos análisis fisicoquímicos y reportes operacionales.

## 2.6 Tratamiento de lixiviados en algunos rellenos sanitarios de Costa Rica

### 2.6.1 Relleno sanitario Los pinos Parque de Tecnología Ambiental Aczarrí.

El PTA Aczarrí se inaugura en el 2007 en El Huazo, Aserrí, San José, con el objetivo de brindar el servicio de tratamiento de los residuos a cantones del área metropolitana. Cuenta con un área de 40 hectáreas y recibe aproximadamente 700 ton/día de desechos.



Figura 13. Planta de tratamiento de lixiviado PTA Aczarrí.

El tratamiento que se le da a los lixiviados es físico: sedimentación y aireación, en una laguna. Esta laguna recibe 80 m<sup>3</sup>/día y tiene un tiempo de retención de 4 días. El tratamiento que reciben los lixiviados consiste básicamente en darles la suficiente aireación para lograr altos niveles de oxígeno disuelto. (Campos et al, 2010)

### 2.6.2 Relleno sanitario Los Mangos

Ubicado en Barrio San José, de la provincia de Alajuela, recibe 550 ton/día de 15 municipalidades, posee una vida útil de 4 años. De acuerdo con la descripción del sistema propuesto por la empresa Estadounidense Waterlink, para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario los Mangos, dicho sistema de tratamiento consta de rejillas de limpieza automática, tanque de estabilización de pH, tanque de compensación, reactor anaeróbico, lodos activados, sedimentador secundario, biodigestión de lodos y filtro prensa (Salas,1999).



Figura 14. Planta de tratamiento de lixiviados relleno sanitario Los Mangos 1999

### **2.6.3 Relleno sanitario Los pinos**

El relleno sanitario Los Pinos, en el distrito Dulce Nombre, Cantón Cartago de la Provincia de Cartago, tiene una extensión de 14 Ha, es un ejemplo de aplicación de técnicas de reconversión de un botadero, sometido a una serie de medidas correctivas de mitigación ambiental hasta convertirlo en lo que es hoy, un relleno técnicamente tratado. Actualmente recibe 300 ton/día y atiende a los cantones: Central de Cartago, El Guarco, Oreamuno y Paraíso (Salas et al , 2010).

El lixiviado es trasladado por una tubería de PVC o ABSL a la planta de tratamiento de lixiviados donde se le da un tratamiento fisicoquímico, esta planta posee un tratamiento anaeróbico y el lixiviado es clorificado. Los valores de DBO entrante en los lixiviados son muy altos y rondan valores entre 6000 y 8000 mg/l, mediante el tratamiento su efluente disminuye a 1000 mg/l aproximadamente según lo menciona el Ingeniero a cargo Juan Diego Vargas (Salas et al, 2010).

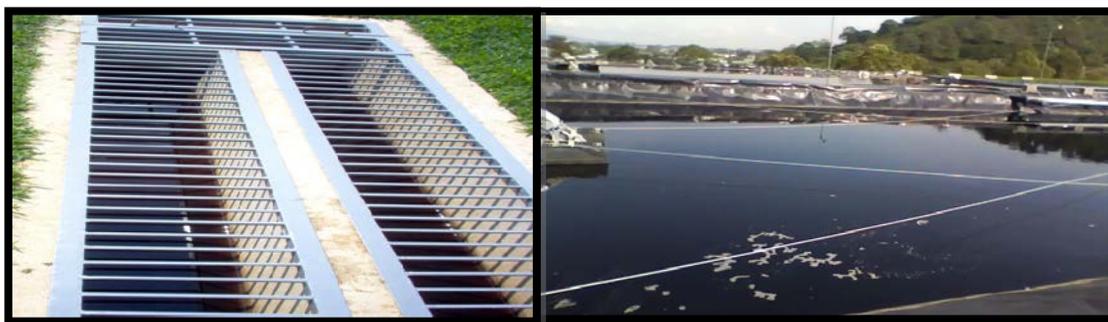
### **2.6.4 Relleno sanitario Río Azul**

Este relleno esta ubicado en el área metropolitana, al sureste de la ciudad de San José, en el Distrito de Río Azul, Cantón de La Unión. Posee un área de 47 Ha y durante su última etapa 2000 - 2007 recibía 2000 ton/día de desechos.

Actualmente lo maneja la empresa WPP Continental de Costa Rica S.A. (Araya et al 2010), se encuentra en la etapa de cierre técnico y produce desde 17 m<sup>3</sup>/día de lixiviados, en época secas, hasta 80 m<sup>3</sup>/día, durante la estación lluviosa. El sistema consiste en: desarenador, laguna de compensación (Tiempo de retención de 25 días) en la que se mantiene un caudal constante para las operaciones posteriores. De la etapa anterior, se bombea 25 m<sup>3</sup>/día a una sección de pre tratamiento químico de coagulación y floculación, la cual consta de varios tanques para regulación del pH con HCl además de la adición de antiespumantes, se mezcla con los agentes coagulantes (policloruros de hierro y aluminio) y almacenamiento temporal.

Finalmente se da un proceso de sedimentación donde se envían los lodos a 10 lechos de secado, los cuales encuentran repartidos igualmente en forma paralela, cuenta con terreno impermeabilizando por medio de geomembrana, compuestos por un piso falso de arena y piedra cuarta, los cuales dirigen el filtrado a una tubería central y a una caja de registro que recircula por bombeo la corriente de agua al tratamiento primario.

Se llena un lecho de secado por día, donde permanece de 4 a 7 días, dependiendo de las condiciones meteorológicas. El producto seco se envía al relleno de Los Pinos o los Mangos, debido a su contenido importante de metales pesados. El agua de salida de los sedimentadores se dirige a dos lagunas en serie como parte de un tratamiento de pulido (Campos et al, 2010).



**Figura 15. Desarenador y Laguna de tratamiento de Relleno Sanitario Río Azul**



**Figura 16. Dispensador de coagulante y lecho de secado**

## 2.7 Tratamiento de lixiviados en diversos rellenos sanitarios

A partir de los tipos de tratamiento y operaciones unitarias detalladas en 4.2, los rellenos sanitarios han desarrollado una metodología para la prevención de la contaminación de su lixiviado. Para comprender su funcionamiento, se seleccionaron rellenos sanitarios latinoamericanos para analizar el tipo de tecnología que se utiliza.

El área, cantidad de desechos, población y la composición no fueron variables consideradas para este análisis de tratamientos dadas las características del relleno sanitario de Garabito.

Sin embargo, estos rellenos sanitarios latinoamericanos comparten la similitud de la composición de desechos por ejemplo porcentaje de materia orgánica, y demás materiales. Principalmente, por los patrones de consumo de estos países que difieren a los encontrados en los rellenos sanitarios estadounidenses, europeos y otros. Se presentan algunos de estos rellenos y su tratamiento de lixiviados a continuación:

En Cuba, Pellón (2009) presentan, de acuerdo a las composiciones fisicoquímicas de tres vertederos cubanos (Vertedero de calle 100, vertedero de Guanabacoa y 8 vías), una alternativa para el tratamiento de 42 m<sup>3</sup>/día de lixiviados . Este sistema esta compuesto de un tanque séptico, un filtro anaerobio, una laguna facultativa y una laguna de maduración.

En Chile, el centro de manejo y disposición final de residuos sólidos Chiloé de la Municipalidad de Castro, posee un área de 99 Ha y atiende a más de 5000 habitantes. La producción de lixiviados tiene un caudal máximo de 300 m<sup>3</sup>/día y una composición de DQO de 10000 mg/l y DBO 5000 mg/l. El tratamiento de los lixiviados esta compuesto de los siguientes procesos: eculización, decantador, lodos activados, filtración por arena, filtración por carbón activado y tratamiento de lodos (concentrador y deshidratador). (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, s.f)

En Colombia, según Noguera y Olivero (2010), el tratamiento inadecuado de los lixiviados en algunos de los rellenos sanitarios es un escenario común. Así para el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo de Cundinamarca, Bogotá de un área de 472 ha, que recibe

alrededor de 5891 ton/día, se presenta la problemática de una producción de lixiviados superiores a la capacidad de la planta de tratamiento (Noguera,2010).

En una nueva etapa de área 17 Ha, el sistema de tratamiento de lixiviados para una producción de 110m<sup>3</sup>/día consiste en pretratamiento regulador de pH por medio de ácido sulfúrico, antiespumante, filtración sobre sílex (nanofiltración) y posteriormente atraviesa el proceso de osmosis inversa con desgasificación (El País, 2011)

El relleno sanitario Doña Juana, en Colombia, inició operaciones en 1988 y el tratamiento de lixiviados ha dependido de la zona que se desarrolló; así hubo zonas sin tratamiento alguno, otras con recirculación y posteriormente se construyó una planta de tratamiento (Mendez et al, 2010). Esta tiene una capacidad hidráulica de 8 - 13.9 l/s para una producción de 12.9 y 16 l/s en promedio de lixiviados.

Sin embargo, se ha dado un excedente de caudal de 23-35 l/s que ha requerido la implementación de lagunas de almacenamiento seguido de un estanque aerobico (SCS engineers, 2007). Su pretratamiento es biológico e incluye oxigenación de lixiviados (El País, 2011) y cuenta con tratamientos físicos químicos para lograr un promedio de remoción de materia orgánica de 10500 kg/día (SCS engineers, 2007).

Se presenta un resumen de las opciones utilizadas para el tratamiento de los lixiviados de los rellenos mencionados anteriormente, en este se muestra su ubicación (país) y tipo de tratamiento que se le da a los lixiviados.



**Figura 17. Sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana**

**Cuadro 5. Resumen de diversos sistemas de tratamiento de lixiviados**

| País                           | Costa Rica                                       |  |                                    |   | Cuba   | Chile   | Colombia                                 |                                     |
|--------------------------------|--|--|------------------------------------|---|--|---|--|-------------------------------------|
| <b>Relleno</b>                 | <b>Relleno sanitario Los Mangos</b>              | <b>Relleno Sanitario Río Azul</b>                    | <b>Relleno Sanitario Los Pinos</b> | <b>Parque Tecnológico Ambiental Aczarrí</b> | <b>Vertedero Guanabacoa, 8 Vías, Calle 100</b> | <b>Centro de manejo y disposición final residuos Chiloé</b> | <b>Relleno sanitario Nuevo Mondoñedo</b> | <b>Relleno Sanitario Doña Juana</b> |
| <b>Tratamiento primario</b>    | Rejas, estabilización pH, tanque de compensación | Desarenador  | Lagunas anerobias                  | Laguna Aireada                              | Tanque séptico                                 | Estanque ecualización, Decantador                           | Tanque ecualizador                       | Lagunas de almacenamiento           |
| <b>Tratamiento secundario</b>  | Reactor anaerobio                                | Laguna estabilización                                | Floculación Coagulación            |   | Filtro anaerobio                               | Lodos Activos   | Filtración sobre silex (nanofiltración)  | Estanque aerobico                   |
| <b>Tratamiento terciario</b>   | Lodos activados                                  | Coagulación, Flotación con adición de antiespumantes | Desinfección                       |   | Laguna facultativa                             | Filtación por arena,  | Osmosis inversa                          | Tratamiento Quimico                 |
| <b>Tratamiento cuaternario</b> | Sedimentador                                     | Sedimentación<br>Lagunas aerobias                    |                                    |   | Laguna maduración                              | filtración por carbón activado                              |  |                                     |
| <b>Tratamiento de lodos</b>    | Biodigestión y Filtro prensa                     | Lechos de secado                                     |                                    |   |  | Concentrador y deshidratador                                |  |                                     |

## 2.8 Destilación

La destilación separa o fracciona especies químicas diferentes, aprovechando que las composiciones de las fases líquida y vapor coexistentes son generalmente diferentes (Doherty,2001)

La separación flash en dos etapas es la más simple de las separaciones por etapas continuas en equilibrio. Una corriente de una sola fase gaseosa es enfriada para producir una mezcla de dos fases (Figura 18), que es conducida a un recipiente donde las fases son separadas. El vapor y el líquido (productos generados) son retirados continuamente del recipiente ya que se encuentran en equilibrio. Este proceso, puede suceder alternativamente, cuando el líquido se somete a calor y/o reducción de la presión para producir un alimento de dos etapas de la cámara de expansión (Doherty,2001).

Uno de los problemas típicos es calcular la composición ( $X_f$ ), caudal ( $F$ ) de cada producto del flujo, temperatura ( $T$ ) y la presión ( $P$ ). El balance de materiales está dado por la siguiente ecuación:

$$FX_f = Vy_i + Lx_i \quad i = 1, 2, \dots, c$$

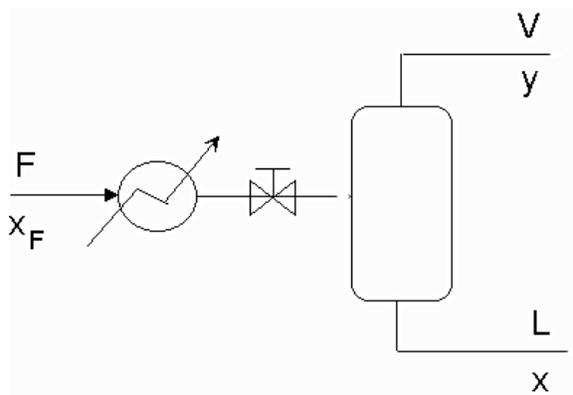


Figura 18. Destilación flash simple

Los costos de destilación están determinados principalmente por el tamaño de la columna de evaporación, el equipo de intercambio de calor (capital de inversión), así como de la energía consumida (costos operacionales).

## 2.9 Evaporación en el tratamiento de lixiviados

Por sus características, la evaporación es una operación utilizada en numerosas aplicaciones industriales. En particular, el tratamiento de lixiviados por evaporación presenta la ventaja de ser un sistema en el que se emplean menos operaciones unitarias al compararla con sistemas de tratamiento convencional. La evaporación permite la separación de elementos volátiles de los no volátiles, la concentración de sólidos y metales en un pequeño volumen después de su evaporación.

A pesar de que existen diversos tipos de evaporadores para el tratamiento de los lixiviados, es necesario continuar con demostraciones para su total aceptación en el campo de la ingeniería y por parte de las autoridades reguladoras. El proceso de evaporación puede tratar compuestos contaminantes inorgánicos y orgánicos en el lixiviado en un solo paso (Rehman, 2003). Es importante resaltar que se debe evaluar la factibilidad del sistema en un estudio caso por caso, ya que los contaminantes meta por eliminar y la transformación de los COV's no sigue un patrón (Rehman, 2003). La separación de los sólidos es la operación que presenta más dificultad de evaluar ya que solo se puede determinar basándose en las bases de experiencias anteriores (Organics, 2011)

El principio de la evaporación de los lixiviados es sencillo y directo: se utiliza el gas recolectado y se utiliza como fuente de energía para evaporar el H<sub>2</sub>O y la combustión de los compuestos orgánicos en el lixiviado. Estos sistemas concentran y precipitan metales, principalmente como sales y lleva los compuestos orgánicos a la oxidación térmica (Roe,1998)

Los compuestos orgánicos son transferidos de la fase líquida a la fase gaseosa dependiendo de sus presiones de vapor y concentración. El intercambio de masa a presiones de vapor bajas promueve una migración a las fase gaseosa. Esta transferencia de masa se ve mejorada por el tiempo de retención del líquido en la zona de evaporación (minutos u horas) y la masa de líquido es elevada. (Roe,1998)

Existen diversos métodos para la evaporación del lixiviado, la mayoría de estos patentados (Figura 19) y difieren únicamente en el tipo de transferencia de calor al lixiviado y como el vapor liberado es tratado. Algunos se detallan a continuación:

En el Sistema Technair el gas generado en el relleno sanitario es introducido continuamente por un quemador al lixiviado como burbujas finas por debajo de la superficie y se da una transferencia de calor por contacto directo entre el líquido y el gas caliente. El lixiviado se mantiene entre 82 - 87 °C con un caudal de entrada de 37.85 m<sup>3</sup>/día.

La energía requerida para evaporar un metro cúbico de lixiviado es 2674 MJ/m<sup>3</sup>, pero al asumir pérdidas de calor en el evaporador de 15%, y que la temperatura es de 82 - 87°C, la energía requerida es de 3140 MJ/m<sup>3</sup> de lixiviado. A partir de estos datos se estima que la cantidad de gas requerido para evaporar un metro cúbico es de 55 MJ/m<sup>3</sup>. Además, se espera una reducción mínima de 25 - 35 % de los sólidos totales en efluente de lixiviado, generando una gran reducción del volumen (Roe,1998).

Otro sistema de evaporación de lixiviado requiere una temperatura superior a 100 °C generada por agua o vapor a altas temperaturas. El sistema consiste en dos evaporadores de cuatro etapas de diseño idéntico con una bomba de recirculación, el intercambio de calor se da por lecho fluidizo también utilizado para prevenir depósitos o formaciones en las superficies generados por el calor. Los caudales son de 10-2000 m<sup>3</sup>/día y se requiere aproximadamente de 2000 MJ/m<sup>3</sup> de lixiviado evaporado. Además, requiere un pretratamiento de filtración para las partículas mayores a 2 mm de diámetro. El área requerida para la instalación de este tipo de equipo para el tratamiento de 20 m<sup>3</sup>/día es de 25 m<sup>2</sup>. (Organics Group, 2011)

Para el caso del relleno sanitario de Orchard Hill en Michigan, USA en el que se instaló el primer sistema de evaporación de lixiviados en septiembre de 1992 se utilizó como pretratamiento el ajuste del pH y la precipitación de metales pesados. Actualmente este relleno evapora un promedio de 22712 l/día de lixiviado y se requiere aproximadamente una hora por día para operar el evaporador.

Por estas razones Rehman (2003) considera que los evaporadores no deben de ser laminares o de ebullición ya que estos sistemas utilizan tubos metálicos o placas para la transferencia de calor , en los que se podrían depositar contaminantes en la superficie metálica

Di palma (2002) a nivel de laboratorio, realizó destilaciones de lixiviados con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de contaminantes y eliminar las posibles obstrucciones en el proceso de osmosis inversa. Para esto utilizó un evaporador vertical rotatorio (10 rpm) a una temperatura de 40 °C con presiones de 400 y 20 mmHg.

La destilación alcanzó, para los compuestos recuperados en el destilado, porcentajes de remoción superiores a un 97% en DQO, COT, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub> y sin presencia de metales. Se generó un volumen de destilado mayor con el paso del tiempo y se demostró que la evaporación es una etapa recomendada para disminuir significativamente los niveles de amonio y materia orgánica en la disolución previo a la aplicación de osmosis inversa.

Diversos estudios de evaporación de lixiviados muestran eficiencias de remoción de 92%, 86% y 98% de DQO, 98,5% y 98% amoniacal y conductividad sin reportes de la concentración de COV's.

Rehman (2003) estudió el comportamiento de SST, DQO, Cl, metales (B,Ba), compuestos volátiles del nitrógeno (TKN,NH<sub>3</sub>), compuestos no iónicos volátiles (tolueno y m/p-xileno). Estos fueron seleccionados ya que los sólidos suspendidos y disueltos pueden afectar el pretratamiento y los horarios de limpieza, el Cl , los metales pesados y el pH pueden crear corrosión y los compuestos orgánicos volátiles pueden afectar las emisiones al aire.

Los resultados de este estudio mostraron un incremento de evaporado con una elevación de la temperatura. También una disminución de la cantidad de sólidos suspendidos totales, en el concentrado, con el aumento de la temperatura. El autor (Rehman, 2003) explica que esto se debe posiblemente a que los sólidos suspendidos tenían una alta fracción de sólidos volátiles, a la adherencia de estos sólidos a la superficie del evaporador o depositarse en el fondo de éste y algunas de las partículas finas que se pueden

haber evaporado. Por último, algunos sólidos se pueden haber descompuesto u solubilizado.

Finalmente, se muestra en este estudio que la energía requerida para evaporar 1 litro de agua a 20°C es 2600 KJ. Los contaminantes presentes en el lixiviado fueron concentrados en el 10% de volumen restante producto de la evaporación, alrededor de un 60% - 70% de la masa total de los compuestos no volátiles como el Boro y Cloro se encontraron en el concentrado. Estos porcentajes disminuyeron conforme aumentó la temperatura. Los compuestos volátiles probados: tolueno y m-p-xileno fueron eliminados completamente de la fase gaseosa.

La fracción de DQO en el concentrado disminuyó con el incremento de la temperatura en la columna de evaporación. De manera contraria, con un aumento del pH inicial, el DQO aumentó en el concentrado. El TKN que estaba compuesto en un 80% por amoníaco, se eliminó casi por completo, se encontró solo un 1% en el concentrado. Éste fue volatilizado con un aumento de la temperatura de la columna de la evaporación.

Las principales ventajas de este sistema son la reducción del volumen del lixiviado, no hay malos olores, poca área de construcción, disposición de lodos, costos de operación bajos, fácil de operar y mantener.

Durante la evaporación, los contaminantes en el lixiviado crudo fueron concentrados en el lodo o perdidos en el vapor saturado. El autor recomienda investigaciones adicionales para evaluar la composición del vapor de salida.

# United States Patent [19]

Duesel, Jr.

US005342482A

[11] Patent Number: **5,342,482**

[45] Date of Patent: **Aug. 30, 1994**

- [54] LEACHATE EVAPORATION SYSTEM  
 [76] Inventor: **Bernard F. Duesel, Jr., R.D. #3 Box 289, Goshen, N.Y. 10924**  
 [21] Appl. No.: **898,921**  
 [22] Filed: **Jun. 12, 1992**  
 [51] Int. Cl.<sup>3</sup> ..... **B01D 1/14**  
 [52] U.S. Cl. .... **159/DIG. 2; 159/29; 159/46; 159/47.3; 202/234; 203/100; 210/170; 405/129**  
 [58] Field of Search ..... **159/16.2, 29, 905, 16.1, 159/46, 47.3; 210/170; 405/128, 129; 203/100; 202/234**

- 5,024,770 6/1991 Boyd et al. .  
 5,032,230 7/1991 Shepherd ..... 159/905  
 5,139,365 8/1992 Chesser ..... 405/129  
 5,188,041 2/1993 Noland et al. .... 405/128

Primary Examiner—Wilbur Bascomb, Jr.  
 Attorney, Agent, or Firm—Brumbaugh, Graves, Donohoe & Raymond

[57] **ABSTRACT**

In the representative leachate treatment system disclosed in the specification, leachate is supplied to a submerged combustion gas evaporator having a downwardly-directed central burner supplying combustion gases through a downcomer to a combustion gas distributor in an evaporation zone. A conical baffle beneath the gas distributor separates the evaporation zone from a quiescent settling zone in a conical bottom of the distributor from which leachate concentrate and sludge are removed. The leachate supplied to the evaporator is preheated by exhaust gases from the evaporator and combustion air supplied to the burner is preheated by leachate concentrate and sludge removed from the evaporator. Landfill gases may be used to fuel the burner and the sludge may be further concentrated and liquid from the concentrator returned to the evaporator.

[56] **References Cited**  
**U.S. PATENT DOCUMENTS**  
 2,756,035 7/1956 Axelrad et al. .... 210/170  
 2,764,234 9/1956 Rash ..... 159/16.2  
 3,215,189 11/1965 Bauer ..... 159/16.2  
 3,449,247 6/1969 Bauer ..... 210/170  
 3,586,624 6/1971 Larson .  
 3,622,511 11/1971 Pizzo et al. .  
 3,705,851 12/1972 Brauer .  
 3,732,911 5/1973 Lowe et al. .  
 3,835,909 9/1974 Douglas et al. .... 159/16.2  
 4,016,028 4/1977 Young et al. .  
 4,278,494 7/1981 Lijja et al. .  
 4,323,367 4/1982 Ghosh .  
 4,995,969 2/1991 LaVigne .

13 Claims, 2 Drawing Sheets

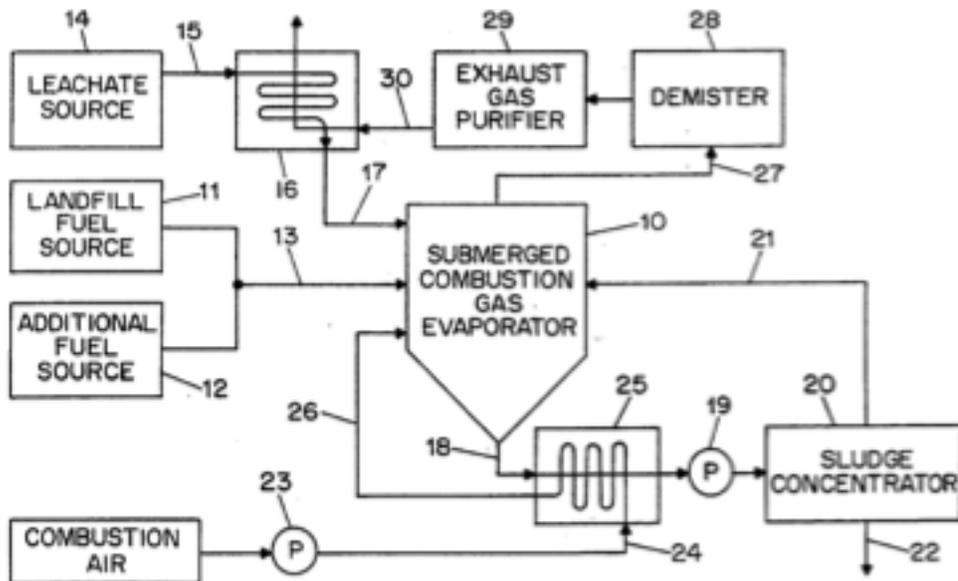


Figura 19. Patente de un sistema de evaporación en el tratamiento de lixiviados

## 2.10 Destilación por medio de energía solar

Los destiladores solares son clasificados como pasivos o activos. En el destilador solar pasivo, la radiación es recibida directamente por el agua en el recipiente, y esta es la única fuente de energía que el agua recibe. De esta manera se eleva la temperatura hasta alcanzar su ebullición con una productividad baja (Sampathkumar 2010).

En los destiladores solares activos, hay una adición de energía térmica, que ocasiona una evaporación más rápida mejorando su productividad. Sampathkumar (2010) clasifica los diversos tipos de destiladores de la siguiente manera:

- Destiladores de alta temperatura: el agua caliente proveniente de un panel colector solar y es alimentada hacia el recipiente donde se da la destilación
- Aplicaciones del agua precalentada: el agua caliente va a ser alimentada hacia el recipiente de destilación con un caudal constante
- Producción nocturna: el agua caliente es depositada en el recipiente una vez al día

Los parámetros que afectan ambos tipos de destilaciones solares son numerosos, tales como: la altura del agua en el recipiente de destilación, la velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura ambiente, el ángulo de inclinación y los materiales de fabricación (Sampathkumar 2010).

La energía solar se ha utilizado para la destilación de agua de buena calidad para convertirla en potable, siendo su aplicación principal la desalinización utilizado destiladores rectangulares de hierro galvanizado, los cuales pueden ser de 0.002 m de grosor (Potoglou, 2004) fibra de vidrio (Fonseca, 2005), madera en el exterior y hierro galvanizado (Nandwani, 2009), utilizando una cobertura de vidrio de 0.005 m de grosor (Potoglou, 2004), vidrio de 0.03 m de grosor (Nandwani, 2009) plexiglas de 0.003 m di grosor (Haralambopulos, 2000).

La inclinación es 30° (Potoglou, 2004) y 20° (Fonseca, 2003). Y se utilizan para la entrada y salida tubos de salida de acero inoxidable (Fonseca, 2003).

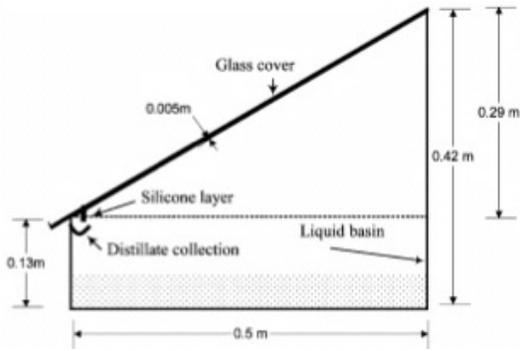


Figura 21. Destilador solar pasivo Fuente D. Potoglou et al (2003)

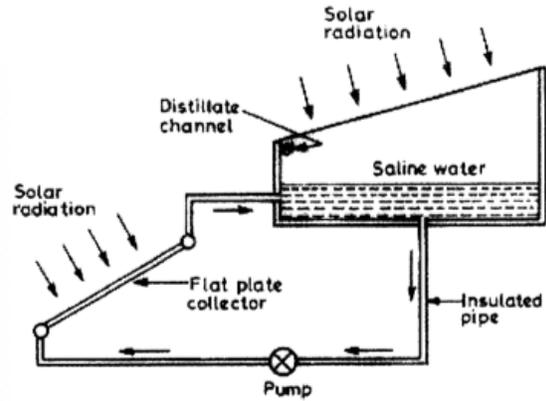


Figura 20. Destilador solar activo

La cantidad de agua destilada obtenida en estos sistemas es muy variable, ya que depende de varios factores como lo son tipo de cobertor (plástico o vidrio), cantidad de agua, radiación solar, temperatura y humedad ambiente (Nandwani, 2009). Se obtienen  $2.2 \text{ L/m}^2 \cdot \text{d}$  de acuerdo a los resultados de Fonseca (2003), aunque Nandwani (2009) menciona que este tipo de destilador puede generar de  $3 - 4 \text{ L/m}^2 \cdot \text{d}$ .

Otro de los usos de un destilador solar (Figura 21) se estudió con el fin de eliminar el agua restante en las almazaras (donde se exprimen las aceitunas), obteniendo una remoción total de sólidos, una disminución en DQO de 80% y un 90% en TKN. El autor afirma que la destilación solar se puede aplicar en cualquier proceso donde sea requerido separar la fase líquida de la sólida (Potoglou 2004).

Tripathi (2004) optimizó este destilador solar con el uso de calentadores solares con el objetivo de estudiar el efecto de la altura de agua en el recipiente y los coeficientes de transferencia de calor y masa. Se obtuvo como valor máximo de coeficiente de transferencia de calor de  $2.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  y coeficiente de transferencia de calor evaporativo de  $2.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  a una profundidad de 0.15 m.

Sampathkumar (2010) realizó una revisión de destiladores, dando énfasis en la destilación del agua de buena calidad para su potabilización y resume diversos tipos de adaptaciones de los colectores solares a un destilador solar convencional.

Algunos de los estudios utilizando una placa colectora generaron mejores resultados utilizando bombeo en lugar de la circulación natural del agua. Otro estudio muestra una generación de hasta  $5.18 \text{ l/m}^2$  con una radiación solar de  $24.34 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ .

Experimentalmente se han calculado los valores máximos de los coeficientes para destiladores solares como 43, 86, 67 y 76 W/m<sup>2</sup>\*°C para colectores de placa, colector concentrador, tubos al vacío y ETC con “heat pipe”.

## **2.11 Energía solar utilizada para el tratamiento de aguas residuales**

El uso de la energía solar en el tratamiento de aguas residuales se da en los pantanos de estabilización y en la desintoxicación solar, siendo su principal aprovechamiento: el desarrollo de bombas solares (Argaw,2003)

Un ejemplo de esto se da en Apache powder superfund site, donde la energía solar se emplea para generar la electricidad requerida por una bomba centrífuga para recircular (5 gal/min) agua contaminada a través de un humedal, siendo el método utilizado para el tratamiento de agua contaminada.

Algunos otros casos de energía solar y otras energías limpias aplicadas a la recuperación del suelo y agua se pueden observar en la página de EPA (<http://www.epa.gov/oswercpa/successstories.htm>), es importante rescatar que la energía solar en estos proyectos es utilizada para generar la electricidad o potencia requerida para la remediación.

Además se han desarrollado métodos de oxidación avanzada en los que se utiliza la energía solar o luz solar para generar oxidaciones fotocatalíticas. Así, Palanivelu (2007) utilizó un método solar fotocatalítico utilizando dióxido de titanio, obteniendo una eficiencia de degradación de un 85%. Kositzi (2004) realizó una reducción fotocatalítica del contenido orgánico de agua residual municipal sintética generando una reducción de 55% en la cantidad inicial del contenido de carbono.

Específicamente para el tratamiento de lixiviados, en el relleno sanitario de Rethymnon se llevó a cabo un proyecto de investigación denominado “Tratamiento fotovoltaico de lixiviados”, donde uno de los objetivos principales fue adquirir información y proveer aplicaciones de la energía solar fotocatalítica en el tratamiento de aguas residuales (Solar photocatalytic treatment, 2002).

También Rocha (2011) realizó un estudio de tratamiento de lixiviados maduros tratados por AOPs, conducidos por energía solar, utilizando procesos fotocatalíticos homogéneos y heterogéneos.

Otros estudios, más inclinados hacia al aprovechamiento del calor generado, fueron realizados por Haralambopoulos (2000) y Yiannopoulos (2008). El primero utilizó un destilador solar para analizar el proceso de eliminación de agua en el lodo generado de un proceso de lodos activados. Utilizó un destilador solar simple, similar a los empleados en los procesos de desalinización, y se realizaron análisis de DQO, SSV y SS al destilado, aproximadamente  $837 \text{ ml/m}^2 \cdot \text{d}$ , encontrando que los valores de DQO aumentaron debido a la intensa producción de vapores cargados de COV. Los investigadores concluyen que es posible la eliminación del agua del lodo por destilación solar, tomando en cuenta los volúmenes producidos en una planta de tratamiento. Sin embargo es requerido realizar futuras investigaciones para alcanzar un proceso de operación continua durante todo el año bajo las diferentes condiciones meteorológicas.

El segundo estudio consistió en diseñar y analizar un reactor calentado solarmente para optimizar el tratamiento anaeróbico del agua residual. Por medio de colectores solares (placas), un tanque de almacenamiento del agua caliente y un filtro anaeróbico de doble pared. se mantenía caliente el contenido aproximadamente a una temperatura de  $35^\circ\text{C}$ .

En este estudio se analizaron tanques de  $2.04 \text{ m}^3$  y  $19.63 \text{ m}^3$  generando una remoción de DQO en un 59% a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  y a una temperatura de  $35^\circ\text{C}$ .

## **2.12 Potencial de uso de energía Solar en Costa Rica**

Costa Rica se encuentra localizado en un lugar privilegiado en el planeta, la zona tropical, donde las variaciones climatológicas no son extremas (Ver 3.1). Al estar localizados en medio de los trópicos de Cáncer y Capricornio el país tiene la influencia directa del sol todo el año y durante el movimiento de translación de la tierra los rayos son perpendiculares a la superficie del globo en medio de estos trópicos (Calvo,2008).

Estos factores generan un potencial muy grande para el desarrollo de la energía solar en Costa Rica, sin embargo es una tecnología que no se ha desarrollado, principalmente por aspectos económicos.

La variación espacial y temporal del potencial solar en el país fue estudiado por Jaime Wright utilizando la información de radiómetros, actinógrafos o piranómetros (radiación solar) y heliógrafos (brillo solar). El estudio se realizó de acuerdo a  $\frac{GH}{G_{Ho}} = a + b \frac{n}{N}$  donde  $GH/G_{Ho}$  es la relación entre la radiación recibida en el suelo con respecto a la que se recibiría en el tope de la atmosfera y  $n/N$  es la relación entre horas reales y horas posibles de brillo solar (heliofanía relativa); a y b son constantes.

Este estudio muestra como resultado anual, por medio de mapas la variación de la radiación solar global diaria media mensual, que Jacó se encuentra en una zona de 17 MJ/m<sup>2</sup>-día. El mes en el que la radiación es menor para la zona es Octubre con un valor de 16 MJ/m<sup>2</sup>-día y un valor máximo en febrero de 19 MJ/m<sup>2</sup>-día, datos que coinciden con los valores de radiación solar de las estación Damas, utilizados en este estudio .

En relación con los valores de MJ/m<sup>2</sup>-día para Costa Rica, Jacó se encuentra situado en el límite superior del promedio de radiación media mensual (12 y 16 MJ/m<sup>2</sup>-día). Además, la zona se ve favorecida topográficamente, ya que las montañas o relieves no influyen de gran manera en la disminución de la intensidad solar. Concluye Wright que el valor de energía total anual del potencial solar es alto.

En regiones como ésta, donde existe radiación solar durante el año, la misma debe ser aprovechada. Esta es relativamente económica para fines de transferencia de calor como lo son calentadores solares, destilación de agua, desalinización, calentamiento por efecto invernadero, secado de lodos y productos para la agricultura (ya sea por exposición directa, por circulación de aire), y el calentamiento de reactores anaerobios para el tratamiento de agua residual (Yiannopoulos, 2008).

### 2.13 Calentadores solares

La energía proveniente del sol es por su naturaleza no contaminante, pues no genera emisiones de ningún tipo. Además sus costos de operación son muy bajos e independientes del comportamiento de las otras fuentes de energía.

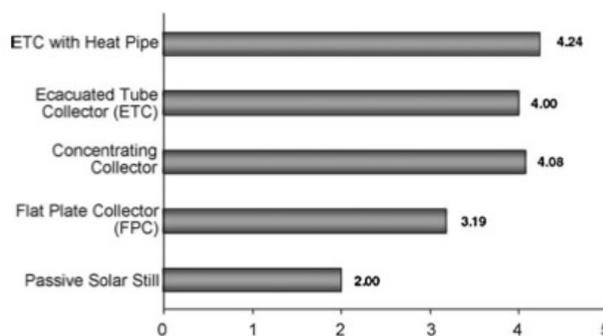
Una forma de aprovechar la energía proveniente del sol, es mediante la utilización de sistemas captadores de la radiación solar, a través de los cuales se logra una concentración del calor, en un “calentador”, donde sucede un proceso de transferencia de calor hacia un fluido, el cual absorbe el calor y lo puede entregar o transferir a otro cuerpo o líquido. (Gómez,2005)

El sistema “termosifón” depende de que el agua caliente se eleve (convección) para circular el agua a través de los colectores y del tanque de almacenamiento. La cantidad de agua caliente que produce depende del tipo y tamaño del sistema, volumen de agua por calentar, radiación e instalación del sistema (Enertiva, 2009)

Este sistema utiliza el principio de convección natural entre el colector y el tanque de almacenamiento, por lo que no se requiere bombeo, aunque es requerido instalar el tanque 0.6 m más arriba del punto más alto del colector (Field, 1980)

El sistema de colectores solares por termosifón es más eficiente que el sistema de calentamiento por placa colectora. Estos poseen una absorción más eficiente de la radiación debido a su forma cilíndrica que favorece diversos ángulos de incidencia, su material y cobertura optimizan la absorción, además del vacío en los tubos que disminuye las pérdidas de calor.

Tal y como se muestra en la Figura 22 en el estudio de Sampathkumar (2010) los colectores de tubos generan 4 kg/m<sup>2</sup>, superado por dos colectores más especializados, pero superando en un 50% a los colectores pasivos y en un 10% a los colectores de placa.



**Figura 22. Total de agua caliente generada por diversos tipos de colectores solares Fuente Sampathkumar 2010**

## 2.14 Disposición de lodos

Existen varios métodos para el tratamiento y posterior disposición de los lodos en general, algunos de estos son el concentrador-espesador por gravedad, deshidratador-filtro de prensa, estabilización por cal, lechos de secado y sistemas de deshidratación.

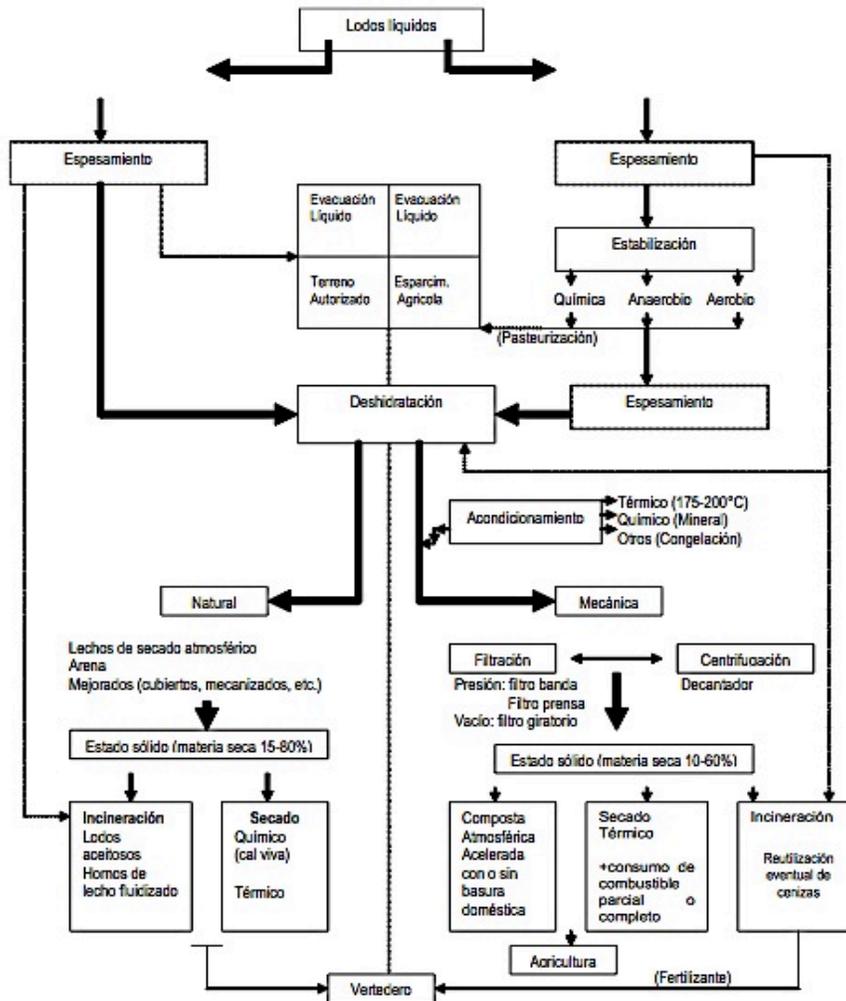


Figura 23. Líneas más comunes en el tratamiento de lodos  
Fuente: Oropeza, 2006

Oropeza muestra un resumen (Figura 23) de los tratamientos más comunes para los lodos, que dependerán de su cantidad y calidad. El tratamiento y disposición final de los lodos resultan significativos pues pueden presentar un riesgo para la salud y el ambiente.

Los lechos de secado, parecieran la técnica más viable para su uso en el Relleno Sanitario de Garabito, pues son el método de deshidratación de lodo más empleado en Estados Unidos, principalmente por su bajo costo y escaso mantenimiento (Metcalf & Eddy, 1996).

Existen cuatro tipos: convencionales de arena, pavimentadas, de medio artificial y por vacío. Para el secado de los lodos en el Relleno Sanitario de Garabito se propone un lecho de secado de medio artificial para finalmente ser retirado y evacuado a rellenos sanitarios o ser utilizado como acondicionador de suelos (Metcalf & Eddy, 1996).

Para este tipo de lecho, se introduce el lodo líquido en un medio drenante horizontal relativamente abierto y se utiliza una malla de acero inoxidable o paneles de poliuretano de alta densidad. El acero se coloca en forma de cuña, dispuesta con la cara plana en la parte superior. La abertura de las ranuras entre cada barra es de 0.25 mm, y con esto se forma un panel que se instala sobre un falso fondo. Para el control del drenaje se utiliza una válvula dipuesta en la salida (Metcalf & Eddy, 1996).

Este tipo de método no padece de obstrucciones, posee un drenaje constante y rápido, el rendimiento es más elevado que la del lecho de arena, y se da la posibilidad de digerirlos por vía aerobia a un costo de mantenimiento relativamente sencillo. El sistema debe de estar ubicado a al menos 100 m de edificios y urbanizaciones.

Para definir y proyectar el sistema de tratamiento y evacuación de lodos, se debe conocer su procedencia, cantidad y características. Tal y como se observa en la Figura 43 la producción de lodo se da en el pretratamiento y en los tratamientos biológicos, generando por medio del desbaste sólidos gruesos, sólidos supendidos y lodos primarios en las siguientes operaciones unitarias.

El lodo primario generado de la sedimentación es generalmente gris y graciento, normalmente produce un mal olor. El lodo digerido aerobio es de color café o café oscuro y tiene una apariencia floculenta (Metcalf & Eddy, 1996).

De acuerdo con Metcalf & Eddy (1996), el peso específico del lodo generado en la decantación primaria es de 1.02 y el contenido de sólidos secos es de  $150 \text{ kg}/10^3\text{m}^3$ . El lodo de las lagunas aireadas tiene un peso específico de 1.01 y  $95 \text{ kg}/10^3\text{m}^3$  de sólidos secos.

### 3.1 Factores Climatológicos

Para el análisis de los factores climatológicos se determinaron las variables meteorológicas por analizar y se solicitaron al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica los datos requeridos. Se determinó que la fuente principal de información sería la estación meteorológica Damas. Los sitios en línea recta más cercano con los datos requeridos fueron Puntarenas número 27 (Lat 9 ° 58' N Long 84 ° 49'O; 3m) y Damas número 90009 ubicada en Quepos (Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m). La primera se encontraba a una distancia de 45.7 km en línea recta y la segunda a 56 km.

A pesar de que la primera se encuentra a una distancia menor, fue seleccionada la estación Damas, pues ésta se encuentra ubicada geográficamente similar a Jacó, en una costa expuesta a la influencia de las condiciones marítimas (vientos, temperatura, cambios de presión atmosférica, y demás fenómenos atmosféricos). Al contrario de la estación ubicada en Puntarenas que se encuentra en un golfo, con influencia de las condiciones marítimas por los costados norte y sur.

Además, al realizar una comparación de los datos promedio mensual de la precipitación de ambas estaciones con la de Jacó, se encuentran diferencias mayores a 70% en el caso de Puntarenas. Por estos motivos fueron seleccionados los datos de temperatura, humedad, radiación, brillo solar y viento para la estación Damas.

### 3.2 Determinación de caudales

Para determinar los caudales, se realizaron mediciones en la variación del nivel de agua en la laguna de lixiviados del 7 Octubre 2011 al 5 Noviembre 2011. En varios días de la semana, en distintas horas, bajo diversas condiciones de operación, y considerando principalmente la precipitación como factor de variación de la producción.

Se determinó el volumen de agua ( $m^3$ ) a partir de la altura  $h$  (Figura 24), además del tiempo transcurrido entre cada medición ( $h$ ). Los datos de precipitación diaria fueron obtenidos del pluviómetro del Hotel Club del Mar.

Para los cálculos de los volúmenes se utilizaron las fórmulas:

$$V_{\text{prisma rectangular}} = l * a * h$$

l: largo del prisma rectangular

a: ancho del prisma rectangular

h: altura del nivel de agua en el prisma

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * h$$

r: radio del cilindro

h: altura del nivel del agua en el canal cilíndrico

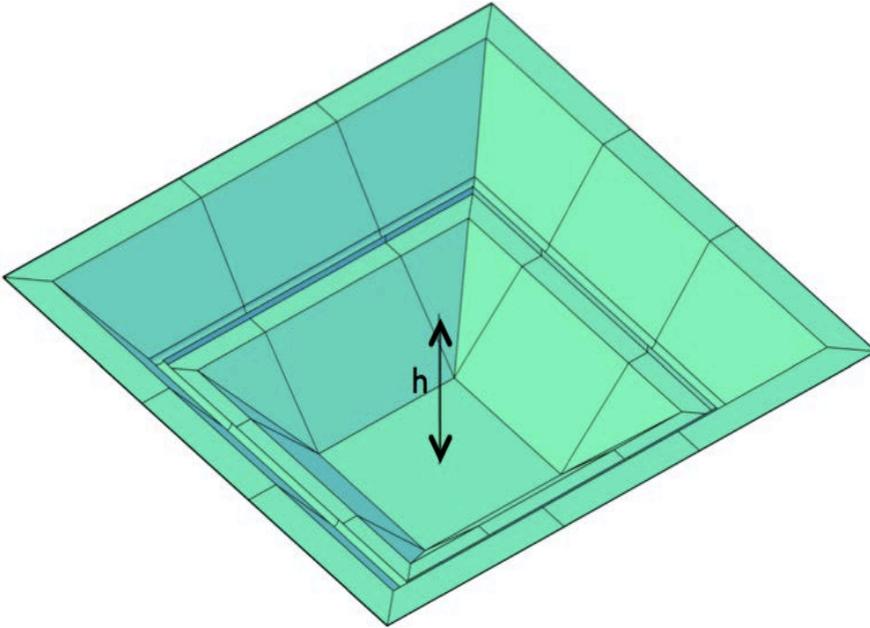


Figura 24. Pileta almacenamiento de lixiviados: determinación de alturas

$$V_{\text{piramide}} = \frac{h}{3} (AB + AB' + \sqrt{AB} + \sqrt{AB'})$$

AB: Base menor de la pirámide truncada

AB': Base Mayor de la pirámide truncada

h: altura del nivel del agua .

Durante las mediciones de los volúmenes un factor que afectó la determinación de los caudales fue el bombeo previo o posterior a la medición, por lo que se eliminaron todas estas las medidas.

### **3.3 Determinación de la composición de los lixiviados**

Para determinar la composición, se tomaron los datos de los análisis de lixiviados solicitados por la municipalidad de Garabito a los laboratorios LAMBDA y San Martin en los años 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2011. Las muestras fueron tomadas en la pileta de lixiviados y la última de éstas fue tomada en la caja de registro de la celda 4 (figura 1). Los parámetros analizados fueron pH, temperatura, sólidos totales, sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, aceites y grasas, DQO, DBO, mercurio, níquel, cromo, plomo, cadmio, zinc, cobre, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo, calcio, magnesio, manganeso, hierro, sodio, amonio, potasio y nitrógeno.

### **3.4 Control y conducción de lixiviados**

#### **3.4.1 Diseño de conducción de lixiviados**

El diseño se basa en una fórmula alternativa de Hazen Williams debido a que ésta se utiliza en flujos de agua con conductos mayores de 2 pulgadas y menores de 6 pies de diámetro.

$$D = \frac{359 * Q^{0.380}}{Ch * S^{0.54}}$$

Donde:

Ch: Coeficiente de Hazen-Williams ; valor de diseño 130 para plástico, cobre, latón, vidrio

Q: Caudal

S pendiente (m/m)

#### **3.4.2 Diseño del sistema de conducción de pluviales**

El sistema de conducción de pluviales debe ser realizado por medio de canales, por lo que se hará mediante los conocimientos de hidráulica de canales y las condiciones del terreno. Este canal se construirá basado en el “Análisis y diseño de un canal de recolección de agua pluvial” realizado por Díaz et al (2009)

### **3.5 Diseño del tratamiento de lixiviados**

Para el tratamiento se seguirá la metodología de diseño propuesta por Metcalf & Eddy, así como los métodos utilizados en nuestro medio para desarrollar la planta de tratamiento y sus principales etapas: influencia de caudales y las cargas contaminantes, evaluación y determinación de los caudales de proyecto, evaluación y determinación de las cargas contaminantes, selección de procesos y elementos del diseño conceptual de procesos.

#### **3.5.1 Diseño conceptual**

En esta etapa se toman las decisiones en cuanto a ingeniería, se escoge equipo y prepara la distribución física de las instalaciones; se recolectan y procesan los datos del proyecto; se elabora el diagrama de flujo de procesos; se plantea el análisis hidráulico de la planta y cálculo de la línea piezométrica; y se definen los sistemas de explotación y control. También se estipula la distribución física de los elementos de la planta y estudios del terreno.

#### **3.5.2 Diseño preliminar**

En este apartado se da una descripción detallada de los elementos pertenecientes al proceso, tal como la distribución definitiva de la parcela, donde se establecen necesidades de equipos, conceptos arquitectónicos y necesidades de espacio. Al mismo tiempo, se dispone la red de tuberías y equipos mecánicos alternativos; se establecen los requisitos para los sistemas auxiliares y para los edificios; y se fijan los costes de la obra.

#### **3.5.3 Estudios especiales**

Estos estudios se realizarán antes y después del diseño preliminar. Se pueden incorporar nuevos equipos y procesos en planta piloto o estudios de olores para el conocimiento de las condiciones a desarrollar. Del mismo modo, se puede realizar el análisis de las aguas receptoras para conocer las características de dispersión de la zona de vertido.

#### **3.5.4 Proyecto constructivo**

El último paso en el proyecto de una planta es la elaboración de los diagramas constructivos y de las especificaciones técnicas.

### 3.6 Destilador solar: Prueba de concepto

El objetivo de la prueba de concepto es analizar, desde una perspectiva operativa y de diseño, el funcionamiento del destilador solar activo propuesto. En este se obtendrán valores experimentales del volumen y caudal destilado generado, calidad fisicoquímica del destilado, energía requerida, L/m<sup>2</sup>\* día de destilado y funcionamiento del equipo para este fin (pérdidas de calor, fugas, manejo de presión y temperaturas).

#### *Materiales y Equipo*

Para la ejecución de la prueba y diversas conexiones requeridas se utilizaron los siguientes materiales y equipo :

**Cuadro 6. Materiales utilizados en la prueba de concepto**

| <b>Materiales</b>                 | <b>Marca</b>  | <b>Modelo</b> |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| 2 termómetro                      |               | 150 C         |
| 3 termopares tipo K               | ND            |               |
| 1 Datalogger                      | Honeywell     |               |
| 2 probetas                        | Pirex         | 500 y 1000 mL |
| 1 pH metro                        |               | Scholar 405   |
| 1 Termómetro infrarrojo           | Ideal         | 61-685        |
| 1 Termómetro Bimetal              | Winters       | TBM           |
| 1 piranómetro                     | Kipp & Zonnen | SP Lite 2     |
| 1 Datalogger                      | Kipp & Zonen  | Meteon 2.1.2  |
| 1 Isopo                           |               |               |
| 1 tanque aislado                  | Solare        | 90 L          |
| 12 tubos de borosilicato al vacío | Solare        | Vacío         |
| 2 llaves #10                      |               |               |
| 1 llave Francesa                  |               |               |
| 1 llave de cañería                |               |               |
| Bushing de 3/4 a 1/2"             |               |               |
| 3 Niple HG 1/2"x 4'               |               |               |
| 2 Tee HG 1/2                      |               |               |
| 3 uniones HG de 1/2"              |               |               |
| 1 carucha de Teflón               |               |               |
| 3 llaves de bola de 1/2" de HG    |               |               |
| 1 manguera 10 m de 3/4"           |               |               |
| 1 manguera 10 m 3/8"              |               |               |
| conector hembra fija 3/8" a 1/2"  |               |               |
| 4 gaza sin fin                    |               |               |
| 2 reducciones fijas de 3/4 a 1/2" |               |               |
| Cámara fotográfica                | Apple         | Iphone 4      |

### ***Procedimiento***

Se realizaron las pruebas para determinar el comportamiento del sistema para agua potable (A) y lixiviado (L).

- 1) Instalación del calentador SOLARE
- 2) Instalación termómetros
- 3) Instalación piranómetro
- 4) Instalación de válvulas y mangueras
- 5) Revisión de fugas
- 6) Prueba de agua potable (Pruebas A)
  - a) Determinación de pH, Temperatura y caudal del agua de llenado
  - b) Llenado de tanque
  - c) Determinación de la temperatura
    - Ambiental
    - Exterior del tanque
    - Interior del tanque
    - Salida del Gas
    - Destilado
  - d) Determinación del Volumen de destilado
  - e) Repetición del paso c y d por 12 horas cada media hora
- 7) Prueba de lixiviado (Pruebas L)
  - a) Determinación de pH, Temperatura y caudal del lixiviado
  - b) Toma de muestra para posterior análisis fisicoquímico
  - c) Llenado de tanque
  - d) Determinación de la temperatura
    - Ambiental
    - Exterior del tanque
    - Interior del tanque
    - Salida del Gas
    - Destilado
  - e) Determinación del Volumen de destilado
  - f) Repetición del paso d y e por 12 horas cada media hora

### **3.7 Selección del sistema de tratamiento**

Se determina la factibilidad, para las alternativas de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito, mediante criterios cualitativos ambientales, técnicos, operacionales y económicos. Lo anterior, con el objetivo de ser utilizados para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Los criterios ambientales toman en cuenta posibles impactos ambientales generados a partir de la implementación de una planta de tratamiento. El aspecto de emisiones se refiere a los residuos generados en el tratamiento, ya que pueden darse emisiones líquidas

(efluente) y gaseosas; la producción de lodos se refiere a las emisiones sólidas, específicamente en la cantidad de lodos que se producen; y el reúso de agua se refiere al cumplimiento del efluente con el reglamento y su posibilidad de ser reutilizado.

Los criterios técnicos se refieren a aspectos de diseño que debieron de ser contemplados para su posterior operación tales como la formación de espumas, que podrían ser generadas en el sistema y que disminuyen su eficiencia; la sensibilidad del sistema para las variaciones de caudal y su capacidad de mantenerse funcionando a pesar de cambios generados en la producción de lixiviados; así como el ruido y los malos olores que se podrían generar

Los criterios operacionales toman en cuenta el mantenimiento que se le debe de dar a la planta de tratamiento, así como el equipo requeridos y materiales que se deban de adquirir para su funcionamiento óptimo. Además, considera la complejidad operacional que esta pueda presentar para el operador de acuerdo a las labores que se deban desarrollar.

Los criterios económicos, consideran la inversión inicial, principalmente el área requerida, debido al costo de cada metro cuadrado del terreno donde se encuentra ubicado el relleno.

**Cuadro 7. Criterios para la selección del sistema de tratamiento**

| Criterio                | Aspecto                            | Escala                |
|-------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Criterios Ambientales   | Emisiones                          | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Producción de Lodos                | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Reuso de agua                      | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
| Criterios Técnicos      | Consumo energético                 | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Sensibilidad variaciones de caudal | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Ruido                              | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
| Criterios operacionales | Malos olores                       | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Mantenimiento                      | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Equipo y materiales requeridos     | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
| Criterios económicos    | Complejidad operacional            | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Área requerida                     | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |
|                         | Inversión                          | 3.Alto 2.Medio 1.Bajo |

## **4.1 Información base requerida**

### **4.1.1 Factores Climatológicos**

Costa Rica esta situado en el trópico, con lo cual la variación en su clima depende principalmente de los fenómenos atmosféricos que se estén llevando a cabo en un periodo de tiempo. A pesar de eso, es muy estable y su cambio es representado por la estación seca y la estación lluviosa.

Los factores climatológicos tienen gran importancia en la producción y calidad del lixiviado, ya que son factores con alta variabilidad y con poca o nula posibilidad de control. A continuación se analizarán los factores de precipitación, temperatura, evapotranspiración, brillo solar, viento y humedad relativa. Estos fueron tomados de diferentes estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de acuerdo a la disposición de datos.

#### ***4.1.1.1 Precipitación***

La generación de lixiviado esta directamente relacionado con la precipitación en el sitio. Esta representa la cantidad de agua entrante al sistema por lo que deben de considerarse cantidad, intensidad, frecuencia y duración. Esta proporción aumenta si el nivel de compactación de los desechos es mínimo, la cubierta vegetal es poca o nula y la permeabilidad del suelo es alta ya que el flujo del liquido a través del área de relleno es mucho mayor.

La precipitación en el sitio puede: evaporarse directamente del suelo a la atmósfera, ser utilizada por las plantas a través de la transpiración, puede recargar de humedad el suelo seco hasta su capacidad de campo (el máximo contenido de humedad), percolar o formar escorrentías en el terreno.

Para el análisis de este factor se utilizaron los datos climatológicos de las estaciones meteorológicas Punta Leona (Lat. 9°42'N Long 84°39'O altitud 20m), Club del Mar (Lat. 9°36' Long 84°38'O altitud 3m) y Jacó (Lat. 9°35'N Long 84°37'O altitud 3m).

Para las tres estaciones meteorológicas, los meses de enero, febrero, marzo y abril son secos, donde las precipitaciones son menores a 100 mm (Figura 25.)

En el mes de mayo, marcado por el inicio de la estación lluviosa, se pueden encontrar precipitaciones promedio de hasta 500 mm, mientras que en los siguientes meses, junio y julio, disminuyen las precipitaciones manteniéndose alrededor de los 300 y 400 mm. Sin embargo se muestra un aumento de las precipitaciones en el mes de setiembre y octubre, que varían entre los 400-700 mm, para finalmente mostrar una caída de la precipitación de 100-300 mm. durante los meses de noviembre y diciembre.

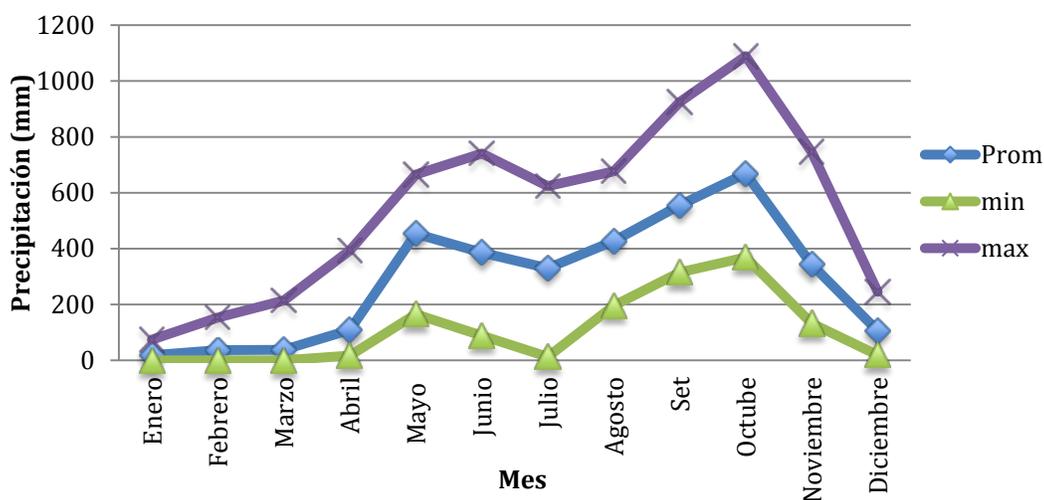


Figura 25. Precipitación (mm) promedio , mínima y máxima mensual periodo 2000-2011 para la estación Jacó (Lat 9°35'N Long 84°37'O altitud 3m )

En el período analizado 2000-2010, para la estación Jacó, la mayor precipitación promedio se presenta en el mes de Octubre y es de 669 mm, así mismo la máxima precipitación de este periodo es Octubre 2007 con 1 088 mm. De igual manera, para la estación Punta Leona, las máximas precipitaciones promedio se dan Octubre con valores de 469 mm y la máxima precipitación fue de 1 122 mm en Octubre 2008. La estación Club del Mar, de manera muy similar, presenta para el periodo 2005-2011 una mayor precipitación promedio de 714,89 mm en Octubre y su máxima precipitación fue también en Octubre 2007 con 1 154 mm.

**Cuadro 8. Precipitación (mm) mensual para la estación Jaco (Lat. 9°35'N Long 84°37'O altitud 3m ) 2000-2010**

| Mes /Año    | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | Mayo | Jun. | Jul. | Agst. | Set | Oct  | Nov   | Dic |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|------|-------|-----|
| <b>2000</b> | 14.8 | 24   | 0    | 88   | 407  | 366  | 307  | 299   | 793 | 517  | 388.1 | 20  |
| <b>2001</b> |      |      |      | 75   | 165  | 295  | 349  | 303   | 429 | 762  |       |     |
| <b>2002</b> |      |      |      |      | 437  | 343  | 13   | 618   |     | 581  | 196   |     |
| <b>2003</b> | 0    | 5    | 57   | 137  | 374  | 741  | 624  | 401   | 315 | 510  | 212   |     |
| <b>2004</b> | 0    | 0    | 0    | 78   | 626  | 521  | 246  | 505   | 417 | 773  | 133   | 19  |
| <b>2005</b> | 8.9  | 0    | 214  | 63   | 558  | 426  | 358  | 196   | 812 | 627  | 396   | 141 |
| <b>2006</b> | 20   | 5    | 27   | 93   | 264  | 253  | 165  | 244   | 449 | 540  | 150   | 246 |
| <b>2007</b> | 3.5  | 35   | 14   | 83   | 665  | 88   | 492  | 677   | 444 | 1089 | 133   | 214 |
| <b>2008</b> | 74   | 104  | 5.6  | 17   | 619  | 246  | 317  | 619   | 573 | 924  | 330   | 89  |
| <b>2009</b> | 45   | 0    | 4.5  | 58   | 232  | 482  | 247  | 395   | 396 | 664  | 746   | 26  |
| <b>2010</b> | 0    | 153  | 14   | 394  | 639  | 481  | 510  | 448   | 926 | 369  | 746   | 88  |
| <b>Prom</b> | 18   | 36   | 37   | 109  | 453  | 386  | 330  | 428   | 555 | 669  | 343   | 105 |
| <b>Min</b>  | 0    | 0    | 0    | 17   | 165  | 88   | 13   | 196   | 315 | 369  | 133   | 19  |
| <b>Max</b>  | 74   | 154  | 214  | 394  | 665  | 741  | 624  | 677   | 925 | 1089 | 745.7 | 246 |

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

#### **4.1.1.2 Temperatura y Brillo solar**

La temperatura es un indicador de la cantidad de energía calorífica existente en el aire o en un cuerpo, la cual, por medio de la radiación del sol pasa a la atmósfera y al llegar a la superficie es absorbida y se transforma en energía calórica o radiación de onda larga (Calvo, 2008).

La temperatura y el brillo solar son factores que influyen en el balance hídrico del relleno sanitario, ya que de éstos va a depender la tasa de evaporación del líquido en el área de relleno (interna y externa). Además, su importancia en la producción de lixiviado es un factor por considerar para la selección del tratamiento, debido principalmente a que los tratamientos biológicos son afectados directamente por la temperatura, pues este es el factor que más afecta el crecimiento y sobrevivencia de los microorganismos, así como las reacciones enzimáticas (Bitton, 2005).

Analizando los datos de temperatura promedio mensual (1984-2009) para la estación Damas, se deriva que dicho promedio se mantiene entre los 21.7 °C y los 32.5 °C . Para esta estación, las temperaturas medias promedio más altas se dan en el mes de marzo

con un valor de 27.6°C y la menor 26.5 °C en los meses de octubre y noviembre. Las mayores temperaturas se presentan en febrero, marzo y abril, dándose una disminución de la temperatura en los meses siguientes. Para este sitio la temperatura promedio anual es de 26.7 °C

En los siguientes gráficos se muestra el ciclo anual de temperatura media, de esta manera se distingue el cambio de estaciones que afecta el sitio, aunque cabe resaltar que, al estar Costa Rica situada en el trópico, las variaciones son mínimas.

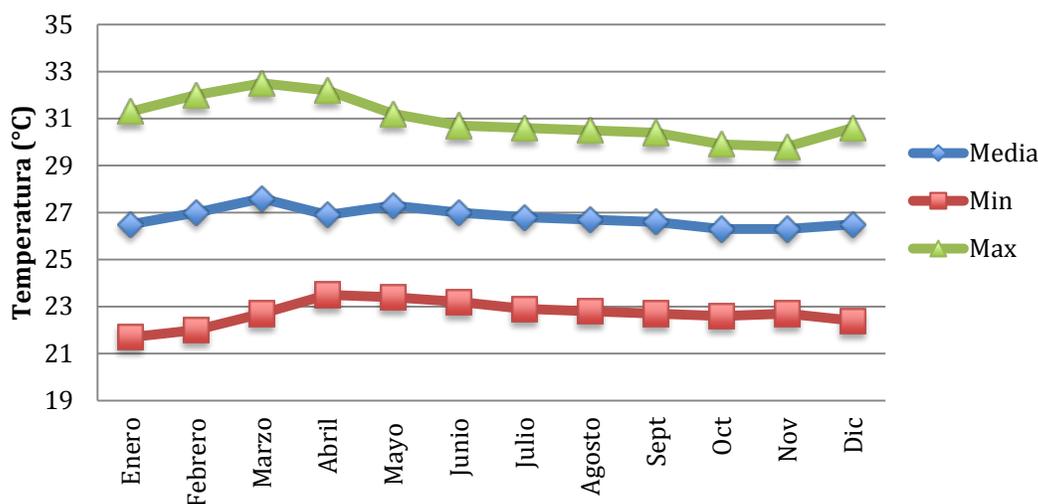


Figura 26. Temperatura Promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica Damas, Quepos Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m

Con respecto al brillo solar durante la época lluviosa (mayo a noviembre), se tiene que las horas promedio de sol son menores o iguales a tres, mientras que en la época seca (noviembre-abril) son mayores a seis. (Pérez, 1995). Para la estación Damas (Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m) los valores promedio diarios mensuales más altos se dan en los meses de enero a abril y se mantienen bajos de mayo a diciembre.

Los valores promedio diario de brillo solar para el periodo 2000-2010, se encuentran entre las 4 h y 8 h que corresponden a los meses de octubre y febrero respectivamente. Por otro lado la mayor cantidad de horas de brillo solar fue de 9 h en el mes de marzo 2004 y la menor fue noviembre 2010.

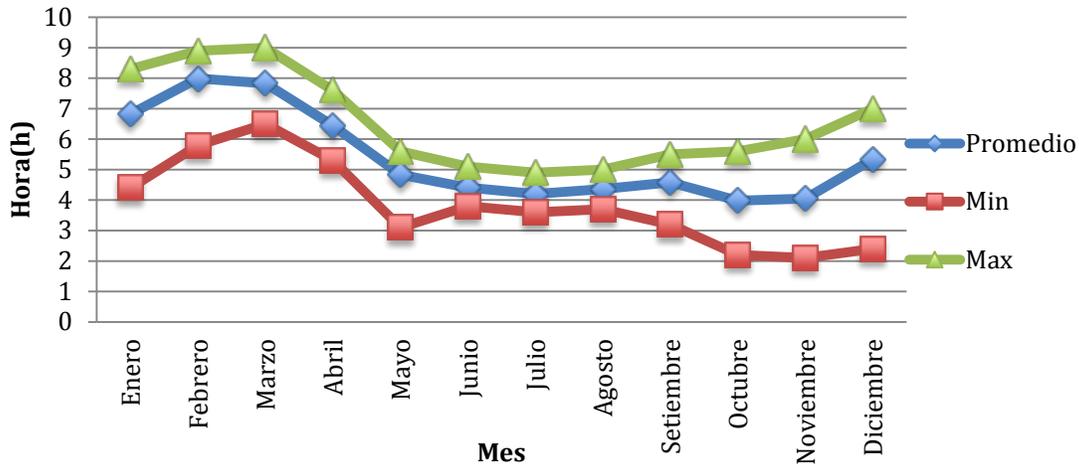


Figura 27. Promedio diario mensual de Brillo Solar(h) para la estación Damas (Lat, 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m)

Al salir el sol del este y oponerse en el oeste, el relleno el relleno sanitario de Garabito esta expuesto a insolación a partir de las 7 am hasta el atardecer, prácticamente en la totalidad de horas de sol ya que su pendiente y la topografía no presentan obstáculos y se favorece una incidencia directa de los rayos. Otro elemento que determina una variación en la temperatura es el tipo de suelo del relleno sanitario, ya que el color pardo, pardo rojizo y café disminuyen la reflexión de los rayos solares (albedo) a la atmósfera, conservando el calor. Por otra parte, no se impide el calentamiento de la superficie por medio de la cobertura vegetal que acumule humedad, por lo que las áreas descubiertas experimentan mayor temperatura y cambios abruptos. Además la altura del sitio es casi a nivel del mar, por lo que la altura no afecta la variación de temperatura.

#### 4.1.1.3 Radiación

La radiación para la estación Damas fue determinada en el periodo de 1984 a 2009, en el que se presentan una radiación mínima en el mes de noviembre de 14.7 MJ y una máxima en el mes de febrero con un valor de 19 MJ. La radiación promedio para Quepos, a partir de estos datos, es de 16.37 MJ.

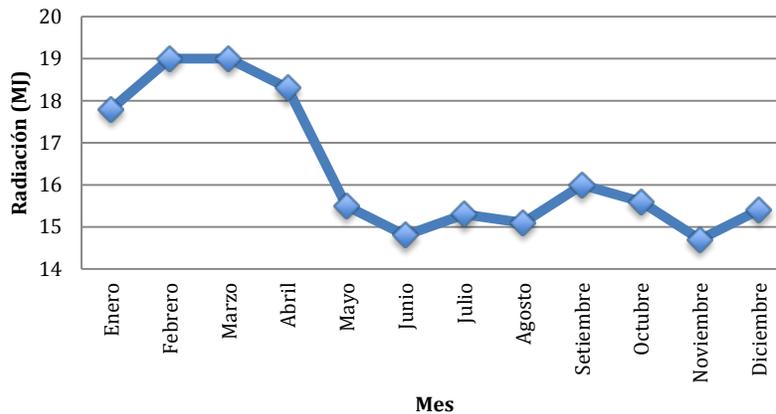


Figura 28. Promedio mensual (1983-1999) de radiación para la estación Damas Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m

#### 4.1.1.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la evaporación del agua del suelo y transpiración de las plantas a la vez (Calvo,2008). Esta forma parte del balance hídrico natural que se da en el sitio del relleno, el cual representa una de las salidas de agua de la tierra a la atmósfera.

Utilizando los datos de temperatura (°C) media mensual para la estación Jacó, se calculó la evapotranspiración por medio del método de Thornwaite que utiliza la temperatura del aire para determinar la evapotranspiración.

$$ET = 1.6 * \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

$$I = \text{Índice anual de calor; } \sum i$$

ET= Evapotranspiración potencial (mm/mes)

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

T=Temperatura mensual promedio( °C)

$$a = 0.49 + 0.0179 * I - 0.0000771 * (I)^2 + 0.000000675 * (I)^3$$

Para Damas, el valor promedio anual de evapotranspiración de 14. mm/mes, siendo su valor mínimo 13 en el mes de noviembre y su máximo 16 mm/mes en el mes de marzo. En los meses de enero, febrero, y marzo la evapotranspiración es alta, lo que indica que existe una mayor salida de agua que en el resto de los meses.

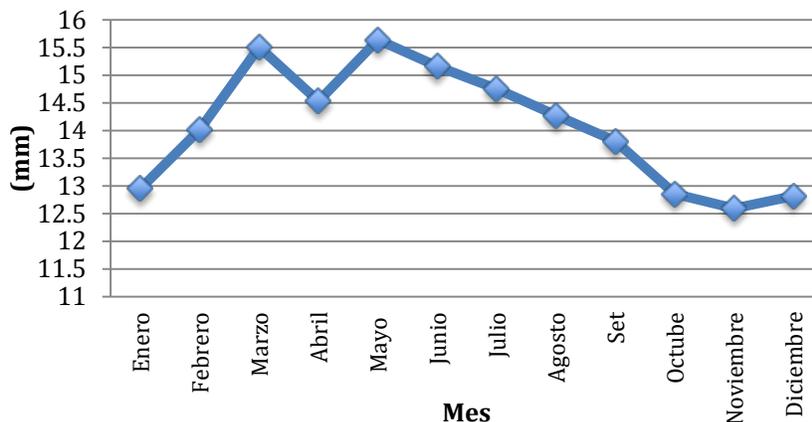


Figura 29. Evapotranspiración (mm) promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica Damas, Quepos (Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m)

Por otro lado, la evaporación tiene valores más elevados en los meses de febrero a abril, alrededor de 5.4 mm, y sus valores más bajos en el periodo junio- agosto con 3.7 - 3.9. El resto de meses la evaporación ronda los 4.2 mm.

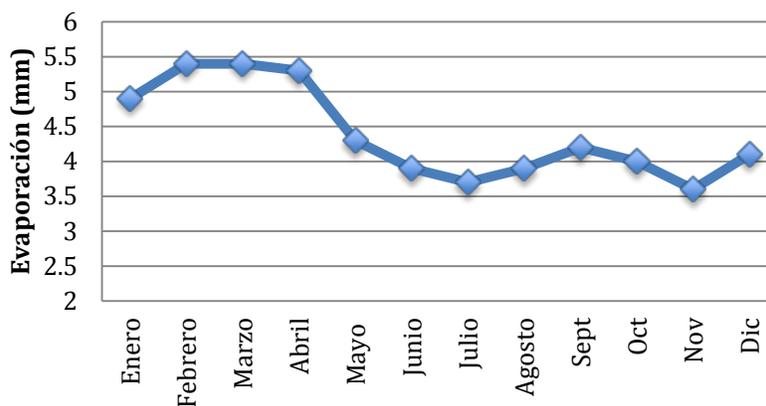


Figura 30. Evaporación Promedio mensual (1984-2009) para la estación meteorológica Damas, Quepos Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m

#### 4.1.1.5 Viento

La zona de Herradura se caracteriza por la influencia de vientos alisios débiles durante la época seca y muy débiles o calmos en la época lluviosa, siendo el viento predominante de oeste-suroeste, con velocidades de hasta 10 km/hora. Cabe destacar que estos vientos vienen cargados de humedad que, al encontrar cerros de alturas superiores a los 600 m.s.n.m, generan precipitaciones. Para el área de estudio, la altura es menor a los 315 m de tal manera que la condensación no es tan intensa, prueba de ello son las precipitaciones intermitentes que se dan en el sitio (Pérez, 1995).

De acuerdo a los datos del IMN la estación Damas no presenta gran variación en la velocidad del viento. Su valor promedio es de 4.4 km/h y su dirección predominante es sur en los meses de noviembre a Enero y dirección este de junio a setiembre, aunque el mes de Octubre presenta ambas direcciones. Las velocidades más elevadas se dan en abril, donde se alcanzan los 4.9 km/h y la velocidad mínima de 4 km/h se da en noviembre.

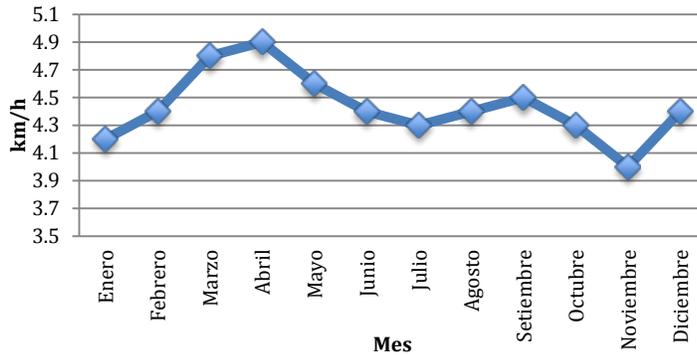


Figura 31. Promedio mensual (1983-2004) de viento para la estación Damas Lat 9 ° 29' N Long 84 ° 12'O; 6m )

En resumen, la precipitación constituye la principal entrada al balance hídrico, por lo que se puede esperar una mayor producción de lixiviado en los meses de mayo, agosto, setiembre y octubre, cuando la precipitación media mensual supera los 400 mm pero no es mayor a 1200 mm.

En los meses de setiembre, octubre y noviembre se dan las menores temperaturas del año, variando de los 23°C - 28°C, siendo en el mes de Octubre en el que se presentan las menores temperaturas. Al mismo tiempo, se da la mayor tasa de evapotranspiración en los meses de enero, febrero, marzo y abril, meses en los que las temperaturas son elevadas y existen más horas de brillo solar.

A partir de estos datos, se considera que los meses críticos en cuanto a la operación del relleno, específicamente producción de lixiviados, son setiembre y octubre; meses en los que la precipitación es muy alta y las temperaturas muy bajas. Esto ocasionaría un incremento en producción de lixiviados y parámetros fisicoquímicos, de manera que algunos como materia orgánica disuelta: sólidos suspendidos, sólidos totales y DBO; aumentarían debido a una mayor dilución del suelo y materia orgánica en el lixiviado ocasionado por la precipitación, además del arrastre del suelo y fenómenos de erosión.

Sin embargo, la calidad en cuanto a macrocompuestos inorgánicos se puede ver disminuida debido a la dilución de éstos.

La cobertura vegetal se debe incrementar para favorecer la transpiración y disminuir la temperatura a nivel del suelo. De esta manera se disminuye la evaporación de la humedad que contienen los residuos sólidos enterrados, además de favorecer la escorrentía del agua en la superficie del terreno. Por otra parte, se debe aprovechar el viento como factor de eliminación y traslado de humedad, además de oxigenar y enfriar el interior de las celdas.

#### 4.1.2 Determinación de la producción de lixiviados

Según lo planteado en la metodología, los caudales obtenidos son muy diversos y se muestran en el siguiente cuadro:

**Cuadro 9. Caudales mínimos máximos y promedio determinados para el relleno sanitario de Garabito en el periodo de del 7 de octubre 2011 al 5 noviembre 2011**

| Caudal | l/s    | m <sup>3</sup> /día |
|--------|--------|---------------------|
| Max    | 4.5    | 382                 |
| min    | 0.0050 | 0.44                |
| Prom   | 0.60   | 52                  |

El mayor caudal generado durante las mediciones fue de 4.4 l/s, equivalente a 382 m<sup>3</sup> /día, el cual se dio después de una fuerte precipitación y horas de realizar una recirculación del lixiviado en el relleno. Por otro lado, el caudal máximo bajo condiciones de lluvia fue de 3.2 l/s (273 m<sup>3</sup> /día ), mientras que el caudal promedio de las mediciones consideradas es de 0.6 l/s. Si se consideraran las mediciones en las que se realizó recirculación, el caudal promedio es de 0.74 l/s. Finalmente, el caudal mínimo se presentó en condiciones posteriores a una lluvia y fue de 0.44 m<sup>3</sup> /día, equivalente a 0.005 l/s.

Este último caudal coincide con el promedio del 3% de la precipitación, cálculo teórico planteado por Ehrig (1992). Al cuantificar la producción lixiviados de este modo, para la precipitación de Damas (1984- 2009) el menor caudal generado es de 0.04 m<sup>3</sup> /día. El mayor caudal es de 0.88 m<sup>3</sup> /día con un promedio de 0.45 m<sup>3</sup> /día.

Sin embargo para precipitación de la estación Club del Mar, en el período 2005-2011, el promedio anual de producción de lixiviados es de 0.036 m<sup>3</sup>/día.

En el siguiente cuadro se encuentran los caudales obtenidos a partir de las mediciones ejecutadas. Fueron enumeradas de acuerdo al orden en que fueron realizadas, considerando el día, la fecha, la hora y la precipitación que se presentó ese día.

**Cuadro 10. Caudales obtenidos para la laguna de lixiviados del relleno sanitario en el periodo del 7 de octubre 2011 al 6 de noviembre 2011**

| Medición | Día       | Fecha    | Hora  | Caudal<br>(l/s) | Caudal<br>(m <sup>3</sup> /d) | Precipitación<br>(mm) |
|----------|-----------|----------|-------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| 6        | Viernes   | 7/10/11  | 14:30 | 4.4             | 381                           | 22                    |
| 7        | Sábado    | 8/10/11  | 12:00 | 0.39            | 34                            | 22                    |
| 8        | Lunes     | 10/10/11 | 7:24  | 0.19            | 17                            | 195                   |
| 9        | Martes    | 11/10/11 | 7:00  | 1.4             | 121                           | 172                   |
| 12       | Miércoles | 12/10/11 | 15:00 | 0.31            | 27                            | 71                    |
| 13       | Jueves    | 13/10/11 | 7:00  | 0.68            | 59                            | 21                    |
| 14       | Jueves    | 13/10/11 | 12:00 | 0.68            | 58                            | 21                    |
| 15       | Viernes   | 14/10/11 | 7:00  | 0.18            | 15.                           | 12                    |
| 16       | Viernes   | 14/10/11 | 12:30 | 1.2             | 100                           | 12                    |
| 17       | Domingo   | 16/10/11 | 15:00 | 0.51            | 44                            | 22                    |
| 18       | Domingo   | 16/10/11 | 17:50 | 3.2             | 273                           | 22                    |
| 19       | Lunes     | 17/10/11 | 8:48  | 0.21            | 18.                           | 43                    |
| 20       | Jueves    | 27/10/11 | 7:00  | 0.030           | 2.6                           | 0                     |
| 21       | Jueves    | 27/10/11 | 14:06 | 0.019           | 1.6                           | 0                     |
| 22       | Viernes   | 28/10/11 | 6:30  | 0.0066          | 0.56                          | 0                     |
| 23       | Viernes   | 28/10/11 | 12:00 | 0.24            | 21                            | 0                     |
| 24       | Sábado    | 29/10/11 | 12:00 | 0.06            | 5                             | 3.7                   |
| 25       | Sábado    | 29/10/11 | 16:40 | 0.82            | 70                            | 3.7                   |
| 26       | Domingo   | 30/10/11 | 1:00  | 0.027           | 2                             | 0                     |
| 27       | Lunes     | 31/10/11 | 6:10  | 0.055           | 5                             | 27                    |
| 29       | Jueves    | 3/11/11  | 8:30  | 0.12            | 10.                           | 18                    |
| 30       | Jueves    | 3/11/11  | 3:40  | 0.12            | 11                            | 18                    |
| 31       | Viernes   | 4/11/11  | 5:40  | 0.42            | 36                            | 119                   |
| 32       | Viernes   | 4/11/11  | 13:00 | 0.35            | 30                            | 119                   |
| 33       | Viernes   | 4/11/11  | 17:34 | 0.005           | 0.43                          | 119                   |
| 34       | Sábado    | 5/11/11  | 7:20  | 0.14            | 12                            | 2.1                   |

Es importante aclarar que la precipitación fue considerada diaria, ya que en la mayoría de los días fue una lluvia constante pero leve durante todo el día o lluvias fuertes esporádicas en las que es difícil determinar un momento o rango de horas en las que ocurrió más lluvia para hacer la medición y compararla.

A partir de las variaciones de precipitación y producción de lixiviados, de acuerdo a la literatura estudiada, se plantea la correlación precipitación-caudal para las mediciones que no se ven alteradas por la recirculación. Sin embargo no se genera alguna relación o ecuación .

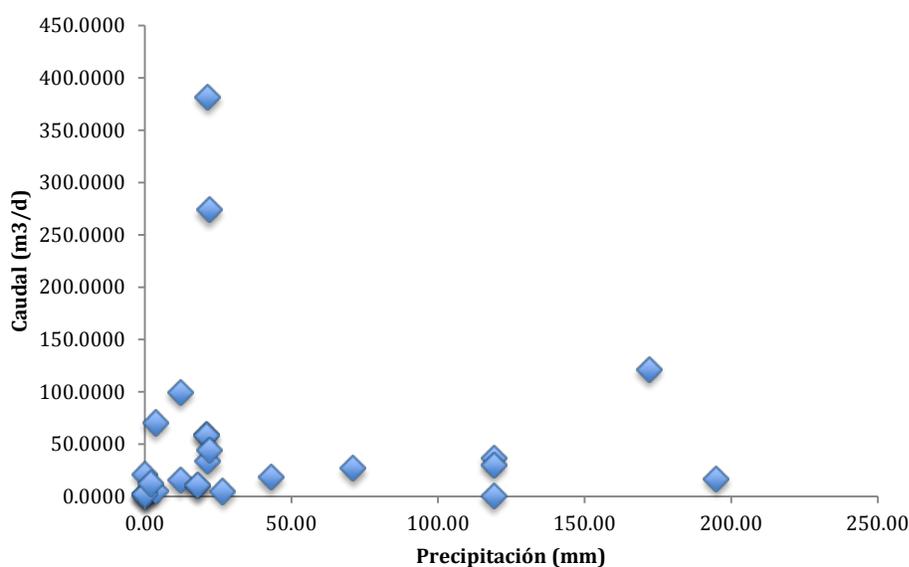


Figura 32. Análisis de la precipitación vs caudal

En todo caso, la posible correlación habría sido determinada únicamente para el mes de octubre del año 2011, por lo que se acude a otros métodos para la determinación de caudales y su variación durante el año.

En general, se observa un patrón entre los aumentos de precipitación y el aumento de caudal, tal es el caso de las mediciones 8, 9, 14, 17, 18, 19, 20, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34; como se puede observar en la Figura 33.

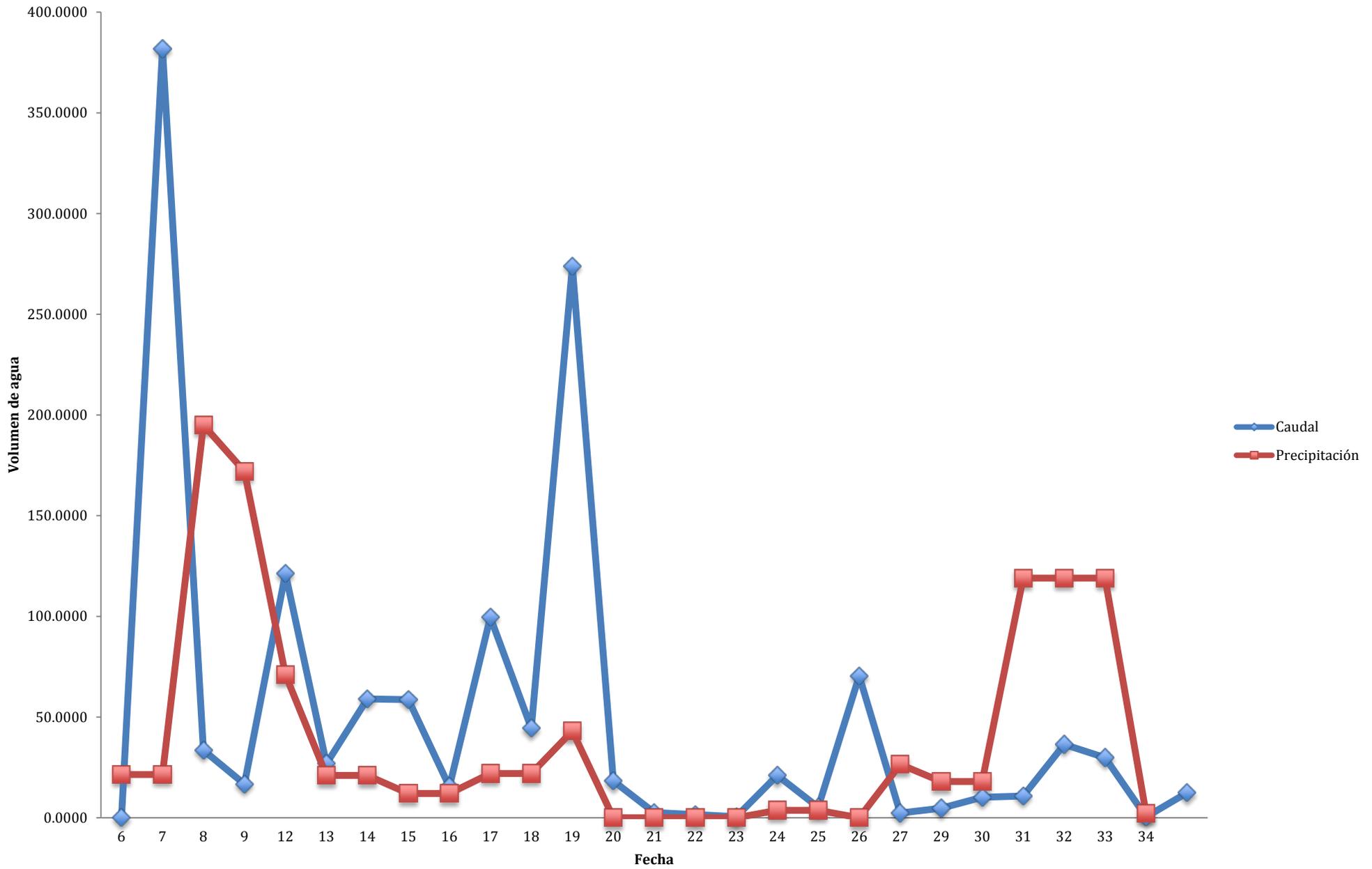


Figura 33. Variación del caudal (m3/día) y la precipitación (mm) para el relleno sanitario de Garabito en el periodo de del 7 de octubre 2011 al 6 de octubre 2011

En este caso, no es posible realizar una predicción mediante el modelo HELP, ya que se requieren los datos diarios de al menos 5 años de: precipitación, temperatura, radiación solar, información del suelo como su porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica y pendiente del terreno. Datos para los que sería necesario realizar un estudio de suelo para el área del relleno sanitario de Garabito.

Otro método utilizado para la predicción de la producción de lixiviados es el “water balance method” propuesto por Thornwaite (1975), obteniendo los siguientes resultados (Cuadro 11. Predicción de la producción de lixiviados mediante el método de balance de agua de Thornwaite). Para su elaboración se utilizaron los datos promedios mensuales de evapotranspiración y precipitación expuestos anteriormente. El coeficiente de escorrentía 0,18 para suelos compactos con una pendiente promedio de 2-7%. La humedad almacenada en el suelo para limos arcillosos es de 150.

**Cuadro 11. Predicción de la producción de lixiviados mediante el método de balance de agua de Thornwaite**

| <b>Mes</b>        | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</b> |
|-------------------|-----------------------------------|
| <b>Enero</b>      | 1,0                               |
| <b>Febrero</b>    | 3,1                               |
| <b>Marzo</b>      | 2,6                               |
| <b>Abril</b>      | 7,4                               |
| <b>Mayo</b>       | 41                                |
| <b>Junio</b>      | 29                                |
| <b>Julio</b>      | 28                                |
| <b>Agosto</b>     | 34                                |
| <b>Septiembre</b> | 47                                |
| <b>Octubre</b>    | 56                                |
| <b>Noviembre</b>  | 23                                |
| <b>Diciembre</b>  | 8,3                               |

En comparación con las mediciones realizadas el caudal mínimo, presentado en enero, es mayor a los 0.44 m<sup>3</sup>/día determinados por el método volumétrico. Y el valor promedio calculado, 23.3 m<sup>3</sup>/día, es menor al obtenido por las mediciones realizadas (52 m<sup>3</sup>/día).

### 4.1.3 Determinación de la composición de lixiviados

La caracterización de los lixiviados se presentan en el Cuadro 12, donde se pueden apreciar las concentraciones (mg/l) de diversos parámetros en el lixiviado. En este se resumen los resultados de los análisis fisicoquímicos (2003-2011) solicitados por la municipalidad de Garabito, los espacios en blanco se deben a parámetros no analizados para esa fecha.

Las muestras fueron tomadas en la pileta de lixiviados, en la fecha indicada, aunque las últimas dos muestras pertenecen a la caja de registro de lixiviados de la celda 4 y a la pileta de lixiviados. Los parámetros de mayor relevancia son analizados de acuerdo a su variación temporal y los valores permitidos de acuerdo a la legislación a continuación:

#### 4.1.3.1 pH

El pH varía de 6.5 a 8.3, con intervalos muy variables de niveles ácidos a básicos. Se puede apreciar un pH neutro que se mantuvo en las muestras tomadas y analizadas en el 2011, 2007 y 2010, a excepción de octubre 2010. Dado que el tratamiento biológico del agua residual ocurre generalmente a pH neutro, siendo 7 su valor óptimo (Bitton, 2005), el pH se mantiene dentro de los límites del Decreto 33601, donde los valores permitidos son 5-9.

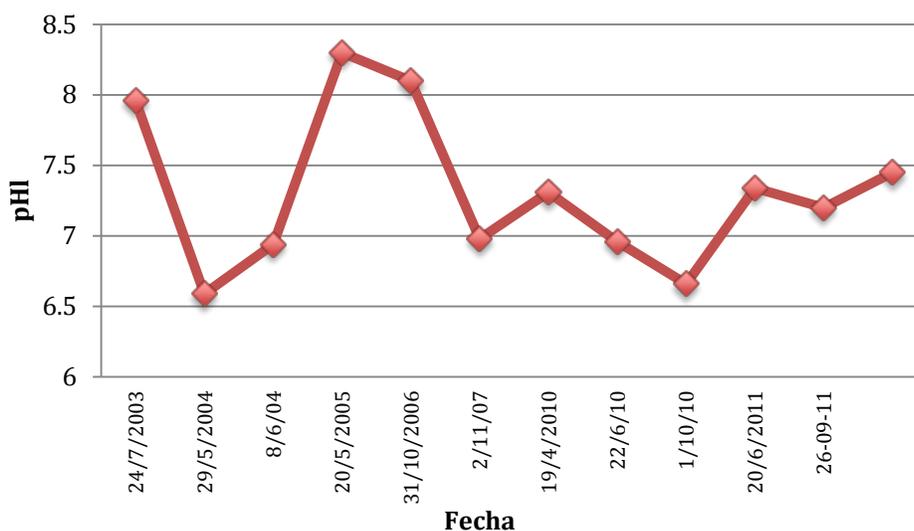


Figura 34. Determinación de pH para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

**Cuadro 12. Características fisicoquímicas del lixiviado del relleno sanitario de Garabito 2003-2011**

| Parámetro                     | 24/7/0<br>3 | 29/5/04 | 8/6/04 | 20/5/05 | 31/10/06 | 2/11/07 | 19/4/10 | 22/6/10 | 1/10/10 | 20/6/11 | 26/09/11 |        |
|-------------------------------|-------------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|--------|
| pH                            | 7.96        | 6.59    | 6.94   | 8.3     | 8.1      | 6.98    | 7.31    | 6.96    | 6.66    | 7.34    | 7.2      | 7.45   |
| Temperatura (°C)              | 25          | 26.4    | 26.9   |         |          |         | 3304    | 29      | 26      | 37      | 29       | 34     |
| Sólidos totales               |             |         | 882    |         | 1666     | 2360    |         | 2648    | 968     | 1448    | 1249     | 4607   |
| Sólidos suspendidos volátiles |             |         |        |         |          |         |         |         |         |         | 40       | 222    |
| Sólidos suspendidos totales,  | 5           | 15      | 93     | 852     |          | 200     | 110     | 32      | 90      | 120     |          |        |
| Sólidos sedimentables, ml/L/H | 0.1         | 0.1     | 0.1    |         |          |         |         |         |         |         |          |        |
| Aceites y grasas mg/L         | 5           | 5       | 5      |         |          |         |         |         |         |         |          |        |
| DQO mg/L                      | 2           | 2.4     | 893    | 505     | 232      | 1900    | 618     | 2170    | 785     | 476     | 526      | 1794   |
| DBO <sub>5,20</sub> mg/L      | 1           | 1.2     | 480    | 340     | 30       | 1100    | 195     | 1380    | 340     | 216     | 290      | 988    |
| Mercurio mg/L                 |             | 0.01    | 0.001  | 0.01    | 0.001    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.001    | 0.01   |
| Níquel mg/L                   |             | 0.02    | 0.02   | 0.01    | 0.05     | 0.05    | 0.15    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.069    | 0.22   |
| Cromo mg/L                    | 0.022       | 0.02    | 0.02   | 0.01    | 0.05     | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.0086   | 0.044  |
| Plomo mg/L                    | 0.01        | 0.02    | 0.02   | 0.19    | 0.01     | 0.05    | 0.05    | 0.09    | 0.05    | 0.05    | 0.001    | 0.01   |
| Cadmio mg/L                   | 0.02        | 0.02    | 0.02   |         |          |         |         |         |         |         | 0.0009   | 0.0009 |
| Zinc mg/L                     | 0.02        | 0.02    | 0.02   |         |          |         |         |         |         |         | 0.05     | 0.05   |
| Cobre mg/L                    | 0.02        | 0.02    | 0.02   |         |          |         |         |         |         |         | 0.04     | 0.04   |
| Nitrógeno amoniacal, mg/L     | 0.1         | 0.1     | 15     |         |          |         |         |         |         |         |          |        |
| Nitratos mg/L                 | 0.1         | 0.5     | 0.5    |         |          |         |         |         |         |         |          |        |
| Fosforo mg/L                  | 4.1         | 11.8    | 10.4   |         |          |         |         |         |         |         | 1.13     | 1      |
| Calcio mg/L                   | 23.3        | 23.4    | 88.2   |         |          |         |         |         |         |         | 122      | 382    |
| Magnesio mg/L                 | 11          | 0.02    |        |         |          |         |         |         |         |         | 76       | 298    |
| manganeso                     | 1.4         | 0.23    | 2.1    |         |          |         |         |         |         |         | 2.9      | 7.8    |
| Hierro mg/L                   | 37          | 5.63    | 2.9    |         |          |         |         |         |         |         | 1.6      | 5.1    |
| Sodio mg/L                    |             |         | 37.5   |         |          |         |         |         |         |         | 67       | 156    |
| Amonio                        |             |         |        |         |          |         |         |         |         |         | 25       | 96     |
| Potasio                       |             |         |        |         |          |         |         |         |         |         | 33       | 109    |
| Nitrógeno                     |             |         |        |         |          |         |         |         |         |         | 0.3      | 497    |

#### 4.1.3.2 Temperatura

La temperatura de los lixiviados analizados es 29 °C en promedio, siendo su temperatura mínima 25 °C y su máxima 37 °C. Esta temperatura se mantiene en el rango permitido por el reglamento de vertido y reúso de aguas residuales 15 - 40 °C

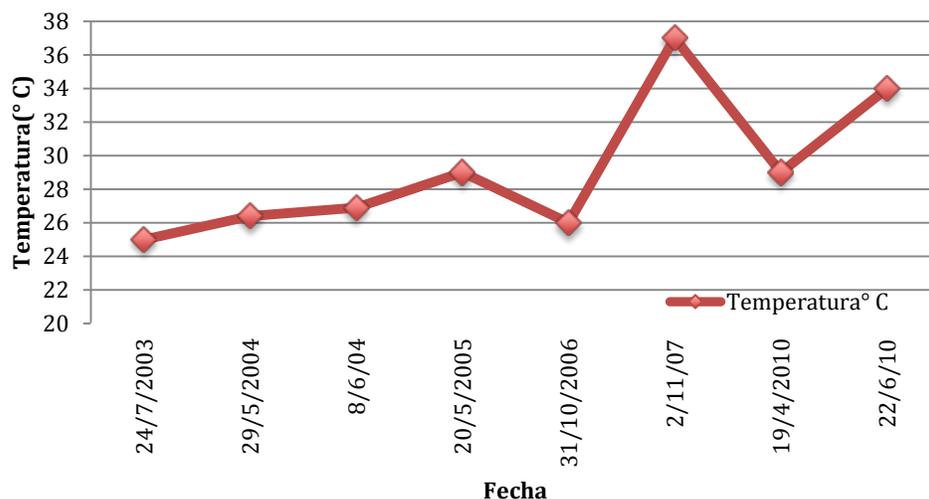


Figura 35 Determinación de Temperatura (°C) para la piletta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

#### 4.1.3.3 DBO y DQO

La DBO y la DQO son utilizados para medir la carga orgánica del lixiviado, su valor promedio es 825 mg/L de DBO y 446 mg/L de DQO. Estos valores aumentan y disminuyen en cada muestra (Figura 36), por lo que no existe ningún patrón cronológico. Estas variaciones se traducen en un incremento o decadencia en la cantidad de oxígeno en el agua debido a la degradación biológica y química de los compuestos orgánicos. De acuerdo con Reinhart y Grosh (1998) cuando las concentraciones de DBO y DQO son bajas, ya que son menores a 500 mg/L, su posible causa es dilución o etapa metanogénica.

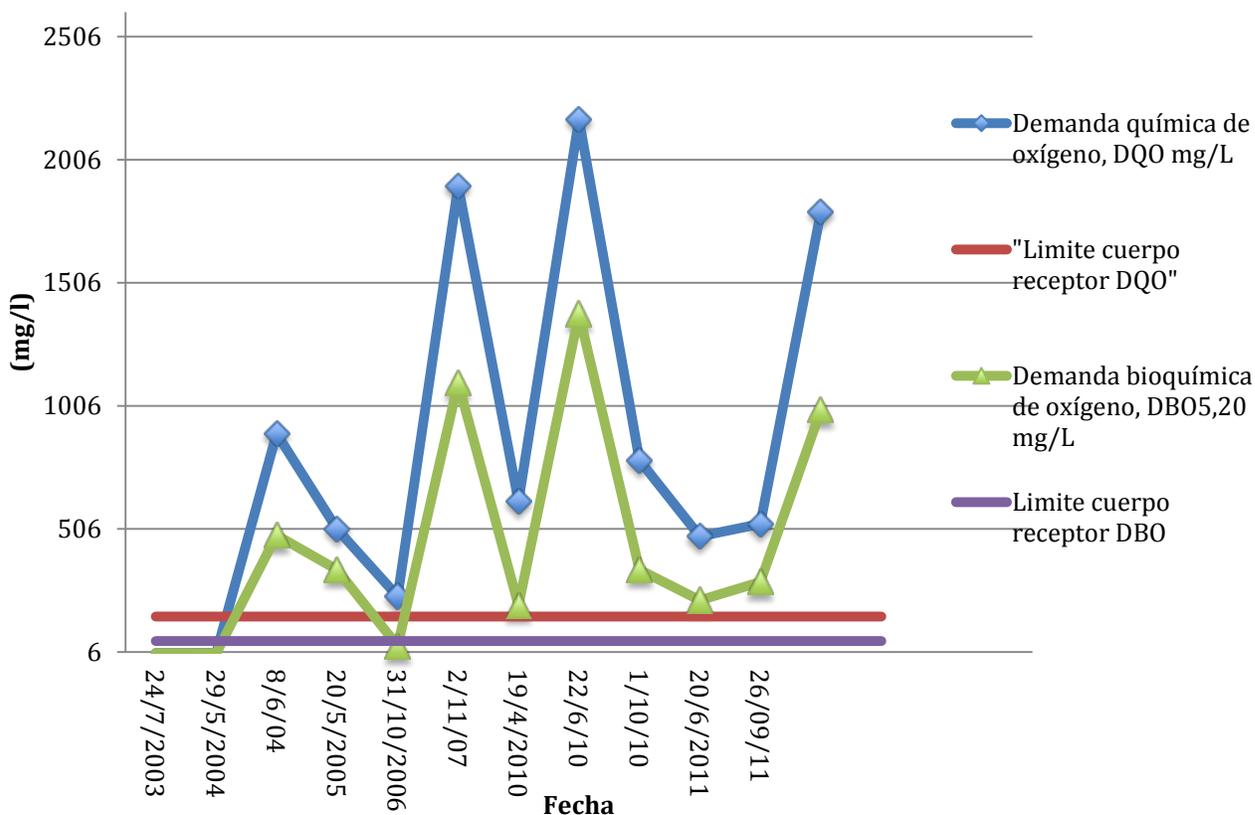


Figura 36. Determinación de DBO y DQO (mg/l) para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

En el caso del relleno sanitario de Garabito, la causa más probable es la dilución, ya que no existen sistemas de recolección o dirección de las aguas pluviales ni tampoco una cobertura impermeabilizadora. La etapa metanogénica no es una posibilidad debido a que el lixiviado de este relleno, a pesar de tener 11 años de operación, presenta valores de  $DBO_5/DQO$  promedio de 0.48 (Cuadro 6) y por consiguiente se puede situar al relleno sanitario en la etapa de fermentación ácida, ya que su índice de biodegradabilidad es superior a 0.4 (Méndez, 2002)

Es importante tomar en cuenta que, según la clasificación de Reinhart y Grosh (1998), las concentraciones del relleno sanitario de Garabito de DQO y DBO son similares a las de la fase 2 de operación del relleno sanitario en la etapa de transición (DQO 480-1800 mg/l) o en los inicios de la fase 3 formación de ácido (DQO 1500 -71100 mg/L).

En este mismo estudio se muestran los resultados de DBO/DQO de otros investigadores , donde la relación entre estos parámetros desciende de 0.47 a 0.07 en un periodo de 23 años, o de 0.49 - a 0.05. Las curvas de variación del índice DBO/DQO vs la edad del relleno descienden después de los 5 años de operación. En el relleno sanitario de Garabito no se muestra un patrón de descenso de este indicador (Cuadro 13)

El DBO y DQO para la pileta de lixiviados se encuentran sobre los niveles permitidos para vertido en cuerpo receptor y para reúso tipo 1 y 8, cuyos valores límite son DBO 50 mg/l y DQO 150 mg/l. Al analizar los valores permitidos para rellenos sanitarios cuyos limites son 300 mg/l de DBO y 1000 mg/l de DQO, se observa que las muestras del 2004, 2005, 2007, 2010 y 2011 también incumplen la normativa

**Cuadro 13. Índice de biodegradabilidad para el lixiviado del relleno sanitario de Garabito 2002-20011**

| Índice      | 24/7/03 | 29/5/04 | 8/6/04 | 20/5/05 | 31/1/06 | 2/11/07 | 19/4/10 | 22/6/10 | 1/10/10 | 20/6/11 | 26/09/11 |      |
|-------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|------|
| DBO/<br>DQO | 0.5     | 0.5     | 0.54   | 0.67    | 0.13    | 0.58    | 0.32    | 0.64    | 0.43    | 0.46    | 0.55     | 0.55 |

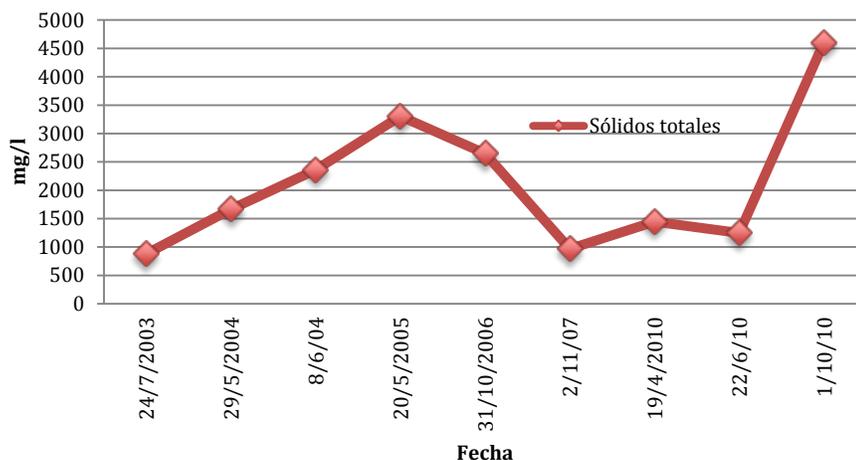
La remoción de amoníaco y de DQO depende principalmente del pH del lixiviado y de la cantidad de DQO que este compuesto por ácidos orgánicos volátiles. En pH bajo el amoníaco se transforma en amonio y no se vaporiza, si el pH se muestra ácido puede ser posible un evaporado con bajas concentraciones de amoníaco y ácidos orgánicos volátiles (Rehman, 2003)

#### **4.1.3.4 Sólidos Totales y Suspendidos**

Los sólidos totales son en promedio 21 256 mg/L, de los análisis utilizados como referencia el valor mínimo es de 882 mg/L y el máximo de 4 607 mg/L.

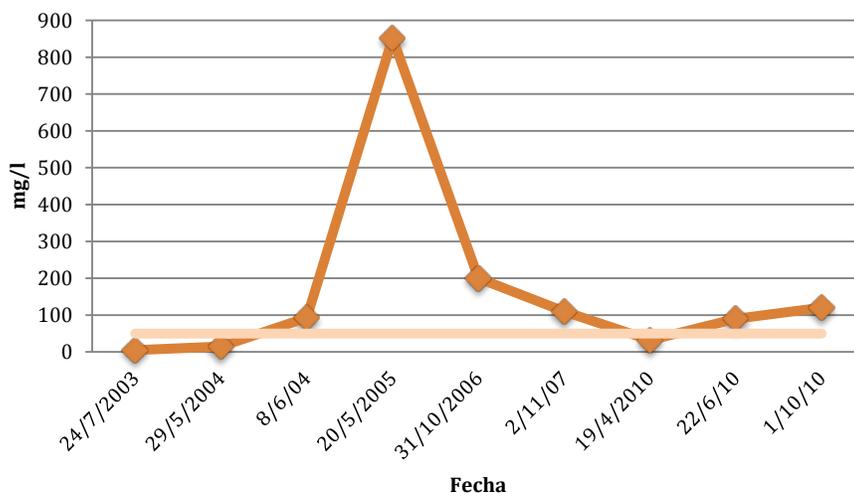
Los sólidos suspendidos totales se encuentran en promedio alrededor de 168 mg/l en un rango de 5- 852 mg/l. De las 9 muestras solo tres se encuentran por debajo del límite según el Decreto 33601 de 50 mg/L para un cuerpo receptor y específicamente para los rellenos sanitarios es de 200 mg/l y solo la muestra del 2007 incumple dicha regulación.

Los sólidos sedimentables determinados para las muestras de los años 2003 y 2004 son de 0,1 ml/l/h, siendo bajos y no sobrepasan el límite de 1ml/l. Por otro, lado los sólidos volátiles determinados únicamente para las muestras de Septiembre 2011 muestran valores de 40 y 222 mg/L



**Figura 37. Determinación de Sólidos Totales(mg/l) para la piletta de lixiviados relleno sanitario de Garabito**

Se puede observar que las concentraciones de sólidos suspendidos totales son altas y sobrepasan la norma, por lo que el sistema debe de ser capaz de disminuir estas concentraciones eficientemente.



**Figura 38. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales(mg/l) para la piletta de lixiviados relleno sanitario de Garabito**

#### 4.1.3.5 Compuestos Inorgánicos

Las concentraciones de los compuestos inorgánicos dependen de la estabilización del relleno sanitario, de la composición de los desechos y del manejo del sitio. Dadas las características del relleno sanitario de Garabito, las cantidades observadas de mercurio, níquel y cromo son inferiores a 0.05 mg/l, con excepción del níquel en las muestras del 2/11/07 y 26/9/07. En esta última, obtenida de la caja de registro de la celda 4, el aumento en la concentración de Níquel se debe posiblemente a residuos depositados en el área de relleno de esta celda.

Las concentraciones de cadmio, zinc, cobre, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo, calcio, magnesio, manganeso, hierro, sodio, amonio, potasio y nitrógeno, también se mantienen por debajo de los límites de detección del equipo y son constantes. Se debe posiblemente a la composición de los desechos en el área de relleno, pues estos son únicamente domésticos.

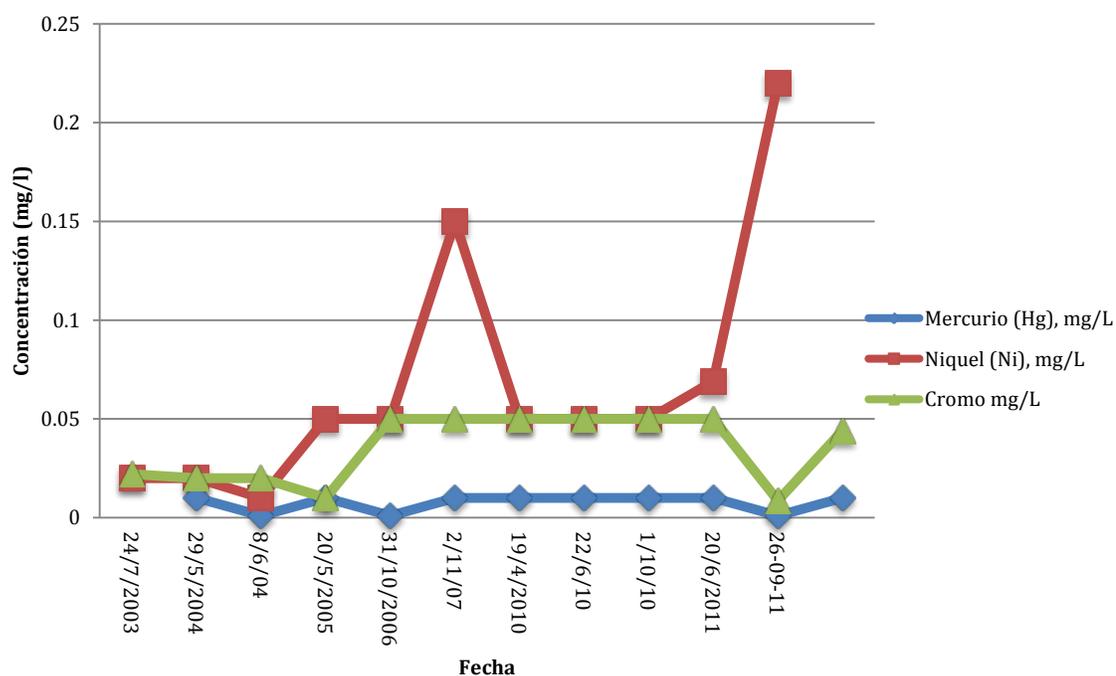


Figura 39. Determinación de mercurio, níquel, cromo y plomo para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

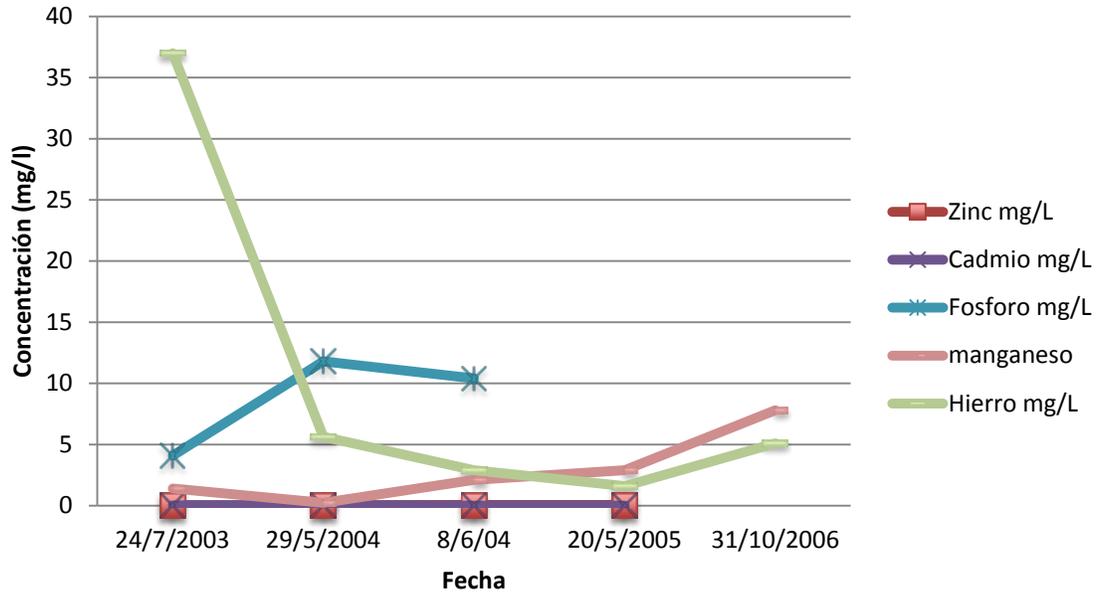


Figura 40. Determinación de cobre, zinc, cadmio, fósforo, mangneso, hierro para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

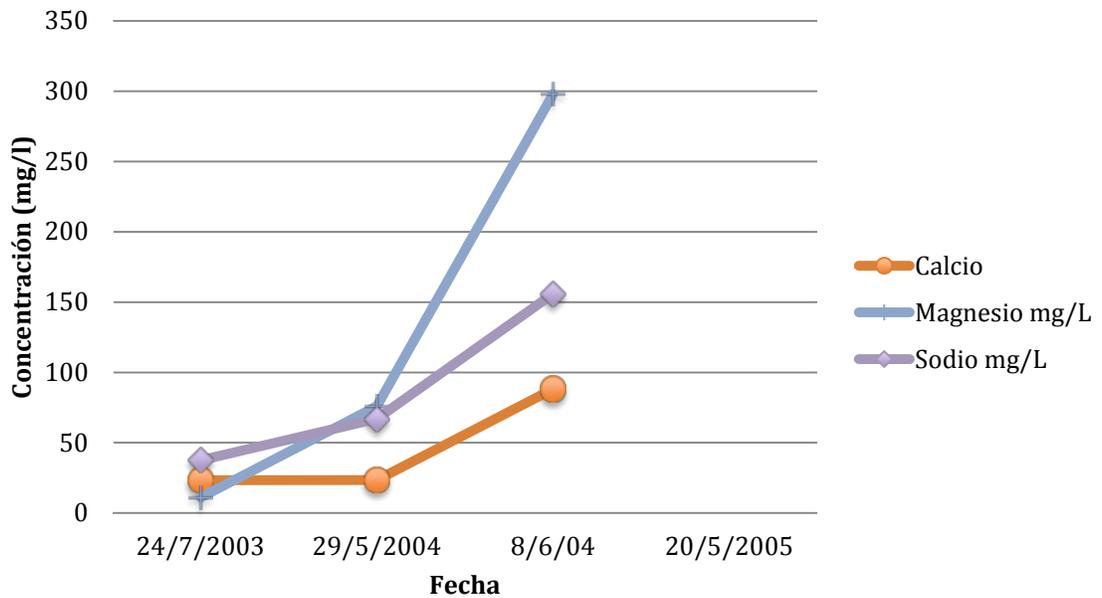


Figura 41 Determinación de calcio, magnesio y sodio para la pileta de lixiviados relleno sanitario de Garabito

Los metales pesados son compuestos solubles o productos de los procesos físicos como corrosión o formación de complejos. En Garabito no se presentan concentraciones altas de metales pesados, pues la altura del área de relleno, que no supera hoy en día los 12 m, probablemente hace que el líquido (humedad, precipitación, etc.) no tenga el suficiente tiempo de contacto para diluir estos compuestos de los residuos.

En ambas fases de la degradación anaeróbica, las diferentes condiciones ambientales producen diferencias en la solubilidad de algunos metales, cuyo rango de concentración se correlaciona estrechamente con los parámetros orgánicos (Ehrig, 2002), sin embargo, para el relleno sanitario de Garabito no existe tal correlación. Esto se da posiblemente por la segregación de desechos en el sitio y el comportamiento de los metales que se precipitan en el área de relleno, lo cual hace que sea poco frecuente encontrar altas concentraciones de estos en el lixiviado, con excepción del hierro (Maximova, 2006).

A pesar de que no se muestrearon compuestos orgánicos volátiles no iónicos, como el tolueno, Rehman (2003) resume una simulación de evaporación flash en la que se encontró un 74 - 76 % del tolueno total con un pH de 4, 6.2 y 10. No existió variación de la concentración de acuerdo al pH, de lo que se deduce que si hay una cantidad significativa de algún compuesto orgánico volátil no iónico en el lixiviado, se deben tomar medidas extras u operación unitaria para obtener la cantidad necesaria en la calidad del evaporado. Otros estudios de evaporación de lixiviados resumidos por este mismo autor, indican que para COV como el fenol la remoción fue de 50%.

Se estima que el relleno sanitario de Garabito se encuentra en la etapa de transición a la fase de fermentación ácida o inicios de esta etapa. El pH se mantiene dentro de los límites determinados por la legislación y sus valores neutros en los últimos tres análisis favorecen un tratamiento biológico. Las concentraciones más altas que además incumplen con lo establecido en el reglamento de vertido y reúso de aguas residuales son DBO, DQO y sólidos suspendidos. Aunque las concentraciones de los compuestos inorgánicos y metales pesados sea mínima, el sistema de tratamiento debe tener capacidad de control sobre algunas altas concentraciones de estos compuestos que se puedan presentar, ya que se puede dar un vertido ocasional de algún compuesto que genere una elevación de la concentración de éstos.

## 4.2 Alternativas para el tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito

Los tratamientos disponibles, para los lixiviados generados en un relleno sanitario, son tan variados como la composición y niveles de producción de éstos. Se deben considerar las principales variables para establecer la solución idónea ante el problema de posibles impactos ambientales ocasionado por los lixiviados, sin embargo, no existe una solución única para su tratamiento y las condiciones que lo afectan varían de acuerdo al sitio. Tomando en cuenta esta diversidad de entornos, a continuación se analizan los sistemas probables de tratamiento de los lixiviados en el relleno sanitario de Garabito y posteriormente se determina el método idóneo.

Según Metcalf y Eddy, a partir de los compuestos de los lixiviados; que incluyen materia orgánica, sólidos en suspensión, metales pesados, compuestos inorgánicos y otros detallados en el Cuadro 2; se enlistan las operaciones, procesos unitarios, y sistemas de tratamiento para eliminar la mayoría de los contaminantes en el agua residual, tal como se puede apreciar seguidamente:

**Cuadro 14. Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en el agua residual**

| Contaminante                   | Operación unitaria/ Proceso unitario o sistema de tratamiento  |
|--------------------------------|--|
| Sólidos en suspensión          | Desbaste Desarenado Sedimentación Filtración, flotación, adición de polímeros, Coagulación/ sedimentación, sistemas naturales.   |
| Materia orgánica biodegradable | Lodos activados, filtros percoladores, Discos rotatorios de película fina, variantes lagunaje, filtración arena, sistemas fisicoquímicos, sistemas naturales   |
| Nutrientes                     | Variantes de cultivo en suspensión, Variantes de sistemas de película fija, arrastre de amoníaco, intercambio iónico, cloración al breakpoint, sistemas naturales, eliminación biológica de nutrientes |
| Metales pesados                | Precipitación química, intercambio iónico, sistemas de tratamiento por evacuación al terreno   |
| Lodos                          | Espesamiento, estabilización, Acondicionamiento, Desinfección, Deshidratación, Secado térmico, Reducción Térmica, evacuación final   |

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

De acuerdo con las composiciones de los lixiviados presentadas en el cuadro 12, se concluye que las cargas de contaminantes más elevadas para los lixiviados del relleno sanitario de Garabito son de los sólidos en suspensión y materia orgánica biodegradable. También se presentan cantidades mínimas de nutrientes como fósforo y nitrógeno, y existe la posibilidad de encontrar metales pesados que influyen en la selección de operaciones unitarias requeridas para eliminar la mayoría de los contaminantes.

Para las alternativas planteadas se consideran los tipos de tratamiento siguientes:

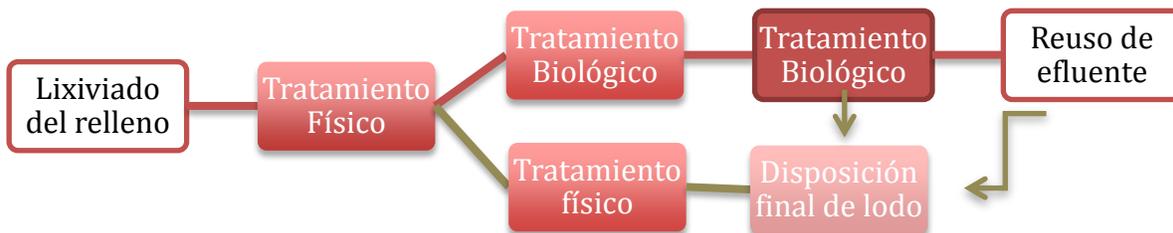
- Físico: como pre-tratamiento y tratamiento primario para eliminar sólidos de mayor tamaño, así como sólidos suspendidos y totales, en especial los de mayor facilidad de separación. demás evitar problemas operacionales en el equipo y tuberías.
- Biológico: como tratamiento primario y secundario, eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión restante. Se contempla también un tratamiento aerobio u anaerobio para la eliminación de la DBO y eliminación de fósforo y nitrógeno. El tratamiento terciario, de pulimento final también será de tipo biológico, con el objetivo de remover organismos patógenos y asegurando la calidad del efluente.
- Tratamiento de lodos: estabilizar los lodos para una disposición adecuada.

Se descarta la necesidad de un tratamiento químico, ya que la composición mostrada por estos lixiviados no posee valores de DQO, ni de metales pesados elevados con respecto a los rellenos sanitarios. Por otro lado, las concentraciones de materia orgánica son elevadas, por lo que la mejor eliminarla es por medio un tratamiento biológico; primero por la reducción de insumos, segundo para no generar dificultades operativas y tercero por un lodo menos cargado de compuestos químicos aportados por los coagulantes, floculantes y antiespumantes, lo cual permite un lodo más fácil de tratar y de disponer adecuadamente. Además, las cargas contaminantes pueden ser disminuidas eficientemente por tratamiento físicos y biológicos como alternativa al tratamiento físico-químico que si bien presenta ventajas importantes, resulta altamente oneroso y requiere mayores cuidados en su implementación, según se muestra en el Cuadro 15.

**Cuadro 15. Ventajas y desventajas para los tratamientos biológicos y Físico-químicos para el tratamiento de los lixiviados**

| Tratamiento    | Ventajas   | Desventajas   |
|----------------|--|---|
| Biológico      | Transformación de complejos orgánicos y adsorción de metales pesados por microorganismos | Disposición adecuada del lodo generado<br>Mayores periodos de arranque<br>Baja sensibilidad a cargas orgánicas y compuestos tóxicos<br>Tratamientos adicionales |
| Físico-Químico | Produce efluentes de alta calidad<br>Se adapta a variaciones de caudal y composición     | Dificultad de operación<br>Labores que requieren alta habilidad de operación<br>Alto capital de inversión<br>Altos costos operacionales                         |

Según lo detallado anteriormente, el diagrama general del proceso necesario para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario propuesto es el siguiente:



**Figura 42. Tipos de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito**

De acuerdo con el tipo de tratamiento requerido se seleccionan procesos unitarios posibles para su aplicación en el relleno sanitario de Garabito. Con base en estos, se proponen tres alternativas, para cada una las cuales se detalla en qué consiste el sistema y sus características. En resumen, las operaciones unitarias para cada sistema son. En resumen las operaciones unitarias para cada sistema son el sedimentador para la remoción de sólidos totales, suspendidos y alguna fracción de materia orgánica.

Para disminuir la DBO, DQO, algunos nutrientes, y posibles metales: destilador solar activo, lagunas y reactor. Además de un humedal como pulido y obtener una calidad óptima del efluente final obedeciendo la legislación.

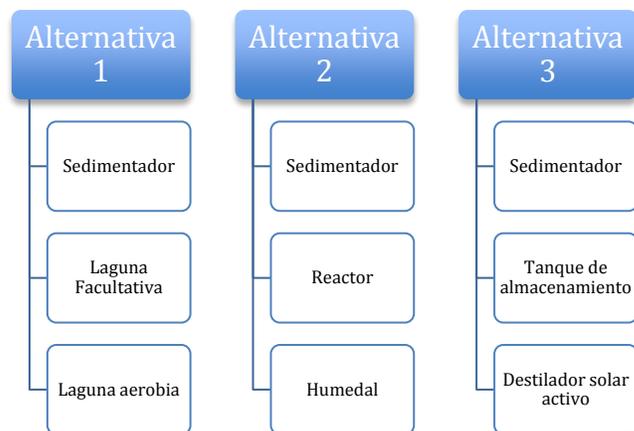


Figura 43. Configuración de operaciones unitarias alternativas para el sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Garabito

#### 4.2.1 Ingreso al sistema

Se debe garantizar un ingreso al sistema que favorezca el uso de las estructuras construidas anteriormente. La problemática de diseño hidráulico actual, debe ser solucionada para evitar los problemas de rebalse de lixiviados en la caja de registro, celda o canal de rebalse.

#### 4.2.2 Pretratamientos propuestos

##### 4.2.2.1 Sedimentación primaria

Por medio de la sedimentación las partículas suspendidas, cuyo peso específico es mayor que el del agua, se separan por acción de la gravedad al igual que grasas y aceites (de menor densidad que el agua). Estas partículas son inferiores a 0,2 mm y superiores a 0,05 mm, alcanzando rendimientos de eliminación de DBO y DQO de 30-40 %, sólidos suspendidos 50-65% , fósforo total 10 - 20% , nitrógeno orgánico 10-20% (Metcalf & Eddy, 1996)

La sedimentación tipo 4, en la que se realiza para soluciones de alta concentración, se basa en formar una estructura en las partículas que va modificándose con el tiempo. Este tipo se realiza para partículas cuyo comportamiento conjunto de los sólidos hace que éstas formen un manto de lodos que flota en el líquido, posiblemente debido a las interferencias mutuas entre partículas. (Arboleda, 2000)

El volumen fue calculado como se detalló en la metodología, así, a partir de éste, se determinan las siguientes fórmulas para los otros cálculos requeridos.

Fórmulas utilizadas

$$A = \frac{(Bm + Bn) * h}{2} \quad Tr = \frac{Q}{V} \quad N = Ls * sen\theta \frac{d}{d + e}$$

**Ec. 1**

**Ec. 2**

**Ec. 3**

Donde:

A: Área

Bm: Base mayor

Bn: Base menor

h: Altura

Tr: Tiempo de retención

Q: Caudal

V: Volumen

N: Número de placas

Ls: Longitud zona de sedimentación

E: Espesor de placas

θ: Ángulo recomendado

d: Espaciamiento entre placas

### **4.2.3 Alternativa 1: Sistema de tratamiento por lagunas**

#### **4.2.3.1 Estanques de estabilización**

También llamado estanque o laguna de oxidación, consiste en una masa de agua relativamente poco profunda contenida en un tanque excavado en el terreno. Sus costos de construcción y explotación son reducidos. Este tratamiento ha sido utilizado en unidades independientes o en forma de combinaciones de unidades, para tratamientos de aguas domésticas e industriales desbastadas o provenientes de una sedimentación primaria.

Se clasifican en función de la naturaleza de la actividad biológica que tiene lugar. Para el tratamiento primario del relleno sanitario se plantean dos estanques, uno facultativo y otro aerobio de cultivo en suspensión en serie y de entradas múltiples, para mejorar la distribución hidráulica y el rendimiento.

### ***Laguna Facultativa***

Este tipo de laguna tiene una zona aerobia y otra anaerobia. Normalmente en la parte superficial se encuentra la aerobia y en el fondo la anaerobia. La degradación de la materia orgánica se da por microorganismos facultativos, es decir, aquellos que pueden degradar en condiciones con y sin presencia de oxígeno .

Algunas ventajas de este sistema son la eliminación de microorganismos patógenos, pueden utilizarse en el tratamiento de aguas industriales con alto contenido en material biodegradable, y su bajo costo de inversión y operación

En cuanto al diseño, su flujo debe dirigirse en la dirección en la que el agua residual recorra la mayor distancia posible. También se plantean entradas múltiples para optimizar el flujo y favorecer una corriente leve y disminución de cortos circuitos, esto es, lo más cercano al regimen de flujo de pistón. Esta sería construida impermeabilizando su base, se propone para ello geotextil, siguiendo las recomendaciones del proveedor para su instalación y de acuerdo con los siguientes parámetros de diseño.

**Cuadro 16. Criterios de diseño para un estanque facultativo**

| <b>Criterio</b>               | <b>Intervalo</b> | <b>Valor típico</b> |
|-------------------------------|------------------|---------------------|
| <b>Tr teórico, d</b>          | 5 a 30           | 10                  |
| <b>h Profundidad (m)</b>      | 1.2 – 2.4        | 1.5                 |
| <b>Cs teórica (kg/ha*día)</b> | 56-200           | 60                  |
| <b>Eficiencia</b>             | 80 - 95 %        | 80                  |

Fórmulas utilizadas

$$A = \frac{Cs}{CO}$$

Ec. 4

$$V = A * h$$

Ec. 5

Donde:  
A: Área  
Cs: Carga superficial

CO: Carga orgánica  
V: Volumen  
h: altura

### ***Laguna aerobia***

Sistema de tratamiento de agua residual que contienen relativamente pocos sólidos en suspensión y en ellas se produce la degradación de la materia orgánica, mediante la actividad de bacterias aerobias que consumen oxígeno producido fotosintéticamente por las algas. Básicamente se diferencian de las facultativas por sus criterios de diseño presentados en el siguiente cuadro.

**Cuadro 17. Criterios de diseño para un estanque aerobio**

| Criterio               | Intervalo | Valor típico |
|------------------------|-----------|--------------|
| Tr teórico d           | 10 a 40   | 10           |
| h Profundidad (m)      | 0.9 – 1.2 | 0.9          |
| Cs teórica (kg/ha*día) | 67- 134   | 70           |
| Eficiencia             | 80 – 95 % | 80           |

Fórmulas utilizadas

$$A = \frac{V}{h} \text{ Ec. 6}$$

A: Área V: Volumen h: altura

#### **4.2.4 Alternativa 2: reactor anaerobio**

##### ***Reactor Anaerobio***

Utilizado como tratamiento primario, el procedimiento anaerobio de cultivo en suspensión, tiene como objetivo eliminar residuos de alto contenido en materia orgánica. En el proceso anaerobio de manto de fango de flujo ascendente (UASB), el agua se introduce por la parte inferior del reactor, el agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodo constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. (Metcalf & Eddy, 1996).

El reactor no contiene ningún relleno para soportar el crecimiento biológico, por lo que el lodo formado en el reactor, puede considerarse dividido en dos zonas. La zona 1, se llama “lecho de lodo” y la zona 2 “manta de lodo”. La diferencia entre las dos zonas, estriba en que el lodo en la primera es mucho más compacto que en la segunda.

La biomasa generada en el UASB está formada por gránulos de 2-4mm con altas velocidades de sedimentación, por consiguiente son retenidas casi totalmente en el reactor. (Ramalho, 1993)

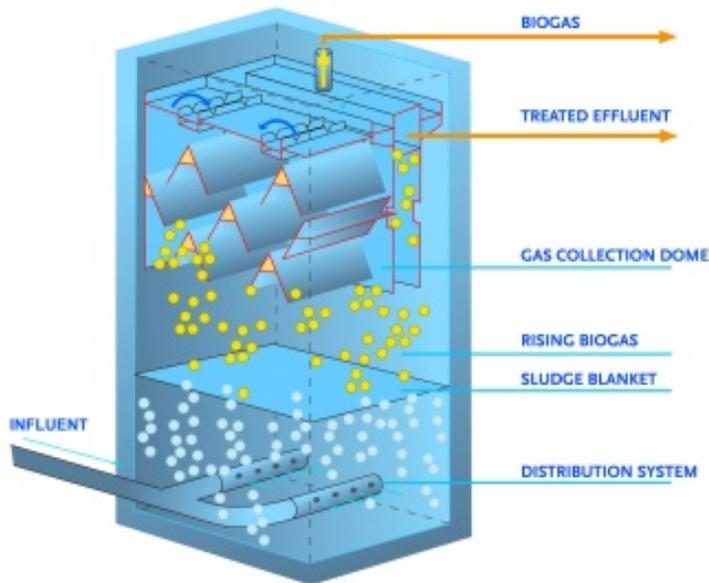


Figura 44. Diagrama de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

Algunas ventajas de este sistema según Ramalho (1993) son:

- Cargas de diseño altas por lo que el volumen del reactor es bajo y requiere menos espacio.
- La fermentación ácida y metánica, así como la sedimentación, tienen lugar en el mismo tanque por lo tanto las plantas son muy compactas, con considerable economía de espacio.
- Como no posee relleno, se elimina la posibilidad de corto circuitos y obstrucciones.
- El consumo de potencia es bajo pues no se requiere agitación mecánica.
- La retención de biomasa es muy buena y por esto no es necesario reciclar el lodo.
- La concentración de biomasa es alta, por consiguiente el sistema es resistente a la presencia de sustancias tóxicas y fluctuaciones de carga.

Para su dimensionamiento se utilizaron los siguientes parámetros de diseño:

**Cuadro 18. Criterios de diseño para un proceso anaerobio de contacto**

| <b>Parámetro</b>                 | <b>Intervalo</b> |
|----------------------------------|------------------|
| <b>DQO entrada (mg/l)</b>        | 1500-5000        |
| <b>Tiempo de retención (h)</b>   | 2.0 -10          |
| <b>COT teorico (DQO/l*día)</b>   | 0.48 - 2.40 g    |
| <b>Porcentaje de eliminación</b> | 75-85%           |

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

Fórmulas utilizadas

$$V = \frac{CO}{COT} \quad Tr = \frac{V}{Q} \quad A = \frac{V}{h}$$

Ec. 7                      Ec. 8                      Ec. 9

Donde

V: Volumen

CO: Carga orgánica

COT: Carga orgánica teórica

Tr tiempo de retención

Q: caudal

A: Área

h: altura

### **Sistemas Naturales**

Uno de los sistemas naturales son los humedales artificiales, donde se aprovechan los procesos naturales de sedimentación, adsorción y degradación orgánica (Corbitt, 2004) al interaccionar agua, suelo, plantas, microorganismos y la atmósfera.

La diferencia de éstos con los sistemas mecánicos, es que los procesos se dan a una velocidad natural y tienden a realizarse de forma simultánea en un único “reactor-ecosistema” en vez de tanques y reactores en forma secuencial y velocidades aceleradas (Metcalf & Eddy, 1996).

Los terrenos pantanosos son terrenos inundados con profundidades normalmente a 0.6 m. Este sistema es utilizado como instalación de separación de sólidos empleadas en combinación con los estanques de estabilización (Metcalf & Eddy, 1996).

Este sistema utiliza plantas flotantes para el tratamiento de agua residual, algunas de las especies que se utilizan son: jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), lenteja de agua, (*Lemma minor*), *Typha latifolia* y *Scirpus validus*.

Estas plantas por medio de sus raíces y tallos, proveen superficies de crecimiento para las bacterias además de un medio de filtración y adsorción de los sólidos. Además, las hojas y tallos por encima de la superficie, regulan el ingreso de luz a la superficie de agua, disminuyendo el crecimiento de algas, a la vez que se reducen los efectos del viento en el agua, el intercambio de gases entre la atmósfera y la superficie de agua y se evita una importante transferencia de gases de las partes sumergidas de la planta (EPA, 1988)

El-Gendy (2003) condujo experimentos utilizando Jacinto de agua (*eichoornia crassipes*) para el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario municipal y observó que el pH que favorecía el tratamiento era 5.8 - 6.0, y mostró ser una planta que funciona como buen acumulador de Cr, Cu y Cd, aunque de pobre absorción de Pb y Ni. Adicionalmente, tiene la capacidad de remover cationes si el pH del medio no lo afecta negativamente, por lo que finalmente el estudio determinó que se pueden tratar los lixiviados de rellenos sanitarios con esta planta.

**Cuadro 19. Criterios de diseño para un humedal**

| <b>Criterio</b>                   | <b>Flujo libre FWS</b> | <b>Flujo superficial SFS</b> |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------------|
| <b>Tiempo retención (d)</b>       | 4.0-15.0               | 4.0-15.0                     |
| <b>d Profundidad del agua (m)</b> | 0.1-0.6                | 0.3-0.75                     |
| <b>DBO (kg/ha*día)</b>            | <67                    | <67                          |
| <b>Carga hidráulica</b>           | 0.014-0.046            | 0.014-0.046                  |
| <b>Superficie específica</b>      | 7.1-2.15               | 7.1-2.5                      |

Fórmulas utilizadas

$$\frac{A \cdot n \cdot d}{Q} = Tr \quad \text{Ec. 10}$$

Donde: d: profundidad  
 A: Área Tr: Tiempo de retención  
 N: Fracción del área transversal no ocupada por plantas Q: Caudal

$$\frac{C_e}{C_o} = A * \exp(0.0875 * kt * Av^{1.75} * tr) \quad \text{Ec. 11}$$

Av: Superficie específica de la actividad microbiológica Kt: constante de velocidad

#### **4.2.5 Alternativa 3: Destilación solar activa para el tratamiento de lixiviado**

El sistema consiste en una destilación en la que la fuente de calor utilizada es el vapor de agua generada por medio de los calentadores solares; es una destilación solar activa a altas temperaturas con una circulación natural del agua.

Se deben utilizar los pre-tratamientos establecidos anteriormente con el fin de eliminar la mayor cantidad de sólidos disueltos y suspendidos en el agua. Estos compuestos orgánicos e inorgánicos, pueden ocasionar problemas durante la evaporación, debido a la presencia de materia volátil, metales, sales y minerales. Las sales, por ejemplo, requieren más calor y energía para evaporar el líquido, en tanto, los sólidos tienden a sedimentarse, ocasionando corrosión en las paredes del evaporador o funcionar como barrera para la transferencia de calor.

El funcionamiento del sistema consiste en una alimentación del lixiviado hacia el evaporador por medio de un sistema de boya, donde una vez evaporado el líquido hasta una altura definida, se ingresa más líquido al sistema. En su ingreso, es precalentado por el vapor generado, donde simultáneamente, en el condensador, genera el flujo de agua para enfriar el vapor de agua saliente. En el interior, el lixiviado es sometido a calentamiento por medio del colector solar.

El calentamiento continúa hasta que se genera vapor de agua, posteriormente el líquido evaporado es condensado. Puede realizarse por medio de un flujo externo, o por contacto con superficies que permita enfriar el vapor de agua, hasta producir (por condensación) agua líquida, que será almacenada en un recipiente como agua destilada.

El destilador consta de tres partes importantes: los colectores de calor, el evaporador y el condensador, cuyos detalles se especifican a continuación:

##### ***Colectores solares***

Son los encargados de absorber la energía disponible del sol y transformarla en energía térmica para luego ser transferida al agua.

El colector de calor solar está compuesto de 50 de tubos de termosifón distribuidos a lo largo del sistema de manera paralela en un ángulo de 30° dirección sur.

En éstos circula el lixiviado y se calientan por convección y radiación. Las características de diseño de los colectores como superficie de absorción, material, eficiencia de absorción, y pérdidas de calor fueron obtenidos por los proveedores de los colectores: la empresa Enertiva

En el diseño debe considerarse una distribución uniforme del líquido a través de todos los tubos y este debe ser un flujo generado por la gravedad, igualmente, el ingreso de agua al sistema, debe ser en la parte inferior y la salida en la superior. (Field, 1980)

### ***Evaporador***

En este se soportan todos los elementos del colector y se da la separación de fases, además del fraccionamiento de las sustancias no volátiles que serán concentradas, mientras los compuestos orgánicos volátiles serán volatilizados.

El flujo de volatilización de la interfase agua-aire dependerá de la concentración de los COV's en el agua, la volatilidad individual de estos compuestos, del área superficial del agua expuesta a la fase gaseosa y las condiciones que rodean al gas. (Rehman, 2003)

Algunas de las características, probadas por Al-Hayek (2003) determinaron como condiciones ideales las siguientes: cobertura de vidrio de 3mm, asimétrica con un ángulo de inclinación de 35°. Adicionalmente debe ser hermético para impedir el ingreso de humedad, polvo y aire que podrían disminuir su eficiencia.

Los materiales para su construcción son muy variados: aluminio, lámina galvanizada, madera, termoplásticos para alta temperatura o fibra de vidrio (Burbano, 2006), aunque es preferible que sean de acero inoxidable o mayores aleaciones de componentes para evitar la corrosión. (Roe,1998). Puede estar rodeado de espuma como material aislante de aproximadamente 5 -10 cm de acuerdo a Field (1980) y contemplar una superficie de aluminio con el fin de evitar pérdidas de calor. Posee una forma cilíndrica y debe colocarse una válvula de seguridad, en caso que la temperatura generada en el tanque sea superior a la requerida y la producción de vapor sea excesiva y es necesario la colocación de medidores de temperatura a la entrada del sistema, en el reactor (parte superior e inferior), en la conducción del evaporado y en el tanque de recolección del destilado.

### ***Tuberías***

La conducción del líquido se realiza por medio de tuberías en las que se consideran para su selección parámetros como material, diámetro, ruta de circulación, uniones, accesorios y caudal,.

Se recomienda cobre tipo L con accesorios del mismo material o bronce, ya que proveen resistencia a la corrosión. Las uniones deben ser soldadas con el correcto fundente para brindar un cierre hermético. Puede ser una aleación 95-5 estaño- antimonio, la soldadura de plata se recomienda para altas temperaturas. La tubería debe tener al menos 1.27 cm de diámetro para ampliar su vida útil y soportar caídas de presión. (Field,1980)

### ***Ubicación***

El equipo debe estar localizado en un sitio donde reciba los rayos solares directamente, sin interferencia de ningún tipo o sombras. Preferiblemente con una localización hacia el sur, para recibir la máxima influencia del sol. Es ideal colocarlo en un lugar de poco viento, ya que éste ocasiona pérdidas convectivas. (Field, 1980)

### ***Mantenimiento***

- Limpieza del polvo de los colectores (tubos de vidrio) pues se afecta la radiación.
- Eliminación de lodos del tanque de almacenamiento
- Enjuague y limpieza por medio de un isopo de los tubos para prevenir incrustaciones y otros en su interior.

### ***Operación***

- El llenado del tanque debe realizarse cuando el sistema esté frío, con el fin de evitar choques térmicos.
- Durante el primer día de llenado, deben mantenerse las válvulas cerradas hasta alcanzar una temperatura de 40 °C.
- Revisión del estado de los termómetros.
- Monitoreo de temperaturas.

### **Diseño sistema**

Se utilizó el procedimiento de diseño de un calentador solar presentado por Guevara (2003) utilizando los siguientes datos: La masa es 435 kg/día, la temperatura inicial de los lixiviados es 25°C y la temperatura por alcanzar es de 100 °C. La capacidad calorífica del agua es 4.18 KJ/Kg °C. La radiación solar mínima presentada en la estación Damas es 14700 KJ (ver factores climatológicos que afectan el sitio) y la eficiencia del sistema es de 90%.

$$E = M * Cp * (Tf - Ti)$$

$$Nc = \frac{Ac * fs}{Ac}$$

$$Ac = \frac{E}{Hp * n}$$

$$V = 1.15M$$

Donde :

E: Energía demandada (KJ/día)

Ti: Temperatura inicial del líquido

M: Masa de agua por calentar (kg/día)

Ac: Área de captación (m<sup>2</sup>)

Cp: Capacidad calorífica agua (KJ/Kg °C)

Hp: radiación solar mínima (KJ)

Tf: Temperatura deseada del líquido

n: Eficiencia del sistema(%)

La remoción del DQO de acuerdo con la temperatura será calculada por la siguientes expresiones de Yiannopulos (2007):

$$\frac{Se}{Si} = \frac{1}{1 + KX(HRT)}$$

Donde:

Si: concentración del influente

K: constante de variación de la temperatura

Se: concentración del efluente

X: concentración de SST en el reactor

HRT: tiempo de retención hidráulica

$$K(T_2) = K(T_1)\theta^{(T_2-T_1)}$$

Donde:  $K_{20}=7.1 \times 10^{-4}$  L/mg\*d       $\theta = 1.07$

Además el % de eficiencia de remoción del DQO

$$\text{remoción DQO} = \frac{Si - Se}{Si} \times 100$$

Con base en las fórmulas, se determinaron las dimensiones y parámetros de diseño, los cuales se muestran a continuación. El diagrama general del diseño se puede observar en el Anexo 3.

**Cuadro 20. Dimensionamiento para el destilador solar activo**

| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Unidad</b>  | <b>valor</b> |
|--|----------------|--------------|
| E demanda energética                               | KJ/día         | 136384       |
| Área de captación                                  | m <sup>2</sup> | 10           |
| H <sub>p</sub> radiación solar                     | KJ             | 14700        |
| n eficiencia global del sistema                    | %              | 90           |
| N número de colectores                             |                | 50           |
| Área de colector                                   | m <sup>2</sup> | 0.31         |
| F.S factor de seguridad o de proyección de demanda |                | 1.15         |
| Volumen tanque                                     | m <sup>3</sup> | 0.50         |
| Se   |                | 4.55         |
| % de remoción                                      |                | 96           |

## CAPITULO 5 RESULTADOS

### 5.1 Sistema de control y conducción de los lixiviados

El control de los lixiviados se debe realizar mediante el monitoreo de: la producción generada en el área rellena, composición por medio de muestreo periódico y posterior análisis fisicoquímicos y lodo generado.

Para el control de la producción del lixiviado se plantea la instalación de un medidor de caudal que debería ser localizado tanto en la entrada como en la salida del sistema de tratamiento. No obstante, debido a que la implementación de este medidor en la entrada es difícil, se localizará a la salida del sedimentador y a la salida del sistema para el control del efluente.

La calidad de los lixiviados debe ser monitoreada de acuerdo a lo establecido en el reglamento de rellenos sanitarios en su artículo 37, para lo cual se deben analizar los parámetros: DBO, DQO, pH, sólidos totales, cromo total, plomo, mercurio, níquel.

Dado que se deben establecer los puntos en los que se realizará el muestreo para la determinación de la composición, primero será en la entrada, en caja de registro donde se unen las tuberías de las celdas del relleno sanitario, justo antes de ingresar al sistema de tratamiento; el segundo en salida del sedimentador y el tercero a la salida del sistema de tratamiento

Para disminuir y controlar de manera más adecuada los lixiviados es importante considerar las acciones que afectan la producción. A partir de estas se pueden implementar algunas medidas para minimizar su generación

- Adecuados sistemas de conducción para las aguas pluviales
- Siembra de zacate (Betiver) o plantas para aumentar la escorrentía del agua entrante al relleno, además de aumentar la evapotranspiración (salida de agua) del área rellena.
- Impermeabilización por medio de algún material de cobertura (arcilla, geomembrana, suelo de baja permeabilidad) de la superficie en la que no se dispondrán desechos.
- Cobertura temporal con geo-membrana que evite el ingreso de agua mientras no se esté operando el relleno

- En las partes superiores de las celdas, pendientes direccionadas a la evacuación de las aguas pluviales por el canal más cercano

### **5.1.1 Conducción de los lixiviados**

En el relleno sanitario de Garabito los lixiviados son recolectados por medio de canales internos, a nivel del piso de cada celda. Estos son canales de cemento de 89 cm de ancho que poseen piedra bola en su interior y conducen los lixiviados hacia una caja de registro. Además, para su control, existen cajas de registro distribuidas en diversos puntos del relleno sanitario (Figura 5. Mapa de los elementos principales del relleno sanitario de Garabito) y posteriormente ingresan al sistema de tratamiento.

Los lixiviados serán conducidos en el sistema de tratamiento por tuberías de PVC de 4", de acuerdo a lo establecido en la metodología, el diámetro es de 0.087 m, equivalente a 2.65 pulgadas, y su velocidad es de 0.099 m/s por lo que no excede los 3.04 m/s, límite recomendado al utilizar la fórmula de Hazen Williams.

### **5.1.2 Conducción de aguas pluviales**

Con el fin de tratar únicamente los lixiviados producidos en el relleno sanitario, reducir el ingreso de agua pluvial en esta área, y minimizar la producción de lixiviados se debe de implementar un sistema de conducción de pluviales.

Además, transportando adecuadamente las aguas pluviales se evita el deterioro del suelo y de las obras civiles como: cobertura de los desechos, canales, celdas, taludes y área de relleno.

Dado que este exceso de agua sin dirección alguna provoca erosión del suelo e inestabilidad, se propone un canal abierto de forma trapezoidal con el fin de evitar contornos erosionables y evitar depósitos de sedimento. Se sugiere el uso de material como adoquines para permitir flexibilidad del sistema, así como mayor facilidad para las reparaciones y la posibilidad de transportar o cambiar el sistema de conducción de ser necesario. Se elimina el uso de cemento, ya que este se quiebra por el movimiento de compactación de los residuos, sin embargo, para reducir del todo los costos. se podría utilizar hormigón o una mezcla cuya proporción de arena es mucho más elevada a la de cemento.

De acuerdo a la metodología planteada para el dimensionamiento de este canal, se determinó el coeficiente de escorrentía a partir de los factores:

- Relieve normal para cerros y pendientes entre 5 y 10%, el factor utilizado es 0.18
- Infiltración alta para suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración o mal drenados, cuyo coeficiente es 0.12
- Cobertura vegetal alta, cuya descripción es poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20% del área con buena cobertura vegetal y su factor 0.012
- Almacenamiento superficial alto, que corresponde a un bajo sistema de cauces superficiales pequeños, bien definidos, sin zonas húmedas con un factor de 0.1

Para enumerar estos factores, se utilizaron los datos de precipitación diaria de la estación Jacó (Cuadro 8.) Con base en esto datos, se determinó que el área de impacto es de aproximadamente 17 Ha, que equivale al área de relleno y su correspondiente área de influencia. La intensidad máxima en una hora, para un período de retorno de 20 años, es de 65.33 mm/h, por lo que el caudal de escorrentía es 1.62 m<sup>3</sup>/s.

La longitud del canal es la base del área rellenada, en la cual en algunos segmentos se puede encontrar el camino principal de tránsito en el relleno. La longitud total aproximada (L) de este canal es de 700 m. El dimensionamiento del canal se presenta en el cuadro y la figura detalladas a continuación:

**Cuadro 21 .Parámetros de diseño para canal de conducción de pluviales**

| <b>Parámetro</b>                  | <b>Valor</b>          |
|-----------------------------------|-----------------------|
| <b>Q Caudal</b>                   | 1.6 m <sup>3</sup> /s |
| <b>Velocidad máxima</b>           | 4.5 m/s               |
| <b>S pendiente del lado canal</b> | 1.5                   |
| <b>Base menor</b>                 | 0.8 m                 |
| <b>borde libre</b>                | 0.27 m                |
| <b>Y profundidad</b>              | 0.5 m                 |
| <b>T espejo de agua</b>           | 1.2 m                 |
| <b>Área Hidráulica</b>            | 0.44 m <sup>2</sup>   |
| <b>Radio hidráulico</b>           | 0.0076                |
| <b>V media por Manning</b>        | 2.2 m/s               |
| <b>n coeficiente de Manning</b>   | 0.013                 |

Este diseño se muestra en el siguiente diagrama:

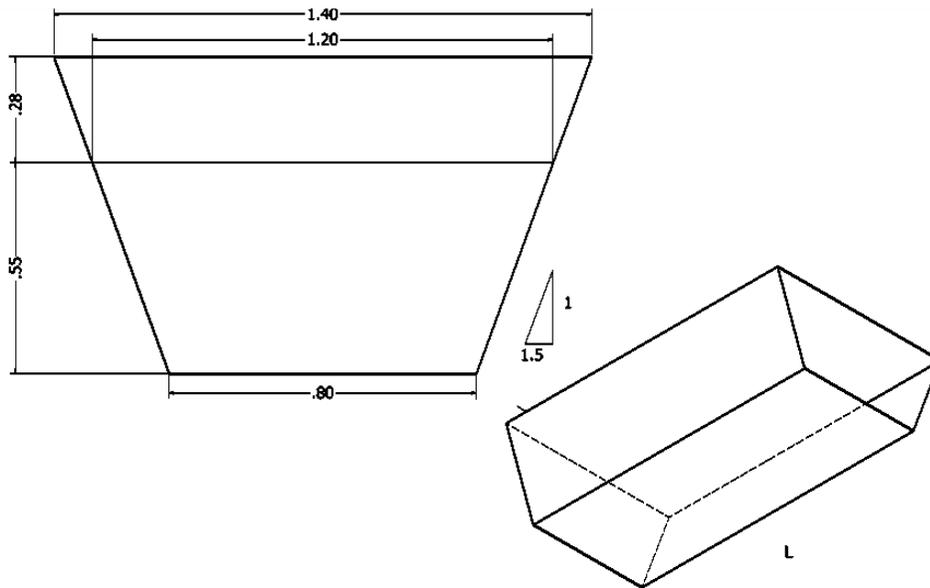


Figura 45  
Dimensionamiento canal  
de pluviales

## 5.2 Optimización del tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Garabito

### 5.2.1 Estructuras actuales

#### *Ingreso al sistema*

Previo al sistema de tratamiento de lixiviados es necesaria la instalación de una de válvula de retención o antirretorno conocida como “válvula check”, que regula el paso del lixiviado en un solo sentido, pues es necesario evitar los problemas de rebalse de lixiviados en la caja de registro, celda o canal de rebalse.

#### *Pretratamiento*

Para el relleno sanitario de Garabito se propone aprovechar la estructura existente como un sedimentador primario que a su vez sería una laguna anaerobia. Además, para aumentar su eficiencia, se recomienda la instalación de pantallas, la creación de entradas múltiples, idealmente cambiándolas hacia la parte superior del elemento, y también la construcción de un vertedero rectangular de pared delgada para la salida del lixiviado.

Se deben instalar 5 pantallas de forma trapezoidal de 1.5 m de alto, 16 m de base mayor y 13 m de base menor. Estas pantallas estarían separadas por 0.06 m y son de un espesor de 0,005 m a un ángulo de 45°.

Adicionalmente, su material debe ser de plástico corrugado, con una alta superficie de contacto que favorezca el crecimiento de una película de microorganismos que realicen un tratamiento biológico.

Para la creación de entradas múltiples se realizaría un acople a la tubería existente (6") en el que se coloca una tee y se une una tubería de 8 m de largo con 4 orificios cada 1.6 m

Un vertedero es una abertura de contorno abierto, en la pared de un depósito, por la cual escurre o rebalsa el líquido contenido en el depósito (Puga, 2012). Su construcción garantizaría la salida del agua en el volumen y tiempo adecuado, de manera que se asegure el correcto tiempo de retención y tratamiento biológico del agua residual. El dimensionamiento de este vertedero es de 14 m de largo y 3 m de alto.

### 5.2.2 Disminución de la carga contaminante

Para las diferentes alternativas propuestas para el tratamiento de los lixiviados en el relleno sanitario (Anexo 3), se determina la disminución de la carga contaminante y se muestran las dimensiones correspondientes para cada operación unitaria.

Tomando en cuenta que la carga contaminante (kg/día) de sólidos totales es de 1.759 kg/día, la de sólidos suspendidos es de 325 kg/día, DBO 526 kg/día y DQO 828 kg/día, se determina la reducción de éstas para cada alternativa propuesta.

**Cuadro 22. Disminución de carga contaminante para las alternativas del sistema de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario de Garabito**

| Parámetro           | Disminución de carga contaminante |                       |                |               |                 |         |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------|---------------|-----------------|---------|
|                     | Alternativa 1                     |                       |                | Alternativa 2 |                 |         |
|                     | Sedimentador                      | 2 Lagunas Facultativa | Laguna aerobia | Sedimentador  | Reactor Aerobio | Humedal |
| Sólidos Totales     | 880                               | 176                   | 35             | 880           | 219             | 88      |
| Sólidos Suspendidos | 163                               | 33                    | 33             | 162           | 40              |         |
| DQO                 | 580                               | 116                   | 23             | 580           | 145             |         |
| DBO                 | 369                               | 74                    | 15             | 368           | 92              | 28      |

La eficiencia total en la disminución de cargas contaminantes para la alternativa 1 es de 97%, mientras que para la alternativa 2 es de 94%

### 5.2.3 Dimensionamiento para cada operación unitaria

Se dimensionan las unidades a partir de las fórmulas planteadas anteriormente, las cuales se presentan a continuación:

**Cuadro 23. Dimensiones para los elementos de los sistemas propuestos para el tratamiento de los lixiviados**

| Parámetro                      | Sedimentador | 2                     |                 | Reactor Aerobio | Humedal |
|--------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------|
|                                |              | 2 Lagunas Facultativa | Lagunas aerobia |                 |         |
| <b>Tiempo de retención</b>     | 21 h         | 10 d                  | 10 d            | 0.90 d          | 6 d     |
| <b>Área (m<sup>2</sup>)</b>    | 177          | 362                   | 283             | 15              | 680     |
| <b>Profundidad (m)</b>         | 4.5          | 1.5                   | 0.90            | 3               | 0.60    |
| <b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b> | 430          | 543                   | 255             | 46              | 408     |
| <b>Largo (m)</b>               | 16           | 38                    | 33              | 3.9             | 26      |
| <b>Ancho (m)</b>               | 16           | 9.5                   | 8               | 3.9             | 2.6     |

### 5.2.4 Destilador solar: Prueba de concepto

Una prueba de concepto, o de principio, consiste en llevar a cabo el método o ideas principales para demostrar su viabilidad o la demostración del principio. Se realiza con el objetivo de verificar que su concepto o teoría tiene potencial de ser utilizado. Estas pruebas son pequeñas y pueden o no ser completadas.

Con esta se pueden determinar, objetiva y racionalmente, las fortalezas y debilidades del sistema, así como los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto. La retroalimentación que se espera de esta prueba de concepto principalmente incluye la generación de datos como: energía requerida, eficiencia del sistema, temperaturas alcanzadas, volumen de agua destilada y su calidad; datos que determinaran aspectos importantes del diseño.

Para esta prueba se siguió la metodología detallada en el punto 3.6, los días 23, 24, 25, 27 y 28 de febrero del 2012, en el relleno sanitario de Garabito Con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados, se debieron considerar las variables ambientales (no controlables) que influyen en la prueba para este sitio; por esto se tomaron en cuenta la radiación y temperatura ambiental.

La radiación observada durante los días de prueba tuvo un comportamiento ascendente y descendente dentro de un horario muy regular, pues no se presentaron cambios en el tiempo atmosférico y los días permanecieron completamente despejados. Los valores de radiación determinados durante estos días no fueron muy diversos y su valor máximo es alcanzado alrededor de las 11:00 y 12:30 am.

La mayor cantidad de radiación durante los días de prueba se dio entre las 10:30 am y 2:00 pm. La radiación máxima se dio durante la prueba de lixiviados L1 y tuvo un valor de  $1153 \text{ W*s/m}^2$  a las 1:00 pm y un mínimo de  $15 \text{ W*s/m}^2$  a las 6 am. Esta radiación es obtenida de mediciones puntuales, a partir del factor de conversión  $t*[1/1000*C]$  se obtienen  $\text{MJ* m}^2$  de acuerdo con el manual de usuario del piranómetro utilizado<sup>7</sup>.

De acuerdo a estas conversiones, el valor de radiación mínimo en un segundo es de  $0.00021157 \text{ MJ*s* m}^2$  y durante 12 horas de sol con esta radiación se reciben  $9.14 \text{ MJ* m}^2$  valor que equivale al 62% de la radiación utilizada para el diseño.

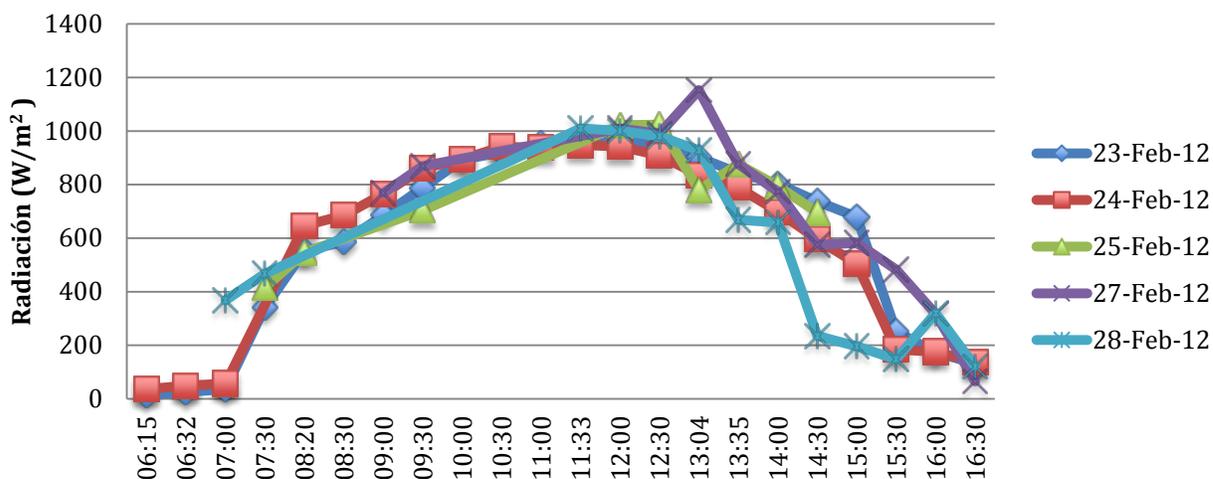


Figura 46. Variación de radiación ( $\text{W/m}^2$ ) durante los días de pruebas

La radiación influye directamente en la temperatura ambiental generando un incremento en la misma posterior a los valores más elevados de radiación del día. La temperatura ambiental varía entre los 22.2 y 35.5 °C, alcanzando las temperaturas más altas (30 - 36 °C) en el rango de las 9:00 am a las 3:00 pm.

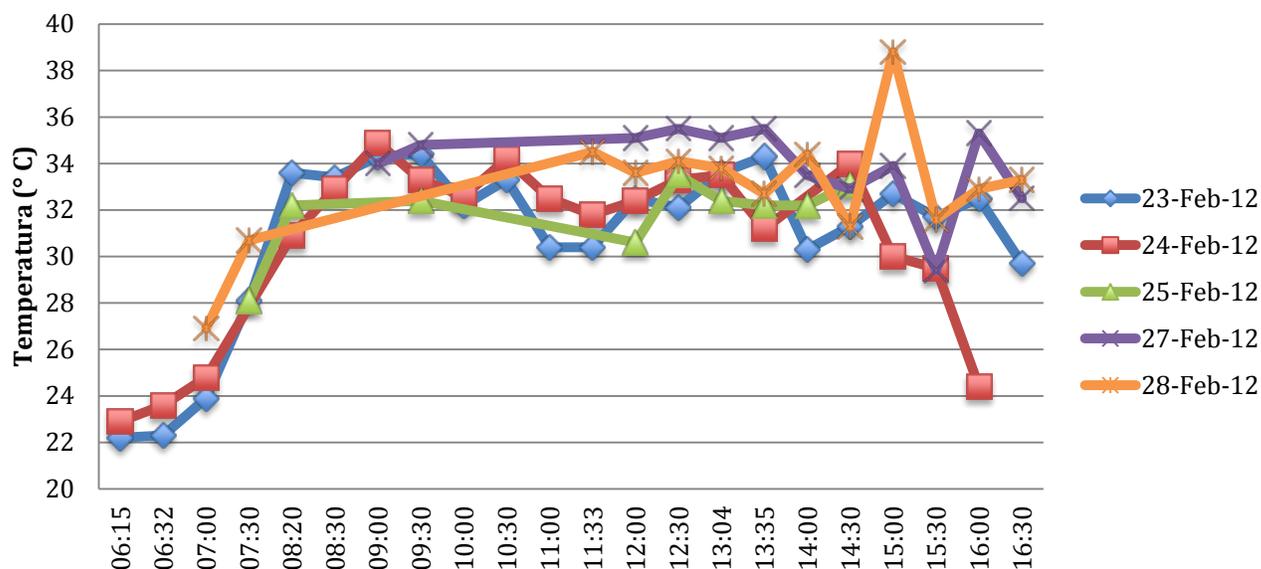


Figura 47 Variación de la temperatura ambiente (°C) durante los días de pruebas

Considerando estas variables ambientales, se analizaron la temperatura en el interior del tanque y la temperatura del vapor generado, obteniendo que, para las pruebas de agua (A), la temperatura inicial fue de 28°C con un pH de 7.09. Para las pruebas de lixiviado (L), la temperatura del líquido al inicio fue de 26°C con un pH de 7.29.

Durante las pruebas realizadas, el cambio en las temperaturas del interior del tanque varía de los 26.3 °C a los 108.4 °C. El incremento de estas temperaturas se da gradual y acumulativamente, así, en la prueba A2, la temperatura inicial es mayor a la temperatura final alcanzada en la prueba A1, mientras que la temperatura inicial en la prueba A3 es mayor la temperatura final de la prueba A2. Estos resultados son un indicador de la capacidad del tanque de preservar el calor en su interior.

La diferencia de temperaturas en el interior del tanque de la prueba A1 a la prueba A2 es, en promedio, de 21 °C. Sin embargo, la diferencia de temperatura entre la prueba A2 y A3 es de 10 °C en las mediciones realizadas.

El comportamiento de L1 y A1 es muy similar, el arranque del sistema con agua y lixiviado no presentó mayor variación, sin embargo L2 y A2 tuvieron una gran diferencia en cuanto a las temperaturas alcanzadas. Esta se debió, posiblemente, a la disminución de la radiación en el día 28 de febrero 2012.

Como se puede observar en la Figura 48 las temperaturas en el interior del tanque, alcanzaron por primera vez los 100 °C en la prueba A2, a las 2:00 pm, sin embargo, al mantener el agua temperaturas similares a las del día anterior durante la prueba A3, se alcanzó esta temperatura a la 1:00 pm.

No obstante lo anterior, en este caso (A3), la temperatura del vapor generada se elevó a 90°C a la 1:00 pm, mientras que en la prueba A2 el vapor generado alcanzó esa temperatura hasta las 3:00 pm. En este último caso fue posible, por medio de un flujo de agua a temperatura ambiente, controlar la condensación hasta las 4:00 pm, momento en que hubo un descenso en la temperatura del vapor.

Durante la prueba A3, la longitud de la manguera (10 m), o el flujo de agua a temperatura ambiente, fueron capaces de generar la condensación y no fue posible su control a partir de la 1:00 pm, por lo que fue necesario suspender la prueba.

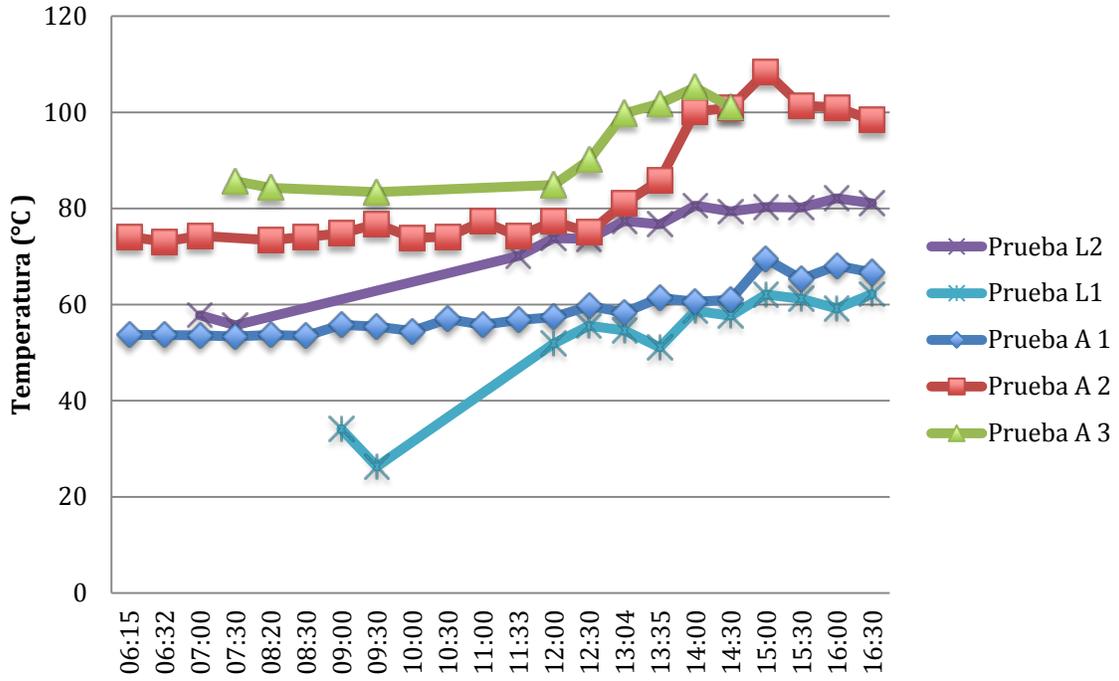


Figura 48 Variación de las temperaturas (°C) en el interior del tanque durante las pruebas

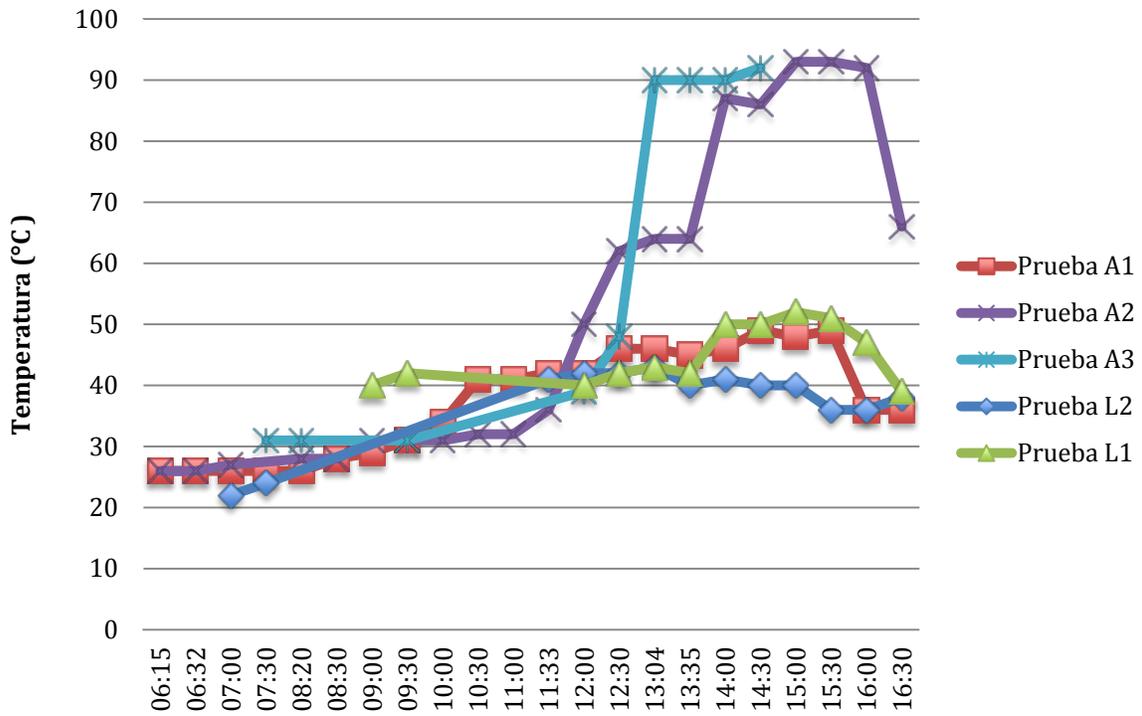


Figura 49 Variación de las temperaturas salida del vapor del tanque

A partir de estas variables se genera un volumen de destilado cuya variación se puede apreciar en la Figura 50. Durante las pruebas de agua (A), el volumen máximo obtenido fue de 3.256 ml, sin embargo el volumen máximo obtenido fue de 4.745 ml en la prueba de lixiviado 1. En la prueba A3, donde se alcanzaron temperaturas elevadas, no fue posible recuperar el destilado por lo que se presenta una disminución del mismo.

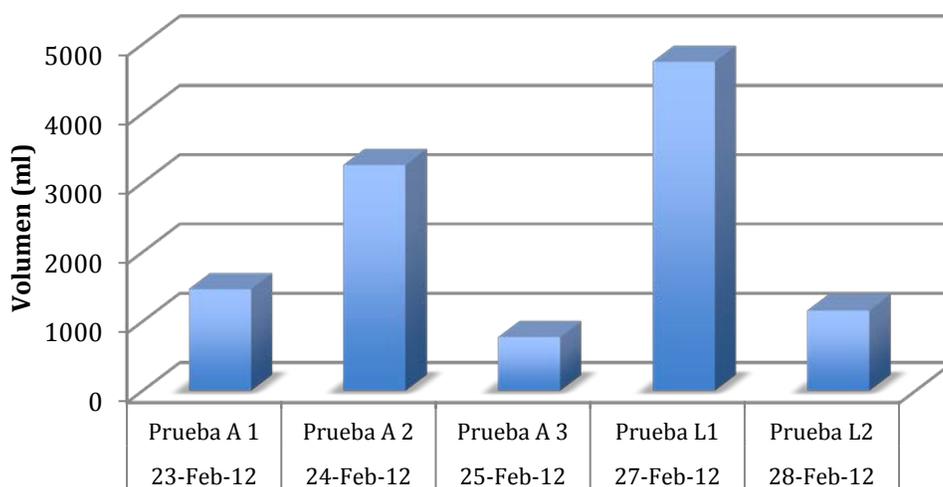


Figura 50 Variación del volumen (ml) del destilado generado en la pruebas

Al analizar la producción de destilado en detalle, por ejemplo de la prueba L1, se puede observar que a partir de las 12:00 pm se obtiene un volumen cuantificable, pues a partir de este momento se incrementa la producción y disminuye alrededor de las 4:00 pm.

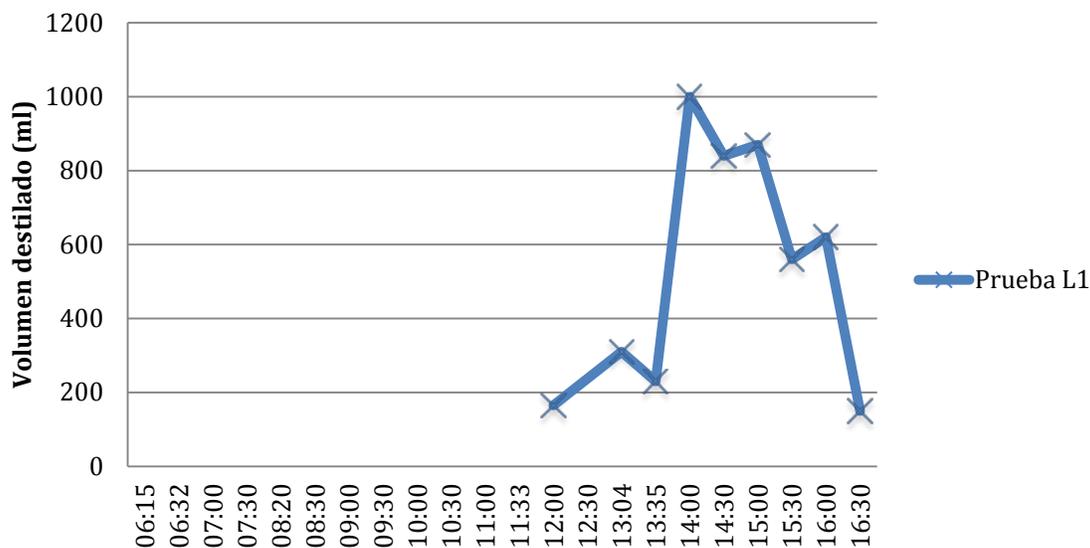


Figura 51 Variación del volumen del destilado generado en la prueba L1

La producción de destilado es de 2.7 L/m<sup>2</sup>\*día para el agua y de 3.9L/m<sup>2</sup>\*día para el lixiviado, durante un máximo de dos días prueba, con lo cual, al compararlo con los resultados obtenidos por Fonseca (2003) y Nandwani (2009), se concluye que el destilador se comporta de manera similar al destilador solar pasivo.

Aunque la radiación menor fue durante la prueba L2 se logró obtener alrededor de 100 mL de destilado. L1 presentó el mayor volumen pero también las menores temperaturas en el interior del tanque, al no conocer el volumen de agua o lixiviado adentro del tanque existe la posibilidad de que en L1 el destilado recolectado no fuese 100% destilado sino una mezcla de agua, que salió debido a la agitación del líquido por la elevación de la temperatura salio del sistema como rebalse

En cuanto a la calidad del lixiviado que entró al sistema, y el de salida para la prueba L1, se obtuvo una reducción en los parámetros analizados DQO, DBO, SS, ST, SV. De esta manera el DQO se redujo en un 30%, el DBO presentó una disminución del 54%, los SS disminuyeron en un 14% y los ST se redujeron en 10%.

De acuerdo al reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, los parámetros DBO, DQO y SS se encuentran dentro de los límites permitidos. Sin embargo, para una vertido a un cuerpo receptor y para el reúso urbano, solo los sólidos suspendidos cumplen la norma. En el siguiente cuadro se muestran los resultados de los parámetros analizados:

**Cuadro 24. Calidad del lixiviado (L2) antes y después de la prueba de concepto**

| <b>Parámetro</b>                  | <b>Lixiviado de entrada</b> | <b>Lixiviado de salida</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>DQO (mg/L)</b>                 | 260±16                      | 200±13                     |
| <b>DBO (mg/L)</b>                 | 116±4                       | 53.0±1.6                   |
| <b>Sólidos Suspendidos (mg/L)</b> | 14±3.4                      | 12±3.4                     |
| <b>Sólidos totales (mg/L)</b>     | 2260±4                      | 2040±4                     |
| <b>Sólidos volátiles (mg/L)</b>   | 20±3.4                      | 18.5±3.4                   |

Es importante considerar que estos parámetros fueron obtenidos del lixiviado dispuesto en la pileta. Para este escenario se plantean ciertas modificaciones con el fin de obtener un efluente de mejor calidad para realizar, posteriormente, la destilación solar.

La baja variación de los compuestos podría haber sido ocasionado por las bajas temperaturas (max. 80°C )que se presentaron en la prueba L2, donde no se alcanzaron los 100 °C.

### 5.2.5 Costos

Con el fin de brindar a la municipalidad un aproximado de los costos de construcción de un sistema de tratamiento de agua residual, específicamente las alternativas planteadas, se muestran (Cuadro 25) los aspectos constructivos generales.

De acuerdo con Martínez (2007), en un sistema de tanque de ecualización, aireación, clarificador y digestor, el costo de reducción de demanda química de oxígeno disuelta es de 074 \$/kg. En el relleno sanitario de Garabito de acuerdo con el caudal promedio y la composición promedio (DQO) se generan 42 kg DQO/día. Por lo que el costo diario sería de \$31 y \$964 mensual.

**Cuadro 25. Costos asociados al proyecto de construcción del tratamiento de los Lixiviados del Relleno Sanitario de Garabito**

| Aspecto constructivo                     | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| área de construcción                     | ¢12,914,735   | ¢6,960,835    |               |
| Alquiler maquinaria para exvación (hora) | ¢1,280,000    | ¢320,000      |               |
| Geomembrana desarendor                   | ¢8,778        | ¢8,778        |               |
| Geomembrana laguna facultativa           | ¢3,085,101    |               |               |
| Geomembrana laguna aerobia               | ¢2,241,065    |               |               |
| Reactor anaerobio                        |               | ¢5,307,205    |               |
| Humedal                                  |               | ¢212,158      |               |
| Tubería                                  | ¢41916        | ¢41916        |               |
| Costo del equipo + modificaciones        |               |               | ¢4,000,000    |
| total                                    | ¢19,571,595   | ¢12,850,892   | ¢4,000,000    |

### 5.3 Selección del sistema de tratamiento

Utilizando los criterios mencionados en la metodología se obtiene una ponderación para determinar el tratamiento idoneo para los lixiviados del Relleno Sanitario de Garabito. El valor más bajo corresponde al aspecto impactado en menor cantidad, en consecuencia, la ponderación más baja será la que muestre el método idoneo.

**Cuadro 26. Valores para los criterios ambientales, operacionales, económicos y técnicos para los tratamientos propuestos para el Relleno Sanitario de Garabito.**

| <b>Sistema Propuesto</b>       |                                    | <b>Lagunas Facultativa y Aerobia</b> | <b>Reactor Anaeróbico</b> | <b>Destilador Solar activo</b> |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| <b>Criterios Ambientales</b>   | Emisiones Gaseosas                 | 1                                    | 2                         | 2                              |
|                                | Producción de Lodos                | 2                                    | 3                         | 1                              |
|                                | Reuso de agua                      | 2                                    | 1                         | 3                              |
| <b>Criterios Técnicos</b>      | Área requerida                     | 3                                    | 2                         | 1                              |
|                                | Sensibilidad variaciones de caudal | 2                                    | 1                         | 1                              |
|                                | Sensibilidad variaciones de carga  | 3                                    | 2                         | 1                              |
|                                | Olores                             | 2                                    | 2                         | 3                              |
|                                | Ruido                              | 1                                    | 3                         | 1                              |
| <b>Criterios operacionales</b> | Equipo e insumos                   | 1                                    | 3                         | 3                              |
|                                | Consumo energético                 | 1                                    | 3                         | 1                              |
|                                | Complejidad operacional            | 1                                    | 3                         | 3                              |
| <b>Criterios económicos</b>    | Inversión                          | 2                                    | 3                         | 3                              |
| <b>Total</b>                   |                                    | 21                                   | 28                        | 22                             |

Según los resultados, el método idóneo es el tratamiento de los lixiviados por lagunas facultativas, pues obtuvo una ponderación menor en los criterios evaluados.

En cuanto a los criterios ambientales, las emisiones gaseosas son mayores para el reactor anaerobio, mientras que para el destilador deben de ser estudiadas con mayor detalle. A pesar del reuso del gas metano, en el reactor, se le da una ponderación más alta; ya que al compararla con los gases emitidos por las lagunas facultativa y aerobia éstos son mayores. En las lagunas los gases solo son producto de la evaporación del agua en la superficie del estanque, mientras que en el reactor son producto de la metanogénesis.

La producción de lodos es mayor en el reactor anaerobio, ya la carga orgánica es mayor y el volumen del contenedor es mucho menor. Se le da una ponderación menor a las lagunas ya que el lodo generado es solo producto del peso de las partículas del agua residual. Al contrario, los lodos generados en el destilador serían reducidos debido a su pretratamiento y la eliminación de los porcentajes de humedad.

El reúso de agua se favorece en las lagunas al ser un proceso con altos tiempos de retención y aerobios. Además, la eficiencia de la disminución de carga para la alternativa 1 es de 97%, superior al 95% de la alternativa 2, mientras que la tercera alternativa tiene porcentajes de eficiencia teóricos de 96%.

En los criterios técnicos, se considera el área requerida por las lagunas mucho mayor al del reactor. Por otra parte, la sensibilidad de variación de caudal por su dimensionamiento y tiempos de retención es menor para las lagunas. La formación de olores se considera igual para las dos alternativas, mientras que el ruido generado por el reactor es mayor que el de las lagunas.

Al aplicar los criterios de operación, se plantea que los reactores utilizan mayor equipo e insumos que las lagunas, además de un mayor consumo energético y complejidad operacional. Del mismo modo la alternativa del destilador solar activo esta basada en equipo para el tratamiento en sí, además de la operación para la que se requiere capacitación al encargado del sistema de tratamiento.

El único criterio económico analizado es inversión, donde la alternativa 1 presenta una inversión mayor debido al valor del terreno del área requerida.

#### **5.4 Opciones de reúso del agua residual**

El agua residual de calidad aceptada, de acuerdo a su producción, y obedeciendo la legislación para los diversos tipos de reúso, puede ser utilizada con los siguientes fines: lavado de camiones que entran y salen del relleno sanitario; riego de áreas verdes en el relleno; disminución del polvo en el área de relleno; compactación de los residuos; lavado de aceras, insalaciones, inodoros; lavado de camiones y flotilla de transporte municipal; combate de incendios y recirculación.

#### 5.4.1 Recirculación

La práctica operativa actual de recircular los lixiviados se ha utilizado principalmente por ser la alternativa más económica para el tratamiento del mismo (Roe,1998). Es una práctica común en diversos rellenos sanitarios, y se realiza rociando el lixiviado sobre la parte superior del relleno sanitario donde se esté operando (Corbitt,2004).

En este método, el relleno sanitario funciona como un reactor de lecho fijo con evaporación en cada ciclo (El-Gendy,2003) en el que las reacciones biológicas, físicas y químicas ocurren y favorecen la estabilización del área de relleno (Ye, 2008). Los resultados obtenidos por Li Ye (2008) muestran un 99% de remoción de nitrógeno amoniacal y un 81% en la remoción de DQO para una carga hidráulica de 15.92 L/m<sup>2</sup> y una carga hidráulica de 25.54 g/ m<sup>2</sup> \* día.

Al aplicar este método, se reducen los problemas operacionales en la planta de tratamiento debido a las altas variaciones de calidad y cantidad (El-Gendy, 2003).

Sin embargo, uno de los problemas que afecta esta técnica de tratamiento es la infiltración de agua adicional, aumentando el riesgo de contaminación de suelo y aguas subterráneas si no existen los controles necesarios.

También se pueden separar las partículas más livianas de las pesadas por la corriente vertical de líquido, generando mayores concentraciones de sales y metales pesados en el efluente final (El-Gendy, 2003). Otro aspecto por considerar es el control de los malos olores, especialmente si se considera la recirculación después del cierre técnico del relleno y el terreno se utiliza para recreación. (Ye, 2008).

Por estas razones la práctica debe de ser controlada debido a que esta técnica afecta el buen funcionamiento del sistema de drenaje que mantiene en equilibrio el líquido que entra y sale del relleno. El sistema puede fallar, produciendo un aumento de la presión de líquidos y gases en los poros de la masa de basura, que cambia la característica del material y, por la configuración geométrica de diseño, el material puede tornarse inestable produciendo un derrumbe de la celda. (Méndez,2006). De ser necesario la continuación de esta práctica, se recomienda realizar la recirculación por un período máximo de 1 hora para no saturar el área de relleno.

## CAPITULO 6 CONCLUSIONES

El relleno sanitario de Garabito inclumple la normativa costarricense alrededor del tratamiento de lixiviados generados en este. Por esto se deben de optimizar las estructuras existentes y generar un sistema de tratamiento.

Esto se podría lograr realizando las modificaciones a la pileta sugeridas de manera que opere como un sedimentador-laguna anaerobia y la implementación de alguna de las alternativas sugeridas: destilación solar activa, lagunas de oxidación o reactor anaerobio y humedal para garantizar la calidad del efluente

La destilación solar activa presenta resultados positivos, y el tratamiento de los lixiviados se podría llevar a cabo por este medio realizando un desarrollo experimental. En el relleno sanitario de Garabito se presentan condiciones idóneas para un desarrollo de este tipo. Ya que se encuentra al final de su vida útil, las composiciones de los lixiviados son las de un relleno joven, no existe la suficiente área constructiva para otro tipo de tratamiento, y existe la presión institucional por el cumplimiento de la legislación.

La evaporación que se lleva a cabo en el destilador diseñado puede sustituir, realizando futuras investigaciones, destiladores eléctricos. Además se puede estudiar su potencial para generar resultados similares a los obtenidos por procesos en los que se utilizan membranas, extracciones líquido - líquido, cristalización y precipitación.

Los resultados obtenidos durante la prueba de concepto reflejan la capacidad del equipo de funcionar como un destilador solar, por esto, realizando los cambios planteados en el diseño y futuros estudios. Se puede optimizar este funcionamiento en más días de operación generar mayor volumen de destilado.

La destilación solar se puede utilizar en diversas industrias y variedad de usos. Su estudio como tratamiento de aguas residuales, lixiviados, es solo una de las aplicaciones que se podrían desarrollar con futuras investigaciones.

El diseño del destilador obedece a las variables de temperatura (de entrada del lixiviado, alcanzadas por los colectores solares en el sistema, y ambiente) radiación y caudal del lixiviado. A partir de estos se generan los criterios de diseños, adaptaciones y modificaciones al destilador solar activo

Es prioritario para la implementación de cualquier tratamiento de lixiviados la conducción de las aguas pluviales. Este caudal puede ser aproximadamente  $0.44 \text{ m}^3/\text{día}$ -  $23 \text{ m}^3/\text{día}$ , de acuerdo con los cálculos y análisis realizados en este estudio. Es esencial contar con este dato para afinar los diseños realizados.

La solución de la problemática ambiental en el país se vería favorecida a partir de la unión academia, empresa y estado. De manera que el planeamiento sea el óptimo y la implementación eficiente. Así los recursos del estado y la población serían invertidos adecuadamente.

## CAPITULO 7 RECOMENDACIONES

- Es importante la implementación de un plan de gestión de residuos municipal en el que se fomente la separación de los residuos sólidos en la fuente. Esto con el fin de eliminar compuestos tóxicos o corrosivos de los desechos domésticos. Además, dicho plan permitiría generar una disminución en la producción per capita del cantón; que al mismo tiempo ampliaría la vida útil del relleno y la disminución o mantenimiento en la producción de lixiviados.
- Posterior a la construcción de los canales de conducción de pluviales se deben realizar mediciones de caudal para verificar el dimensionamiento de las alternativas planteadas.
- Se recomienda la construcción del sistema de tratamiento por etapas; donde la conducción de pluviales es la primera, el pretratamiento completo sería la segunda etapa constructiva y posteriormente el sistema de tratamiento seleccionado.
- La optimización del espacio en el sitio debe ser una prioridad para la municipalidad, ya que este espacio tendría múltiples usos posterior a su cierre técnico. Es importante tomar en cuenta que lo ideal sería utilizar un sistema de tratamiento que ocupe la menor área posible, con el fin de analizar el aprovechamiento del área como una planta del tratamiento de aguas residuales del cantón (sector, poblado o del centro) que se podría construir en el sitio

Es importante considerar una estación de reciclaje a nivel regional, donde se fomente el reciclaje en la zona por medio de planes de gestión integral de los residuos regionales, de manera que se apoye al talento local y el empleo regional

Otro uso, propuesto por el Ing. Rafael Chinchilla, es una estación de tranferencia de los desechos ordinarios, donde posteriormente los desechos serán trasladados a algún otro sitio de disposición final.

- En cuanto a la evaporación de lixiviados, se pueden estudiar diferentes valores de las variables que afectan el sistema de destilación solar activa para obtener una máxima eficiencia de destilado, así como los materiales y dimensiones del sistema.

- Un análisis más detallado de la recuperación del vapor es importante, de manera que la recuperación óptima del vapor sea establecida con más detalle a través de variables como la cantidad de salidas, recipiente de recuperación de destilado (tipo y material) y método de condensación.
- Para este estudio fueron limitantes la longitud de la manguera de salida, así como el material y temperatura del agua que enfría la manguera, por lo que se recomienda un sistema de recirculación de agua
- Considerar que el funcionamiento de un sistema, cuya fuente de energía es renovable, debe poseer alguna especie de almacenamiento de energía para obtener resultados en los que la variabilidad sea baja.
- Se debe analizar si el funcionamiento óptimo es mediante el llenado continuo o por lotes para beneficiar la producción de destilado.
- El uso de un destilador solar no es exclusivo para el tratamiento de las aguas residuales, por lo que se debe investigar su uso para la generación de agua potable por medio de la desalinización; así como su implementación en la producción del agua destilada requerida por equipos hospitalarios y procesos de laboratorio y de salud en general. Otro potencial beneficiario es la industria alimenticia para la concentración y deshumidificación de alimentos.
- La modelación de la distribución de calor en el evaporador puede ser objeto de futuros estudios.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alcañiz, J. M. capítulo 4 erosión: evaluación del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo.
2. Al-Hayek, I. Omar, B (2003) The effect of using different designs of solar stills on water distillation. 169 (2004) 121-127
3. Arboleda, J (2001) Teoría y práctica de la purificación del agua Colombia. McGraw Hill . 3ed
4. Araya, K. Navarro, C. Vargas, S. (2010). Informe de visita técnica relleno Río Azul, La Unión, Cartago. Gestión de residuos sólidos. Ingeniería Ambiental. Tecnológico de Costa Rica.
5. Argaw, N. (2003). Renewable energy in water and wastewater treatment applications. *National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy Laboratory*, , 38-46.
6. Arrechea, A. P., Torres, M. L., & Lloréns, M. C. E. Tecnología química, edición especial, 2009.
7. Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica. (1995). Ley orgánica del ambiente, no. 7554. *La Gaceta, Diario Oficial*, (215), 13.
8. Ávila Macaya, C., Rivela Carballal, B., Méndez Pampín, R., Moreira Vilar, M. T., & Feijoo Costa, G. (2008). Comportamiento, modelización e impacto ambiental de los lixiviados de vertedero. *Tecnología Del Agua*, 28(292), 48-57.
9. Barrow, C. J. (1999). *Environmental management: Principles and practice*. London: Routledge.
10. Bitton, G., & Wiley, J. (1994). *Wastewater microbiology* Wiley Online Library.

11. Burbano, J. C., Restrepo, Á. H., & Sabogal, Ó. J. (2006). Diseño y construcción de un calentador solar de agua operando por termosifón. *Scientia Et Technica*, (31), 85-90.
12. Cámara Costarricense de la construcción. (s.f.). *Evolución y estado actual del sector construcción: impacto en la economía nacional y desafíos. Decimotercer informe sobre el estado de la nación*. Costa Rica
13. Calvo, J (2008) Notas climatología forestal 2008. Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica
14. Campos, A., Umaña, C., & Vengas, D. (2010). *Informe de visita técnica relleno río azul No. 2.*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
15. Castellón, R (2009) Reseña histórica del cantón de Garabito. Geografía y Plan regulador. Municipalidad de Garabito
16. Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of water and wastewater treatment technologies* Butterworth-Heinemann.
17. Chernicharo, C. A. L. (1997). *Reactores anaeróbios* UFMG.
18. Corbitt, R. A., Burstein, D., Jain, R., Abron, L. A., Clar, R. A., Sethl, V., et al. (1990). *Standard handbook of environmental engineering* McGraw-Hill New York, NY.
19. Republica de Costa Rica (1949). Constitución política de la república de Costa Rica. *San José*,
20. Departamento de desarrollo sostenible. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía: Capitulo 4 Caudal. Extraído de <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm> el 17 de julio de 2011.
21. De Lemos (1997). Reactores anaeróbios: Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Editoracao SEGRAC, Belo Horizonte: Brasil.

22. Díaz, A. López, R. Arreola, U.(2009) Análisis y diseño de un canal de recolección de agua pluvial. Universidad de Guadalajara
23. Di Palma, L., Ferrantelli, P., Merli, C., & Petrucci, E. (2002). Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis. *Waste Management*, 22(8), 951-955.
24. Doherty, M., & Malone, M. (2001). In McGraw Hill Higher Education (Ed.), *Conceptual design of distillation systems* (1 ed.). New York:
25. Duncan, D., Harvey, F. y Walker, M. 2007. *Australian Water Quality Centre. Regulatory monitoring and testing Water and wastewater sampling*. EPA: Estados Unidos de América.
26. Ehrig, H. J. (1992). Cantidad y contenidos de lixiviados de rellenos de desechos domésticos.
27. El-Gendy, A., Biswas, N., & Bewtra, J. (2006). Municipal landfill leachate treatment for metal removal using water hyacinth in a floating aquatic system. *Water Environment Research*, 78(9), 951-964.
28. Electronic Code of Federal Regulations(1991) Title 40: Protection of Environment Part 258 Criteria for municipal solid waste landfills. Extraído de <http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=95a8dd346d2d7f738fca5bdbbad06830&rgn=div5&view=text&node=40:25.0.1.4.39&idno=40#40:25.0.1.4.39.5.23.4> el 16 de julio de 2011.
29. EPA (1988). U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. In Center for Environmental Research Information (Ed.), *Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*

30. El País (2011) Evalúan construcción de planta de tratamiento de lixiviados de Navarro. Consultado el 19 de diciembre 2011 en:  
[\(http://www.elpais.com.co/elpais/cali/construccion-planta-tratamiento-lixiviados-continua-en-evaluacion\)](http://www.elpais.com.co/elpais/cali/construccion-planta-tratamiento-lixiviados-continua-en-evaluacion)
31. Farquhar, G. (1989). Leachate: Production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(3), 317-325.
32. Field, R. (1980) Design manual for solar heating of buildings and domestic hot water. Guithersburg : SOLPUB 2ed.
33. Filigrana, P. A., Gómez, O. L., & Méndez, F. (2011). Impacto de un sitio de disposición final de residuos sólidos en la salud respiratoria de los adultos mayores. *Biomédica*, 31, 322-334.
34. Fonseca, S., Abdala, J., Griñán, P., & Sánchez, J. (2005). Prototipo de destilador solar de fibra de vidrio. *Tecnología Química*, 25(3), 57.
35. García, O. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51-58.
36. Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. *Revista De Ingeniería Universidad De Los Andes*, 14, 44-55.
37. Gómez, L. (2005). *Teoría sobre análisis y construcción de biodigestores* (1st ed.). Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
38. González, Y., García, O., Infante, A. et ál. 2005. Situación actual de la producción de lixiviados en los vertederos provinciales de ciudad de la Habana. Impacto ambiental y propuestas de sistemas de tratamiento. *Cuba: Medio ambiente y desarrollo Revista electrónica de medio ambiente*, 9, 5.

39. Haralambopoulos, D., Biskos, G., Halvadakis, C., & Lekkas, T. (2002). Dewatering of wastewater sludge through a solar still. *Renewable Energy*, 26(2), 247-256.
40. Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería ambiental* Pearson Educación.
41. INEC. 2008. Proyecciones poblacionales del Instituto Nacional de Estadísticas y censos. Extraído de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx> el 13 de julio de 2011.
42. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2011) X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011 Cifras preliminares de población y vivienda. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2 ed. San José. Costa Rica.
43. Janssen, J. (2010) Evaluación del potencial de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y producción de energía a partir de rellenos sanitarios y vertederos en ciudades de Costa Rica. CEPAL. Sede subregional en México.
44. Jaramillo (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales: 05 Diseño de un relleno sanitario manual. Parte 1. OPS/CEPIS. Colombia
45. Katsifarakis, K.L (1993). Solar distillation treatment of landfill leachate. A case study in greece. *Desalination*, 94(2), 213-221. doi:10.1016/0011-9164(93)EO130-P
46. Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336.
47. Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336.

48. Kositzi, M., Poullos, I., Malato, S., Caceres, J., & Campos, A. (2004). Solar photocatalytic treatment of synthetic municipal wastewater. *Water Research*, (38), 1147-1154.
49. Li, Y., Wang, L., & Zheng, S. (2008). Removal of pollutants of landfill leachate by recirculation. *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*, 23(2), 281-284.
50. Martinez, R (2007) Estimación del costo global de tratamiento de aguas residuales urbanas en plantas de tratamiento. Proyecto de graduación licenciatura ing. química. Universidad de Costa Rica, Fac. Ing. 146p
51. Maximova, A., Koumanova, B. (2006). Study on the content of chemicals in landfill leachate. *Chemicals as Intentional and Accidental Global Environmental Threats*, , 345-356.
52. Méndez, Castillo, E., Sauri, M. et ál. (2004) Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería Revista Académica 2*, Universidad Autónoma de Yucatán. México: Mérida.
53. Méndez R. et ál. 2002. Tratamiento de lixiviados con carbón activad. *Ingeniería*, 6-3, 19-27.
54. Municipalidad de Garabito. 2001. *Premio Nacional de cantones saludables de Costa Rica Proyecto Parque de manejo de desechos*. Municipalidad de Garabito: Costa Rica.
55. Nandwani, S. (2009). *Seminario/Taller las aplicaciones practicas de la energía solar Destilador solar (construcción, funcionamiento y uso)*. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional de Costa Rica.

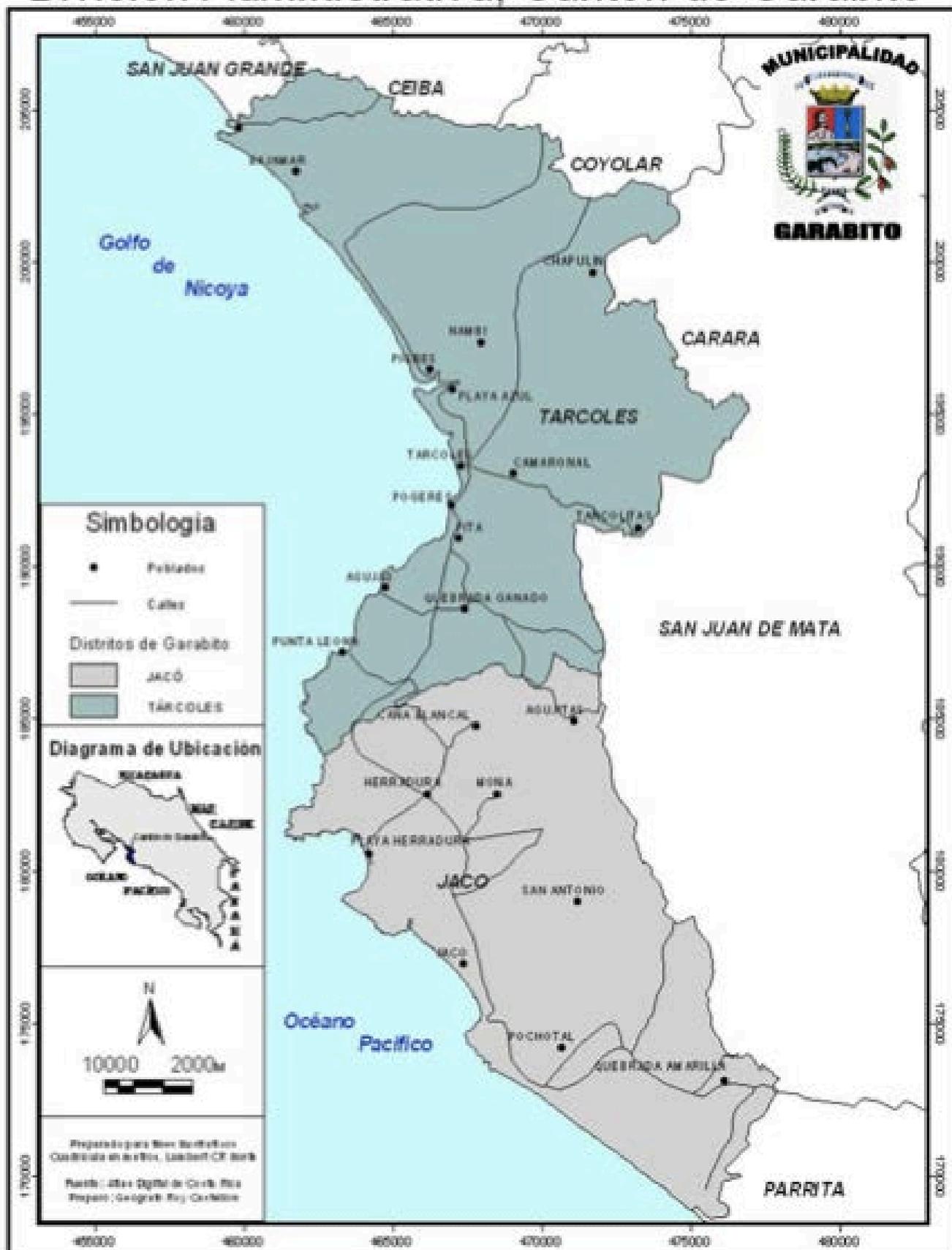
56. Nemerow, N. L. (2009). *Environmental engineering. water, wastewater, soil, and groundwater* Wiley.
57. Noguera, K. M., Olivero, J. T. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista Académica Colombiana de Ciencia* 34(132), 347-356.
58. Novelo, R. I. M., Hernández, E. M., Franco, C. Q., CastilloBorges, E. R., & Riancho, M. R. S. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería.Revista Académica*, (3), 19-27.
59. Organización Panoamericana de la Salud (OPS). (2005). *Guía para la operación y mantenimiento de tanques sépticos, tanques imnhoff y lagunas de estabilización*. Lima, Perú: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental.
60. Pacheco, J., & Magaña, A. (2003). Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*, 7(1), 21-25.
61. Palanivelu, K., Venkateswaran, P., Esakku, S., & Ponethal, R. (2007). Treatment of municipal landfill leachate by solar photocatalytic method using fixed titanium dioxide. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 49(1), 54-57.
62. Pankratz, T. M. (2001). *Environmental engineering dictionary and directory* CRC.
63. Pellón,A. Lopéz,M. Espinosa,M (2009) Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Tecnología Química*.
64. Pérez. J (1995) Estudio hidrogeológico para la ubicación de un relleno sanitario para el cantón de Garabito. Servicio Nacional de aguas subterráneas riego y avenamiento, Dirección de estudios básicos.
65. Poder Ejecutivo de Costa Rica. 2008. *Decreto 27378 Reglamento Relleno sanitario*. San José, Costa Rica.

66. Potoglou, D., Kouzeli-Katsiri, A., & Haralambopoulos, D. (2004). Solar distillation of olive mill wastewater. *Renewable Energy: An International Journal*, 29(4), 569. doi:10.1016/j.renene.2003.09.002
67. Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales* Reverté.
68. Reinhart, D. R., & Grosh, C. J. (1998). Analysis of florida MSW landfill leachate quality.
69. Rehman,A (2003) Landfill Leachate treatment using evaporation technology. Otta-Carleton Institute for environmental engineering. Otawwa, Ontario
70. Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.
71. Roe, S. M., & United States. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. (1998). *Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas* US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory.
72. SCS Engineers (2007) Informe de evaluación relleno sanitario Doña Juana, Bogota, Colombia . consultado el 18 diciembre 2011 de: <http://www.globalmethane.org/Data/DonaJuanaSpanish.pdf>
73. Salas, L (1999) .Informe 3 Regencia Ambiental Etapa II Operación del Proyecto Relleno Sanitario Regional Los Mangos.CIAS S.A Consultores en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
74. Salas,O. Vasques,R. Zumbado,L. (2010) *Informe de visita técnica relleno sanitario Los Pinos* No. 4. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.

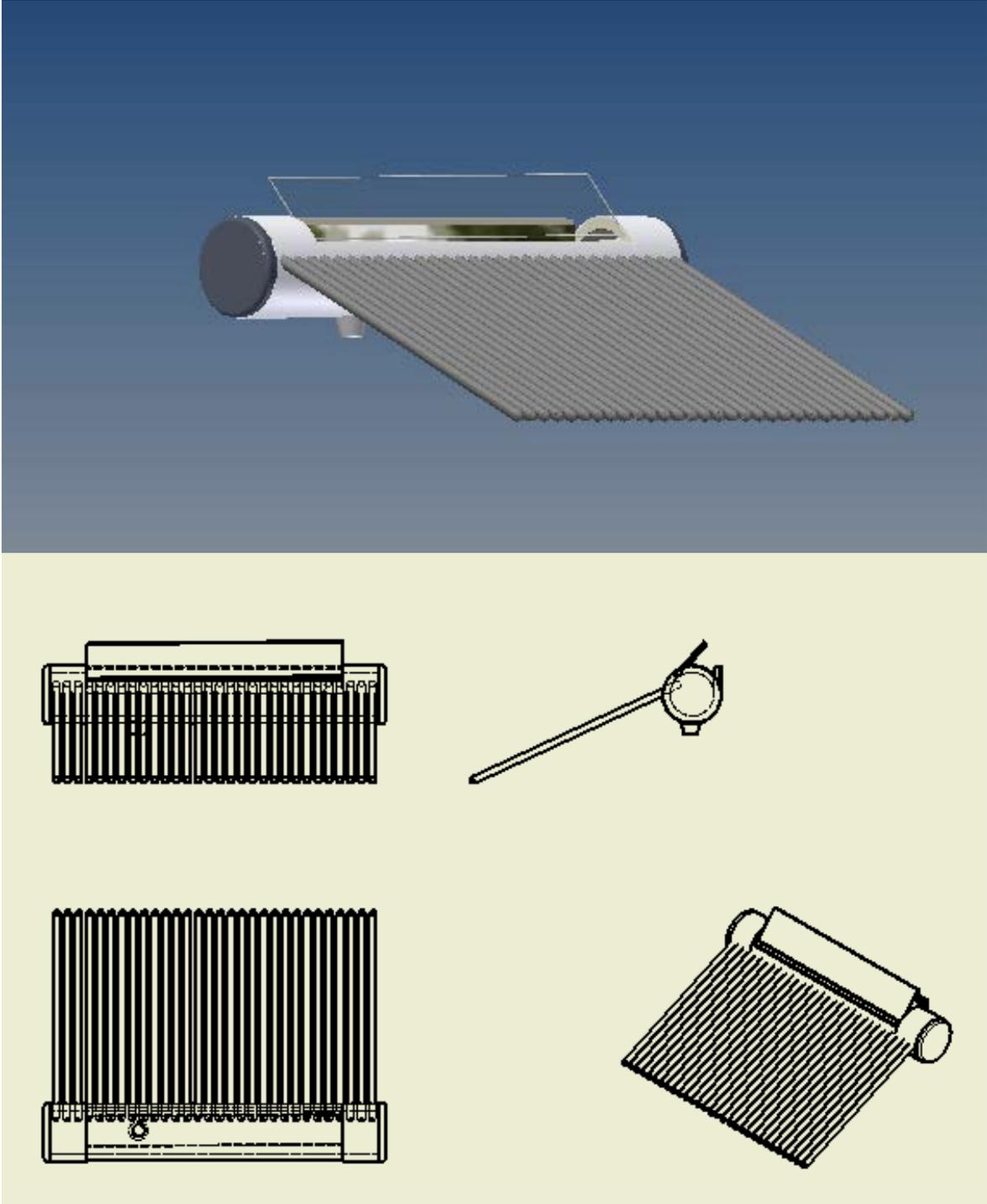
75. Sampathkumar, K., Arjunan, T., Pitchandi, P., & Senthilkumar, P. (2010). Active solar distillation--A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1503-1526.
76. Solar Photocatalytic treatment of landfill leachate (2002) cosultado el 13 de diciembre 2011 de [http://photocatalysis.web.auth.gr/index\\_en.html](http://photocatalysis.web.auth.gr/index_en.html)
77. Taylor, G., Muñoz, C. 1997. Municipalidad de Garabito Documento de préstamo No 6-RS-1014-0297 compra de un terreno para relleno sanitario. Instituto de fomento y asesoría municipal: Dirección de financiamiento municipal, sección análisis y evaluación de proyectos: Costa Rica.
78. Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management* McGraw-Hill.
79. Tripathi, R., & Tiwari, G. (2005). Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation. *Desalination*, 173(2), 187-200.
80. Universidad Pontifica Valparaiso. SF. Estudio de impacto ambiental Centro de Manejo y disposición final de residuos sólidos Chiloé, Municipalidad de Castro.  
  
Consultado el 10 diciembre 2011 de:  
  
[http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id\\_documento=4887138&modo=iframe](http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=4887138&modo=iframe)
81. Wiszniowski, J., Robert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K., & Weber, J. (2006). Landfill leachate treatment methods: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 4(1), 51-61.
82. Wright, J. (2002). Mapas de radiación solar en costa rica. *Departamento De Física, Universidad Nacional.Heredia, Costa Rica.*

83. Yiannopoulos, A. C., Manariotis, I. D., & Chrysikopoulos, C. V. (2008). Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 99(16), 7742-7749.

# División Administrativa, Cantón de Garabito



ANEXO 2 DIAGRAMA DE DESTILADOR SOLAR ACTIVO PROPUESTO



ANEXO 3 SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS PROPUESTOS

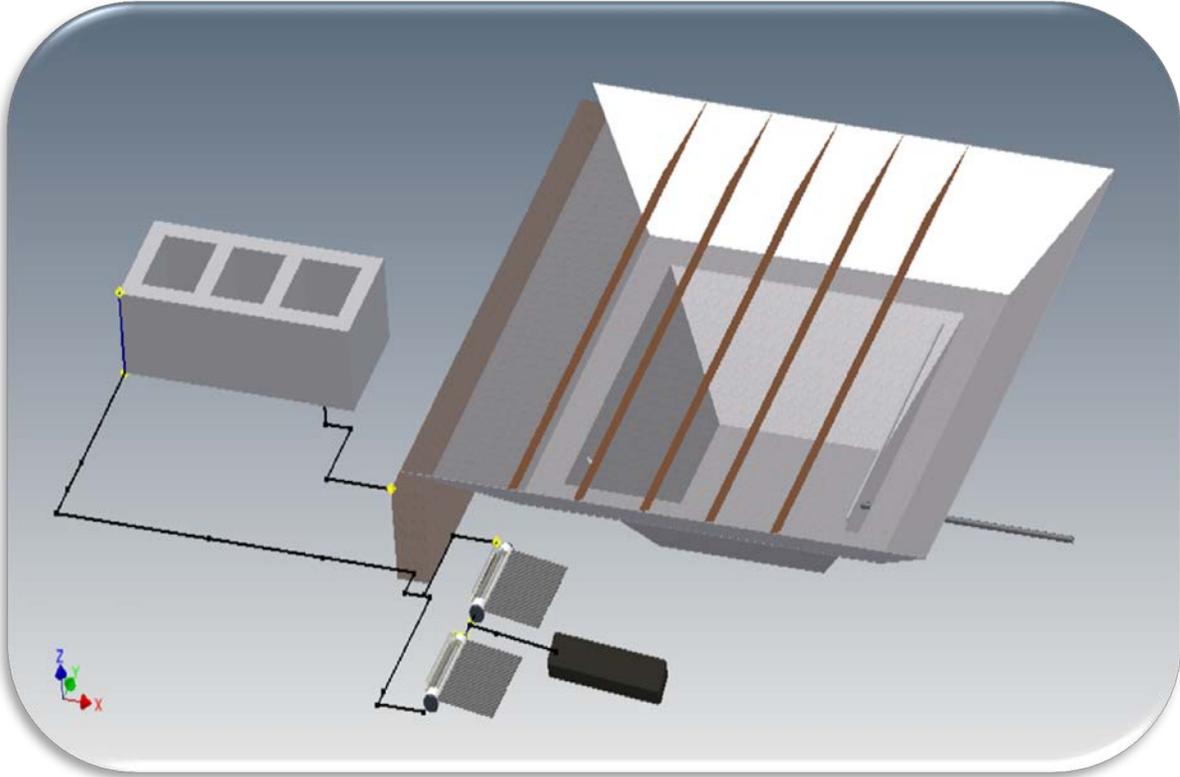
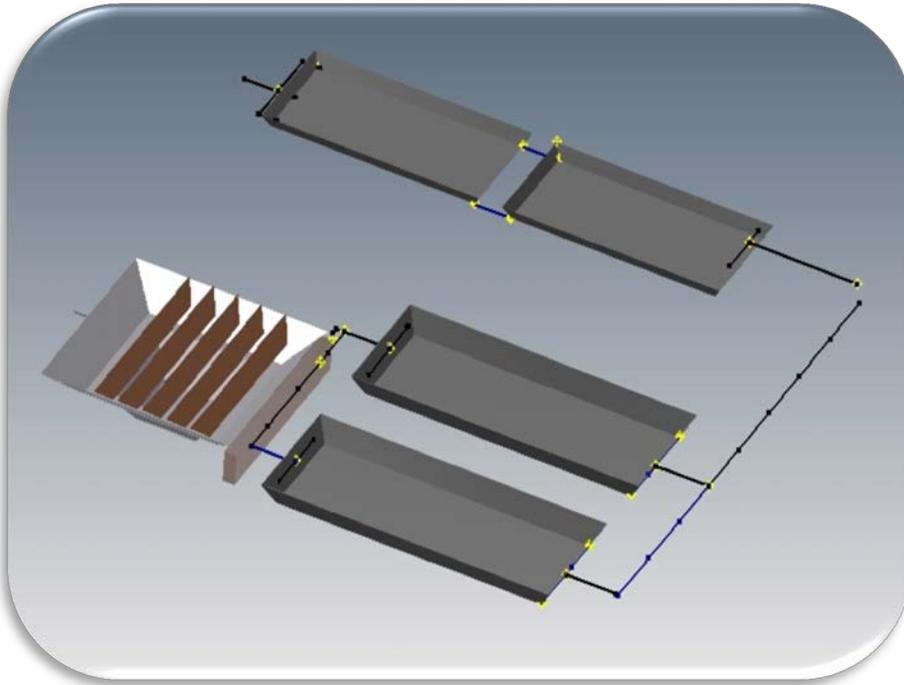
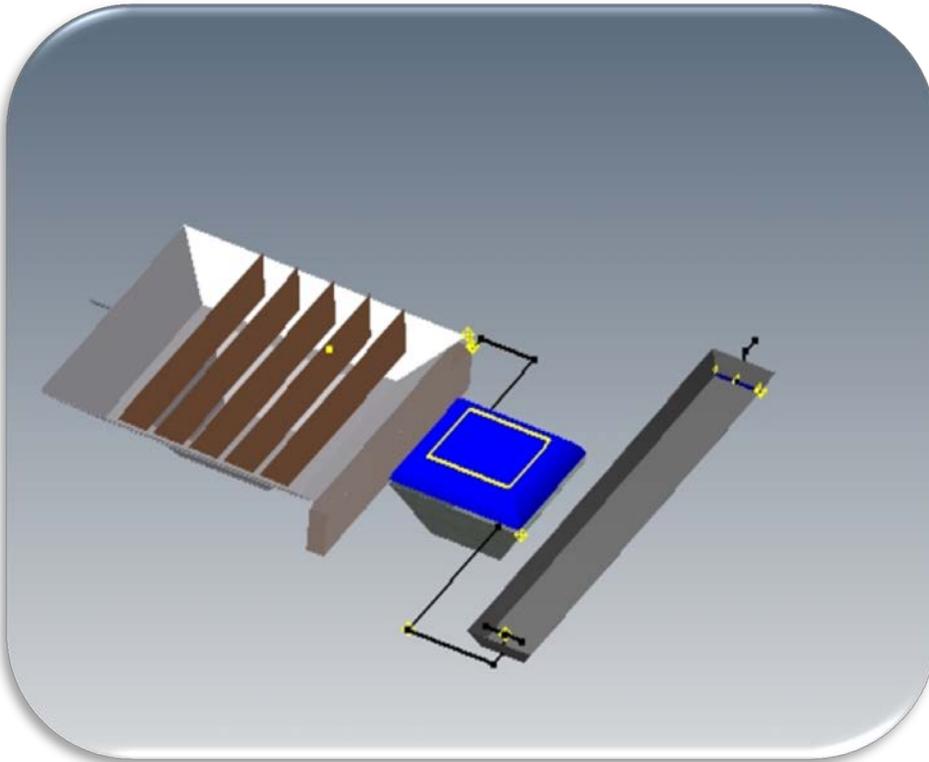


Figura 52 Sistema de tratamiento por medio de destilación solar activa y modificaciones sedimentador



**Figura 53 Sistema de tratamiento por lagunas aerobias, facultativas y modificaciones sedimentador**



**Figura 54 Sistema de tratamiento por reactor anaerobio, humedal y modificaciones sedimentador**

## ANEXO 4 REQUERIMIENTOS ADICIONALES DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

### ***Materiales e Insumos***

Para cada alternativa se deben de considerar equipos, materiales e insumos mínimos requeridos en los sistemas de tratamientos de aguas residuales como lo son:



**Figura 55. Equipo y materiales básicos para la operación de la planta**

### ***Personal***

Se requiere un profesional, jefe de planta, que tenga conocimiento de aguas residuales así como de operación de plantas de tratamiento. Se requiere también al menos de un colaborador para las labores diarias de operación y mantenimiento.

Las labores del Jefe de Planta se orientarán a la verificación de que los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales se realicen a plenitud, así como a la coordinación de las actividades que deberán llevar adelante el operador y los obreros.

Las funciones que deberán desempeñar son las siguientes:

- Administrar y dirigir las acciones de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, y como tal, ejercita autoridad directa sobre todo al personal bajo su responsabilidad.

- Elaborar el programa de operación, mantenimiento y seguridad de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Coordinar con el profesional encargado del laboratorio en los aspectos relativos al control de la calidad de las aguas residuales crudas y tratadas.
- Coordinar con el departamento de alcantarillado de la empresa en los aspectos relativos a la descarga de efluentes industriales y comerciales que puedan afectar la tratabilidad de las aguas residuales y, por lo tanto, el buen funcionamiento de la planta de tratamiento.
- Informar periódicamente al nivel directivo de la empresa, a través de la Gerencia de Operaciones, sobre la administración, operación, mantenimiento y calidad de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Coordinar con la Gerencia de Operaciones la consecución de los recursos necesarios para una adecuada operación y mantenimiento, en lo relativo a:
  - Requerimientos de personal
  - Suministro oportuno de piezas y equipos necesarios para el mantenimiento preventivo de las unidades en general
  - Suministro oportuno de materiales para la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales en general
  - Vehículos y transporte.
- Planificar los programas de monitoreo, evaluación e investigación en la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Procesar los registros operacionales para el control de los procesos de tratamiento de la planta que deben ser presentados ante el Ministerio de Salud y SETENA
- Elaborar periódicamente los informes relativos a la administración, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento.
- Supervisar el cumplimiento del programa de operación, mantenimiento y seguridad de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Supervisar la buena presentación de la planta de tratamiento de aguas residuales, principalmente en lo que respecta al mantenimiento de los jardines, orden de los equipos y sobre todo, la pulcritud integral de la instalación de modo que de crear una buena impresión a los visitantes.

- Capacitar al personal que laborará en la planta de tratamiento en lo referente a labores de operación, mantenimiento y seguridad, así como de sus responsabilidades.
- Mantener la buena imagen de la institución y colaborar con el Departamento de Relaciones Públicas de la empresa, así como atender y guiar a las personas que visitan las instalaciones de la planta de tratamiento.
- Otros que la Gerencia de Operaciones determine.

El operador de la planta de tratamiento es deseable que cuente con educación secundaria. Además, sería de gran beneficio que haya recibido capacitaciones o cuente con un nivel técnico en manejo y tratamiento de aguas residuales. Sus labores son las siguientes:

- Coordinar las actividades de su responsabilidad con el Jefe de Planta.
- Cumplir y supervisar el cumplimiento de todas las labores de operación y mantenimiento especificadas para la planta de tratamiento, y como tal, ejercitar autoridad directa sobre todos los obreros.
- Registrar adecuadamente, en los respectivos formularios, los datos operacionales de la planta de tratamiento en lo referente a caudal, temperatura, pH, oxígeno disuelto, y otros, de acuerdo a los puntos determinados en el programa de monitoreo, así como las observaciones visuales.
- Registrar los volúmenes de sólidos retenidos en las rejillas y en las lagunas de estabilización con la finalidad de optimizar los tiempos de almacenamiento y evacuación de los mismos.
- Colaborar en la toma de muestras de aguas residuales en los lugares de muestreo determinados en el programa de monitoreo.
- Supervisar la manipulación de las compuertas de ingreso a la planta de pre tratamiento y de los dispositivos de distribución de las aguas residuales a las diferentes lagunas de estabilización.
- Supervisar la limpieza de las cribas en las horas de mayor o menor volumen de sólidos retenidos.

- Informar al Jefe de Planta sobre los problemas que se susciten en los diferentes procesos de tratamiento con la finalidad de tomar las medidas correctivas del caso.
- Colaborar con el personal responsable en las labores de evaluación e investigación emprendidas en la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Garantizar la seguridad de equipos y herramientas para lo cual será el encargado de abrir y cerrar el almacén.
- Supervisar las labores realizadas por los obreros y asesorar a los mismos.
- Otras que el Jefe de Planta determine.

### ***Reportes Operacionales***

Según el Reglamento, para un efluente cuyo caudal promedio mensual sea mayor a 100 m<sup>3</sup>/día, el ente generador deberá presentar un reporte operacional cada tres meses. Por consiguiente, se debe presentar un reporte operacional con el formato establecido por la reglamentación (Decreto 33601).

## **Desarenador**

### *Operación*

Una vez que el nivel de arena ha llenado el fondo del canal desarenador o antes que cubra la bomba, se deberá proceder a su limpieza o poner en funcionamiento el clasificador de arena. Periódicamente, el operador deberá determinar el nivel de arena en el canal y a partir de estas observaciones podrá determinar el momento más oportuno para efectuar la limpieza del desarenador o poner en funcionamiento el sistema de clasificación de arena.

El material extraído del clasificador deberá ser almacenado en el contenedor y el agua que pudiera liberarse deberá ser drenada hacia el desarenador. En el caso que se generaran malos olores, se podrá añadir cal en polvo hasta controlar el exceso de humedad.

## **Sedimentador**

### *Arranque*

El arranque del sistema es esencial para obtener los resultados deseados. Es bueno que este se realice en los meses de mayor temperatura para facilitar el desarrollo de los microorganismos en general. Se deben realizar las siguientes acciones:

1. Llenarlo con agua limpia
2. Instalar inóculo proveniente de algún sistema similar

### *Mantenimiento y Operación*

1. Para la zona de sedimentación, se debe asegurar que el caudal se encuentre dividido en partes iguales. También que los ingresos no se encuentren obstruidos
2. Limpieza de lodos generados cuando este sea superior a 1 m (OPS, 2005)
3. Limpieza de material flotante acumulado en la superficie

### *Posibles problemas operacionales*

Algunos de los problemas más comunes que se pueden generar al operar un sedimentador se presentan a continuación, así como las soluciones a estos problemas y sus principales causas.

**Cuadro 27. Posibles problemas operacionales que se pueden presentar en un sedimentador**

| <b>Problema</b>   | <b>Posibles causas</b>  | <b>Posibles soluciones</b>   |
|---|---|--|
| <b>Distribución no uniforme de caudal por turbulencia, Movimiento superficial del agua en la zona de ingreso y/o cortocircuitos (OPS, 2005)</b> | Condiciones hidráulicas inadecuadas en las estructuras de ingreso   | Colocar vertederos pequeños o ajustarlos para permitir la distribución uniforme del caudal afluente            |
|   | Estructuras de ingreso o salida mal niveladas   | Colocar obstáculos como pantallas, bloquetas para ajustar la distribución uniforme del caudal afluente         |
|   | Vertederos mal nivelados  | Ajustar vertederos al nivel correspondiente  |
| <b>Alto contenido de sólidos en la superficie del sedimentador</b>  | Poca profundidad por debajo del nivel de agua de la pantalla de salida  | Ampliar la profundidad de la pantalla de salida por debajo del nivel de agua hasta alcanzar mejores resultados |
|   | Acumulación de cantidades excesivas de espumas en la superficie de agua, o de material adherido a las paredes del sedimentador, canales de colección o vertederos de entrada y salida | Remover el material flotante con mayor frecuencia y en forma completa  |
|   | Ascensión de sólidos a través de la ranura del sedimentador desde la cámara de digestión de   | Drenar los lodos del tanque de digestión hasta una altura que impida su paso al sedimentador                   |
|   | Alto contenido de sólidos en el agua residual cruda   | Evitar exceso de la capa de material flotante y de espuma en la zona de ventilación.                           |

## **Estanques de estabilización**

### *Arranque*

El arranque de una laguna de estabilización toma semanas, o hasta meses, y debe de efectuarse con un caudal menor al de diseño para favorecer la formación de biomasa. Idealmente, el llenado deberá realizarse en la época seca para que las altas temperaturas favorezcan los procesos microbiológicos (CEPIS, 2005).

1. Se debe llenar con agua limpia con el fin de verificar que no existan fisuras al interior de las lagunas por donde podría infiltrarse el agua residual, así como ningún tipo de vegetación. Además, de esta manera se garantiza que todas las compuertas y distribuidores de caudal se encuentren en las posiciones correctas y que los vertederos de salida y los canales de conducción estén libres de obstáculos.
2. Llenar con agua residual cruda.
3. Verificar carga sobre los vertederos situados en las estructuras de salida de las lagunas, las que deben mantenerse uniforme en todo su ancho.
4. El llenado de los estanques facultativos es lento, al inicio y durante dos o más días, se aplicará una lámina de agua de unos 30 centímetros. Luego de alcanzada la altura, se aguarda un tiempo prudencial para el desarrollo natural de las algas, el cual bajo condiciones normales puede demandar dos o más semanas. Es necesario que mientras se desarrollen las algas se mantenga la lámina de agua dentro de la laguna.
5. Se mantiene al inicio una lámina de 30cm, hasta que el agua se ha tornado verde por el crecimiento de las algas, luego se procede a cargarlo con una tasa de aplicación similar al del diseño hasta llegar al nivel de rebose de los vertederos de salida. Finalmente, al igual que en el caso anterior, se procede a verificar el nivel de cada uno de los vertederos, de modo que la lámina de agua efluente sea igual y homogénea en todos ellos.

### Mantenimiento y Operación

1. Remoción del material filamentososo que pudiera adherirse o aglomerarse en las estructuras de salida y paredes.
2. Medición de caudal
3. Análisis de aguas residuales
  - Demanda biológica de oxígeno
  - Sólidos suspendidos totales
  - Sustancias químicas que afectan el funcionamiento del tratamiento biológico ( cobre, cromo 3+, cromo 6+, cadmio, zinc, níquel, Cobalto, Cianuro, Sulfuro de hidrogeno)
4. Verificar periódicamente la presencia de material sedimentable grueso

### Problemas operacionales

**Cuadro 28. Posibles problemas operacionales que se presentan en las lagunas**

| Problema                                | Causa   | Solución   |
|---|---|--|
| Presencia de Natas y material flotante. | Afloración excesiva de algas (formación de nata verde).   | Romper la nata vegetal con un chorro de agua o rastrillo.                                    |
|   | Presencia de material extraño (ej. basura).   | Remover el material flotante con el desnatador.  |
|   | Afloración de lodo  | Romper o remover las placas de lodo.   |
|   | Poca circulación de la masa de agua y actuación del viento.   | Eliminar los obstáculos que impiden la acción del viento (ej Cortinas de árboles).           |
| Problemas ocasionados por la sobrecarga | Sobrecarga orgánica que disminuye el pH y la concentración de oxígeno disuelto (Se manifiesta por el cambio de color del efluente amarillento, rosado, marrón o negro con predominancia de rotíferos y crustáceos que se alimentan de las algas). | Retirar temporalmente la laguna de servicio.   |
|   |   | Disminuir la carga de aplicación o el caudal afluente.                                       |
|   |   | Recircular el efluente a razón de 1/6 (efluente / afluente).                                 |
|   |   | En caso de sobrecargas frecuentes, instalar aireadores.                                      |
|   |   | Revisar las pantallas de los distribuidores de caudal para determinar su correcta ubicación. |

|  |  |   |
|--|--|---|
| Malos olores ocasionados por las condiciones atmosféricas.   | Largos períodos de cielo nublado y bajas temperaturas.   | Retirar temporalmente la laguna de servicio.<br>Disminuir la carga de aplicación o el caudal afluente.<br>Recircular el efluente a razón de 1/6 (efluente / afluente).<br>Instalar aireadores.  |
| Malos olores ocasionados por corto-circuitos hidráulicos.<br><b>Malos olores causados por sustancias tóxicas</b> | Presencia de vegetales acuáticos al interior de la laguna.<br>Descargas significativas de aguas residuales industriales al sistema de alcantarillado (sobre carga orgánica y/o presencia de sustancias tóxicas). | Cortar y remover las plantas acuáticas. - En caso de zonas muertas, poner en funcionamiento los aireadores para producir una pequeña mezcla.<br>Efectuar un análisis físico-químico completo del afluente, para identificar la presencia de compuestos tóxicos. |
| <b>Producción de malos olores</b>  | Agua residual en estado de septicidad  | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas   |
|  | Manejo inadecuado de los residuos sólidos en el contenedor.  | Verificar la posibilidad de reducir las concentraciones de sulfatos en el sistema   |
|  | Sobrecarga del caudal de agua residual como consecuencia de elevadas velocidades superficiales   | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas   |
| <b>Proliferación de insectos</b>   | Manejo inadecuado de los residuos sólidos almacenados en el contenedor   | Evacuación más seguida de los residuos sólidos  |
|  | Caída brusca de la temperatura del agua residual   | Adición de cal<br>Retirar reactor de operación hasta que se reduzcan los ácidos volátiles   |

## **Reactor anaerobio**

### *Arranque*

Para la operación de éste se debe considerar la duración del arranque del sistema, que depende de los parámetros biológicos, químicos y físicos. El arranque está influenciado por la concentración y composición de las aguas residuales, el volumen, la actividad y la adaptación del inóculo, condiciones ambientales, parámetros de operación y por último la configuración del reactor. (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003) El arranque de este sistema consiste en:

1. Operación de la planta con agua potable (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003): Esto se realiza con el fin de comprobar que no haya fugas en el tanque y las tuberías, también para garantizar que las bombas y demás mecanismos del transporte del líquido funcionen correctamente.

2. Inóculo de agua residual, al diluir y filtrar antes de introducir al reactor (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003): El tiempo de arranque puede reducirse sustancialmente utilizando un inóculo que acelere la formación del manto de lodos dentro del reactor. Además se reducen pérdidas de lodo durante su proceso de transferencia. Se sigue el siguiente procedimiento para su inoculación: (De Lemos, 1997)

- Llevar lodo de inóculo al reactor siempre cuidando que sea descargado en el fondo del reactor para así evitar turbulencias y contacto excesivo con el agua residual (De Lemos, 1997)
- Dejar el lodo en reposo por un período aproximado de 12-14 horas, aumentando su adaptación gradual a la temperatura ambiente (De Lemos, 1997)

El inóculo ideal sería el lodo digerido de un sistema similar de tratamiento de aguas residuales. Dicho lodo deberá descargarse en el reactor hasta alcanzar 0,5 m de profundidad. El resto del reactor deberá completarse con el agua del sistema de abastecimiento y se le dejará en reposo por varias semanas con el fin de que las bacterias presentes en el lodo se adapten a las características del agua que deberán tratar.

3. Llenar el reactor con agua residual en recirculación hasta que se disminuya la DQO de manera no significativa (menos de 10%) (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003)
4. Alimentación por lotes (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003)

Luego de este período de reposo, el sistema puede empezar a recibir las aguas residuales provenientes del relleno sanitario, con un caudal que debe ser lo más pequeño posible al principio e ir aumentándose poco a poco hasta alcanzar el caudal de diseño. No se le debe descargar el caudal de diseño desde el inicio de la operación, ya que esto causaría un efecto de choque que arruinaría lo logrado en el período de aclimatación de las bacterias.

Este patrón de carga debe ser progresivo, ya que esta situación beneficia el arranque del sistema brindándole cargas orgánicas progresivas prolongadas, con lo que se evita el efecto de impacto por un aumento de carga en un período corto de tiempo o sobrecarga. (Pazos, A. 1990)

- Según De Lemos, se debe iniciar su alimentación con aproximadamente la mitad de su volumen útil. Además se debe dejar que el reactor sea alimentado por un período de 24 horas. Cuando termina este periodo, y antes de la próxima alimentación, se deben coleccionar muestras del sobrenadante para realizar análisis de los siguientes parámetros: temperatura, pH alcalinidad, ácidos volátiles y DQO
- Si estos se encuentran en los parámetros aceptables se prosigue con el proceso de alimentación hasta llegar al volumen normal del reactor.
- Luego, se deja una vez más sin alimentación por otro período de 24 horas, al final de esto se deben de tomar nuevamente muestras y proceder como anteriormente
- Si los parámetros no se encuentran dentro de los establecidos se propicia una alimentación continua del reactor de acuerdo con la cantidad de inóculo utilizado y con un porcentaje de agua residual
- Luego de implantar el reactor, se procede al monitoreo de la rutina del proceso de tratamiento

- se da un aumento gradual de vacío del efluente, inicialmente cada 15 días de acuerdo a la respuesta del sistema. Este intervalo puede ser reducido o ampliado según la respuesta del sistema

5. Operar de manera continua alimentándolo con agua residual (Pacheco, J. & Magaña, A. 2003)

### *Mantenimiento*

A este sistema de tratamiento es necesario darle mantenimiento para asegurar así que está operando bajo las mejores condiciones y que sea eficiente. Entre el mantenimiento que se debe realizar periódicamente se encuentran los siguientes aspectos:

- A) Canal de entrada y tubería de alimentación:** el buen funcionamiento de un reactor depende de una distribución uniforme en el fondo del reactor, por lo que es importante mantener limpio el canal de entrada y los tubos de alimentación. Cuando se sospeche de una obstrucción en alguno de los tubos, se le deberá limpiar con un chorro de agua introduciéndole una manguera.
- B) Tubo de salida:** la recolección uniforme del efluente es de igual importancia que la distribución del efluente en el fondo. Para lograr una recolección uniforme es importante que todos los orificios del tubo de salida tengan un flujo libre, por lo que deberán ser inspeccionados diariamente. Cuando se sospeche alguna obstrucción en el tubo mismo, deberá registrarse removiendo los tapones laterales.
- C) Tubo de purga de lodos:** el tubo que conduce los lodos del fondo del reactor y sedimentador convencional al digester de lodos, deberá ser lavado con agua después de su uso, ya que está propenso a obstruirse con residuos de lodo purgado.
- D) Limpieza completa:** después de varios años de funcionamiento del sistema, podrá darse el caso de que la operación descrita anteriormente ya no sea suficiente para limpiar de manera adecuada el reactor. Deberá entonces elegirse un día de mínima o nula producción de la industria para seguir el procedimiento de limpieza

Cuando se efectuó una limpieza de este tipo, es de esperar que la eficiencia del sistema de tratamiento se situó temporalmente por debajo del valor de diseño. Tal situación se debe

a que la película biológica demora algún tiempo en formarse nuevamente alrededor de las piedras, pero al cabo de 1 o 2 meses la eficiencia volverá a sus valores normales.

Puesto que la capacidad del tanque es limitada, las purgas de los diferentes elementos del sistema de tratamiento deberán planificarse de modo que en lo posible no se presente una sobrecarga del digester.

### *Operación*

Para el monitoreo del proceso de tratamiento debe de ser definida una rutina de muestreo de los parámetros químico-físicos que deben ser analizados. Actividades básicas para el cumplimiento de la legislación y una operación adecuada.

**Cuadro 29. Parámetros y frecuencia de muestreo para el control operacional**

| Parámetro                                | Unidad     | Frecuencia de muestreo |           |            |
|--|------------|------------------------|-----------|------------|
|  |            | Influyente             | Reactor   | Efluente   |
| <b>Temperatura</b>                       | °C         | Diaria                 | Diaria    | -          |
| <b>pH</b>                                | -          | Diaria                 | Diaria    | -          |
| <b>Sólidos sedimentables</b>             | ml/L       | 3 x semana             | -         | 3 x semana |
| <b>Sólidos suspendidos</b>               | mg/L       | 3 x semana             | -         | 3 x semana |
| <b>Sólidos volátiles totales</b>         | mg/L       | -                      | Mensual   | -          |
| <b>Sólidos totales</b>                   | mg/L       | -                      | Mensual   | -          |
| <b>DQO total</b>                         | mg/L       | 3 x semana             | -         | 3 x semana |
| <b>DQO filtrada</b>                      | mg/L       | 1 x semana             | -         | 1 x semana |
| <b>DBO total</b>                         | mg/L       | 1 x semana             | -         | 1 x semana |
| <b>DBO filtrada</b>                      | mg/L       | 1 x semana             | -         | 1 x semana |
| <b>Nitrogeno total</b>                   | mg/L       | Quincenal              | -         | Quincenal  |
| <b>Fósforo total</b>                     | mg/L       | Quincenal              | -         | Quincenal  |
| <b>Actividad metanogénica específica</b> | gDQO/gSV*d | -                      | quincenal | -          |

\*Una vez comenzado el arranque el muestreo se puede realizar menos frecuentemente Fuente: De Lemos, 1997

### *POSIBLES PROBLEMAS OPERACIONALES*

El arranque y operación son procesos complejos que involucran factores relacionados con el diseño y operación del reactor, factores ambientales y factores relacionados con la cantidad de lodo.

El diseño y operación de un filtro anaerobio debe asegurar las siguientes condiciones:

- ❖ Contacto entre el lodo y el sustrato: el tiempo de retención hidráulico debe ser suficiente para permitir un adecuado contacto entre el lodo y el agua residual, principalmente en la zona de reacción, ya que uno de los problemas que se presentan es la flotación de algunos lodos, lo que dificulta el contacto adecuado con el agua residual, causando su salida del sistema.
- ❖ Retención de lodo activo dentro del sistema: se necesita una concentración de microorganismos activos alta, ya que entre más alta sea mayor será la carga orgánica que podrá tratar.
- ❖ Adecuadas velocidades de reacción: las altas velocidades causan arrastre de los gránulos, pero velocidades muy bajas hacen que se forme un goterón de gas entre los gránulos que eventualmente puede encapsularlos y luego arrastrarlos. Una velocidad adecuada garantiza la difusión del sustrato en el lodo y la transferencia de los subproductos generados entre las especies bacterianas.

Para que no afecte el correcto funcionamiento del sistema y que su operación sea la requerida, a continuación se presentan los principales problemas durante la operación de los reactores anaerobios y su posible solución:

### **Cuadro 30. Algunos problemas en la operación de un reactor anaerobio sus posibles causas y soluciones**

| <b>Problema</b>                              | <b>Posibles causas</b>   | <b>Posibles soluciones</b>   |
|--|--|--|
| <b>Producción de malos olores</b>            | Sobrecarga de aguas residuales como consecuencia de tiempo de detención                        | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas  |
|  | Elevadas concentraciones de compuestos de azufre en agua residual influente                    | Verificar la posibilidad de reducir las concentraciones de sulfatos en el sistema                  |
|  | Elevadas concentración de ácidos volátiles en el reactor, y la disminución de pH               | Adicionar cal hidratada para elevar la alcalinidad del reactor y mantener pH próximo a 7 (6,8-7,4) |
|  | Presencia de sustancias tóxicas en el agua residual  | Localizar y eliminar las fuentes de sustancias tóxicas   |
|  | Descenso de la temperatura del agua residual   | En caso de que el reactor no este cubierto analizar la posibilidad de cubrirlo                     |
| <b>Alto contenido de sólidos suspendidos</b> | Sobrecarga del caudal de agua residual como consecuencia de elevadas velocidades superficiales | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas  |
|  | Elevadas concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente                                 | Analizar la posibilidad de eliminar sólidos aguas arriba de los reactores                          |
|  | Exceso de sólido en el reactor   | Proporcionar un sistema de descarga del exceso de sólidos presentes en el sistema                  |
| <b>Caída en la producción de biogás</b>      | Fugas en la tubería de gas   | Arreglo de fugas   |
|  | Bloqueos en las tuberías de gas  | Desbloquear tuberías de gas  |
|  | Defectos en los medidores  | Reparar los medidores  |
|  | Elevadas concentración de ácidos volátiles en el reactor, y la disminución de pH               | Adicionar cal hidratada para elevar la alcalinidad del reactor y mantener pH próximo a 7 (6,8-7,4) |
|  | Presencia de sustancias tóxicas en el agua residual  | Localizar fuentes de sustancias tóxicas  |
|  | Caída brusca de la temperatura del agua residual   | En caso de que el reactor no este cubierto analizar la posibilidad de cubrirlo                     |
| <b>Caída de la eficiencia del sistema</b>    | Sobrecarga del caudal de agua residual como consecuencia de elevadas velocidades superficiales | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas  |
|  | Elevadas concentración de ácidos volátiles en el reactor, y la disminución de pH               | Adicionar cal hidratada para elevar la alcalinidad del reactor y mantener pH próximo a 7 (6,8-7,4) |
|  | Presencia de sustancias tóxicas  | Localizar fuentes de sustancias  |

|                                  |  |  |
|----------------------------------|--|--|
|                                  | en el agua residual  | tóxicos  |
|                                  | Pérdida excesiva de sólidos en el sistema con reducción de lecho o manto de lodo               | Disminuir caudal del influente de la unidad con problemas o retirar temporalmente el reactor de operación              |
|                                  | Caída brusca de la temperatura del agua residual   | Retirar reactor de operación hasta que se reduzcan los ácidos volátiles  |
| <b>Fluctuación de gránulos</b>   | Sobrecarga del caudal de agua residual como consecuencia de elevadas velocidades superficiales | Disminuir el caudal influente hacia la unidad con problemas  |
|                                  | Reiniciar la operación del sistema después de largos tiempos paralizado                        | Reiniciar el sistema con menores cargas volumétricas   |
| <b>Proliferación de insectos</b> | Presencia de capa de aceite y suciedad que normalmente se forma en los reactores anaerobios    | Aplicar dosis adecuadas de algún tipo de insecticida, de modo que no se perjudique el funcionamiento del reactor       |
|                                  |  | Remover la capa de aceite o suciedad<br>En caso de que el reactor no este cubierto analizar la posibilidad de cubrirlo |

Fuente: De Lemos 1997

## Humedal

### *Arranque*

1. Selección de las plantas de acuerdo a las especies mencionadas anteriormente que se encuentren disponibles en el país. Idealmente de algún sistema de tratamiento de aguas residuales.
2. Implementación de procedimientos para el manejo del nivel de agua con el fin de estabilizar la vegetación plantada
3. Aumentar el caudal por lotes y realizar análisis de la calidad del agua
4. Continuar con el caudal normal
5. Mensualmente eliminar exceso de plantas en el humedal
6. Limpieza de los elementos como ramas, hojas y otros que obstruyan la entrada, salida u otros equipos

7. Remoción de lodos semestralmente
8. Medición de caudales diariamente
9. Análisis de los siguientes parámetros diariamente
  - pH
  - oxígeno disuelto
  - Conductividad
  - Nivel de agua
10. Análisis de los siguientes parámetros mensualmente:
  - DBO demanda bioquímica de oxígeno
  - SST sólidos totales suspendidos
  - Coliformes fecales
  - Fósforo total
  - NH<sub>3</sub>-N
11. Observación del funcionamiento del sistema con respecto a vida silvestre, vegetación, problemas de erosión.
12. Análisis no rutinarios de la vegetación del humedal (rizomas, tallos, hojas) y de los sedimentos acumulados del suelo

### *Operación*

Se deben de regular los caudales de entrada al humedal de acuerdo a las variaciones que se den en la producción de lixiviados.

### *Problemas operacionales*

**Cuadro 31. Problemas operacionales presentados para los humedales**

| <b>Problema</b>                   | <b>Posibles causas</b>           | <b>Posibles soluciones</b>  |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| <b>Inundación</b>                 | Tormentas o lluvias torrenciales | Enviar el exceso a la primera etapa de tratamiento  |
| <b>Proliferación de mosquitos</b> | Agua superficial almacenada      | Implementación de peces: mantener oxígeno disuelto a 1mg/l y reducir densidad de vegetación |
|                                   |                                  | Agentes químicos para el control  |
|                                   |                                  | Cubrir superficie con grava fina o arena gruesa   |
|                                   |                                  | Plantas aromáticas  |

## **Lecho de secado**

### *Operación y Mantenimiento*

Los lechos de secado deben ser acondicionados cada vez que vaya a descargarse lodo del digester. De acuerdo a CEPIS (2005) La preparación debe incluir los siguientes trabajos :

a) Remover todo el lodo antiguo tan pronto como se haya alcanzado el nivel de deshidratación que permita su manejo. El lodo deshidratado con un contenido de humedad no mas del 70% es quebradizo, de apariencia esponjosa y fácilmente hincable con tridente

b) Nunca añadir lodo a un lecho que contenga lodo

c) Remover todas las malas hierbas u otros restos vegetales.

d) Escarificar la superficie de arena con rastrillos o cualquier otro dispositivo antes de la adición de lodo. Esto reduce la compactación de la capa superficial de arena mejorando la capacidad de filtración

e) La profundidad del lodo no debe ser mayor a 0.30 (idealmente 0.25)

f) Observación del lodo

g) Revisar adecuada resquebrajadura

h) Remoción de lodo alrededor del lecho cada una a dos semanas cuando el contenido de humedad sea 70-60%. Su apariencia es gruesa y agrietada, color negro o marrón oscuro.

Por último, periódicamente debe ser reemplazada la capa de arena hasta alcanzar su espesor original. Una parte de la capa de arena se pierde cada vez que se remueve el lodo seco. La arena que se utilice para reponer el espesor original debe ser de la misma característica que la especificada en su construcción.