

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un  
suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades,  
provenientes de una planta de tratamiento de agua residual doméstica**

**Trabajo Final de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Viviana Solano Ramírez**

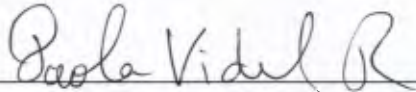
Directora de Proyecto de Graduación:

**Ing. Paola Vidal Rivera**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

## INTEGRANTES DEL COMITÉ ASESOR

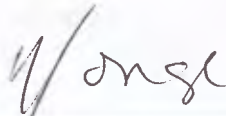
---



---

Ing. Paola Vidal Rivera

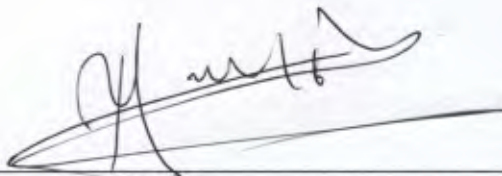
Directora



---

Ing. William Vargas Monge, Ph. D

Asesor



---

Ing. Rafael Baltodano Goulding, Ph. D

Asesor



---

Viviana Solano Ramirez  
Estudiante



28 de octubre de 2015  
IC-852-2015

Estudiante  
**Viviana Solano Ramírez**  
Carné A86188

Estimada estudiante:

Según el artículo 39 del reglamento de Trabajos Finales de Graduación, la Escuela de Ingeniería Civil se complace en otorgarle la aprobación con distinción de su Trabajo Final de Graduación denominado "*Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades proveniente de una planta de tratamiento de agua residual domestica*"

Por este motivo le manifestamos nuestras más sinceras felicitaciones por su dedicación y empeño.

Se despide atentamente,

Ing. Antonio Sánchez Fernández  
**Director**  
Escuela Ingeniería Civil

Universidad de Costa Rica  
**ingeniería**  
**civi**  
Facultad de Ingeniería

Cc: archivo  
GAA

## DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

---

Fecha: 2015, diciembre, 11

La suscrita, **Viviana Solano Ramírez**, cédula 1-1436-0682, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A86188, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades, provenientes de una planta de tratamiento de agua residual doméstica**, bajo la dirección de la Ing. Paola Vidal Rivera, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

*"Hay días en que me levanto con una esperanza demencial,  
momentos en los que siento que las posibilidades  
de una vida más humana están al alcance de nuestras manos.*

*Hoy es uno de esos días. "*

E. Sábato

## **AGRADECIMIENTOS**

---

A mi familia, porque me han guiado y apoyado durante esta etapa de mi vida; porque siempre han creído en mis decisiones y objetivos.

Agradezco a mis compañeros y compañeras que me enseñaron las lecciones más importantes: perseverancia, responsabilidad, honestidad y amor en nuestra profesión. Agradezco a la vida por su presencia, porque han sido una fuente de sabiduría y un motor incondicional.

A mi directora, la ingeniera Paola Vidal; por su esfuerzo en formar profesionales comprometidos con las causas comunes y con el respeto por la vida; por guiarme en la elaboración de un proyecto que ha sido determinante para mi desarrollo personal y profesional.

A mis profesores asesores, los ingenieros William Vargas y Rafael Baltodano, por brindarme sus consejos y apoyo durante este proceso.

Al personal del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica, del Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes y al Centro de Investigaciones Agronómicas, por su ayuda y disposición durante la realización de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 El problema y su importancia .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>24</b>
1.2.1 Objetivo general .....	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	24
<b>1.3 Delimitación del problema.....</b>	<b>24</b>
1.3.1 Alcances .....	24
1.3.2 Limitaciones .....	25
<b>1.4 Antecedentes .....</b>	<b>26</b>
<b>1.5 Metodología .....</b>	<b>27</b>
1.5.1 Fase investigativa .....	27
1.5.2 Fase experimental .....	29
1.5.3 Fase analítica .....	30
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Lodo residual .....</b>	<b>31</b>
2.1.1 Origen: Agua residual .....	31
2.1.2 Parámetros de calidad ambiental.....	33
2.1.3 Características de lodo residual.....	36
2.1.4 Tratamiento de lodo residual .....	39
2.1.5 Uso de lodo residual .....	40

<b>2.2 Suelo artificial .....</b>	<b>43</b>
2.2.1 Caracterización geotécnica del suelo artificial .....	43
2.2.2 Caracterización ambiental .....	49
2.2.3 Uso del suelo como material constructivo .....	49
<b>2.3 Impacto de agua y lodo residual en el ambiente.....</b>	<b>54</b>
2.3.1 Contaminación de agua.....	55
2.3.2 Contaminación del suelo.....	56
<b>2.4 Gestión de saneamiento en Costa Rica .....</b>	<b>57</b>
2.4.1 Marco legal .....	57
2.4.2 Marco institucional.....	60
2.4.3 Situación actual .....	60
2.4.4 Normativa internacional .....	63
<b>CAPÍTULO 3: PLANTA DE TRATAMIENTO BOULEVARD LAS PALMAS</b>	<b>65</b>
<b>3.1 Ubicación .....</b>	<b>65</b>
<b>3.2 Descripción técnica.....</b>	<b>66</b>
<b>3.3 Sistema de tratamiento .....</b>	<b>67</b>
3.3.1 Pretratamiento .....	69
3.3.2 Sistema biológico: lodos activados de aireación extendida.....	70
3.3.3 Tratamiento de lodos: digester aerobio y lechos de secado .....	71
<b>3.4 Eficiencia del tratamiento .....</b>	<b>74</b>
<b>3.5 Características climáticas del sitio.....</b>	<b>75</b>
<b>3.6 Descripción de visitas.....</b>	<b>77</b>



<b>CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LODO RESIDUAL.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1 Metodología de caracterización.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2 Descripción de muestra.....</b>	<b>81</b>
4.2.1 Recolección de lecho de secado .....	81
4.2.2 Almacenamiento.....	82
4.2.3 Edad de secado.....	84
4.2.4 Proceso de secado.....	89
4.2.5 Características físicas.....	89
4.2.6 Selección de muestras para ensayos .....	96
<b>4.3 Caracterización ambiental.....</b>	<b>98</b>
4.3.1 Contenido de nitrógeno y fósforo .....	98
4.3.2 Carga orgánica.....	100
4.3.3 Contenido orgánico y contenido de humedad.....	102
4.3.4 Potencial de hidrógeno.....	103
<b>4.4 Caracterización geotécnica.....</b>	<b>104</b>
4.4.1 Gravedad específica (ASTM D-854) .....	105
4.4.2 Granulometría (ASTM D-422).....	106
4.4.3 Límites de consistencia (ASTM D-4318) .....	107
4.4.4 Clasificación (ASTM D-2487).....	108
<b>CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DE SUELO ARTIFICIAL .....</b>	<b>109</b>
<b>5.1 Metodología de caracterización.....</b>	<b>109</b>
<b>5.2 Descripción de la muestra.....</b>	<b>111</b>
5.2.1 Selección de muestras para ensayos .....	111
5.2.2 Elaboración y composición de suelo artificial .....	112

5.2.3 Características físicas .....	112
<b>5.3 Caracterización ambiental .....</b>	<b>115</b>
<b>5.4 Caracterización geotécnica .....</b>	<b>115</b>
5.4.1 Proctor Estandar (ASTM D-698) .....	116
5.4.2 Corte Directo (ASTM D-3080) .....	120
<b>CAPITULO 6: EVALUACIÓN DE APLICACIONES DE SUELO ARTIFICIAL</b>	
<b>131</b>	
<b>6.1 Criterios de evaluación .....</b>	<b>131</b>
<b>6.2 Calidad ambiental.....</b>	<b>132</b>
<b>6.3 Calidad geotécnica.....</b>	<b>137</b>
<b>6.4 Evaluación de aplicaciones.....</b>	<b>140</b>
6.4.1 Material de relleno en obras conexas a carreteras, caminos y puentes.	140
6.4.2 Control de erosión en obras.....	142
6.4.3 Recubrimiento de tierra y agregado para taludes.....	143
6.4.4 Recuperación de sitios de extracción minera no metálica.....	144
<b>7. CAPÍTULO 7: ELABORACIÓN DE SUELO ARTIFICIAL .....</b>	<b>146</b>
<b>7.1 Extracción de lodo .....</b>	<b>146</b>
<b>7.2 Secado .....</b>	<b>148</b>
7.2.1 Dimensionamiento .....	151
7.2.2 Estructura .....	154
<b>7.3 Mezcla.....</b>	<b>157</b>
<b>7.4 Control de calidad .....</b>	<b>157</b>
<b>7.5 Presupuesto.....</b>	<b>158</b>

7.5.1 Costo inicial.....	158
7.5.2 Costo operativo .....	159
<b>7.6 Guía de manipulación de lodo y suelo artificial .....</b>	<b>161</b>
<b>CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>166</b>
<b>8.1 Planta de tratamiento .....</b>	<b>166</b>
8.1.1 Relación entre eficiencia de tratamiento y calidad de lodo .....	166
8.1.2 Efecto de condiciones climáticas en la deshidratación de lodo.....	167
<b>8.2 Efectos observados .....</b>	<b>168</b>
8.2.1 Relación entre características del lodo y el suelo artificial .....	168
8.2.2 Edad de secado como parámetro de calidad de lodo.....	169
8.2.3 Comparación de procesos de secado de lodo .....	170
8.2.4 Relación entre edad de secado y características físicas de lodo.....	172
8.2.5 Procesamiento de muestra .....	173
<b>8.3 Ensayos de caracterización .....</b>	<b>174</b>
8.3.1 Efecto de edad de secado en la calidad ambiental .....	174
8.3.2 Efecto de edad de secado en la calidad geotécnica .....	176
8.3.3 Relación entre trabajabilidad, calidad ambiental y geotécnica .....	180
<b>8.4 Usos del material.....</b>	<b>180</b>
<b>CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>182</b>
<b>9.1 Conclusiones .....</b>	<b>182</b>
<b>9.2 Recomendaciones.....</b>	<b>186</b>
<b>10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>189</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>194</b>

<b>Apéndice 1. Datos de laboratorio de ensayos ambientales</b>	<b>194</b>
<b>Apéndice 2. Datos de laboratorio de ensayos geotécnicos</b>	<b>198</b>
<b>Apéndice 3. Memoria de cálculo .....</b>	<b>203</b>
Obtención de curva de secado en planta de tratamiento.....	203
Cálculo de gravedad específica .....	203
Cálculo de curva granulométrica.....	204
Procedimiento de clasificación de suelo.....	205
Cálculo de curva de compactación .....	206
Cálculo de ángulo de fricción y resistencia cortante.....	208
<b>ANEXOS .....</b>	<b>210</b>
<b>Anexo 1. Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>210</b>
"Caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial" .....	210

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Esquema metodológico de caracterización mecánica y ambiental .....	28
<b>Figura 2.</b> Etapas de tratamiento de lodo residual .....	40
<b>Figura 3.</b> Curvas de compactación típicas de suelos variados .....	47
<b>Figura 4.</b> Diagrama de caja de corte .....	48
<b>Figura 5.</b> Ubicación de PTAR Boulevard Las Palmas.....	65
<b>Figura 6.</b> Diagrama de proceso de tratamiento en Boulevard Las Palmas .....	67
<b>Figura 7.</b> Diagrama de Boulevard Las Palmas .....	68
<b>Figura 8.</b> Pretratamiento: Rejillas y desarenador .....	69
<b>Figura 9.</b> Tratamiento biológico: tanque de aireación y sedimentador secundario	70
<b>Figura 10.</b> Tratamiento de lodos: Digestor aerobio .....	71
<b>Figura 11.</b> Tratamiento de lodos: Lechos de secado.....	72
<b>Figura 12.</b> Disposición de lodo residual .....	73
<b>Figura 13.</b> Ubicación de estructuras de Boulevard Las Palmas.....	73
<b>Figura 14.</b> Ubicación de estructuras de Boulevard Las Palmas.....	74
<b>Figura 15.</b> Precipitación de Ciudad Colón .....	76
<b>Figura 16.</b> Temperatura de Ciudad Colón .....	76
<b>Figura 17.</b> Esquema de caracterización de lodo .....	80
<b>Figura 18.</b> Almacenamiento de lodos antes de secado al horno.....	83
<b>Figura 19.</b> Almacenamiento de lodos luego de secado al horno.....	83
<b>Figura 20.</b> Cajón de almacenamiento de lodos luego de secado al horno .....	83
<b>Figura 21.</b> Relación de humedad y tiempo de secado de muestras de lodo .....	87
<b>Figura 22.</b> Relación de humedad y tiempo de secado teórico de lodo .....	88
<b>Figura 23.</b> Condiciones de secado al horno en laboratorio .....	89
<b>Figura 24.</b> Lodo categoría T <sub>3</sub> : Trabajabilidad baja.....	92
<b>Figura 25.</b> Lodo categoría T <sub>2</sub> : Trabajabilidad media .....	92
<b>Figura 26.</b> Lodo categoría T <sub>1</sub> : Trabajabilidad alta.....	93
<b>Figura 27.</b> Lodo categoría T <sub>1</sub> : Trabajabilidad alta.....	93
<b>Figura 28.</b> Deshidratación de lodo en lecho de secado .....	95
<b>Figura 29.</b> Saturación de lodo seco.....	95

<b>Figura 30.</b> Preparación de soluciones de lodo residual.....	99
<b>Figura 31.</b> Pruebas de contenido de nitrógeno y fósforo.....	99
<b>Figura 32.</b> Variación de contenido de minerales de muestras de lodo .....	100
<b>Figura 33.</b> Variación de grado de contaminación de muestras de lodo .....	101
<b>Figura 34.</b> Determinación de contenido de humedad y contenido orgánico .....	102
<b>Figura 35.</b> Variación de contenido de humedad y materia orgánica .....	103
<b>Figura 36.</b> Variación de potencial de hidrógeno de muestras de lodo.....	104
<b>Figura 37.</b> Determinación de gravedad específica de muestras de lodo.....	105
<b>Figura 38.</b> Curvas granulométricas de muestras de lodo.....	107
<b>Figura 39.</b> Esquema de elaboración y caracterización de suelo artificial .....	110
<b>Figura 40.</b> Características físicas de suelo artificial .....	113
<b>Figura 41.</b> Compactación de muestra S-13.....	116
<b>Figura 42.</b> Curvas de compactación y saturación total de muestras .....	119
<b>Figura 43.</b> Equipo de corte directo.....	120
<b>Figura 44.</b> Elaboración de pastilla de corte directo .....	121
<b>Figura 45.</b> Falla de pastilla corte directo no consolidado-no drenado .....	122
<b>Figura 46.</b> Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra, condición NC-ND...	123
<b>Figura 47.</b> Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra, condición NC-ND...	124
<b>Figura 48.</b> Deformación axial y deformación vertical de muestra .....	124
<b>Figura 49.</b> Deformación axial y deformación vertical de muestra .....	125
<b>Figura 50.</b> Falla de pastilla corte directo tipo consolidado-drenado .....	125
<b>Figura 51.</b> Consolidación de la muestra S-10, Probeta 1 .....	127
<b>Figura 52.</b> Consolidación de la muestra S-10, Probeta 3 .....	127
<b>Figura 53.</b> Consolidación de la muestra S-10, Probeta 4 .....	128
<b>Figura 54.</b> Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra, condición CD .....	128
<b>Figura 55.</b> Deformación axial y deformación vertical de muestra, condición CD	129
<b>Figura 56.</b> Proyección de humedad para un tiempo de 77 días en PTAR .....	150
<b>Figura 57.</b> Área de celda requerida según concentración de sólidos.....	154
<b>Figura 58.</b> Vista en planta de área de almacenamiento y secado.....	155
<b>Figura 59.</b> Corte E-E de área de almacenamiento y secado.....	156
<b>Figura 60.</b> Recta de mejor ajuste de esfuerzo cortante y normal.....	209

## ÍNDICE DE CUADROS

---

<b>Cuadro 1.</b> Composición típica de agua residual doméstica.....	32
<b>Cuadro 2.</b> Relación de demanda biológica y química de oxígeno .....	35
<b>Cuadro 3.</b> Características de lodo residual según tipo de tratamiento.....	36
<b>Cuadro 4.</b> Producción de lodo de agua residual doméstica .....	37
<b>Cuadro 5.</b> Consistencia del lodo según la tasa de sólidos secos .....	38
<b>Cuadro 6.</b> Vías de contaminación de agentes patógenos.....	39
<b>Cuadro 7.</b> Restricciones al uso de biosólidos.....	42
<b>Cuadro 8.</b> Tipo de suelo según gravedad específica para suelos orgánicos .....	44
<b>Cuadro 9.</b> Relación tipo de suelo y ángulo de fricción .....	49
<b>Cuadro 10.</b> Actividades normadas para la construcción de carreteras y caminos..	50
<b>Cuadro 11.</b> Especificaciones de materiales utilizados en construcción .....	52
<b>Cuadro 12.</b> Problemática de aguas residuales y lodos .....	55
<b>Cuadro 13.</b> Reuso de aguas residuales .....	59
<b>Cuadro 14.</b> Límite de parámetros de vertido de aguas residuales .....	59
<b>Cuadro 15.</b> Marco institucional de Costa Rica .....	60
<b>Cuadro 16.</b> Situación de saneamiento en Costa Rica .....	62
<b>Cuadro 17.</b> Parámetros de patógenos para clasificación de lodo, según EPA .....	63
<b>Cuadro 18.</b> Tiempo y temperatura para lodo Clase A, según EPA .....	64
<b>Cuadro 19.</b> Rango de aplicación por clase de lodo .....	64
<b>Cuadro 20.</b> Ficha técnica de PTAR <sup>1</sup> Boulevard Las Palmas.....	66
<b>Cuadro 21.</b> Temperaturas anuales en Ciudad Colón .....	75
<b>Cuadro 22.</b> Descripción de visitas a planta de tratamiento Boulevard Las Palmas	78
<b>Cuadro 23.</b> Ensayos de caracterización para lodo residual .....	81
<b>Cuadro 24.</b> Descripción de muestras extraídas del lecho de secado.....	82
<b>Cuadro 25.</b> Relación de humedad y tiempo de secado de muestras de lodo .....	86
<b>Cuadro 26.</b> Relación de humedad y tiempo de secado (teórico) de lodo .....	87
<b>Cuadro 27.</b> Comparación de tiempo de secado de muestras de lodo .....	88
<b>Cuadro 28.</b> Descripción física de muestras de lodo .....	91
<b>Cuadro 29.</b> Descripción de procesos de lodo residual .....	94
<b>Cuadro 30.</b> Ensayos según edad de muestras de lodo.....	97

<b>Cuadro 31.</b>	Contenido de nitrógeno y fósforo de muestras de lodo.....	100
<b>Cuadro 32.</b>	Carga orgánica de muestras de lodo.....	101
<b>Cuadro 33.</b>	Contenido de humedad y contenido orgánico de muestras de lodo..	102
<b>Cuadro 34.</b>	Potencial de hidrógeno de muestras de lodo .....	103
<b>Cuadro 35.</b>	Valores de gravedad específica para muestras de lodo.....	106
<b>Cuadro 36.</b>	Granulometría de muestras de lodo.....	106
<b>Cuadro 37.</b>	Resultados de límite líquido de muestras .....	108
<b>Cuadro 38.</b>	Clasificación de muestras de lodo.....	108
<b>Cuadro 39.</b>	Ensayos de caracterización para suelo artificial.....	111
<b>Cuadro 40.</b>	Características de muestras utilizadas en elaboración de suelo.....	111
<b>Cuadro 41.</b>	Componentes del suelo artificial.....	112
<b>Cuadro 42.</b>	Descripción física de muestras de suelo artificial.....	113
<b>Cuadro 43.</b>	Descripción de procesos de suelo artificial.....	114
<b>Cuadro 44.</b>	Metales pesados de muestra de suelo artificial L-10.....	115
<b>Cuadro 45.</b>	Resultados de compactación de muestras de suelo.....	117
<b>Cuadro 46.</b>	Porcentajes de humedad para condición de saturación.....	118
<b>Cuadro 47.</b>	Humedad óptima de compactación de muestras de suelo artificial ..	119
<b>Cuadro 48.</b>	Características de espécimen de ensayo corte directo NC-ND .....	123
<b>Cuadro 49.</b>	Características de espécimen de ensayo corte directo CD.....	126
<b>Cuadro 50.</b>	Esfuerzos normales y cortantes de muestra S-10.....	130
<b>Cuadro 51.</b>	Parámetros de resistencia cortante de muestra S-10.....	130
<b>Cuadro 52.</b>	Criterios para análisis de uso de suelo artificial.....	132
<b>Cuadro 53.</b>	Calidad ambiental de muestra L-01 .....	133
<b>Cuadro 54.</b>	Calidad ambiental de muestra L-02 .....	133
<b>Cuadro 55.</b>	Calidad ambiental de muestra L-07 y S-07 .....	134
<b>Cuadro 56.</b>	Calidad ambiental de muestra L-10 y S-10 .....	134
<b>Cuadro 57.</b>	Calidad ambiental de muestra L-13 y S-13 .....	135
<b>Cuadro 58.</b>	Tendencia de calidad ambiental de muestras de lodo y suelo .....	136
<b>Cuadro 59.</b>	Calidad mecánica de muestra L-07 y S-07.....	138
<b>Cuadro 60.</b>	Calidad mecánica de muestra S-10.....	138
<b>Cuadro 61.</b>	Calidad mecánica de muestra S-13.....	139
<b>Cuadro 62.</b>	Tendencia de calidad mecánica de muestras de lodo y suelo .....	139



<b>Cuadro 63.</b> Lista de chequeo para material de relleno en construcción .....	141
<b>Cuadro 64.</b> Lista de chequeo para control de erosión con tierra vegetal.....	143
<b>Cuadro 65.</b> Lista de chequeo para recubrimiento de tierra y taludes.....	144
<b>Cuadro 66.</b> Lista de chequeo para uso en recuperación de zonas.....	145
<b>Cuadro 67.</b> Límite de contenido de humedad según prueba.....	149
<b>Cuadro 68.</b> Clasificación de muestra de suelo seca al aire .....	151
<b>Cuadro 69.</b> Dimensionamiento de estructura.....	152
<b>Cuadro 70.</b> Área de almacenamiento según contenido de humedad .....	153
<b>Cuadro 71.</b> Costos considerados en presupuesto de suelo artificial.....	158
<b>Cuadro 72.</b> Presupuesto de inversión inicial .....	159
<b>Cuadro 73.</b> Presupuesto de costo operativo .....	160
<b>Cuadro 74.</b> Costo unitario de lodo residual y suelo artificial .....	160
<b>Cuadro 75.</b> Guía de elaboración de suelo artificial.....	162
<b>Cuadro 76.</b> Guía de elaboración de suelo artificial (Cont.).....	163
<b>Cuadro 77.</b> Clasificación de procedimientos.....	164
<b>Cuadro 78.</b> Simbología de riesgos y equipo en el manejo de lodo residual .....	165
<b>Cuadro 79.</b> Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-01 .....	194
<b>Cuadro 80.</b> Parámetros de calidad para muestra L-01 .....	194
<b>Cuadro 81.</b> Contenido de materia orgánica para muestra L-01.....	194
<b>Cuadro 82.</b> Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-02 .....	195
<b>Cuadro 83.</b> Parámetros de calidad para muestra L-02 .....	195
<b>Cuadro 84.</b> Contenido de materia orgánica para muestra L-02.....	195
<b>Cuadro 85.</b> Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-07 .....	195
<b>Cuadro 86.</b> Parámetros de calidad para muestra L-07 .....	196
<b>Cuadro 87.</b> Contenido de materia orgánica para muestra L-07.....	196
<b>Cuadro 88.</b> Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-10 .....	196
<b>Cuadro 89.</b> Parámetros de calidad para muestra L-10 .....	196
<b>Cuadro 90.</b> Contenido de materia orgánica para muestra L-10.....	197
<b>Cuadro 91.</b> Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-13 .....	197
<b>Cuadro 92.</b> Parámetros de calidad para muestra L-13 .....	197
<b>Cuadro 93.</b> Contenido de materia orgánica para muestra L-13.....	197
<b>Cuadro 94.</b> Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-07 .	198

<b>Cuadro 95.</b> Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-10.	198
<b>Cuadro 96.</b> Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-13.	199
<b>Cuadro 97.</b> Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-07199	
<b>Cuadro 98.</b> Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-10200	
<b>Cuadro 99.</b> Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-13200	
<b>Cuadro 100.</b> Datos de elaboración de suelo S-07.....	200
<b>Cuadro 101.</b> Datos de elaboración de suelo S-10.....	201
<b>Cuadro 102.</b> Datos de elaboración de suelo S-13.....	201
<b>Cuadro 103.</b> Dimensiones de molde metálico para prueba de compactación .....	201
<b>Cuadro 104.</b> Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-07.....	202
<b>Cuadro 105.</b> Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-10.....	202
<b>Cuadro 106.</b> Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-13.....	202
<b>Cuadro 107.</b> Resumen de resultados, Rivera (2012) .....	210

Solano Ramírez, Viviana

Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades, provenientes de una planta de tratamiento de agua residual doméstica

Proyecto de Graduación-Ingeniería Civil-San José, C.R.:

V. Solano R., 2015

XXI, 171, [17]h; ils. col.- 40 refs

## **RESUMEN**

El lodo es un desecho generado durante el tratamiento del agua residual, este residuo es tratado y depositado en el suelo o en rellenos sanitarios; sin embargo, en muchas ocasiones es dispuesto sin completar su tratamiento, por esto, es necesaria la búsqueda de alternativas de disposición del lodo que impulsen su adecuado tratamiento y su reuso.

En esta investigación se elabora un suelo artificial a partir de la mezcla de material cementante y lodo; para esto se extrae material residual de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, posteriormente se estudia la variación de humedad del lodo conforme se aumenta el tiempo de secado, de manera simultánea se estudian sus características físicas y su trabajabilidad; al obtener material en condiciones trabajables, se realiza una caracterización geotécnica y ambiental del suelo artificial elaborado con lodo en diferentes condiciones de humedad. Los resultados de la observación y la caracterización, son fundamentales para evaluar el uso del lodo y el suelo artificial en aplicaciones geotécnicas; tomando en consideración la teoría de mecánica de suelos y la normativa asociada a calidad geotécnica y ambiental de Costa Rica.

A partir de la evaluación de aplicaciones, se determinó que el suelo artificial puede ser aplicado en la recuperación de zonas de extracción minera y en el relleno de zonas conexas a obras tales como carreteras y puentes; siempre y cuando en el sitio no se vayan a cimentar construcciones. Sin embargo, para hacer uso del suelo artificial el lodo debe ser tratado adecuadamente, por lo cual en este documento se propone una estructura para completar la deshidratación de los lodos en las plantas de tratamiento con deficiencias en el sistema de secado; esto permite solventar las limitaciones que se presentan en algunas

plantas del país. Finalmente, se brinda una guía para la elaboración y manipulación del lodo y el suelo artificial, de manera que se proteja el material y la salud de las personas que manipulan estos materiales.

Con esta investigación se proyecta el reuso de los desechos generados en el tratamiento de aguas residuales, pues esto permitirá completar el ciclo del tratamiento; la investigación y cooperación entre diversos campos de estudio permite la generación de soluciones integrales y sostenibles, por lo que con este proyecto se pretende impulsar el estudio de los lodos residuales desde la perspectiva de varias áreas, pero con el objetivo común de mejorar la calidad ambiental de nuestro entorno.

LODOS RESIDUALES, SUELO ARTIFICIAL, PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS

Ing. Paola Vidal Rivera

Escuela de Ingeniería Civil

## ABREVIATURAS

---

### A

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Association for Testing and Materials
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

### C

Cc	Coeficiente de curvatura
CD	Corte directo en condición drenada y consolidada
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
Cu	Coeficiente de uniformidad

### D

DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno

### E

EPA	Environmental Protection Agency
-----	---------------------------------

### G

GP	Grava mal gradada
Gs	Gravedad específica

### I

INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IRET	Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas

### N

N	Nitrógeno
NC-ND	Corte directo en condición no consolidada y no drenada

**P**

P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
Pt	Turba
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
PTARBP	Planta de tratamiento Boulevard Las Palmas

**S**

SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
ST	Sólidos totales
SS	Sólidos suspendidos
SD	Sólidos disueltos
SP	Arena mal gradada
SV	Sólidos volátiles
SW	Arena bien gradada

**U**

UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales
------	--

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

---

### **1.1 El problema y su importancia**

Las obras ingenieriles tienen como finalidad la generación de soluciones eficientes, óptimas y sostenibles ante las necesidades que presenta la sociedad. Un problema al cual se debe enfrentar la ingeniería es al manejo de residuos provenientes de las actividades humanas. Estos residuos representan un grave problema, pues en la mayoría de los casos no se brinda un manejo adecuado de los desechos, lo cual provoca la contaminación desmedida de los recursos naturales.

A esto se debe agregar el aumento en la generación de desechos debido al crecimiento poblacional; según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) la población nacional creció más del 370 por ciento en los últimos 48 años, esto implica un aumento en los residuos producidos en una proporción similar. (Toro, 2009)

El manejo de desechos es fundamental para asegurar la protección de los recursos naturales, pues en la mayoría de los casos una mala disposición de los residuos genera un impacto negativo en el ambiente. El país cuenta con un deficiente sistema de tratamiento de aguas residuales; se estima que en los últimos cinco años la cantidad de agua tratada se mantiene en un 3,6% de la totalidad. Además, dentro de las plantas de tratamiento hay deficiencias asociadas a la disposición final de los productos derivados, tal es el caso de los lodos generados del tratamiento de aguas.

El lodo residual corresponde a una mezcla líquida o semilíquida de agua y sedimentos, con características dependientes del tipo de tratamiento que se realiza en la planta. Este material debe ser dispuesto en las instalaciones y condiciones adecuadas para completar el proceso de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, en muchos casos el tratamiento y disposición de lodos no se realiza de manera correcta.

La inadecuada disposición de los lodos provoca que el material llegue a estados de putrefacción, atracción de vectores y presencia de organismos peligrosos. Según el Ministerio de Salud Pública, dentro de la normativa del país, se declara de interés público y nacional las acciones tendientes al diseño, construcción, operación y mantenimiento de

sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y lodos sanitarios, provenientes de obras para la recolección, tratamiento y disposición final de lodos. Sin embargo, las acciones en el país no son consistentes con esta política, pues los sitios que sirven de depósito de los lodos son rellenos sanitarios, suelo, cercanías de los ríos, desembocaduras a corta distancia de la costa y lagunas. En el país se cuenta únicamente con 156 empresas autorizadas para transportar el lodo séptico de más de 4,4 millones de personas y con seis empresas dedicadas al tratamiento de los lodos para 175 000 m<sup>3</sup> anuales del material. (Angulo, 2013)

Este problema tiene entre sus consecuencias un aumento en el gasto social, económico y ambiental; por lo que es fundamental actualizar técnicas y visiones que permitan concebir los residuos como una oportunidad para recuperar recursos, así como promover la sustentabilidad en las soluciones ingenieriles. Es fundamental que en el campo de la ingeniería civil se tome en consideración la gestión ambiental que permita asegurar la protección del medio ambiente. Respecto al manejo de residuos, es necesaria la formulación de procesos que incluyan la disposición final de los desechos de manera sostenible y aprovechable.

Los lodos derivados del tratamiento de aguas residuales pueden ser tratados y utilizados para una gran variedad de propósitos tales como recuperación de tajos, fabricación de aditivos para cultivo, elaboración de productos de construcción y materiales cementantes; sin embargo, es necesaria la investigación y el estudio del material antes de ser utilizado en los propósitos mencionados. (Redondo, 2014)

La elaboración de suelo artificial a partir de lodos representa una técnica de aprovechamiento de los residuos en el campo de la geotecnia. Sin embargo, es importante evaluar las características geotécnicas y ambientales del suelo, así como asociar estas características con la edad del lodo, de manera que se aproveche el material de desecho pero también se considere la calidad que debe poseer el material para ser utilizado. Mediante esta investigación se establecen relaciones entre el lodo y las características finales del suelo artificial; por otro lado, al determinar las condiciones de fabricación que permiten obtener un suelo competente es posible relacionar los resultados con aplicaciones y usos del suelo artificial.



El impacto negativo de la disposición final de los lodos de plantas de tratamiento, así como los costos por transporte y manejo de los mismos, ha generado la búsqueda de una alternativa económica y técnicamente viable para aprovechar los residuos de manera beneficiosa. Por lo tanto, la importancia de esta investigación radica en propiciar el uso de materiales que contribuyan con un desarrollo sostenible y el traslado de estos beneficios a nivel social, ambiental e ingenieril.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Caracterizar muestras de suelo artificial elaboradas a partir de lodo con diferentes edades, extraídos de una planta de tratamiento de agua residual doméstica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Estudiar las características de lodos extraídos del tratamiento de agua residual doméstica según su etapa de tratamiento, edad de secado y propiedades físico-químicas.

- Determinar parámetros geotécnicos y ambientales de muestras de lodo y suelo artificial.

- Establecer relaciones entre las características geotécnicas y ambientales de las muestras de suelo artificial con la edad del lodo.

- Evaluar el uso del suelo artificial en aplicaciones geotécnicas en función de las características y propiedades del material.

## **1.3 Delimitación del problema**

### **1.3.1 Alcances**

A través de la investigación se proyecta cumplir con los alcances detallados a continuación:

- En el estudio se considera la caracterización de los lodos extraídos del tratamiento de agua residual doméstica de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas.

- Dentro de las fronteras del trabajo se encuentra la elaboración de muestras de suelo artificial, elaboradas a partir de lodo de agua residual doméstica de distintas edades.

- Se caracterizan las muestras de suelo artificial mediante la determinación de parámetros geotécnicos y ambientales. Dentro de los parámetros geotécnicos se estudian las propiedades de gravedad específica, humedad, límites de consistencia, granulometría, compactación y resistencia cortante. Respecto a los parámetros ambientales se estudiará la presencia de nitrógeno, fósforo, potencial de hidrógeno (pH), metales pesados, contenido orgánico, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

- Mediante la determinación de parámetros del suelo artificial es posible relacionar las características del suelo con la edad del lodo.

- A partir de las características y propiedades del suelo es posible indicar aplicaciones geotécnicas del mismo, considerando los requerimientos de dichos usos. A la vez, se relaciona la edad del lodo con los usos geotécnicos recomendados.

### **1.3.2 Limitaciones**

Durante la realización del proyecto es fundamental establecer las limitaciones con el objetivo de solventar las mismas; las limitaciones de la investigación se especifican a continuación:

- Las edades de los lodos que se utilizan son dependientes de los tiempos de secado proporcionados por la planta de tratamiento de la cual se extraen los lodos.

- Al establecer relaciones entre el comportamiento del suelo artificial y la edad del lodo, se utilizan las caracterizaciones provenientes de las muestras de suelo realizadas; por lo tanto las relaciones establecidas se verán afectadas por la representatividad de las muestras utilizadas.

- Las muestras de suelo artificial se realizan únicamente con lodo residual extraído de una planta de tratamiento y con un único contenido de material cementante. La variable en la elaboración de muestras de suelo artificial corresponde a la edad de secado del lodo.

- Los resultados de esta investigación son dependientes de las condiciones de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas; por lo que los resultados sólo son comparables con plantas con un mismo tratamiento y condición operativa similar.

- El lodo mal digerido y con alto contenido de humedad presenta baja trabajabilidad, esto junto con el olor que presenta, genera dificultades en el trabajo de laboratorio, especialmente para el personal del sitio; además, la disponibilidad de equipos regula las pruebas que se realizan.

#### **1.4 Antecedentes**

Con el objetivo de conocer el contexto y situación actual del tema en cuestión, se consideran los estudios anteriormente realizados que se vinculan al suelo artificial elaborado con lodos residuales. A continuación se resumen estudios puntuales sobre el tema.

- Cerón (2004) plantea evaluar la viabilidad técnica de utilizar lodos de plantas potabilizadoras en la elaboración de productos utilizados en el campo de la construcción. El proyecto consiste en el muestreo y caracterización de los lodos producidos por una planta potabilizadora; posteriormente se realizan pruebas de caracterización para especímenes realizados con mezclas compuestas por lodo y materiales cementantes. Cerón elabora ladrillos y tabicones con las mejores formulaciones de lodo y material cementante; en su investigación, se indica que el lodo evaluado presenta una aceptable viabilidad técnica para fabricar concretos de relleno y morteros para mampostería; mientras que los ladrillos tipo adobe se pueden elaborar al disminuir la contracción por secado.

- Rivera (2012) elabora un prototipo de suelo artificial a partir de material cementante y lodos derivados de dos plantas de tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de describir las características geotécnicas del suelo y evaluar su desempeño por medio de ensayos de laboratorio. Para cumplir con el objetivo, Rivera realiza seis muestras de suelo con lodos extraídos de las plantas de tratamiento de Residencial Los Lagos de Heredia y El Roble de Puntarenas, posteriormente las muestras se caracterizan mediante parámetros geotécnicos y ambientales, además se comparan con los trabajos de Acosta (2010) y Bobba (2005), utilizados como referencia. También se realiza la clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y se determina que corresponden al tipo

arena limosa con grava y limo orgánico arenoso. En Anexo 1. Antecedentes de la investigación, es posible observar el resumen de resultados del proyecto realizado.

Los anteriores trabajos representan un parámetro comparativo para la investigación, pues se determinan características del lodo en combinación con el material cementante. También es importante mencionar el trabajo de Redondo (2014), en el cual realiza una propuesta para el manejo y disposición de lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable de Tres Ríos; mediante el trabajo se determina el volumen de lodos generados así como las características físico-químicas del material, y a partir de esta información se establece el método más viable para disponer los lodos.

Los lodos han sido estudiados como materia prima para la generación de materiales cementantes, así como en la elaboración de materiales constructivos.

## **1.5 Metodología**

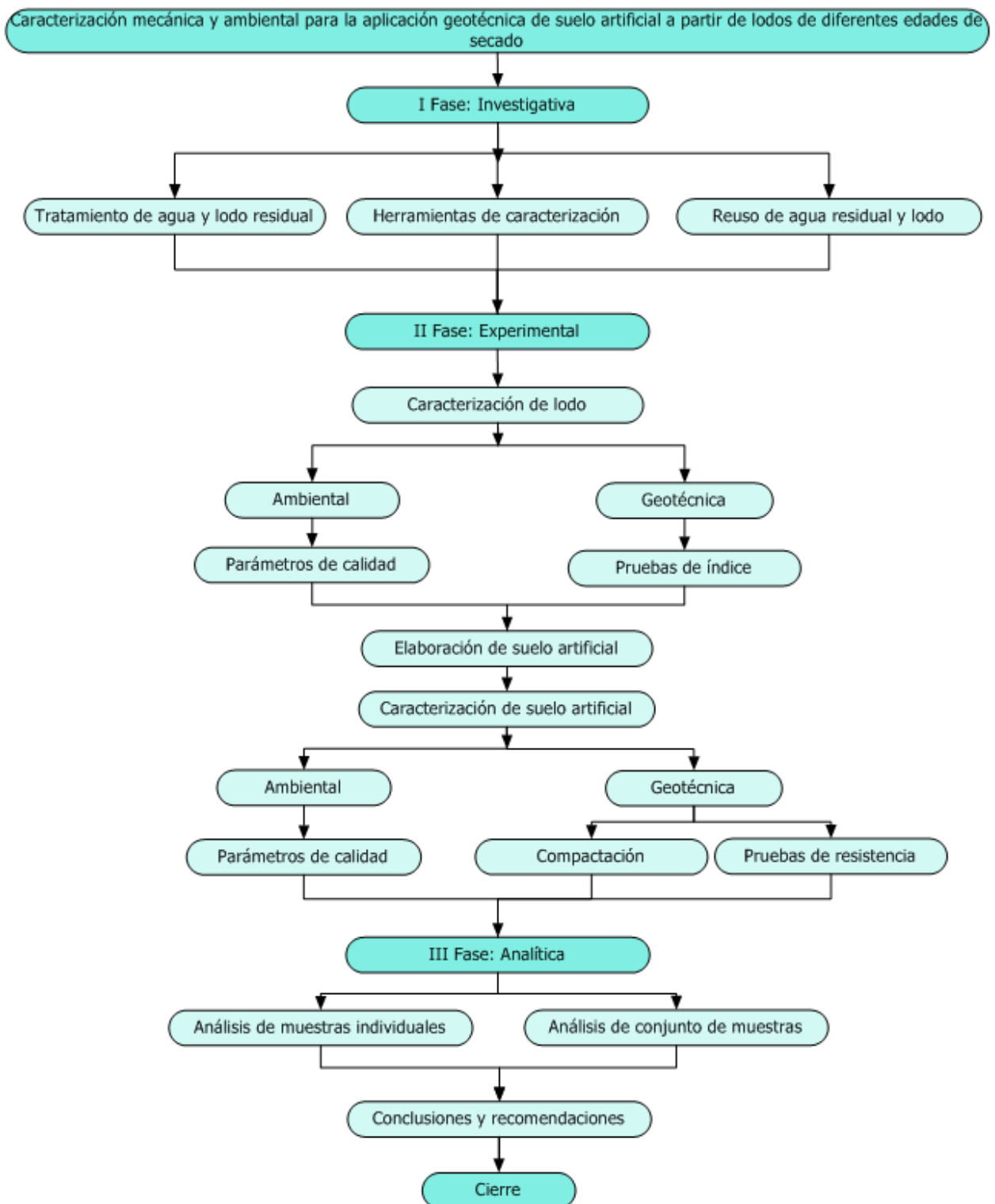
La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1. A continuación se detalla cada una de las etapas del proyecto:

### **1.5.1 Fase investigativa**

La primera etapa del trabajo consiste en la revisión bibliográfica sobre los temas de interés. Se estudian los efectos de la generación de aguas residuales y los tratamientos que se brindan al agua y lodo, con énfasis en los tratamientos típicamente utilizados en el país y en la planta de estudio; también se incluye el estudio de la normativa y situación actual de Costa Rica respecto al tema. Finalmente, se investiga sobre la gestión de agua y lodo residual en otros países, con mayor atención a las formas de disposición final del lodo. Tomando en consideración los temas anteriores, se procede a determinar los parámetros que deben ser investigados según los usos que se proyectan analizar; por lo tanto se estudian temas de calidad ambiental y valoración geotécnica de un suelo, pues en la fase investigativa se debe considerar la información que es utilizada para el diseño de la etapa experimental.

Durante la revisión bibliográfica se recopila información sobre elaboración de suelo artificial a partir de lodos y se indican los parámetros que son determinados en dichas

pruebas, esto con el objetivo de contar con información que permita comparar los resultados que se proyectan obtener en la investigación.



**Figura 1.** Esquema metodológico de caracterización mecánica y ambiental

En esta etapa también se investiga sobre el funcionamiento de plantas específicas de Costa Rica, con el fin de seleccionar la planta de tratamiento que mejor se adecúa a las necesidades del proyecto; para realizar esta selección se consulta a personas involucradas con las plantas de tratamiento.

### **1.5.2 Fase experimental**

La fase experimental está compuesta por dos etapas: diseño de experimento y su realización, es un proceso iterativo y en donde el diseño inicial puede requerir modificaciones.

A partir de la revisión de información realizada en la fase investigativa, es posible diseñar la fase experimental. Se determinan las condiciones bajo las cuales se deben obtener y disponer los lodos, así como prever los posibles cambios que se requieran en la realización de los ensayos normados, pues aunque el lodo residual pueda ser tratado como un suelo, su naturaleza es distinta.

En esta etapa se extraen los lodos de la planta de tratamiento en las edades de interés; sin embargo se debe tomar en cuenta el proceso de secado que se realiza en la planta, pues en caso de no contar con diferentes edades de lodos se debe proceder a realizar el secado de manera artificial, para así obtener diferentes condiciones de humedad. A partir de esto, se realiza la caracterización de los lodos mediante la determinación de parámetros ambientales y geotécnicos.

Al finalizar la caracterización del lodo residual, es importante evaluar si se obtiene la información proyectada y necesaria para continuar con la fabricación de muestras de suelo artificial y su posterior caracterización. Cuando la caracterización del lodo residual es satisfactoria, entonces se inicia el trabajo con el suelo artificial.

Respecto a los parámetros geotécnicos se busca determinar los parámetros que permitan describir el comportamiento mecánico del suelo, por lo tanto se realizan pruebas de compactación y resistencia del suelo; a través de estas pruebas es posible conocer la calidad del suelo como material geotécnico. Para realizar las pruebas se utilizan los procesos normados por American Association for Testing and Materials (ASTM). En cuanto a los parámetros ambientales se pretende realizar pruebas de nitrógeno, fósforo, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda bioquímica de oxígeno (DQO), metales pesados,

potencial de hidrógeno (pH) y materia orgánica. Es importante mencionar que la selección de pruebas está basada en una caracterización típica de suelos.

### **1.5.3 Fase analítica**

La última fase de la investigación corresponde al análisis de la información obtenida en la etapa investigativa y experimental. Es necesario analizar cada una de las muestras realizadas, esto en contraposición con la teoría de mecánica de suelos y parámetros físico-químicos del suelo. Posteriormente, se procede a sintetizar la información y establecer relaciones entre las diferentes muestras y las edades de los lodos utilizados; los métodos a utilizar para establecer las relaciones son dependientes de la información obtenida en los procesos anteriores.

Además, en esta etapa, según los resultados obtenidos, se vinculan las características del suelo con aplicaciones geotécnicas; considerando los parámetros requeridos para los usos analizados. Debido al alcance del proyecto, es importante emitir conclusiones y recomendaciones que sirvan de guía para futuros estudios en torno al suelo artificial.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

---

### **2.1 Lodo residual**

El tratamiento de aguas residuales se encarga de remover los contaminantes para evitar impactos negativos en el medio ambiente, pero durante el tratamiento de aguas se derivan productos con dificultades de manejo y disposición, tal como espumas, arenas, basuras y lodos; en donde el lodo constituye gran parte del volumen de la materia eliminada del agua, especialmente en el caso de las plantas de lodos activados. En las secciones siguientes se detalla sobre su origen, características y tratamientos.

#### **2.1.1 Origen del lodo: Agua residual**

Gran cantidad de actividades humanas demandan el recurso hídrico, por lo que desde tiempos antiguos las civilizaciones se han asentado en las cercanías de fuentes de agua; actualmente, el crecimiento y los cambios en el estilo de vida de la mayor parte de las poblaciones han incrementado la necesidad del recurso. La cantidad de agua demandada no depende únicamente de la dinámica poblacional, sino también de la planificación, distribución y manejo adecuado del agua; es decir, de las acciones en torno al recurso.

La disponibilidad de agua potable es concebida como un derecho de las personas, pues involucra el saneamiento y la salud pública; debido a esta visión, se dan esfuerzos importantes por proveer a las poblaciones del servicio, lo cual tiene como consecuencia que mayor cantidad de personas tengan acceso al agua potable. Según el Laboratorio Nacional de Aguas (Mora, 2012), en Costa Rica se estima una cobertura del 99,38% del servicio de agua; sin embargo, es fundamental reconocer las debilidades que se presentan en torno a este servicio y que afectan de manera directa a la población; una de estas debilidades es la calidad del agua, pues en numerosas comunidades se tiene el acceso al servicio pero el agua no es adecuada para su consumo, de modo que las personas realmente no cuentan con un servicio de agua potable. Por otro lado, el aumento del consumo de agua también implica la generación de mayor cantidad de agua resultante de las actividades humanas; estas aguas son denominadas residuales. Las aguas residuales presentan una calidad menor y contienen residuos de actividades domésticas, agrícolas, industriales, y demás acciones para las cuales es utilizado el recurso hídrico.



A pesar del aumento en la cobertura del servicio de agua potable y por tanto de la generación de aguas residuales, el país no brinda una solución adecuada para su tratamiento; esto representa un problema de manejo de residuos, pues como todo desecho, requiere de una adecuada disposición final para evitar problemas ambientales, sociales y sanitarios.

Tal como se mencionó, existen diversos tipos de agua residual; sin embargo, en esta investigación el enfoque se encuentra en las aguas residuales domésticas. Estas aguas contienen los residuos de las actividades diarias de las personas, incluyendo las aguas negras. Las aguas residuales domésticas tienen un impacto en el plano estético y urbanístico, pero también son responsables de transmisión de enfermedades y contaminación del medio ambiente cuando no se brinda una disposición adecuada. En el siguiente cuadro se indica la composición típica del agua residual doméstica.

**Cuadro 1.** Composición típica de agua residual doméstica

Parámetro	Concentración		
	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST) (mg/L)	350	720	1200
Sólidos suspendidos (SS) (mg/L)	40	180	250
Sólidos disueltos (SD) (mg/L)	60	100	150
DBO (mg/L)	110	220	400
DQO (mg/L)	250	500	1000
Nitrógeno total (mg/L)	20	40	85
Fósforo total (mg/L)	4	8	15
Coliformes totales (NPM/100 mL)	106-107	107-108	107-109

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003

Existen diversos tratamientos para mejorar la calidad ambiental del agua residual; esta investigación se enfoca en el sistema de plantas de tratamiento, en donde se reúnen las aguas negras de gran cantidad de hogares y se les brinda un mismo tratamiento luego de su recolección. Hay varios tipos de planta de tratamiento, así como diferentes niveles de depuración; la elección del tipo y nivel de tratamiento depende de las condiciones locales,

disponibilidad de fondos para la construcción y explotación de la planta de tratamiento, así como de las características requeridas del agua tratada.

Las plantas de tratamiento presentan una etapa preliminar, primaria, secundaria, terciaria y avanzada, en donde cada una de estas etapas permite una mayor remoción de contaminantes; sin embargo conforme se avanza en el proceso también aumenta la complejidad y el costo del proceso. Debido a esto, en el país generalmente se utiliza el tratamiento primario y secundario; el tratamiento primario está asociado a materia sedimentable y está compuesto por estructuras tales como rejillas, desarenadores y estanques de sedimentación. El tratamiento secundario puede estar compuesto por filtros percoladores con estanques de sedimentación o estructuras para el proceso de lodos activados o cámaras de contacto; esto depende del tratamiento que se brinde al agua residual. (Unda, 1999)

Esta investigación se enfoca en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, la cual corresponde a un sistema de lodos activados de aireación extendida; sobre el funcionamiento de este sistema y esta planta de tratamiento se detalla en el Capítulo 3: Planta de tratamiento Boulevard Las Palmas.

### **2.1.2 Parámetros de calidad ambiental**

El agua y lodo residual presentan características que son dependientes de su origen; es importante definir estas características porque ellas permiten diseñar el tipo de tratamiento requerido. Entre los parámetros de calidad se pueden mencionar características físicas (distribución de sólidos, turbiedad, color, olor, temperatura, densidad y conductividad), químicas inorgánicas (contenido de amonio, nitrógeno, nitritos, fósforo, potencial de hidrógeno, alcalinidad, sulfatos y metales pesados), químicas orgánicas (carbono orgánico, demanda biológica y química de oxígeno) y biológicas (coliformes, microorganismos y toxicidad). (Metcalf & Eddy, 2003)

Es importante indicar que estos parámetros también se pueden aplicar a materiales que no son propiamente aguas residuales pero sí derivados de estas, tal como lodo residual o espumas. A continuación se describen los parámetros de calidad ambiental más importantes que se consideran en esta investigación.

- Nitrógeno (N): es un nutriente que se puede encontrar como nitrógeno gaseoso, amoníaco, amonio, nitritos y nitratos. La forma en la cual se presenta el nitrógeno determina

la manera en que se afecta el agua; por ejemplo, en el caso del amoníaco, se genera un ambiente tóxico especialmente para la vida acuática, mientras que nitritos y nitratos producen el crecimiento indeseable de algas y otras plantas acuáticas. Por otro lado, el nitrógeno permite identificar el tiempo en el cual el agua fue contaminada, pues cuando el agua tiene contenidos de nitrógeno en su forma amoniacal y orgánica se relaciona con una contaminación reciente y por lo tanto un alto potencial de peligro. En el caso de aguas con presencia de nitratos, se puede determinar que el agua fue contaminada con anterioridad y por lo tanto el riesgo para la salud de las personas es menor. (Orozco, 2005)

- Fósforo (P): es un nutriente que favorece el desarrollo de organismos vivos en aguas frescas y sistemas marinos, mientras que en aguas residuales provoca la presencia de algas y bacterias. El fósforo es considerado como un parámetro crítico en la calidad de agua debido a su influencia en el proceso de eutrofización, este proceso está relacionado con el envejecimiento del agua; además la presencia de fósforo en aguas residuales está asociada principalmente a la presencia de detergentes y residuos de curación de carnes. (Vidal, 2014)

- Demanda biológica de oxígeno (DBO): corresponde a la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos que se encuentran en el agua, principalmente bacterias. Los microorganismos requieren oxígeno para descomponer la materia orgánica, por lo tanto la DBO permite conocer el grado de contaminación provocada por este tipo de materia; a mayor cantidad de materia orgánica, es mayor el oxígeno que se requiere para que las bacterias la degraden. (Orozco, 2005)

- Demanda química de oxígeno (DQO): se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica; por lo tanto, al igual que la demanda biológica de oxígeno, es una medida de la calidad de aguas residuales o cuerpos naturales pero mediante un proceso químico. La demanda química de oxígeno permite medir de manera indirecta la cantidad de materia orgánica, pues en lugar de descomponer la materia orgánica mediante la respiración de microorganismos vivos, se utiliza un agente oxidante en un medio ácido.

Es posible establecer una relación entre los valores de demanda biológica y la demanda química de oxígeno; en el cuadro siguiente se muestra la relación.

**Cuadro 2.** Relación de demanda biológica y química de oxígeno, para agua residual

<b>Tipo de agua residual</b>	<b>Relación DQO/DBO</b>
Agua cruda	1,2 – 2,0
Efluente	0,2 – 0,5

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003

- **Potencial de hidrógeno (pH):** corresponde a la magnitud de acidez o alcalinidad que tiene el agua y representa la concentración de iones hidrógeno. El agua neutra tiene un valor de pH de 7; los valores y cambios del pH en el agua pueden indicar problemas de contaminación, además el valor del pH afecta directamente a los organismos vivos que viven en el agua pues determinados procesos químicos solamente se pueden dar bajo condiciones específicas de pH. En las aguas residuales el valor del pH es un parámetro importante en los tratamientos biológicos pues el pH debe mantenerse dentro de un rango específico para desarrollar el proceso.

- **Metales pesados:** desde el punto de vista ambiental, los metales pesados corresponden a elementos que en determinados tiempos de exposición y concentraciones, pueden perjudicar el medio ambiente y la salud de las personas. Entre los metales pesados se pueden mencionar el arsénico, cobre, cromo, selenio, plomo, zinc y estaño. (Von Sperling, 2001)

La determinación de los parámetros ambientales del lodo tiene como objetivo la caracterización del material y el control de los contaminantes presentes. Estos objetivos son fundamentales para establecer relaciones entre las aguas residuales y los lodos resultantes del tratamiento de estas aguas, pues de esta forma es posible estudiar los efectos de los tratamientos que se realizan. Es importante mencionar que las características finales de los lodos están directamente asociadas a las condiciones del agua residual de la cual son originarios.

Por otro lado, la caracterización de los lodos es necesaria para conocer el grado de contaminación que poseen y por lo tanto determinar el tratamiento que requieren los lodos o la manera en la cual es adecuada su disposición; puesto que la peligrosidad de estos materiales limita su disposición final.

### 2.1.3 Características de lodo residual

Las características del lodo residual son dependientes del tipo de agua residual y el tratamiento brindado, por lo tanto las características del lodo son consecuencia de diversos factores. Sin embargo, típicamente el lodo residual tiene características definidas según su origen, en el Cuadro 3 se presentan algunas de ellas y en el Cuadro 4 se puede observar la masa de lodo y el porcentaje de sólidos según el tipo de tratamiento que se brinda al agua; se presentan los sistemas de tanque séptico, lodos activados y lodos activados de aireación extendida; pues estos son los tratamientos que generan mayor cantidad de lodos residuales y que además son ampliamente utilizados en el país.

**Cuadro 3.** Características de lodo residual según tipo de tratamiento

<b>Tipo de lodo</b>	<b>Relación SV/ST</b>	<b>Sólidos secos (%)</b>	<b>Masa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Lodo secundario aerobio	0,65-0,70	0,8-1,2	1002
Lodo secundario adensado (Lodos activados convencional)	0,75-0,80	2-7	1001
Lodo secundario adensado (Lodos activados convencional aireación extendida)	0,65-0,70	2-6	1002
Lodo digerido	0,60-0,65	2-6	1007-1100
Lodo deshidratado	0,60-0,66	20-40	1050-1100

Fuente: Von Sperling, 2001

Modificado de: Autor, 2015

**Cuadro 4.** Producción de lodo de agua residual doméstica

Sistema	Lodo removido en fase líquida		Lodo adensado por gravedad		Lodo digerido aerobio		Lodo deshidratado en lecho		
	Masa de lodo (gSS/hab-d)	Sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab-d)	Sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab-d)	Sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab-d)	Sólidos secos (%)	Volumen (L/hab-d)
Tanque séptico	20-30	3-6	-	-	-	-	20-30	30-40	0,05-0,10
Lodos activados convencional	60-80	1-2	60-80	3-7	38-50	3-6	38-50	30-40	0,1-0,17
Lodos activados aireación extendida	40-45	0,8-1,2	40-45	2-3	-	-	40-45	25-35	0,11-0,17

Fuente: Von Sperling, 2001

Modificado de: Autor, 2015

Una característica importante en el lodo residual es la relación entre su consistencia y contenido de sólidos, en el Cuadro 5 se presenta la consistencia típica del lodo residual, según la cantidad de sólidos presentes; independientemente del tipo de tratamiento que se brinda.

**Cuadro 5.** Consistencia del lodo según la tasa de sólidos secos

<b>Sólidos secos (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Consistencia de lodo</b>
0 a 25	75 a 100	Fluido
25 a 35	65 a 75	Semi sólido
35 a 60	40 a 65	Sólido duro
60 a 85	15 a 40	Gránulos
85 a 100	0 a 15	Polvo fino

Fuente: Von Sperling, 2001

Respecto a sus contaminantes, estos se incluyen dentro de las características de los lodos residuales, pues típicamente estos parámetros son considerados en la caracterización de aguas residuales y sus derivados. Sin embargo, debido a la naturaleza de esta investigación, es necesario hacer énfasis en los contaminantes de los lodos residuales, según Von Sperling (2001), los principales contaminantes de los lodos residuales son los microorganismos patógenos.

La cantidad de patógenos se puede asociar con las condiciones socioeconómicas de la población, condiciones sanitarias, geográficas y tipo de tratamiento que se le brinda al lodo residual. Además se debe tomar en consideración el tiempo de sobrevivencia de los microorganismos, en donde interfiere la acidez del medio en el que se encuentran, la luz solar, temperatura y capacidad de retención del agua; todos estos factores determinan la cantidad de contaminantes en el lodo.

Es importante identificar los momentos en los cuales las personas se encuentran expuestas a estos contaminantes. Según Von Sperling (2001), la exposición puede darse de vía directa o indirecta; en las figuras siguientes se muestran las vías de contacto de los patógenos presentes en el lodo.

**Cuadro 6.** Vías de contaminación de agentes patógenos

Tipo de vía		Descripción
Directa	Consumo de alimentos	Consumo de vegetales y pastos plantados en sitios contaminados con lodo no tratado
		Agricultores, consumidores y animales de zonas rurales y urbanizadas
	Contacto directo con lodo	Personas que trabajan en estaciones de tratamiento o transportando lodo
		Agricultores
	Inhalación de partículas	Personas que trabajan en estaciones de tratamiento o transportando lodo
		Transportadores de lodo
Indirecta	Consumo de agua de fuentes contaminadas	Personas y animales que beben directamente de la fuente
	Animales alimentados con pastos contaminados	Personas que consumen animales contaminados

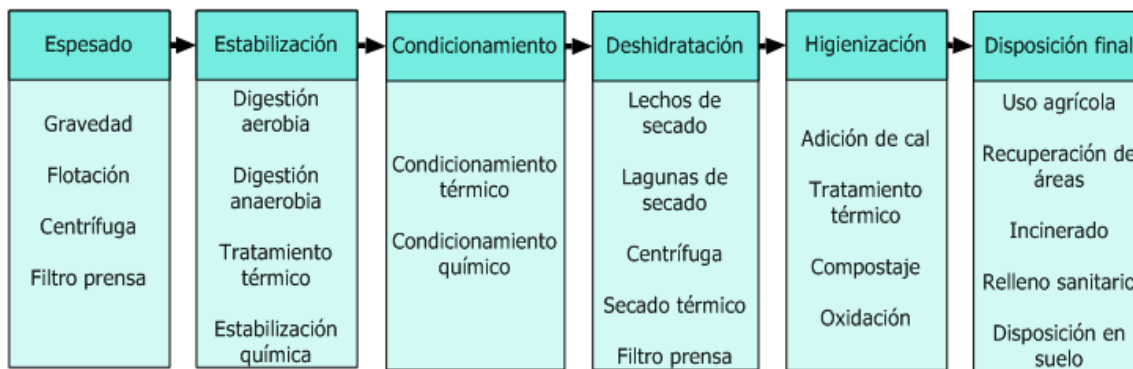
Fuente: Von Sperling, 2001

Modificado de: Autor, 2015

### 2.1.4 Tratamiento de lodo residual

El manejo de lodos es fundamental para completar el adecuado tratamiento de las aguas residuales. Antes de disponer el material, es necesario que sea tratado para reducir la atracción de vectores, olores y riesgos a la salud, así como para reducir su volumen. Típicamente, el tratamiento de lodos consiste en un espesamiento, digestión, deshidratación y estabilización antes de disponerlos en su sitio final. Las etapas de tratamiento de lodos se esquematizan en la figura siguiente, en donde además se indican los diversos sistemas que se puede emplear para cada etapa.





**Figura 2.** Etapas de tratamiento de lodo residual

Fuente: Von Sperling, 2001

Tal como se mencionó anteriormente, en esta investigación se profundiza en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas; en la cual se utiliza espesado por gravedad, estabilización aerobia, deshidratación en lechos de secado y disposición en el suelo. Sobre estos sistemas se detalla en la sección 3.3 Sistema de tratamiento.

### 2.1.5 Uso de lodo residual

Debido a la problemática asociada a la disposición final de los lodos provenientes de plantas de tratamiento, se han presentado diversas alternativas que dan uso a este material de desecho. Sin embargo, los usos se ven limitados por una serie de factores asociados a los lodos, tal como su calidad ambiental, comportamiento mecánico y volúmenes producidos, entre otros; por lo que muchos de los usos de lodos se encuentran en etapas de investigación. Es posible identificar estudios en donde se evalúa el lodo; al igual que el resto de materiales, los lodos deben ser evaluados a nivel técnico, económico, social y ambiental, pues esto permite identificar los usos para los cuales un material puede ser aprovechado.

En el caso de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, se presentan grandes diferencias en la composición de las aguas y por lo tanto de los lodos, pues esto depende de la actividad que los origina; a continuación se detallan algunos de los usos asociados a los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas:

- Mejorador de suelo: los lodos estabilizados pueden ser utilizados como mejoradores del suelo porque contienen nutrientes que favorecen el crecimiento vegetal; estos materiales

son denominados biosólidos y corresponden a aquellos sólidos que provienen del proceso de tratamiento de aguas residuales y que están compuestos por materia orgánica residual no descompuesta. Los biosólidos permiten abastecer el terreno de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, níquel, zinc y cobre; además de los nutrientes que aportan al suelo, los biosólidos mejoran características del suelo, como la textura y la capacidad de adsorción de agua; es decir, son potenciales sustitos de productos químicos que se utilizan para mejorar los suelos. Esto beneficia los terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo y demás terrenos que requieren recuperación debido a alteraciones. (Limón, 2013)

Es importante mencionar que para hacer uso de los lodos en este tipo de aplicaciones, el material debe respetar concentraciones de parámetros de patógenos, parásitos y metales pesados. Es decir, se debe asegurar que no representan un problema para la salud pública, además se debe tomar en consideración los requerimientos del terreno; por lo que en diversos países existe normativa que restringe el uso de biosólidos en el terreno. En México, Chile y Estados Unidos los lodos residuales se clasifican según su densidad de coliformes fecales, densidad de salmonella y contenido de ova helmíntica; estos contenidos rigen la clasificación del material en tipo A o B (o C en el caso de México), y su vez, esta clasificación define el uso que se le pueda dar al lodo residual. Es evidente que el criterio de uso es la protección de la salud pública.

En el cuadro siguiente se presentan usos y limitaciones proporcionados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), en donde se indican restricciones según el uso que se proyecta para los biosólidos.

**Cuadro 7.** Restricciones al uso de biosólidos

<b>Uso del terreno</b>	<b>Restricción</b>
Cultivo de algodón, trigo, sorgo y avena	Sin restricción, ya que sus partes útiles nunca tocan el suelo. Además, aplicando los biosólidos antes de la siembra, se rebasan los 30 días para realizar la cosecha
Cultivos de frutos con partes comestibles subterráneas	Si la incorporación se realiza a los cuatro meses o más después de la aplicación de los biosólidos, se puede cosechar después de 20 meses de aplicación. Si la incorporación se realiza antes de cuatro meses después de la aplicación de los biosólidos entonces se puede cosechar después de 38 meses de aplicación
Cultivos comestibles, forrajes y fibras	Cosechar después de 30 días de la aplicación de biosólidos
Pastos para forraje	Pastar ganado después de 30 días de la aplicación de biosólidos
Sitios con alto potencial de acceso público (parques)	Restringir el acceso por un año después de aplicados los biosólidos
Sitios con bajo potencial de acceso público (tierras de cultivo)	Restringir el acceso por 30 días después de aplicados los biosólidos

Fuente: EPA, 2003

Modificado de: Autor, 2015

- Fuente de energía: la digestión anaerobia corresponde a un proceso de estabilización en el cual la materia orgánica es destruida debido a la ausencia de oxígeno, este proceso permite la generación de biogás; el biogás puede ser aprovechado como fuente de energía, lo cual es ampliamente utilizado y representa una disminución en el consumo de otros tipos de energía. Con el desarrollo de alternativas eficientes y económicas es posible implementar este tipo de sistemas y optimizar los recursos y materiales de desecho. El uso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, no solo permite una disposición y aprovechamiento del material, sino que también proporciona mayor eficiencia en el uso de la energía y menos emisiones al ambiente. (Limón, 2013)

- Materiales de construcción: los lodos, en conjunto con materiales cementantes pueden ser utilizados en la elaboración de materiales de construcción. Sobre estas

posibilidades se han presentado diversos estudios, en los cuales se busca conocer la capacidad de los lodos para estas aplicaciones. Tal como se mostró anteriormente, en los antecedentes a este proyecto se presenta el trabajo de Rivera (2012), quien presenta la caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial; también es importante retomar el trabajo de Cerón (2004), en donde se utilizan los lodos y el material cementante para la elaboración de ladrillos y tabicones. Sobre esto se detalla en 1.4 Antecedentes.

## **2.2 Suelo artificial**

Los suelos se pueden definir como acumulaciones de fracciones de minerales rocosos, materia orgánica y otras partículas; pueden encontrarse con agua o sin agua. La mayoría de suelos son producto de la fragmentación y descomposición de las rocas, lo que con el tiempo se transforma en una acumulación de partículas con espacios vacíos entre ellas. (Vargas, 2013)

Por otro lado, un suelo artificial se define como un producto manufacturado con la función de cumplir objetivos específicos del suelo, mediante la mezcla de materiales naturales, residuales o artificiales, además es posible que contengan aditivos que permitan mejorar ciertas características. Según Rivera (2012), un suelo artificial es una combinación de materiales de desecho tal como los lodos de plantas de tratamiento, cenizas volantes, carbón vegetal o cemento; además indica que entre las ventajas del suelo artificial utilizado en recuperación de tierras se encuentra una mayor retención de agua en el suelo, características físicas mejoradas, disminución del potencial de erosión del suelo y un incremento en la actividad biológica. En el contexto de la investigación, un suelo artificial corresponde a una mezcla elaborada a partir de lodo y cemento. Sobre la elaboración del suelo artificial se detallará en secciones posteriores.

### **2.2.1 Caracterización geotécnica del suelo artificial**

El objetivo de la estabilización de lodos residuales con cemento consiste en obtener una mezcla con comportamientos similares al suelo, por lo tanto se pretende que el material posea las características de un suelo competente. Debido a esto, el suelo artificial será sometido a distintas pruebas típicas de la caracterización de un suelo; a continuación se

detallan las características geotécnicas del lodo y del suelo artificial que se proyectan determinar.

- Gravedad específica: corresponde a la relación entre el peso unitario de una sustancia y el peso unitario del agua, en iguales condiciones de temperatura, esto se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{\text{Peso unitario de sustancia (Kg/m}^3\text{)}}{\text{Peso unitario de agua (Kg/m}^3\text{)}} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

En el caso de los suelos, la densidad específica corresponde a la relación entre el peso al aire de las partículas sólidas y el peso del agua. Generalmente las partículas sólidas de un suelo tienen valores típicos entre 2,5 y 2,8. (Vargas, 2013)

El peso unitario de un suelo está asociado a sus componentes y según éstos se puede determinar el tipo de suelo. En el cuadro siguiente se muestran clasificaciones para suelos orgánicos, pues el material analizado es de esta naturaleza.

**Cuadro 8.** Tipo de suelo según gravedad específica para suelos orgánicos

<b>Gravedad específica</b>	<b>Tipo de suelo</b>
1,50 - 2,15	Turba
2,13-2,60	Lodos aluviales orgánicos
2,30	Limos con trazos de materia orgánica

Fuente: Vargas, 2013

- Granulometría: el análisis granulométrico de un suelo busca determinar las proporciones de los diferentes tamaños de granos presentes en una masa de suelo; en este caso se busca determinar la distribución de partículas del lodo. Para la determinación de la granulometría, es necesario realizar las pruebas asociadas a esta característica, utilizando una muestra estadísticamente representativa de la masa del suelo, así como un método adecuado. Con el fin de conocer la distribución de tamaños se utilizan distintos métodos que dependen del tamaño de las partículas; en el caso de las partículas de mayor tamaño (superiores a 0,075 mm) se utiliza el método de tamizado, mientras que para las partículas de menor tamaño (inferiores a 0,075 mm) se utiliza el método de sedimentación. (Vargas, 2013)

El procedimiento de tamizado consiste en hacer pasar el material por una serie de tamices de forma que las partículas se agrupen según su tamaño, el material retenido en cada tamiz consiste en partículas de variados tamaños pero todos menores al tamaño de la malla del tamiz en el cual es retenido. Por otro lado, el método del hidrómetro se ajusta a masas de suelo que poseen partículas de suelo más finas. Este método se basa en la sedimentación de un material en suspensión en un líquido, específicamente en la Ley de Stokes, que define la velocidad final de caída de una partícula sólida esférica en un fluido viscoso en función de su diámetro, su densidad y la densidad del fluido.

Los resultados obtenidos en análisis granulométrico se pueden representar mediante una curva donde se observe fácilmente cuál es la distribución de tamaños del suelo. A partir de la distribución de tamaños de granos es posible definir si el suelo artificial, y en general el suelo, es bien gradado.

- Límites de Atterberg: la plasticidad es una propiedad que determina la magnitud de las fuerzas de las películas de agua dentro del suelo, pues estas partículas de agua permiten moldear el suelo sin romperlo; de forma que la deformación que puede soportar un suelo con determinada humedad está dada por la distancia que las partículas pueden moverse sin perder su cohesión. Específicamente, la plasticidad de un suelo se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales; desplazándose como sustancia viscosa a lo largo de la superficie mineral. (Ruiz, 2010)

La consistencia equivale a la capacidad de mantener las partes del conjunto integradas, es decir, estabilidad. (Ruiz, 2010). En el estudio de los suelos, sólo se utiliza para los suelos finos que dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, fluyen sin romperse; esto explica que algunos suelos cambian de consistencia en función al contenido de humedad: el suelo puede tener distintos estados dependientes de su cantidad de humedad. Los límites de Atterberg permiten determinar los contenidos de humedad que definen un cambio en la consistencia del suelo. Los límites de consistencia permiten la clasificación de suelos donde el contenido de finos es significativo; con lo cual se logra completar la clasificación del suelo artificial iniciada con el análisis granulométrico.

- Clasificación de suelos: la clasificación permite determinar cuál es el tipo de suelo en estudio y relacionarlo con características generales predeterminadas. Existen distintos

sistemas que permiten clasificar un suelo, en este estudio se utilizan dos sistemas de clasificación: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y American Association of State Highway and Transportation Officials (ASTHO). Ambos sistemas toman en consideración la granulometría y plasticidad del material, pero en el caso de los materiales no plásticos, se considera únicamente la granulometría. El procedimiento de clasificación se puede encontrar en bibliografía sobre mecánica de suelos y tomando en cuenta la normativa ASTM. (Das, 2001).

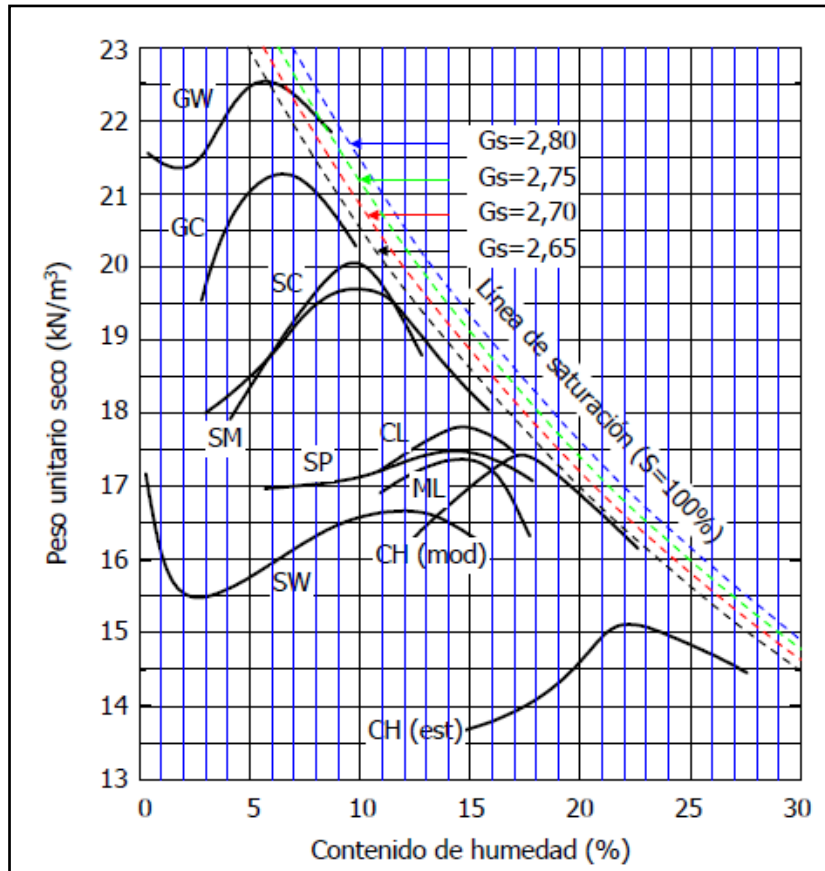
- Compactación de suelos: la compactación es un proceso que tiene como objetivo su densificación para obtener suelos con mejores características ingenieriles. El proceso de compactación consiste en aplicar presiones que unen las partículas del suelo y reducen el contenido de aire en los vacíos. (Vargas, 2012)

Las ventajas de la compactación están asociadas a su comportamiento mecánico, entre las cuales se pueden mencionar el aumento en la capacidad de soporte del suelo, la reducción de asentamientos y el aumento de la resistencia al corte. La compactación se puede dar en la construcción de rellenos para una obra civil pero también se utiliza como técnica de mejoramiento del suelo. Sin embargo, para lograr una adecuada compactación del suelo, es necesario controlar las diferentes variables que intervienen en este proceso; la compactación depende del método y de las condiciones en las que se encuentra el suelo cuando es compactado. Entre los factores que se deben tomar en cuenta se encuentra el tipo y peso unitario del suelo, la energía de compactación y el contenido de humedad del suelo.

Por lo tanto es importante la realización de estudios con el fin de determinar cuáles son las condiciones requeridas según el tipo de suelo que se trata. Los resultados de los ensayos de compactación se miden en función del peso volumétrico unitario y el contenido de humedad de cada una de las muestras compactadas. La densidad seca obtenida varía en función de la humedad del suelo: con algunas humedades (con valores menores al límite plástico) la compactación es poco efectiva, hasta que alcanza un máximo que corresponde a una "humedad óptima", luego de este punto la densidad seca comienza a disminuir con el aumento de humedad.

Una curva de compactación es un gráfico que relaciona el peso seco de un suelo con su contenido de humedad con el fin de obtener la humedad óptima de compactación. En la

figura siguiente se puede observar que hay un punto donde la densidad seca alcanza un valor máximo para cierto valor de humedad, la cual es humedad óptima, en este punto el contenido de humedad del agua actúa como lubricante y no como disipador de energía, se conoce como humedad óptima. Existen curvas de compactación típicas, con lo cual se puede observar si el suelo se comporta de manera esperada.



**Figura 3.** Curvas de compactación típicas de suelos variados

Fuente: Vargas, 2013

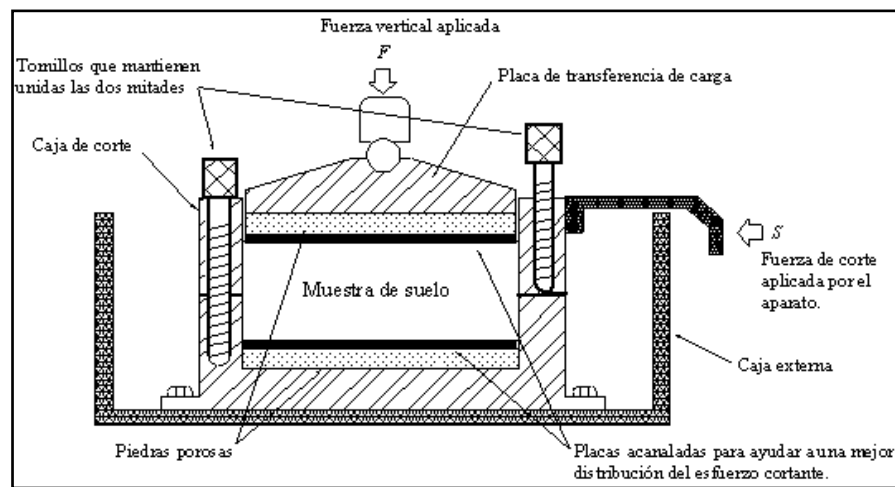
- Resistencia cortante de suelos: según Das (2001), la resistencia cortante del suelo se define como la resistencia por masa unitaria que el suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento en un plano. Dentro de las características mecánicas y geotécnicas del suelo, la resistencia cortante es fundamental, pues esto permite identificar la capacidad del material como medio soportante. La resistencia es dependiente de la adhesión y la fricción entre las superficies del plano de falla, por lo que la fuerza de resistencia al corte se expresa:



$$\tau = c + \sigma \tan(\phi)$$

[Ecuación 2]

Para la determinación de la resistencia cortante es necesario hacer uso de teorías tal como los Criterios de falla Mohr-Coulomb, la cual se refiere a las teorías de ruptura de los materiales; también es necesaria la aplicación de pruebas de resistencia al suelo, algunos de los ensayos más utilizados son la veleta, ensayos de penetración estándar SPT, ensayos de compresión uniaxial, corte directo y ensayos de compresión triaxial. En este caso se utiliza el ensayo de corte directo; en la figura siguiente se muestra un diagrama del ensayo de corte directo.



**Figura 4.** Diagrama de caja de corte

Fuente: Das, 2001

Se puede observar que la muestra de suelo es colocada en la caja de corte, la cual tiene una abertura en su interior, debido a que la caja de corte será separada para realizar la falla; la caja de corte será separada por la fuerza externa que se aplica para fallar la muestra. En la caja de corte la muestra se puede saturar, consolidar, drenar y fallar; la selección de procesos depende del tipo de condiciones que se investigan. A partir de este ensayo es posible obtener la resistencia cortante de un suelo, así como sus parámetros de resistencia: cohesión y ángulo de fricción; según Mohr-Coulomb.

A su vez, estos parámetros se pueden asociar con determinado tipo de suelo, pues existen valores típicos para estos parámetros. En el cuadro siguiente se muestran estos valores típicos.

**Cuadro 9.** Relación tipo de suelo y ángulo de fricción

Clasificación	Ángulo de fricción según esfuerzo máximo (°)		Ángulo de fricción según esfuerzo de rotura (°)
	Densidad media	Densa	
Limo (No plástico)	28-32	30-34	26-30
Arena uniforme de fina a media	30-34	32-36	26-30
Arena bien gradada	34-40	36-46	30-34
Arena y grava	36-42	40-48	32-36

Fuente: Vargas, 2013

### 2.2.2 Caracterización ambiental

La caracterización ambiental del material corresponde a la determinación de los parámetros de calidad ambiental de las aguas residuales. Tal como se indicó anteriormente, estos parámetros también son utilizados para los desechos generados en el tratamiento de las aguas residuales. Para los lodos residuales, la caracterización ambiental incluye los siguientes parámetros de calidad ambiental: nitrógeno, fósforo, demanda biológica orgánica, demanda química orgánica (DQO), potencial de hidrógeno (pH), metales pesados, contenido de materia orgánica y contenido de humedad.

### 2.2.3 Uso del suelo como material constructivo

El suelo es un material que tiene múltiples aplicaciones en el ámbito ingenieril, pues es un material constructivo que se encuentra en la mayor parte de las obras civiles. Al igual que el resto de los materiales constructivos, el suelo debe cumplir con características y especificaciones según el uso proyectado; el nivel de exigencia y el tipo de obra definen la calidad que debe tener un suelo para ser utilizado.

Debido a esto, en Costa Rica se cuenta con documentos que especifican las características que debe tener un suelo para ser utilizado, pues esto permite asegurar que los materiales seleccionados tengan una calidad consistente con el tipo de obra que se realizan, pues es conocido que hay actividades en las que existe mayor reglamentación que en otras; esto responde tanto a la exigencia de la actividad como a los intereses desarrollados en torno al tipo de obra; por ejemplo, hay una gran diferencia entre los requisitos de los materiales

para la construcción de vías públicas y el material utilizado para rellenar sitios donde se realizó excavación minera. Una de las aplicaciones en las cuales se centra esta investigación, es el uso del suelo artificial en construcción de carreteras, caminos, rellenos, control de erosión de taludes y recuperación de zonas degradadas. En este tema se considera el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes (MOPT, 2010); en donde, entre otros temas, se indica la calidad del material utilizado en la construcción de algunas de las obras indicadas. En la construcción de este tipo de estructuras, típicamente los materiales utilizados requieren de una alta calidad, debido a su volumen, costo e impacto en el desarrollo de infraestructura del país. Sin embargo, es importante mencionar que durante la realización de estas obras también se requiere material para obras que se desarrollan al margen de la estructura principal.

A partir de la revisión del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes, se determinan las actividades en las cuales se utilizan materiales consistentes con las características que podría tener el suelo artificial. Las actividades se muestran en el cuadro siguiente, en donde se indica el material usado comúnmente pero que se considera que podría ser sustituido por el lodo o el suelo artificial.

**Cuadro 10.** Actividades normadas para la construcción de carreteras y caminos

<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Material utilizado</b>
Control de erosión (Secciones 157, 626 y 628) <sup>1</sup>	Siembra de césped; típicamente se coloca césped en los taludes, para su plantación se utilizan semillas, fertilizantes y recubrimiento con pajote, para una hectárea se utilizan 40, 37 y 1500 kg respectivamente	Cubierta vegetal
	En la plantación de plantas, arbustos y espigas	
Recubrimiento de tierra vegetal y agregado (Sección 305) <sup>1</sup>	Mezcla para colocar sobre un espaldón preparado o taludes	Tierra vegetal
Relleno (Sección 704.03) <sup>1</sup>	Relleno de terrenos	Material de relleno

<sup>1</sup>Las secciones se refieren al manual indicado

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010

Modificado por: Autor, 2015

Por otro lado, en el cuadro siguiente se presentan las características que debe tener el material utilizado para las actividades descritas anteriormente. En estas especificaciones se encuentran características de tipo geotécnico pero también ambiental.

**Cuadro 11.1.** Especificaciones de materiales utilizados en construcción

Material	Característica	Especificaciones
Tierra vegetal (Sección 713.01) <sup>1</sup>	Suelta, friable, exenta de basura, troncos, raíces y piedras mayores de 25mm, malezas	Materia orgánica AASHTO T267 3 a 10% Arena AASHTO T88 (Malla 200) 20 a 70 Limos AASHTO T88 10 a 60 Arcillas AASHTO T88 5 a 30 Potencial de hidrógeno (pH) AASHTO T289 6 a 8 Ramas y hojas parcialmente descompuestas 75% mínimo
Cubierta vegetal (Sección 713.05) <sup>1</sup>	Musgo o turba: no debe contener piedras ni palos  Compost: Friable, oscuro, libre de maleza y patógenos. Material orgánico parcialmente descompuesto (hojas, césped, arbustos curados entre 4 y 8 semanas. La madurez se revisa con la estabilidad de temperatura y el olor.	Color Café o pardo Potencial de hidrógeno (pH) 3,5 a 7,5 Textura fibrosa, porosa o esponjosa Relación carbón/nitrógeno 25/1 - 35/1 Relación carbón/ fósforo 12/1 - 240/1 Potencial de hidrógeno (pH) 6,0 a 7,8 Contenido de agua 40% máximo Tamaño de partículas 25 mm máximo Materia orgánica 50% mínimo Materiales extraños (vidrio, metal) 2% máximo Tamaño máximo 75 mm Clasificación AASHTO A-1, A-2, A-3
Material de relleno (Sección 704.03) <sup>1</sup>	Material libre de raíces, semillas y materiales deletéreos, material granular y tierra fina	

<sup>1</sup>Las secciones se refieren a los apartados del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010

Modificado por: Autor, 2015

Otra aplicación del suelo que se debe comentar, es sobre su uso en la recuperación de zonas degradadas, tal como sitios de extracción minera no metálica. Esta actividad está relacionada con la industria de fabricación de agregados y materiales para la construcción, lo cual se traduce en extracción de arena, grava, caliza; la obtención de este material implica excavación y remoción del suelo, formaciones superficiales, capa de vegetación y sustrato rocoso; lo cual suele generar depresiones artificiales en el terreno. (UICN, 2009)

Por lo tanto, cuando se termina la explotación minera en un sitio, es necesario que se realicen actividades de recuperación ambiental, en conformidad con el marco legal asociado a la actividad minera (Código de Minería Ley 6797, reformas al Código de Minería Ley 8246, Ley Orgánica del Ambiente, Reglamento al Código de Minería y Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental); en donde se especifica que el responsable de la extracción debe tomar acciones ante los impactos ambientales realizados. Es importante mencionar que respecto a la recuperación de zonas degradadas no existen requerimientos técnicos específicos, pues típicamente esto corresponde a un proceso más detallado y que se realiza durante la evaluación de impacto ambiental del proyecto.

La actividad minera genera diversos impactos ambientales en el suelo, aire, agua, paisaje y medio biótico, entre otros; por lo tanto, es fundamental que se realice un plan para solventar estos impactos. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN), cuenta con una Guía de gestión ambiental para minería no metálica, en donde especifican las acciones desarrolladas para los impactos ambientales; la revisión de esta guía permite identificar las acciones en las cuales es necesario el préstamo de material para la recuperación de la zona, se identifican dos acciones en las cuales se requiere material, la primera es durante la nivelación del terreno para evitar que las depresiones artificiales se llenen de agua, dificultando el crecimiento de vegetación; en este caso es necesario realizar un relleno pero con requerimientos de calidad menores que para una carretera o camino, pues el objetivo no es cimentar una estructura, sino regenerar la capa vegetal.

La segunda acción es la restauración de las áreas que se dejan de utilizar, para esto se desarrolla una restauración ambiental mediante un proceso que combina la regeneración natural con el enriquecimiento de flora arbórea. Para este proceso, se deja que la vegetación arbustiva de la zona se regenere de manera natural durante uno o dos años, evitando en lo

posible la invasión de jaragua u otros zacates. Luego se procede con la siembra de especies de árboles nativos de la zona. (UICN, 2009)

Sobre el material requerido no se cuenta con especificaciones técnicas; sin embargo, es evidente que el material debe estar libre de contaminantes patógenos y que eviten el crecimiento de la vegetación.

### **2.3 Impacto de agua y lodo residual en el ambiente**

Tal como se ha mencionado anteriormente, siempre se ha tenido la necesidad de alejar los desechos de los centros de población; tanto por motivos estéticos como por motivos de salud pública. Sin embargo, no sólo es necesario alejar los desechos de las poblaciones, también se debe brindar una disposición adecuada para asegurar que el entorno no se vea afectado por estos materiales.

El conocimiento de los materiales de desecho permite prever situaciones que ponen en riesgo la salud pública y el medio ambiente; es importante notar la estrecha relación entre estos dos temas, pues condiciones adecuadas del entorno están asociadas con condiciones salubres e higiénicas para las personas, de modo que gran parte del impacto recae en la protección del medio y los recursos de los que diariamente las personas hacemos uso. Además, se debe tomar en cuenta que los impactos en el medio ambiente muchas veces no son previsibles pues siempre existe un grado de incertidumbre asociado a las afectaciones del entorno. Esto genera que los principios de prevención y cautela tomen importancia en el manejo de los desechos, pues en muchas ocasiones no se tiene una adecuada estimación de los daños que estos desechos pueden producir en el medio ambiente.

En el caso de las aguas y lodos residuales, no sólo es necesario comprender la naturaleza de los materiales, sino que también se deben estudiar los sitios en los cuales se proyecta disponer de ellos, pues el medio que los recibe debe ser capaz de ajustarse o resistir los cambios generados por la presencia del desecho. Sin embargo, en muchos casos no se cuenta con conocimiento de los materiales de desecho ni de los sitios en los que se disponen y esto tiene repercusiones importantes en el medio ambiente, que finalmente serán consecuencias negativas en la calidad de vida de las personas.

Los impactos negativos ocasionados por las aguas residuales y por los lodos se dan principalmente por sus contenidos de contaminantes, a continuación se resumen los contaminantes y sus efectos en el medio ambiente.

**Cuadro 12.** Problemática de aguas residuales y lodos

<b>Contaminante</b>	<b>Problemática</b>
Partículas en suspensión	Los sólidos pueden generar depósitos de fango y generación de condiciones anaeróbicas en un medio acuático
Sustancias orgánicas biodegradables	Estas sustancias están compuestas por proteínas, carbohidratos y grasas. Una vez vertidas en el medio ambiente, su descomposición biológica puede dar lugar al agotamiento del oxígeno disuelto en las aguas receptoras y a la aparición de condiciones anaerobias
Microorganismos patógenos	El agua actúa como vehículo en la transmisión de bacterias, virus y parásitos
Nutrientes	Son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de plantas y su presencia en el agua aumenta su valor para riego. Cuando se vierten en un medio acuático se produce eutrofización y se pueden contaminar las aguas subterráneas
Acidez o alcalinidad	Afecta la solubilidad de los metales, así como la alcalinidad del suelo
Metales pesados	Se acumulan en el medio ambiente y son tóxicos para animales y plantas. Su presencia en el agua residual limita su uso para riego
Productos disueltos no orgánicos	Un grado excesivo de salinidad puede perjudicar cultivos

Fuente: Torres, s.f.

Modificado de: Autor, 2015

En Costa Rica, las aguas residuales y lodos son depositados en masas de agua o en el suelo, a continuación se puntualizan estos tipos de contaminación.

### **2.3.1 Contaminación de agua**

El agua tiene la capacidad de disolver y autopurificarse, por lo que estas capacidades han sido aprovechadas para la disposición de desechos. Cuando en un cuerpo receptor se realiza un vertido, se produce un mecanismo de autopurificación en el cual se presentan cuatro zonas a lo largo de la masa de agua, típicamente un río; estas zonas corresponden a



zona de degradación, zona de descomposición, zona de recuperación y finalmente zona de aguas claras, en donde la masa de agua presenta condiciones similares a las aguas naturales y se dan condiciones aptas para la vida. (Unda, 1999)

Es decir, los vertidos controlados no representan un riesgo para el medio ambiente y permiten una adecuada disposición de los desechos, aprovechando las capacidades de purificación de los cuerpos de agua. Sin embargo, esta práctica no siempre se da bajo las condiciones adecuadas por lo que gran cantidad de vertidos son descontrolados tanto en cantidad como en calidad; el resultado es la contaminación de las masas de agua pues el mecanismo de autopurificación no se desarrolla. La contaminación en el agua se define como una alteración en sus propiedades químicas, físicas o biológicas y que además produce efectos negativos en la salud, seguridad y bienestar de la población y de la vida acuática; también cuando se compromete la utilización del agua para usos agrícolas, industriales y recreativos. (Unda, 1999)

Para realizar vertidos de aguas residuales es necesario tener conocimiento de la concentración de las aguas que se depositan y también de la capacidad del curso receptor para recibir estos desechos. La prevención de la contaminación del agua se realiza por medio del tratamiento de aguas antes de los vertidos y el control de la calidad del agua que se obtiene luego del tratamiento; además, es importante considerar los usos que se da aguas abajo del sitio de vertido.

### **2.3.2 Contaminación del suelo**

Los contaminantes en el suelo pueden desencadenar gran cantidad de procesos físicos, químicos y biológicos que no solamente contaminan el suelo, sino que también dañan el resto del ambiente, incluyendo la cadena trófica. El impacto ambiental de la contaminación del suelo está asociado a las características del contaminante, el medio receptor y su entorno, así como la interacción entre contaminantes y seres vivos. Tal como indica Fernández (s.f.), cuando un contaminante se incorpora en el suelo se pueden prever cuatro vías para el contaminante: que este quede retenido en el suelo o sea fijado por adsorción y precipitación, que sea absorbido por plantas y se incorpore en las cadenas tróficas, que pase a la atmósfera por volatilización o se movilice a aguas superficiales y subterráneas.

La contaminación del suelo se da principalmente por el depósito de lodos resultantes del tratamiento de aguas, esto se da por la disposición inadecuada de los desechos pero también por el mal uso de los lodos como mejoradores del suelo; pues esta práctica es favorable sólo si se realiza de manera controlada, pues los lodos tienen altos contenidos de patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos. (Fernández, s.f.)

Los metales pesados son sustancias con alto peso molecular, muy difundidos y útiles pero que también pueden afectar la salud de los seres vivos y el medio ambiente; entre los metales pesados más comunes de los lodos se pueden mencionar níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio. Los metales pesados cambian la alcalinidad del suelo, dependiendo de la concentración de éstos, también contaminan el agua y los cultivos. Específicamente, el plomo puede producir alteraciones en ciertas plantas, degradar el suelo y disminuir su productividad hasta producir la desertificación. Uno de los principales problemas de la contaminación debida a metales pesados es que su efecto no es visible sino hasta mucho tiempo después, cuando no es posible revertir el daño. (Eróstegui, 2009)

## **2.4 Gestión de saneamiento en Costa Rica**

En múltiples campos han surgido importantes avances que permiten el progreso de la humanidad, en el saneamiento también se han dado esfuerzos, adelantos y compromisos; sin embargo, las consecuencias ambientales son mayores que las acciones para prevenir y subsanar los daños ocasionados al medio ambiente, por lo tanto es necesario tener conocimiento de la situación actual en torno a la gestión de saneamiento, pues para generar cambios positivos es importante conocer las debilidades, fortalezas y oportunidades del país y las personas que lo conforman; es necesario un punto de partida y un punto de llegada.

A continuación se describe la situación actual del país, tomando en cuenta documentos de dominio público y la legislación vigente en Costa Rica.

### **2.4.1 Marco legal**

En Costa Rica se cuenta con legislación asociada a las aguas residuales y lodos provenientes del tratamiento de estas aguas. A continuación se mencionan las leyes y reglamentos vigentes.

- Reglamento para el manejo de lodos procedente de tanques sépticos (Decreto 21287-S, año 1992): El reglamento es dirigido principalmente a empresas encargadas de

transporte de lodos, por lo que se emiten varios deberes en los cuales se busca proteger la seguridad de las personas que se encargan de transportar lodos y de la población en general. Estas medidas están asociadas a logística pero no se consideran aspectos sobre la disposición final de los lodos transportados.

- Reglamento sobre el Manejo de Residuos Sólidos Ordinarios (Decreto 36093-S; 2010): En este reglamento se determinan las responsabilidades de las municipalidades respecto a los desechos sólidos, específicamente su recolección, transporte, recuperación y disposición. Así como las sanciones y prohibiciones asociadas a los residuos sólidos ordinarios.

- Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (Decreto 31545-S-MINAE; 2013): En este reglamento se especifican los requisitos que se deben cumplir respecto a la disposición de sus aguas residuales, esto incluye retiros, ubicación, tipos, documentación y aspectos constructivos de sistemas de tratamiento.

Es importante indicar que existe la propuesta del Reglamento para la gestión integral de lodos y biosólidos; pero aún no se encuentra vigente en el país.

- Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales (Decreto 30413, año 2002): En este reglamento se establecen los parámetros que se deben tomar en consideración para realizar vertidos: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, potencial de hidrógeno, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sustancias activas al azul de metileno y temperatura; además se especifican los valores que deben tener estos parámetros de calidad en los vertidos. Adicionalmente, se especifican los parámetros complementarios a los mencionados, y que deben realizarse para determinadas actividades.

En este reglamento también se especifican los tipos de reuso que se puede dar a las aguas residuales y los valores de parámetros de calidad que deben tener para que estos reusos se puedan realizar. También se incluye normativa sobre el muestreo, reportes operacionales, prohibiciones y sanciones.

**Cuadro 13.** Reuso de aguas residuales

Tipo de reuso	Descripción	Límites	
		Nematodos intestinales (Promedio N° huevos/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
Urbano	Riego en zonas de acceso público	1	1000
Agrícola en cultivos no alimenticios	Riego de piso, forrajes, cultivos de fibras y semillas	1	Evitar contacto por 15 días, de lo contrario debe ser menor a 1000
Recreativo	Posible contacto ocasional	1	10000
Paisajístico	Aprovechamiento estético en sitios sin contacto público	1	-
Construcción	Compactación de suelos, control de polvo, lavado de materiales	1	1000

Fuente: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, 2007

Modificado de: Autor, 2015

Ahora, del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, se considera el Capítulo III, de donde se extraen los parámetros de calidad asociados a esta investigación. De este reglamento también se considera importante tomar en cuenta los lineamientos de reuso de aguas residuales, pues esto es más representativo en esta investigación; en el cuadro siguiente.

**Cuadro 14.** Límite de parámetros de vertido de aguas residuales

Parámetro	Límite
Demanda Biológica de Oxígeno	50 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	150 mg/L
Sólidos suspendidos	50 mg/L
Potencial de hidrógeno	5-9
Fosfatos	25 mg/L
Nitrógeno total	50 mg/L

Fuente: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, 2007

### 2.4.2 Marco institucional

En Costa Rica existen diversas instituciones y organizaciones que se encuentran involucradas en el tema de aguas y lodos residuales. Existe una división de funciones pero también es común la duplicidad de responsabilidades y por lo tanto, la ausencia de una entidad que las asuma. En el Cuadro 15 presenta un esquema del marco institucional del país.

**Cuadro 15.** Marco institucional de Costa Rica

Aspecto	Gobierno Nacional				Gobierno local	Sector privado	Usuarios
	Ministerio de Salud	MINAE	AyA	ARESEP			
Desarrollo de políticas y estrategias	••	••	•	•	•		
Regulación económica				••	••	••	•
Implementación de proyectos			••		••	••	••
Gestión			••				••
Vigilancia	••	••	••	•	•	•	•

#### Simbología

••	Responsable
•	Involucrado
	No involucrado

Fuente: Latinosan, 2007

Modificado de: Autor, 2015

### 2.4.3 Situación actual

Para describir la situación actual de Costa Rica respecto al tema de aguas residuales, es importante considerar varios aspectos, tal como las políticas y estrategias, marco legal e institucional, financiamiento, monitoreo y evaluación. En los últimos años muchos de estos aspectos han mejorado, pues ha aumentado la importancia y la consciencia de proteger el medio ambiente y la salud pública. Sin embargo, es posible identificar tres aspectos críticos: el saneamiento carece de identificación política de carácter nacional, no se cuenta con control

claro y efectivo de las normativas y el sistema del tanque séptico -ampliamente utilizado en el país- no cuenta con normativa.

En el Cuadro 16 se presenta un resumen de la situación de saneamiento en Costa Rica, tomando en cuenta los aspectos anteriormente mencionados; se presenta un resumen de las acciones que se toman en el país, así como los puntos débiles y las recomendaciones para fortalecer las acciones que se realizan. Con esta información se puede trazar un escenario de la situación actual del país. Pero además de conocer las acciones en torno a la gestión de las aguas residuales, es necesario comentar las consecuencias debido al manejo inadecuado de estos desechos.

En Costa Rica, la contaminación hídrica ha provocado la disminución de la calidad ambiental de gran cantidad de sitios; el río Grande de Tárcoles, Grande de Térraba, Tempisque y Reventazón son algunos de los casos en los que la contaminación de ríos ha generado también la contaminación de playas y por lo tanto ha afectado las actividades que se realizan en estas zonas. El Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) realizó un estudio en 250 ríos del país, donde se tomaron 487 puntos de muestreo entre el año 2005 y 2012, se obtuvo como resultado que un 71% de los puntos muestreados presenta contaminación de moderada a extrema. (Angulo, 2013)

**Cuadro 16.** Situación de saneamiento en Costa Rica

<b>Aspecto</b>	<b>Resumen de acciones</b>	<b>Aspectos críticos</b>	<b>Recomendaciones</b>
Políticas y estrategias	El Plan de Desarrollo 2006-2010 plantea proyectos de alcantarillado para San José, Heredia, Alajuela, Limón y Cartago	Ausencia de plan de acción, información, capacitación y estrategia; inconsistencia en las metas formuladas	Realizar una política integral
Marco legal	El marco legal se detalla en 2.4.1 Marco legal	La actualización de leyes y reglamentos es lenta, por lo que el control, sanción e incentivos es deficiente; además hay duplicidad por lo que las instituciones no asumen su responsabilidad: el marco legal no es suficiente para hacer cumplir las leyes	Estimular los procesos de toma de decisiones; promover que sectores colaboren en los procesos para mejorar el marco legal
Marco institucional	El marco institucional se detalla en 2.4.2 Marco institucional	Inconsistencia y descoordinación en las funciones de las instituciones La política no es integral	Definir una política nacional que promocióne el avance y cumplimiento de metas
Financiamiento	No se cuenta con políticas de subsidios, recuperación de costos y tarifas	Ausencia de esquema de financiamiento	Buscar apoyo de usuarios
Monitoreo y evaluación	El Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 prevé el diseño del Sistema Nacional de Información Ambiental	No se consideran contenidos, procedimientos ni estrategias para correcta acción de monitoreo y evaluación; la información recolectada no es analizada ni utilizada para futuros diseños, tampoco es intercambiada entre instituciones compartida	Trabajar de forma conjunta

Fuente: Latinosan, 2007

Modificado de: Autor, 2015

En el año 2012, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), presentó el informe Calidad Sanitaria de las aguas de playa de Costa Rica en el período 1996-2011, en donde se evalúa la calidad de 100 playas de Costa Rica mediante la determinación de promedios geométricos de coliformes fecales, a partir de muestras de agua recolectada en varios puntos de muestreo en los litorales. En este informe se indica que en consistencia con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), la contaminación de los ríos es responsable de entre el 70% y 80% de la contaminación de las aguas de mar, debido a las descargas en los ríos y en desembocaduras de los ríos y esteros. Esto sugiere que gran cantidad de generadores de agua residual realizan vertidos inadecuados.

Adicionalmente al tema de ríos y mares, es importante mencionar la contaminación en mantos acuíferos; los cuales son vulnerables a la contaminación debida a la presencia de aguas residuales y de lodos, pues estos materiales pueden ser depositados en zonas donde la infiltración permite que los contaminantes alteren los acuíferos. En Costa Rica, el Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional brindó una alerta respecto a su contaminación, pero no hay estudios sobre este tipo de contaminación según el Estado de la Nación del año 2013.

#### **2.4.4 Normativa internacional**

La EPA (Agencia de Protección del Ambiente de EEUU, EPA por sus siglas en inglés) clasifica el lodo residual y los biosólidos en dos grupos (A y B), considerando su nivel de estabilización y contenido de contaminantes, en donde el lodo clase A representa un material seguro y con diversas aplicaciones; para clasificar como clase A, el lodo o biosólido debe cumplir con alguno de los contenidos de patógenos mostrados a continuación.

**Cuadro 17.** Parámetros de patógenos para clasificación de lodo, según EPA

<b>Clasificación</b>	<b>Densidad de coliformes fecales (NMP/g ST)</b>	<b>Densidad de Salmonella (NMP/4g de ST)</b>	<b>Contenido de ova helmintica viable (1/4 g de ST)</b>
Clase A	1000	3	1
Clase B	2000000	-	-

Fuente: Water Environment Federation, 2010

Modificado de: Autor, 2015



Además del cumplimiento de los contenidos de patógenos, se puede clasificar como A si cumple con alguna de las siguientes condiciones:

- Combinación de tiempo y temperatura: si se utiliza el criterio de tiempo y temperatura, se deben utilizar los lineamientos mostrados en el Cuadro 18, con los cuales se obtiene el tiempo que se debe dar entre la disposición del suelo y el contacto con las personas.

**Cuadro 18.** Tiempo y temperatura para lodo Clase A, según EPA

Total sólidos (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (t)	Tiempo de contacto (D)
≥ 7	≥ 50	≥ 20 minutos	$D = \frac{131700000}{100,14 \cdot t}$
≥ 7	≥ 50	> 15 segundos	
<7	> 50	≥ 15 segundos - < 30 minutos	
<7	≥ 50	≥ 30 minutos	$D = \frac{50070000}{100,14 \cdot t}$

Fuente: Water Environment Federation, 2010

- Tratamiento alcalino: adicionar cal manteniendo el pH del lodo a niveles sobre 12 por un tiempo superior a 72 horas.

- Tratamiento para reducir patógenos (compostaje, pasteurización, aplicación de rayos gamma, secado por calor, estabilización con cal, entre otros)

Ahora, esta clasificación es utilizada para definir los métodos de disposición del residuo, en el cuadro siguiente se detallan.

**Cuadro 19.** Rango de aplicación por clase de lodo

Clasificación	Uso permitido
Clase A	Sin restricción para aplicar en suelos
Clase B	Suelos de uso forestal, con control del área por 30 días posteriores a la aplicación; praderas para pastoreo, con aplicación 30 días antes de su uso. (Ver Cuadro 7 para más usos de lodo clase B)

Fuente: Water Environment Federation, 2010

## CAPÍTULO 3: PLANTA DE TRATAMIENTO BOULEVARD LAS PALMAS

La planta de tratamiento de agua residual Boulevard Las Palmas corresponde a un sistema de lodos activados de aireación extendida, el cual consiste principalmente en un tratamiento biológico por medio de cultivo bacteriano en un tanque de aireación. En secciones posteriores se detalla sobre este sistema. La selección de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas considera dos aspectos: corresponde a un sistema de lodos activados, el cual genera gran cantidad de lodos y mediante consultas a personal encargado de la planta, se indica que la planta de tratamiento funciona adecuadamente.

### 3.1 Ubicación

La planta de tratamiento Boulevard Las Palmas se ubica en el cantón de Mora, en la provincia de San José, específicamente en el residencial Boulevard Las Palmas; en la Figura 5 se muestra la ubicación de la planta de tratamiento.

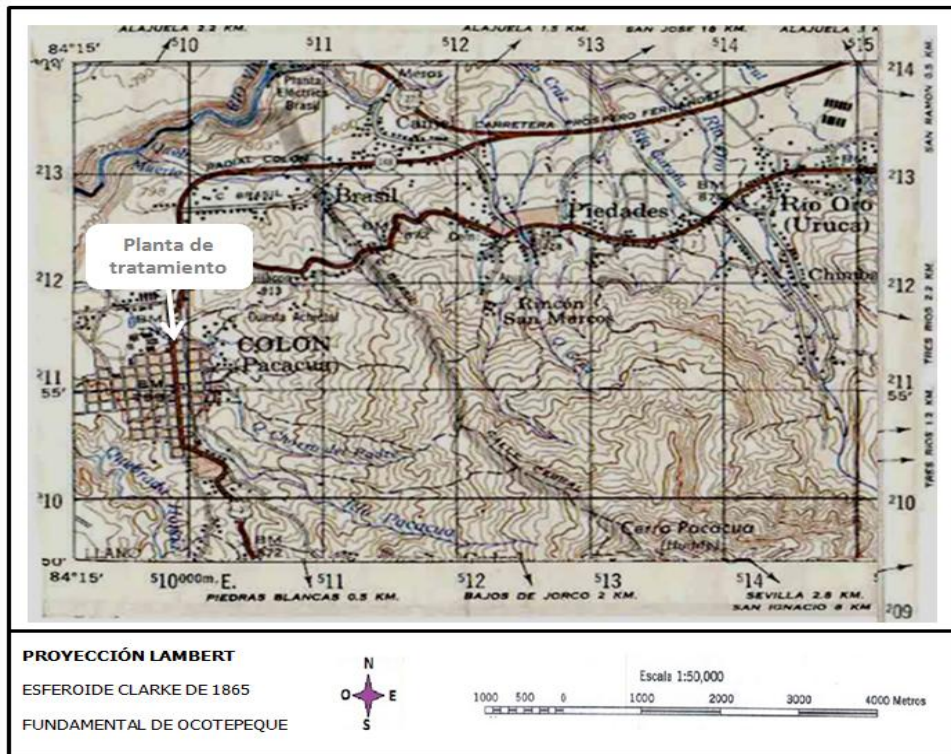


Figura 5. Ubicación de PTAR Boulevard Las Palmas

### 3.2 Descripción técnica

En el cuadro siguiente se muestra la información de la ficha técnica de la planta de tratamiento, en donde se encuentran los datos generales de la planta.

**Cuadro 20.** Ficha técnica de PTAR<sup>1</sup> Boulevard Las Palmas

<b>Ubicación</b>	Lugar: Boulevard Las Palmas Provincia: San José	Distrito: Colón Cantón: Mora
<b>Zona</b>	Tipología de casas: VC-03 Lote promedio: 190,00m <sup>2</sup> Nivel socioeconómico: Medio Zona de vida: Bosque húmedo premontano Período seco: 3,5-5 meses Precipitación anual: 1200-2200 mm	
<b>Tratamiento de aguas</b>	Tratamiento primario: Rejillas y desarenador (dos en paralelo) Sistema biológico: Lodos activados con aireación extendida Tratamiento secundario: Sedimentador secundario	
<b>Tratamiento de lodos</b>	Tratamiento: Digestor aeróbico y lecho de secado Cantidad producida: 162,00 m <sup>3</sup> /año Método de remoción: Manual desde lecho Destino final: En terreno de PTAR Bosques de Santa Ana	
<b>Estado general de infraestructura</b>	Año de construcción: 2002 Inicio de administración AyA: Mayo de 2010 Obra gris: Muy bueno Estructura metálica: Muy bueno Instalación mecánica: Muy bueno Equipos: Muy bueno	
<b>Funcionamiento</b>	Cantidad de servicios: 238 servicios Medición de caudal: Medidor electromagnético a la entrada Frecuencia de análisis: Cada seis meses Cuerpo receptor: Río Pacacua	

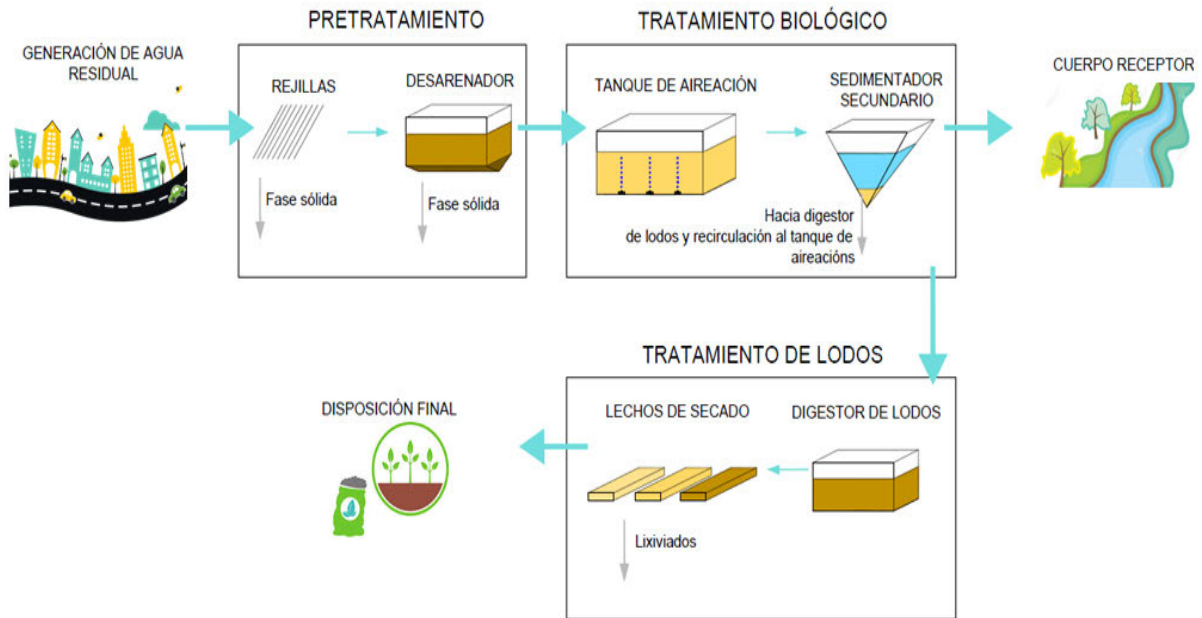
<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

Fuente: Baudrit, 2014

Modificado de: Autor, 2015

### 3.3 Sistema de tratamiento

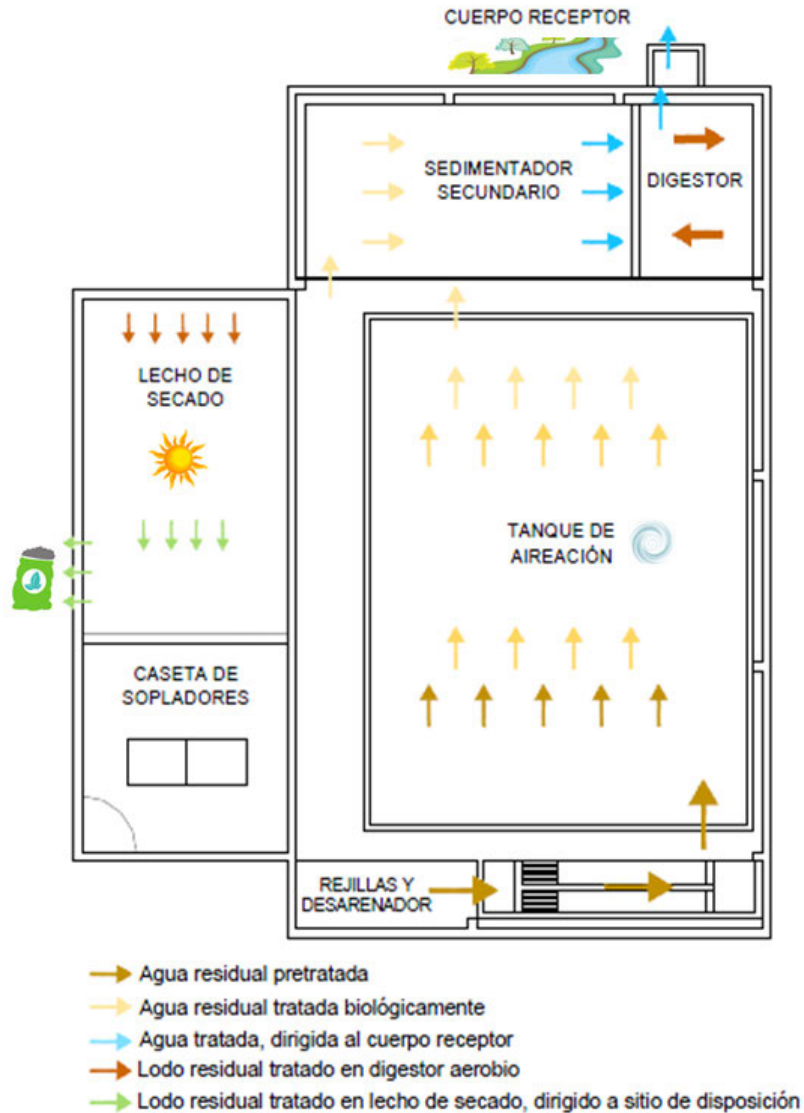
El tratamiento de las aguas residuales en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas está compuesto por tres etapas: pretratamiento de la línea de agua (rejillas y desarenador), tratamiento biológico de la línea de agua (sistema de lodos activados de aireación extendida) y tratamiento de lodos (digestión aerobia y deshidratación en lecho de secado). En la figura siguiente se presenta un diagrama del proceso de tratamiento.



**Figura 6.** Diagrama de proceso de tratamiento en Boulevard Las Palmas

En la figura anterior se observa la secuencia de las tres etapas de tratamiento del agua en la planta Boulevard Las Palmas. Inicia con un pretratamiento de la línea de agua, en donde se remueven los sólidos de mayor tamaño para evitar daños en las siguientes unidades de tratamiento. Posteriormente se inicia el tratamiento biológico, el cual consiste en un tratamiento con lodos activados de aireación extendida por medio de un tanque de aireación y un sedimentador secundario, en donde las partículas sólidas sedimentan; del sedimentador son enviadas al digestor de lodos o recirculan al tanque de aireación según corresponda, la fase líquida que se encuentra en el sedimentador secundario es el agua tratada que se vierte en el cuerpo receptor. Finalmente, en la etapa de tratamiento de lodos, se ubica el digestor de lodos y los lechos de secado.

En la Figura 7 se muestra un diagrama de la planta de tratamiento, en donde se observa la ubicación de las unidades de tratamiento y la circulación de agua y lodo residual y tratado.



**Figura 7.** Diagrama de Boulevard Las Palmas

Fuente: Baudrit, 2014

Modificado de: Autor, 2015

En las secciones siguientes se detalla cada una de las unidades de tratamiento de la planta Boulevard Las Palmas.

### 3.3.1 Pretratamiento

En el pretratamiento se separa la fase sólida de la líquida de las aguas residuales, para preparar las aguas para el tratamiento y proteger las siguientes unidades del tratamiento. Las rejillas permiten separar los sólidos de mayor tamaño de las aguas residuales para evitar que ingresen residuos que puedan dañar el sistema de tratamiento. Posteriormente el agua es enviada al desarenador, en donde se remueven las arenas o partículas de mayor tamaño. Es importante que en esta unidad de tratamiento el agua se mantenga a una velocidad adecuada para que las partículas sedimenten por gravedad. En la figura siguiente se presenta la cámara de entrada, la cual está compuesta por las rejillas y el desarenador.

En esta etapa, las basuras retenidas en la rejillas son dispuestas en bolsas de basura y colocadas con la basura convencional; la arena retenida en el desarenador es depositada en el suelo. Estos desechos no se incorporan a la línea de lodos.



**Figura 8.** Pretratamiento: Rejillas y desarenador

Fuente: Baudrit, 2014

Modificado de: Autor, 2015

### 3.3.2 Sistema biológico: lodos activados de aireación extendida

El sistema de lodos activados consiste en mantener el agua residual en condiciones aerobias, específicamente en un tanque de aireación que además de brindar las condiciones aerobias permite mantener una mezcla constante en el agua residual. El principio del digestor aerobio consiste en que los microorganismos consumen su propia reserva de energía para sobrevivir. Este es un proceso endógeno en el cual la materia biodegradable es oxidada de manera aerobia por medio de dióxido de carbono, agua y amoníaco. (Von Sperling, 2001)

Luego de estar en el tanque de aireación, el agua residual es dirigida al sedimentador secundario, en donde los sólidos sedimentables son separados por gravedad; para lograr esto el agua debe permanecer un tiempo adecuado en el sedimentador secundario, de forma que las partículas más densas se sedimenten. Luego de esta separación, el agua tratada es desviada al río Pacacua, mientras que los sólidos sedimentables son llevados al digestor de lodos aerobio o se mantienen recirculando en el tanque de aireación, pues la presencia del cultivo bacteriano es fundamental. El tanque de aireación y el sedimentador secundario pueden ser observados en la figura siguiente.

En esta etapa es donde se genera el lodo residual; el cual es enviado a la siguiente etapa de tratamiento, compuesto por el digestor aerobio y lechos de secado.



**Figura 9.** Tratamiento biológico: tanque de aireación y sedimentador secundario

### 3.3.3 Tratamiento de lodos: digester aerobio y lechos de secado

En la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas los lodos son tratados mediante el sistema de digester aerobio y lechos de secado, como tratamiento de estabilización y deshidratación, respectivamente.

En el digester aerobio, se da la estabilización del lodo para reducir el porcentaje de sólidos volátiles y evitar los malos olores cuando son dispuestos en su sitio final. En esta etapa, los microorganismos se encargan de estabilizar el material mediante un principio similar al del tanque de aireación, por lo tanto es necesaria la presencia de oxígeno y del cultivo bacteriano. En la figura siguiente se muestra el digester de lodos.



**Figura 10.** Tratamiento de lodos: Digester aerobio

Luego del digester de lodos aerobio, este residuo es dirigido a los lechos de secado en donde debe permanecer un tiempo necesario para su deshidratación. El objetivo de mantener el lodo en estos lechos es reducir el contenido de humedad de modo tal que



también se reduzca su volumen y su grado de contaminación, pues estos son los aspectos que generan mayores problemas a la hora de su disposición final; en la planta de tratamiento se cuenta con tres lechos de secado, los cuales se pueden observar en la Figura 11. Es importante mencionar que los dos primeros lechos de secado presentan condiciones más favorables para el secado del material, pues se encuentran mejor protegidos por la lluvia y la posición respecto al sol permite que su secado sea más rápido.

Respecto a la reducción de volumen del lodo, es importante notar que en el lecho de secado N.1 la fotografía muestra la realización de una purga de lodos, los cuales tienen un volumen y cantidad de agua importante; mientras que en los lechos N.3 y N.2 se muestran lodos que tienen cerca de 8 días de permanecer en secado, por lo que su consistencia es más sólida y su volumen menor al inicial.



**Figura 11.** Tratamiento de lodos: Lechos de secado

Cuando los lodos están secos se llevan a su sitio de disposición final; los lodos son depositados en un lote destinado para este fin y en pequeñas cantidades son utilizados como abono en los árboles ubicados en la planta de tratamiento. Esto se puede observar en la Figura 12.



**Figura 12.** Disposición de lodo residual

En la Figura 13 y Figura 14 se puede observar la distribución de las principales estructuras de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas. Esto corresponde al tanque de aireación, sedimentador secundario, digester de lodos, el cuarto de control o caseta de sopladores y los tres lechos de secado.



**Figura 13.** Ubicación de estructuras de Boulevard Las Palmas



**Figura 14.** Ubicación de estructuras de Boulevard Las Palmas

### **3.4 Eficiencia del tratamiento**

En la elaboración del suelo artificial el principal componente es el lodo residual, el cual también es el componente que presenta las mayores variabilidades según su procedencia, edad de secado y funcionamiento de la planta de tratamiento.

Para determinar si el funcionamiento de la planta es adecuado, es necesario realizar análisis de manera periódica al agua residual y al agua tratada, para así comparar las características del agua antes y después de los procesos que se aplican en la planta. Según Baudrit (2014), los análisis realizados en las aguas de la planta indican que la depuración en el agua sí cumple con las eficiencias y con los parámetros establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

Según la información presentada por Baudrit (2014), la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas tiene un funcionamiento adecuado, pues presenta eficiencias satisfactorias y generalmente un cumplimiento de los parámetros de vertidos. Respecto a los lodos residuales, indica que los lechos de secado no drenan de manera satisfactoria, por lo cual se dificulta la reducción de la humedad del material. En general, la información presentada por Baudrit (2014) indica que el tratamiento en la planta Boulevard Las Palmas es adecuado; sin embargo en una de las visitas a la planta de tratamiento, el lodo no se encontraba en condiciones típicas ni adecuadas (se observó la presencia de animales y restos orgánicos visibles), por lo que se podrían haber dado problemas en la operación de la planta

de tratamiento; también se observó el “arrastre” (lodo residual dirigido al río) de lodos en el sedimentador secundario. Sobre las visitas se detalla en la sección 3.6 Descripción de visitas.

### **3.5 Características climáticas del sitio**

Tal como se observó anteriormente, los lechos de secado de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas se encuentran bajo techo, pues es fundamental proteger el material del agua. Sin embargo, durante las visitas al sitio y la observación, se ha notado que las condiciones climáticas influyen de manera importante en el secado de los lodos, pues en la época seca los rayos de sol aceleran el proceso, mientras que en la época lluviosa los lodos requieren más tiempo para llegar a la condición de humedad deseada. Por lo tanto, además de describir la planta de tratamiento, es importante conocer las condiciones climáticas del sitio en el cual se ubica, pues esto afecta la condición de humedad de los lodos.

En Ciudad Colón, es posible distinguir dos estaciones marcadas: la época lluviosa que va de mayo a noviembre, y la época seca que va de diciembre a abril; además, la precipitación promedio anual es de 2400 mm. Respecto a las temperaturas anuales de la zona, estas se encuentran en los rangos mostrados en el Cuadro 21. Esto se puede observar en las figuras siguientes.

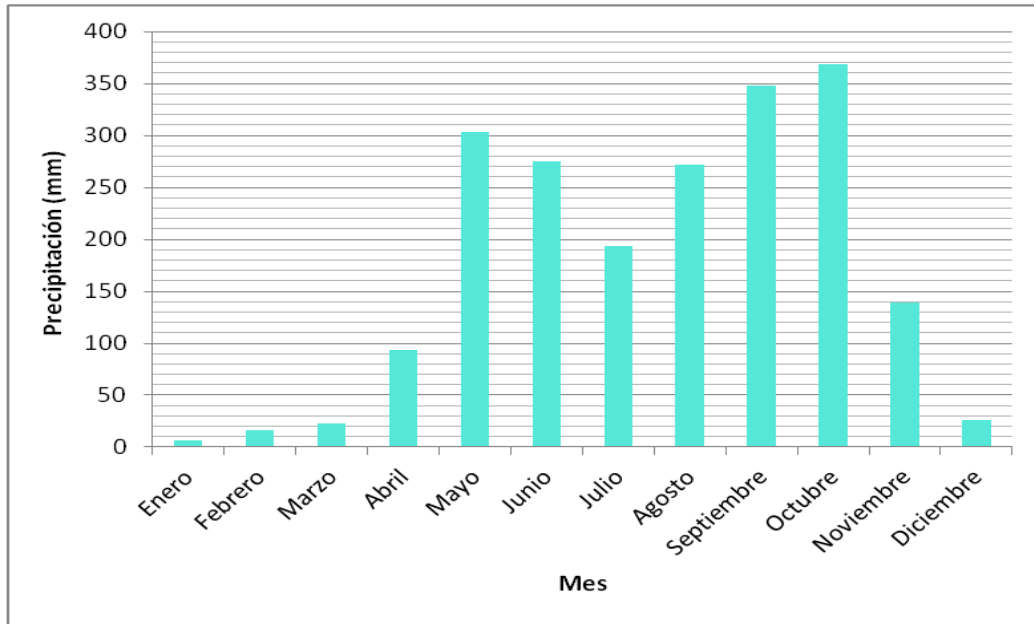
**Cuadro 21.** Temperaturas anuales en Ciudad Colón

<b>Temperatura anual (°C)</b>		
<b>Máxima</b>	<b>Media</b>	<b>Mínima</b>
28 - 30	22 - 24	18 - 20

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2009

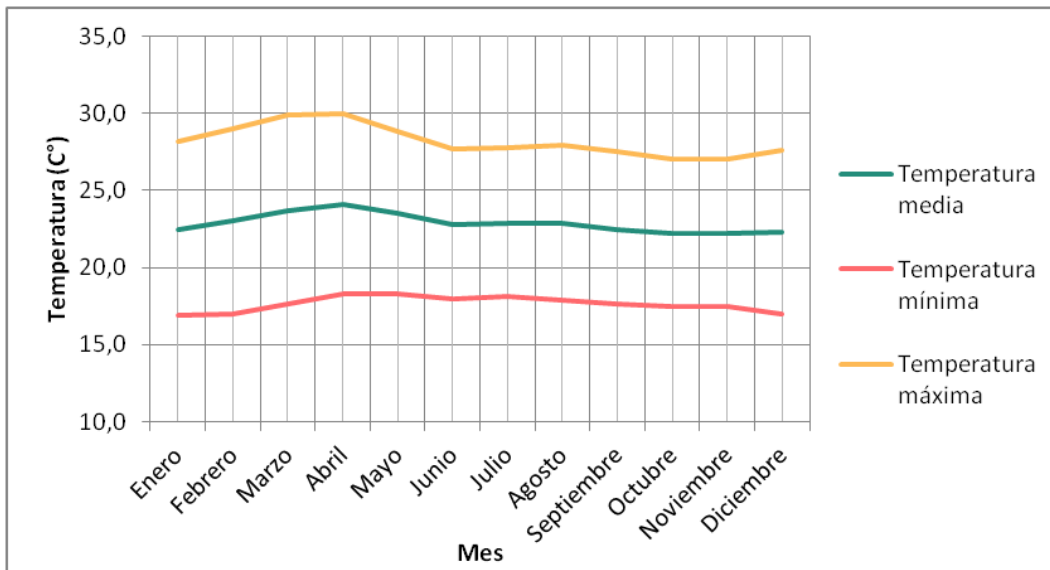
Modificado de: Autor, 2015

En las figuras siguientes se presenta la variación de precipitación y de temperatura en Ciudad Colón, sitio en el cual se ubica la planta de tratamiento Residencial Las Palmas.



**Figura 15.** Precipitación de Ciudad Colón

Fuente: Climate Data, s.f.



**Figura 16.** Temperatura de Ciudad Colón

Fuente: Climate Data, s.f.

### **3.6 Descripción de visitas**

Durante la investigación, se realizan visitas a la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas; esto con el fin de caracterizar el sitio y la recolección del lodo residual. En el Cuadro 22 se puede observar la descripción de las visitas realizadas a la planta de tratamiento.

Es importante notar que en las dos primeras visitas el lodo residual se encuentra con bajas humedades, mientras que para las últimas visitas el material tiene altas humedades y una apariencia que evidencia un cambio en la operación de la planta de tratamiento, pues se observan restos orgánicos visibles y animales. Según lo consultado al encargado de la planta de tratamiento, esto se relaciona con las condiciones climáticas, pues el lodo no se seca debido a las precipitaciones.

**Cuadro 22.** Descripción de visitas a planta de tratamiento Boulevard Las Palmas

<b>Visita</b>	<b>Fecha</b>	<b>Estado del tiempo</b>	<b>Actividad realizada</b>	<b>Observaciones</b>
1	6 de mayo, 2015	Día de recolección: Soleado Días previos: Soleado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instrucción por parte del encargado de la planta de tratamiento (ubicación de estructuras, funcionamiento y operación)</li> <li>Revisión de condiciones de lechos de secado para la recolección del material</li> <li>Recolección de tres sacos de lodo residual de los lechos N.2 y N.3</li> <li>Traslado de lodo residual a los laboratorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los lechos N.2 y N.3 tienen lodo con bajas humedades, el lecho N.1 se encuentra en purga</li> <li>Debido a la presencia de tres lechos de secado y las condiciones favorables del secado, se decide utilizar el material de la planta de tratamiento</li> <li>Se observa "arrastre" de lodos</li> </ul>
2	4 de junio, 2015	Día de recolección: Soleado Días previos: Soleado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección de ocho sacos de lodo residual de los lechos N.1, N.2 y N.3; para su posterior traslado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los lechos N.2 y N.3 presentan bajas humedades, el lecho de secado N.1 no presenta una humedad adecuada, a pesar de tener ocho días en el lecho de secado</li> <li>El material se empaca y se mantiene protegido de la lluvia en un sitio cercano a los lechos</li> </ul>
3	8 de junio, 2015	Día de recolección: Soleado Días previos: Soleado/Nublado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Traslado de lodo residual a los laboratorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se recolectó lodo porque ningún lecho tenía material con bajas humedades, a pesar de tener varios días en el lecho de secado</li> </ul>
4	23 de julio, 2015	Día de recolección: Soleado Días previos: Soleado/Nublado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección de un saco de lodo residual del lecho N.2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se recolecta el material pero se descarta porque su humedad es alta y el lodo tiene contenidos orgánicos visibles, a pesar de tener varios días en el lecho</li> </ul>

## **CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LODO RESIDUAL**

---

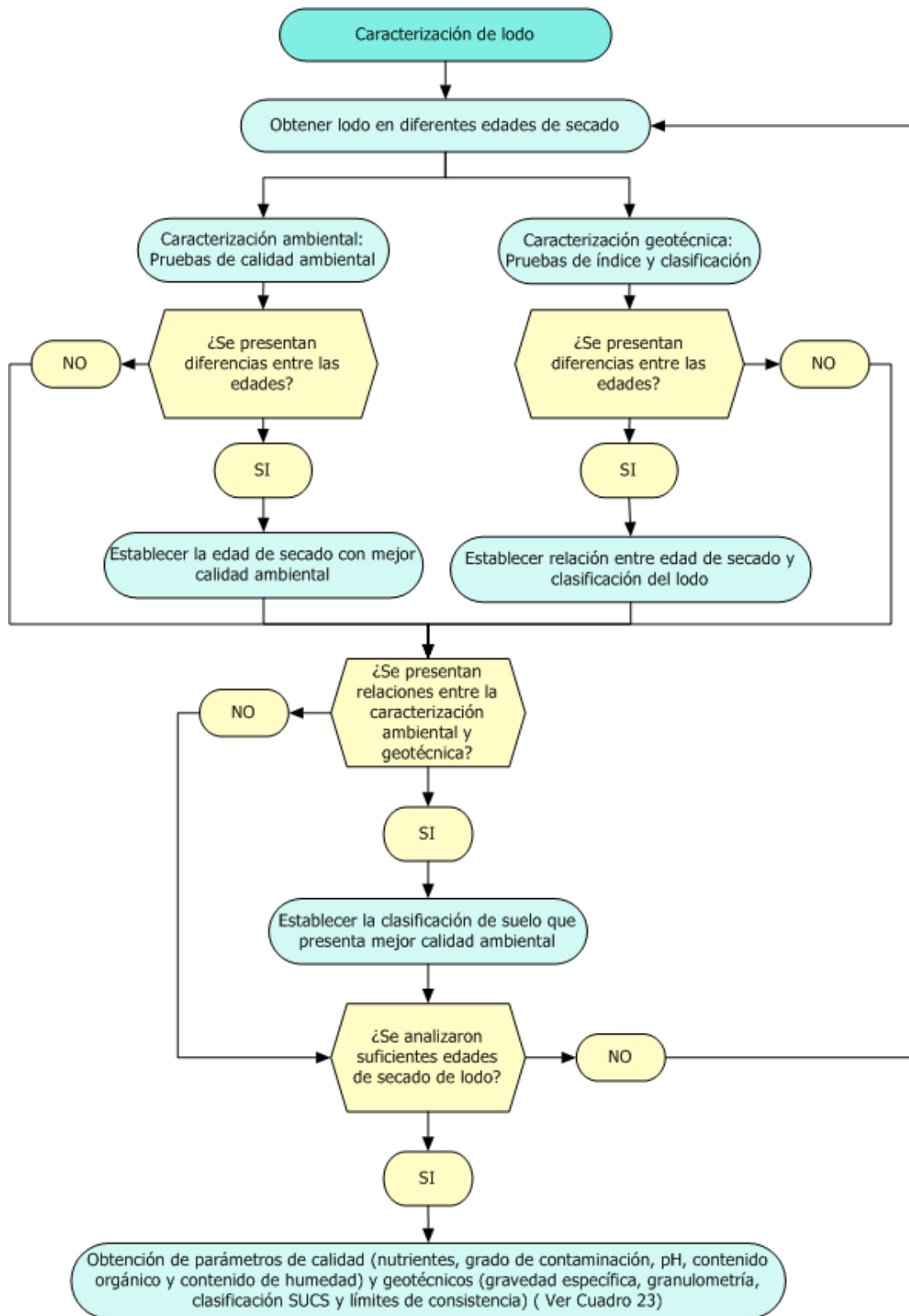
### **4.1 Metodología de caracterización**

El lodo es estudiado desde el punto de vista ambiental y geotécnico; la caracterización ambiental permite determinar las propiedades del lodo para diferentes edades y así analizar los cambios que se presentan conforme aumenta la edad del residuo, además se podrá determinar cuál de las edades analizadas presenta mejor calidad ambiental; por otro lado, la caracterización geotécnica permite catalogar el lodo dentro de los estándares de clasificación de suelos, esto con el objetivo de establecer si se presentan diferencias debido a la edad o estado de humedad del lodo.

En la Figura 17 se presenta el esquema de caracterización del lodo residual. La caracterización inicia con la obtención de lodo en diferentes edades de secado, esto se refiere a lodo con diferentes contenidos de humedad; es importante mencionar que la obtención de lodo considera la extracción del lodo de la planta de tratamiento y su proceso de secado en laboratorio.

Cuando el material presenta las condiciones de humedad buscadas, se inicia con la caracterización ambiental y geotécnica del lodo. En este proceso, es fundamental analizar suficientes condiciones de humedad del material, pues se busca conocer las características del lodo en la mayoría de condiciones posibles. Cuando las muestras de lodo analizadas son suficientes para la investigación, se inicia con la elaboración del suelo artificial, utilizando los lodos que presentaron las mejores condiciones para este fin. Sobre el suelo artificial se detalla en secciones posteriores.





**Figura 17.** Esquema de caracterización de lodo

Además de la secuencia de la caracterización, es necesario especificar las pruebas que se realizan al lodo; en el cuadro siguiente se detalla esta información:

**Cuadro 23.** Ensayos de caracterización para lodo residual

Área	Parámetro	Metodología de prueba	
Ambiental	Contenido de materia inorgánica	Nitrato	Procedimiento
		Nitritos	Procedimiento
		Amoniaco	Procedimiento
		Fósforo	Procedimiento
	Materia orgánica	DBO	Procedimiento
		DQO	Procedimiento
	Calidad ambiental	Contenido de volátiles	Procedimiento
		Contenido de humedad	Procedimiento
		Potencial de hidrógeno	Procedimiento
Geotecnia	Gravedad específica		Norma ASTM D-854
	Granulometría		Norma ASTM D-422
	Clasificación		Norma ASTM D-2487
	Límites de consistencia		Norma ASTM D-4318

## 4.2 Descripción de muestra

En esta sección se indican las características del lodo extraído del lecho de secado de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, así como de los lodos que fueron secados luego de ser recolectados de esta planta de tratamiento. También se explican las condiciones de extracción, almacenamiento, secado y manipulación del material; pues debido a la naturaleza del material es importante tomar en cuenta cómo estos factores afectan la muestra.

### 4.2.1 Recolección de lecho de secado

El lodo es extraído en diferentes edades de secado y en distintas épocas del año, tal como se indicó en la descripción de las visitas a la planta de tratamiento. En el Cuadro 24 se detalla la edad de las muestras extraídas de la planta.

**Cuadro 24.** Descripción de muestras extraídas del lecho de secado

Muestra	Fecha de tratamiento en PTAR <sup>1</sup>		Edad de secado (Días)
	Purga de digestor	Recolección de lecho	
L-01	15 de mayo, 2015	21 de mayo, 2015	6
L-02	27 de abril, 2015	4 de mayo, 2015	8
L-03	26 de mayo, 2015	8 de junio, 2015	12

<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

Las muestras son extraídas de los lechos de secado N.2 y N.3 pues son los que tienen las humedades más bajas cuando se realizan las visitas a la planta, de modo que favorece la manipulación del material. Son extraídos con pala y guardados en sacos, los cuales a su vez son guardados y sellados en bolsas plásticas. Posteriormente las bolsas son llevadas a los sitios en los cuales se realizan los ensayos de caracterización.

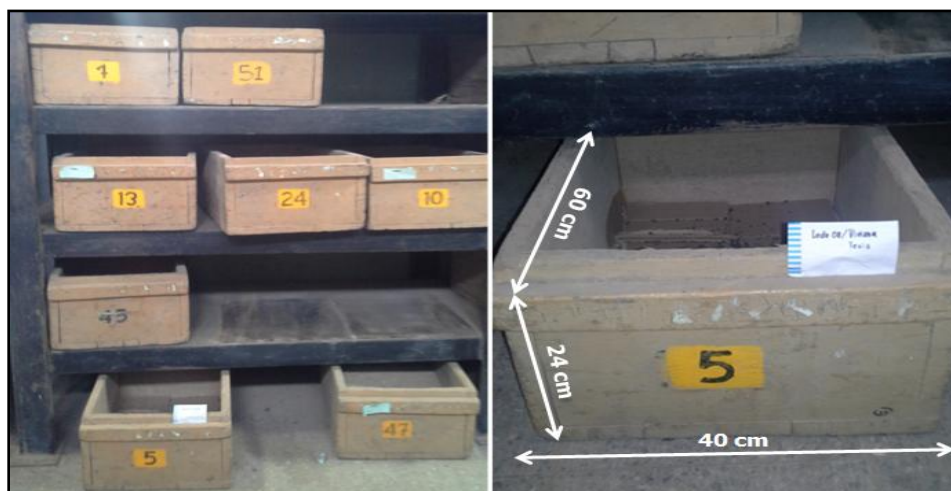
#### **4.2.2 Almacenamiento**

Los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, tienen un importante contenido orgánico y de humedad, por lo que es necesario controlar el ambiente de almacenamiento, de lo contrario el material puede presentar cambios respecto a su condición inicial.

En la mayoría de los casos, las pruebas de caracterización se realizan en los días posteriores a la recolección de los lodos; sin embargo, siempre es necesario almacenar el lodo pues no es posible utilizar todo el material de manera inmediata. En el caso de las muestras destinadas para determinar las condiciones ambientales del lodo en la planta de tratamiento, estas se almacenan en refrigeradoras para evitar la degradación de la materia orgánica presente; mientras que las muestras de lodo con las cuales se determina la calidad ambiental luego del secado en horno, se almacenan en un ambiente seco para proteger el material de la humedad. Para las pruebas geotécnicas, antes de iniciar los ensayos el material es almacenado en una cámara húmeda para evitar la alteración del lodo, como se muestra en la Figura 18; pero luego de secarlo en el horno, el lodo es almacenado en cajones de madera destinados para el depósito de suelos. En la Figura 19 y Figura 20 se muestran los sitios de almacenaje de las muestras de lodo, luego del secado.



**Figura 18.** Almacenamiento de lodos antes de secado al horno



**Figura 19.** Almacenamiento de lodos luego de secado al horno



**Figura 20.** Cajón de almacenamiento de lodos luego de secado al horno

### **4.2.3 Edad de secado**

Tal como se ha mencionado en secciones anteriores de este documento, en la caracterización del lodo es fundamental estudiar diferentes edades de secado; la edad del lodo está asociada principalmente con el porcentaje de humedad y con la calidad ambiental del material, pues el secado es un proceso que permite la reducción de agua y patógenos en los lodos residuales. Debido a esto, se extraen y analizan muestras que han permanecido diferentes tiempos en el lecho de secado, con una edad mínima de cuatro días y una edad máxima de doce días; no es recomendable una edad menor a cuatro días porque el lodo aún contiene altos porcentajes de agua y una edad superior a los quince días exige que se alteren los tiempos de funcionamiento de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas; esto se debe principalmente por dos razones expuestas a continuación.

En Costa Rica, aún no existe reglamentación que determine la calidad del lodo para ser extraído del lecho de secado y llevado a su sitio de disposición final, por lo tanto no se cuenta con un parámetro para determinar el tiempo de secado requerido; típicamente los lodos se recogen del lecho cuando tienen una apariencia "seca". Aunado a lo anterior, en las plantas de tratamiento es necesario el constante tratamiento de aguas residuales y por lo tanto la generación de lodos es un proceso continuo, de modo que no es posible mantener los lodos en el lecho de secado por tiempos muy extensos; muchas veces ni siquiera se puede mantener el tiempo necesario para llegar a un estado seco, sino que son extraídos cuando se debe realizar la próxima purga de lodo. En resumen, para mantener el lodo por más de quince o veinte días conlleva un retraso en la próxima purga, por lo que solamente se permite bajo situaciones particulares.

Debido a lo anterior y considerando la realidad del país respecto a este tema, para obtener edades de secado mayores al tiempo indicado, se deben tener instalaciones dispuestas para este fin o secar de modo artificial. Para la realización de esta investigación, se utilizan las edades de secado al aire indicadas en el Cuadro 24, pero también se utilizan muestras de secado al horno, con el objetivo de simular edades superiores a las que típicamente se tienen en la planta de tratamiento. Esto surge en respuesta a la necesidad de trabajar con lodos más secos, puesto que desde el punto de

vista geotécnico, no es posible caracterizar el material tal como es recolectado de la planta de tratamiento.

A continuación se resumen las razones por las cuales las edades de secado del lodo son dadas en el laboratorio, y no en el lecho de secado de la planta de tratamiento:

- En el lecho de secado se tienen edades máximas de quince a veinte días, las cuales aún no son trabajables desde el punto de vista geotécnico.
- Se presentan diferencias importantes en la humedad de lodos con una misma edad, pero dispuestos en distintos lechos de secado. La edad de secado al aire no es un parámetro confiable para estudiar la variación de las propiedades del lodo, pues también interfieren las condiciones climáticas, el estado y operación del lecho de secado.

A pesar de la información anterior, con la cual se justifica la necesidad de utilizar el secado artificial del material; se toma en cuenta que el secado al horno exige un gasto económico y energético, por lo tanto es importante estudiar el comportamiento del material cuando es secado al aire y solventar la limitación que se tiene respecto al secado al aire. Para este fin, se calcula el tiempo de secado en la planta de tratamiento, mediante la corrección de la pendiente de la recta (El procedimiento se muestra en Apéndice 3. Memoria de cálculo).

Por lo expuesto anteriormente, es importante tomar en consideración:

- Las muestras de lodo estudiadas presentan diferentes edades, las cuales son dadas de dos maneras distintas: secado al aire en planta de tratamiento y secado al horno en laboratorio.
- Para los efectos de esta investigación, la edad de secado se refiere al porcentaje de humedad y el tiempo (en horas) de secado al aire (sin condiciones controladas) o secado al horno a una temperatura constante (60°C); según se indique.

Se estudian trece edades de secado de lodo; sin embargo no todas las edades son caracterizadas desde el punto de vista ambiental y geotécnico, pues se realiza una selección para caracterizar las muestras. Esta selección se basa en la trabajabilidad del material y las posibilidades de utilizar según lo que exigen las normas de caracterización

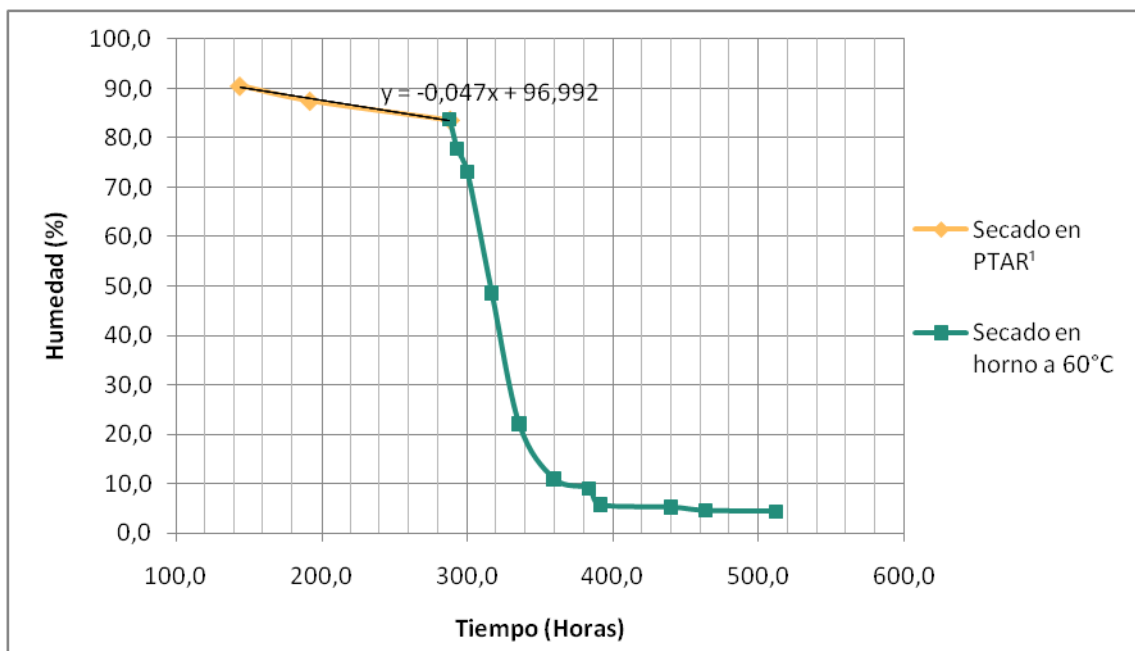
de suelos; sobre este tema de selección de muestras se detalla en la 4.2.6 Selección de muestras para ensayos. En el Cuadro 25 se detallan las edades de secado del lodo utilizado, el porcentaje de humedad y el tiempo de secado.

**Cuadro 25.** Relación de humedad y tiempo de secado de muestras de lodo

Muestra	Proceso de secado	Edad	
		Tiempo (Horas)	Humedad (%)
L-01	Al aire en PTAR <sup>1</sup>	144,0	90,5
L-02		192,0	87,5
L-03		288,0	83,6
L-04	Al horno en laboratorio a 60 °C	293,0	77,7
L-05		300,0	73,0
L-06		316,8	48,5
L-07		335,5	22,1
L-08		359,5	10,9
L-09		383,5	9,0
L-10		391,5	5,7
L-11		439,5	5,2
L-12		463,5	4,5
L-13		511,5	4,4

<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

A partir de los dos tipos de secado, es posible obtener las muestras indicadas en el Cuadro 25, las cuales conforman la totalidad de edades de secado estudiadas, con su respecto porcentaje de humedad y tiempo de secado. Con esta información es posible realizar un gráfico en donde se observe la variación de estos parámetros, tal como se muestra a continuación:



<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

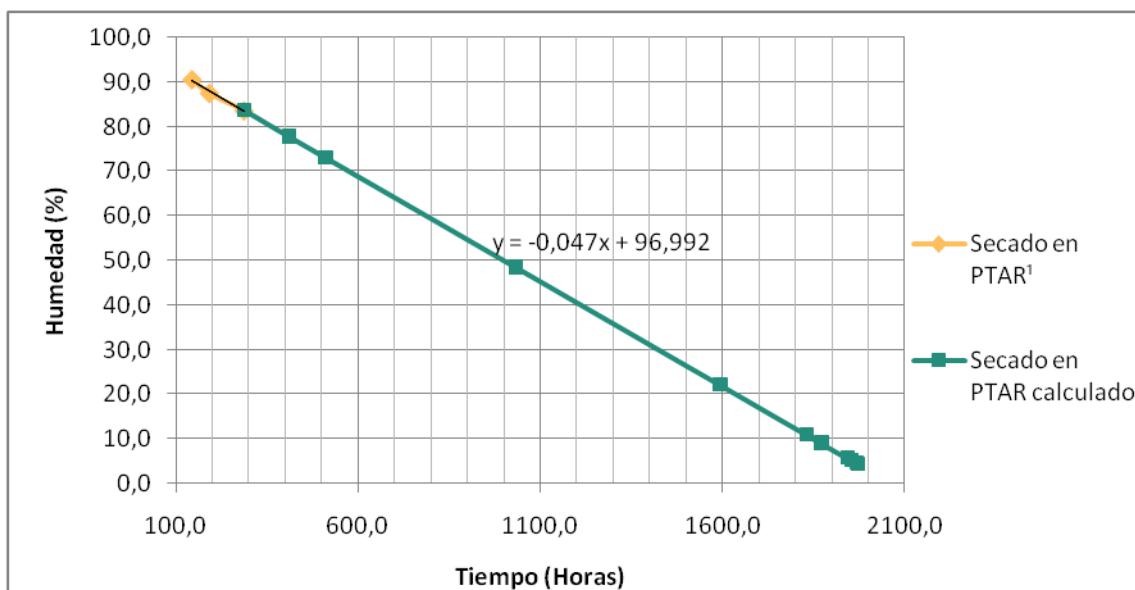
**Figura 21.** Relación de humedad y tiempo de secado de muestras de lodo

Tal como se indicó anteriormente, es posible predecir el comportamiento del lodo residual en la planta de tratamiento, en el cuadro siguiente se presentan los valores de tiempo calculados para obtener un porcentaje de humedad determinado.

**Cuadro 26.** Relación de humedad y tiempo de secado (teórico) de muestras de lodo

Muestra	Edad	
	Tiempo (Horas)	Humedad (%)
L-04'	409,5	77,7
L-05'	509,9	73,0
L-06'	1032,1	48,5
L-07'	1594,1	22,1
L-08'	1830,7	10,9
L-09'	1872,2	9,0
L-10'	1943,0	5,7
L-11'	1953,4	5,2
L-12'	1967,3	4,5
L-13'	1971,0	4,4





<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

**Figura 22.** Relación de humedad y tiempo de secado teórico de lodo

En el cuadro siguiente se presenta la diferencia del tiempo de secado al horno a 60°C y el tiempo de secado calculado en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas.

**Cuadro 27.** Comparación de tiempo de secado de muestras de lodo

Muestra	Humedad (%)	Tiempo de secado t (Días)		Δt (Días)
		En horno a 60°C	En PTAR <sup>1</sup>	
L-04	77,7	0,2	5,1	4,9
L-05	73,0	0,5	9,2	8,7
L-06	48,5	1,2	31,0	29,8
L-07	22,1	2,0	54,4	52,4
L-08	10,9	3,0	64,3	61,3
L-09	9,0	4,0	66,0	62,0
L-10	5,7	4,3	69,0	64,6
L-11	5,2	6,3	69,4	63,1
L-12	4,5	7,3	70,0	62,7
L-13	4,4	9,3	70,1	60,8

<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual, valores teóricos calculados según la Figura 22

#### 4.2.4 Proceso de secado

Anteriormente se indicó que en esta investigación se utilizan dos maneras de secado del lodo: secado al aire en planta de tratamiento y secado al horno en laboratorio. Ahora, es necesario detallar las condiciones en las cuales se realiza cada secado.

El secado al aire en la planta de tratamiento corresponde a la utilización de lechos de secado. El secado al horno en laboratorio permite obtener gran cantidad de material con humedades muy bajas; de manera que se puede estudiar el cambio de humedad en el lodo y también se puede caracterizar el material bajo estas condiciones. El lodo es secado durante un tiempo máximo de aproximadamente diez días, en los cuales se extraen muestras de lodo para realizar pruebas ambientales y geotécnicas. En la Figura 23 se observa el horno utilizado, así como las bandejas metálicas en las cuales el lodo es dispuesto para su secado.



**Figura 23.** Condiciones de secado al horno en laboratorio

#### 4.2.5 Características físicas

La edad de secado del lodo es determinante en las características del material, pues dependiendo de su humedad, se pueden observar condiciones diferentes del material. Con el estudio del material bajo distintas condiciones de humedad, es posible observar los cambios que se presentan conforme se reduce la cantidad de agua en el lodo, así como las mejoras que se tienen en cuanto a trabajabilidad y manipulación.

En el Cuadro 28 se indican las principales características físicas del lodo según su edad o contenido de humedad; estas características son su olor, color, consistencia y descripción de partículas. También, tomando en consideración la trabajabilidad se le asigna su clasificación (clase  $T_1$ ,  $T_2$  o  $T_3$ ); donde  $T_1$  representa la mejor calidad. En el Cuadro 28 se puede observar la variación que presentan las características físicas del lodo conforme se disminuye la humedad; sin embargo, en varias edades estos cambios son poco significativos, por lo que el lodo puede agruparse en cuatro clasificaciones, tomando en cuenta la similitud en sus características físicas y su trabajabilidad. Esta clasificación responde a lo observado durante la investigación realizada, y se consideran únicamente las características físicas y la facilidad de manipulación del material; es muy importante mencionar que esta clasificación no responde a contenidos de patógenos, como típicamente se realiza la clasificación de lodo.

Se puede observar que conforme se reduce el contenido de humedad del lodo, el material tiende a oscurecerse, tanto en el secado al horno como en el secado al aire; además es importante mencionar la reducción del olor al reducir la cantidad de agua presente en el material.

Respecto a la consistencia y a las partículas del material, también se presentan mejoras conforme se disminuye el contenido de humedad mediante el secado al horno; pues algunos de los contenidos orgánicos visibles se volatilizan por lo que se puede suponer una reducción en el grado de materia orgánica del material.

**Cuadro 28.** Descripción física de muestras de lodo

Tipo de secado	Edad	Humedad (%)	Característica física				Clase
			Color	Olor	Consistencia	Descripción de partículas	
Al aire en PTAR <sup>1</sup>	L-01	90,5	Café claro	Fuerte	Líquido	-	T <sub>3</sub>
	L-02	87,5					
	L-03	83,6					
Al horno a 60 °C <sup>2</sup>	L-04	77,7	Café oscuro	Leve	Sólido plástico	El material forma láminas y partículas de tamaño mediano, las cuales se mantienen unidas debido al alto contenido de humedad; no se presenta material fino. Se observa la presencia de desechos de tamaño pequeño (plástico, metal, tela, semillas, restos de alimentos)	T <sub>2</sub>
	L-05	73,0					
	L-06	48,5					
	L-07	22,1					
	L-08	10,9					
	L-09	9,0					
	L-10	5,7					
	L-11	5,2					
	L-12	4,5					
	L-13	4,4					
			Café muy oscuro a gris	Muy leve	Sólido quebradizo	Se reduce el tamaño de las partículas. Las láminas se separan en partículas de tamaño mediano y pequeño (6 cm - 1 cm), también se observan partículas sueltas pero no hay presencia de finos pues tiene apariencia arenosa. Se observa la presencia de desechos de tamaño pequeño (plástico, metal, semillas, restos de alimentos) disminuyen. El secado no es homogéneo, por lo que algunas partículas son quebradizas, mientras otras aún se encuentran unidas debido a la presencia de humedad.	T <sub>1</sub>

<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

<sup>2</sup>Durante un tiempo mínimo de 5 horas y un tiempo máximo de 224 horas (aproximadamente 10 días)

T<sub>1</sub>: Trabajabilidad Clase 1, material más trabajable

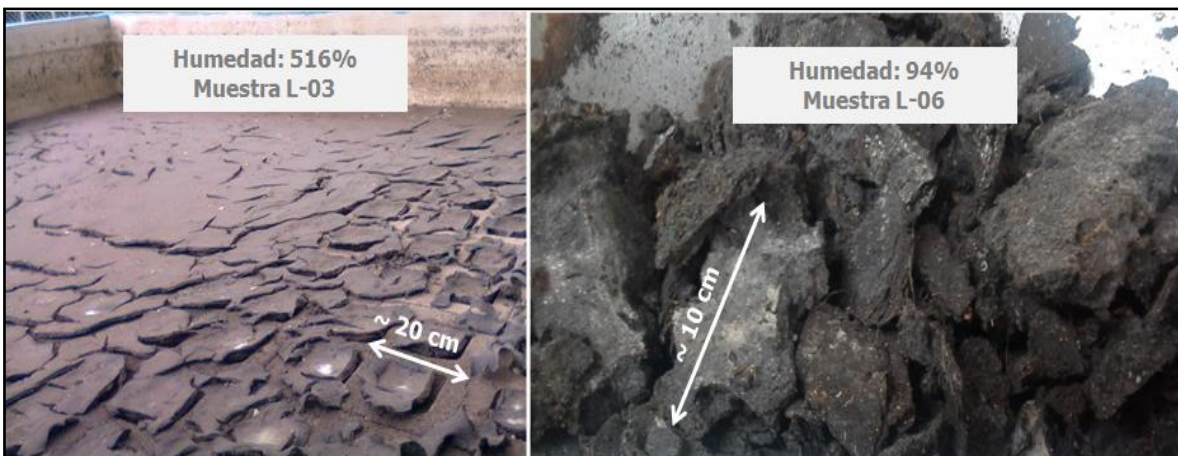
T<sub>2</sub>: Trabajabilidad Clase 2, material trabajable

T<sub>3</sub>: Trabajabilidad Clase 3, material menos trabajable

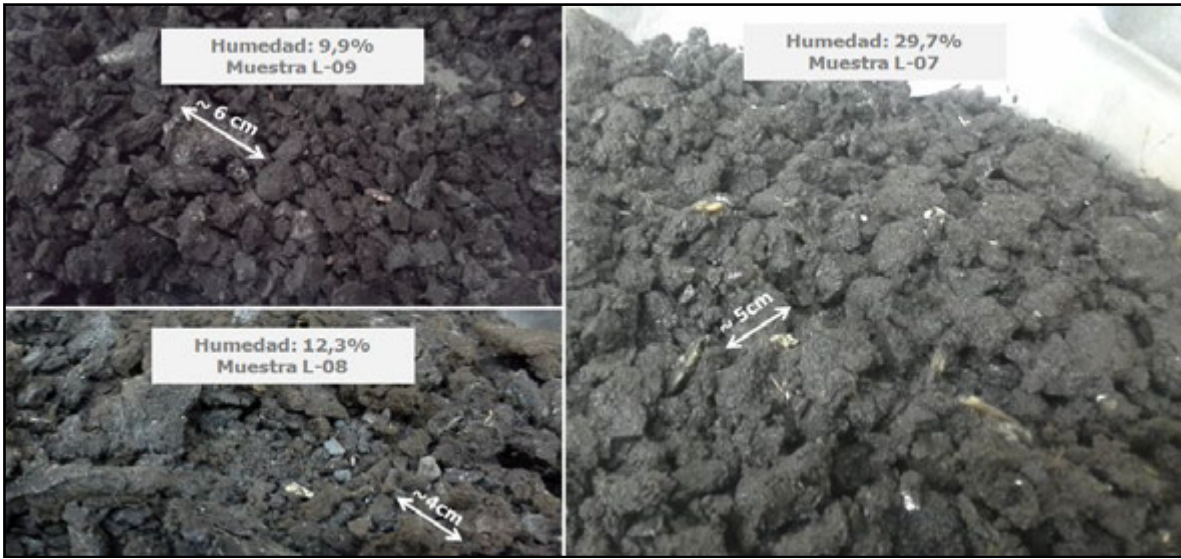
En las figuras siguientes se muestran fotografías que ejemplifican la información mostrada en el Cuadro 28. A continuación se observa lodo con condiciones de humedad que lo ubican como categoría T<sub>3</sub>:



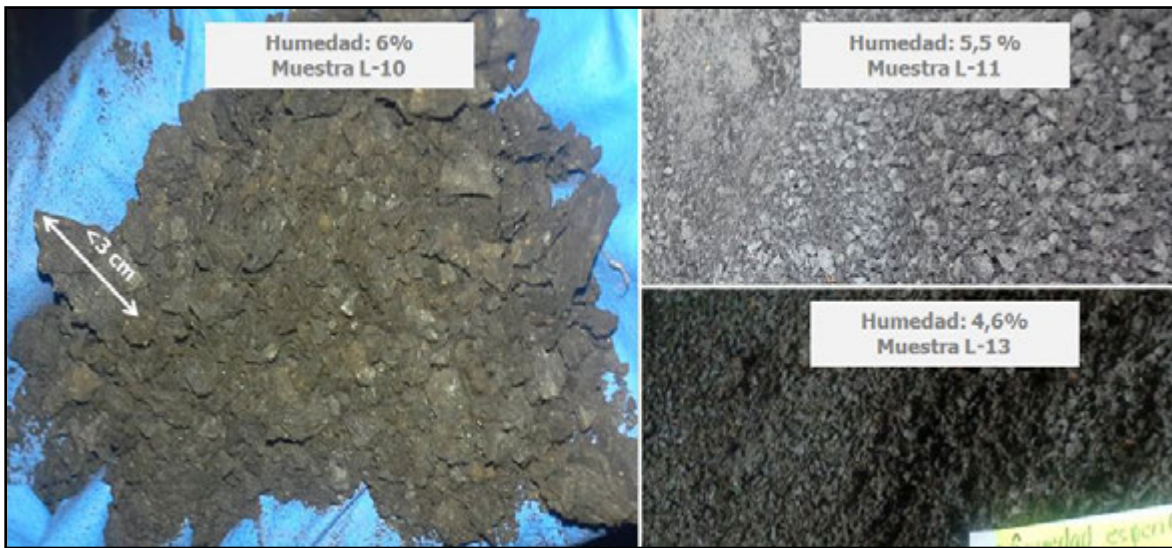
**Figura 24.** Lodo categoría T<sub>3</sub>: Trabajabilidad baja



**Figura 25.** Lodo categoría T<sub>3</sub>: Trabajabilidad baja



**Figura 26.** Lodo categoría  $T_2$ : Trabajabilidad media



**Figura 27.** Lodo categoría  $T_1$ : Trabajabilidad alta

Además, se indican los cambios que se observan bajo distintos procesos que típicamente se realizan en el laboratorio; y se clasifica según el riesgo de la realización del procedimiento, en el cuadro siguiente se presenta esta clasificación de los procesos.

**Cuadro 29.** Descripción de procesos de lodo residual

Proceso	Cambios observados			Clase
	Color	Olor	Partículas	
Deshidratación en lecho (Ver Figura 28)	Oscurece	Reduce	Se reduce el volumen y se puede fragmentar	R <sub>1</sub>
Almacenamiento <sup>1</sup>	No presenta cambios	No	No presenta cambios	
Tamizaje		presenta cambios	Las partículas se hinchan debido a la absorción del agua	
Saturación		Luego de secado a 60 °C	Las partículas más densas se sedimentan y las livianas flotan	
Secado al horno a 60 °C	Oscurece	Emite gases	Se reduce el tamaño y el volumen del material. Desaparece parte de desechos orgánicos visibles	R <sub>2</sub>
Secado al horno a más de 120 °C			Se reduce el tamaño y el volumen del material. Desaparece la totalidad de desechos orgánicos visibles	
Quiebra del material	No presenta cambios	No presenta cambios	Para humedades mayores a 6% el material se aplasta, para humedades inferiores el material se quiebra	
Recolección de lecho			El material se fragmenta en láminas y partículas grandes para ser extraído	
Aplicación de calor luego de secado al horno		Emite un fuerte olor	No presenta cambios	R <sub>3</sub>

<sup>1</sup>En condiciones de almacenamiento adecuadas (recipiente hermético)

R1: Riesgo Clase 1, procedimientos de menor riesgo

R2: Riesgo Clase 2, procedimientos de riesgo medio

R3: Riesgo Clase 3, procedimientos de mayor riesgo

En las figuras siguientes se muestran fotografías que ejemplifican la información mostrada en el cuadro anterior:



**Figura 28.** Deshidratación de lodo en lecho de secado



**Figura 29.** Saturación de lodo seco



#### **4.2.6 Selección de muestras para ensayos**

En la sección anterior de este documento, se explicó la relación entre la trabajabilidad y la edad de secado del material; lodos con cortos tiempos de secado son más difíciles de manipular que los lodos con un tiempo mayor de secado, además para humedades altas el material se comporta como un líquido y no como un suelo, por lo que no se puede caracterizar como un suelo. Tal como se ha mostrado en secciones anteriores, se cuenta con lodo en trece edades de secado; sin embargo no todas las muestras son caracterizadas desde el punto de vista ambiental y geotécnico. Por lo tanto, se realiza una selección de las muestras que son caracterizadas y utilizadas para la elaboración de un suelo artificial. Esta selección se realiza bajo dos ejes principales: la trabajabilidad del material y el cumplimiento de las normas de ensayos de suelos; a continuación se detallan estos criterios de selección de muestras.

- **Trabajabilidad:** Los ensayos de caracterización propuestos en esta investigación, en su mayoría requieren que el suelo se encuentre en estado seco; pues esto permite tener una mejor manipulación del material. En el caso de los lodos residuales, la trabajabilidad involucra su consistencia, olor y presencia visible de desechos.
- **Cumplimiento de normas:** Típicamente, los ensayos indican las condiciones en las cuales se debe encontrar el material para ser utilizado en la realización de ensayos; por lo tanto, en la selección de muestras se utilizan las muestras de lodo que cumplan de manera parcial o total con estas condiciones normadas.

Tomando en consideración la información anterior, se realiza la selección de muestras que son caracterizadas; esta selección se resume en el Cuadro 30. En este cuadro se indica si para determinada edad es posible realizar los ensayos cumpliendo las normas de manera total o si es necesaria alguna modificación a la norma para poder realizar el ensayo, además se indica si el ensayo fue realizado. En el Cuadro 30 se indican las pruebas que se pueden realizar según la clasificación del lodo en categorías  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ . Es importante notar que para la categoría  $T_3$  no es posible realizar ensayos geotécnicos pues la consistencia del lodo es líquido o líquida- sólida, de modo que no se puede caracterizar como un suelo. Por otro lado, el lodo catalogado como  $T_1$ , se puede utilizar en la realización de ensayos y se cumple con la totalidad de las normas.

**Cuadro 30.** Ensayos según edad de muestras de lodo

Muestra	Tipo de secado	Humedad (%)	Área de ensayo							Clase	
			Ambiental		Geotecnia						
			Contaminación y nutrientes	Parámetros de calidad	Gravedad específica	Granulometría	Plasticidad	Compactación	Resistencia cortante		
L-01	Al aire en PTAR <sup>1</sup>	90,5	•								T <sub>3</sub>
L-02		87,5	•								
L-03		83,6									
L-04	77,7										
L-05	73,0										
L-06	48,5										
L-07	Al horno a 60 °C	22,1	•	•	•					•	T <sub>2</sub>
L-08		10,9									
L-09		9,0									
L-10		5,7	•	•	•	•	•	•	•	•	T <sub>1</sub>
L-11		5,2									
L-12		4,5									
L-13		4,4	•	•	•	•	•	•	•	•	

**Código de color**

	La prueba no se puede realizar debido a las condiciones del material
	La prueba se puede realizar pero la norma se cumple de manera parcial
	La prueba se puede realizar y la norma se cumple de manera total
•	La prueba es realizada para la muestra
	La prueba no es realizada para la muestra

<sup>1</sup>Planta de tratamiento de agua residual

### **4.3 Caracterización ambiental**

Debido a su origen, el lodo residual es un material asociado a una baja calidad ambiental; tal como se ha detallado en secciones anteriores, el lodo es un desecho del tratamiento de aguas residuales, por lo tanto es inherente la preocupación de sus características ambientales.

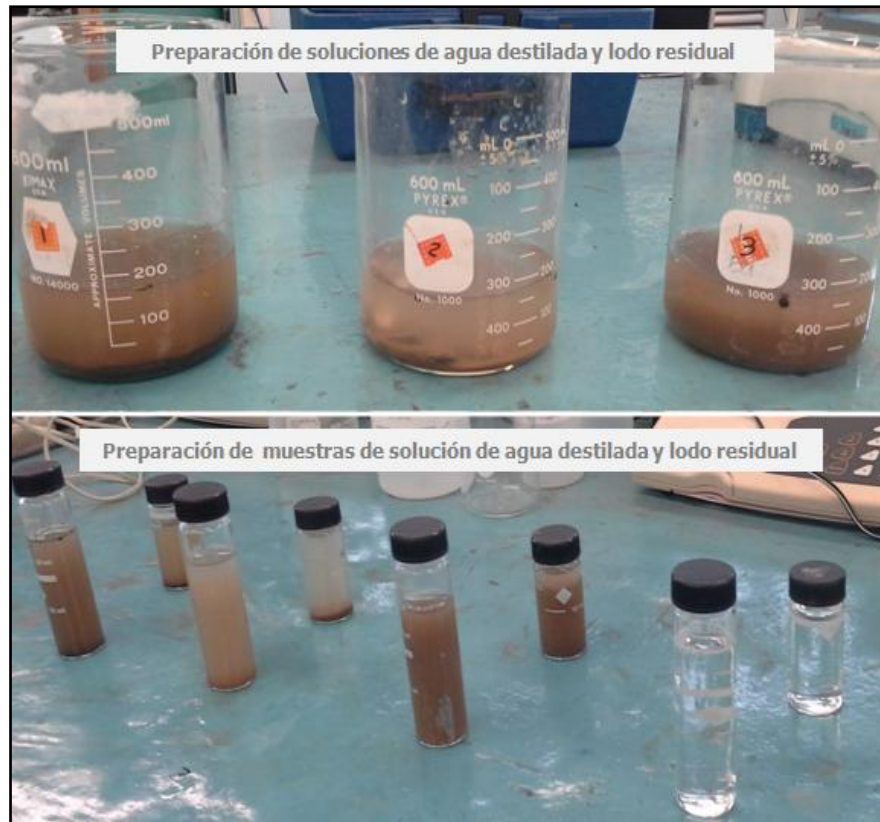
En el tratamiento de aguas residuales, se incluye el tratamiento del lodo; en este caso, el lodo es tratado mediante digestión aerobia y su posterior deshidratación, esto permite reducir las cargas contaminantes del material y así proporcionarle mayor estabilidad. Sin embargo, es fundamental verificar que estos procesos efectivamente cumplen con los objetivos, pues en esta investigación la finalidad es la utilización del lodo residual de manera segura para las personas y el medio ambiente. Debido a esto, es fundamental la determinación de la calidad ambiental del lodo residual.

En esta investigación, tal como se muestra en el Cuadro 23, como parte de la caracterización ambiental del lodo residual se encuentra la determinación de compuestos químicos, grado de contaminación y otros parámetros de calidad ambiental del material. Las pruebas son realizadas a cinco muestras de lodo residual, extraídos de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas; dos de ellos son analizados luego de ser extraídos del lecho de secado, por lo que conservan las características que típicamente tienen los lodos en este sitio (L-01 y L-02); mientras que los tres restantes son muestras de lodo secadas al horno a 60°C (L-07, L-10 y L-13).

Para la realización de las pruebas se utilizan procedimientos de laboratorio que permiten caracterizar agua y lodo residual, por lo que los altos contenidos de humedad del material no representan ningún inconveniente. En las secciones siguientes se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

#### **4.3.1 Contenidos de nitrógeno y fósforo**

En esta investigación se considera el fósforo, nitrógeno, nitrito y nitrato. En las figuras siguientes se observan las muestras utilizadas.



**Figura 30.** Preparación de soluciones de lodo residual



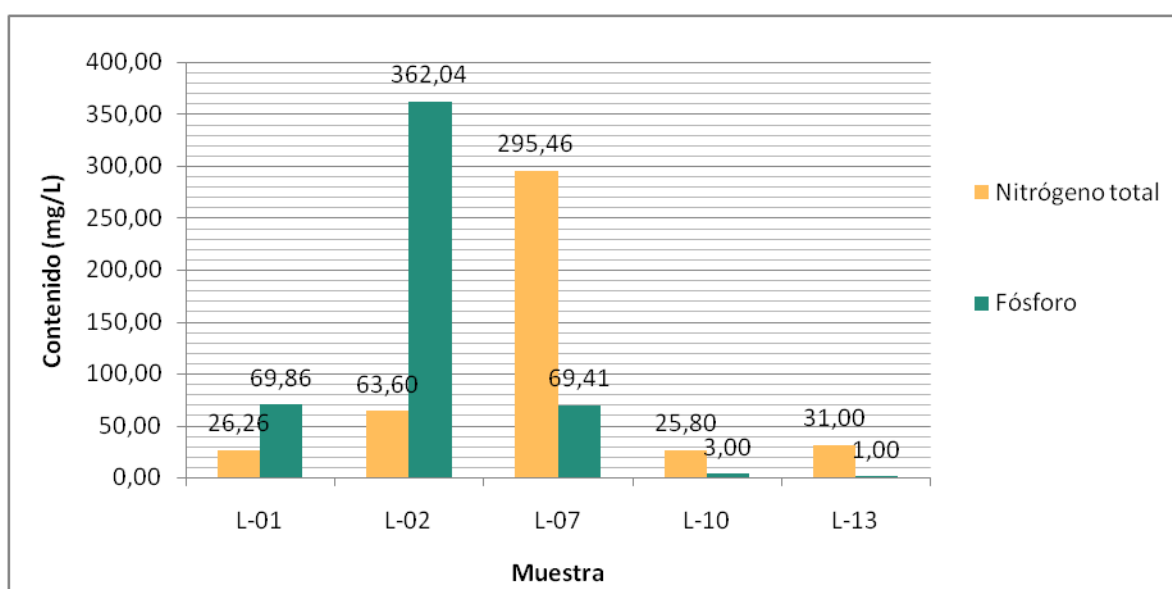
**Figura 31.** Pruebas de contenido de nitrógeno y fósforo

A partir de la realización de las pruebas, se obtienen los siguientes resultados.

**Cuadro 31.** Contenido de nitrógeno y fósforo de muestras de lodo

Ensayo	Contenido por muestra (mg/L)				
	L-01	L-02	L-07	L-10	L-13
Nitrato	15,52	NR	200,36	14,00	12,00
Nitrito	9,96	0,00	0,29	0,00	10,00
Nitrógeno amoniacal	0,78	63,60	94,81	11,80	9,00
Fósforo	69,86	362,04	69,41	3,00	1,00

En la figura siguiente se observa la variación de nitrógeno y fósforo, conforme se aumenta la edad de secado de las muestras analizadas.



**Figura 32.** Variación de contenido de nitrógeno y fósforo de muestras de lodo

#### 4.3.2 Carga orgánica

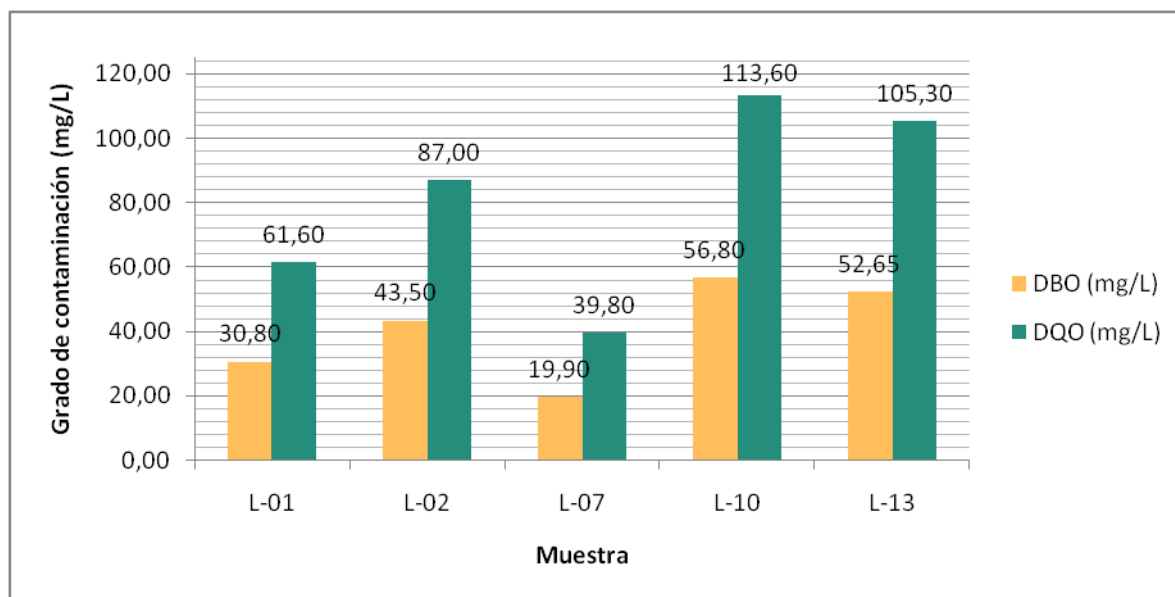
La carga orgánica del lodo residual es medida mediante la demanda biológica de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno; pues estos parámetros indican la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica. A mayor materia orgánica, se requiere mayor oxígeno.

Para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno se utiliza la misma solución descrita anteriormente; sin embargo, la demanda biológica de oxígeno es estimada a partir de la demanda bioquímica de oxígeno, pues entre ambos parámetros existen relaciones típicas para las aguas residuales. Sin embargo, es importante realizar pruebas que permitan asegurar esto, pues esta relación ha sido establecida para el agua residual y no para el lodo. En el cuadro siguiente se presentan los datos obtenidos.

**Cuadro 32.** Carga orgánica de muestras de lodo

Ensayo	Contenido por muestra (mg/L)				
	L-01	L-02	L-07	L-10	L-13
DBO	30,80	43,50	19,90	56,80	52,65
DQO	61,60	87,00	39,80	113,60	105,30

En la figura siguiente se observa la variación de la demanda biológica y bioquímica de oxígeno, conforme se aumenta la edad de secado de las muestras analizadas.



**Figura 33.** Variación de carga orgánica de muestras de lodo

### 4.3.3 Contenido orgánico y contenido de humedad

El contenido orgánico y el contenido de humedad son parámetros importantes en la caracterización del lodo residual, pues ambos están asociados con la calidad ambiental del material; lodo con altos contenidos orgánicos y de humedad, usualmente están relacionados con un mayor grado de contaminación que un lodo con bajos porcentajes de ambos parámetros. Para realizar ambas pruebas, se prepara una muestra de lodo que es introducida en el horno para evaporar el agua (a 120°C) o volatilizar la materia orgánica (a 550°C), según corresponda; posteriormente se determina la diferencia de pesos inicial y final, pues esta diferencia corresponde a los porcentajes de interés. En la figura siguiente se ilustra la realización de las pruebas y en el Cuadro 33 se presentan los resultados obtenidos.

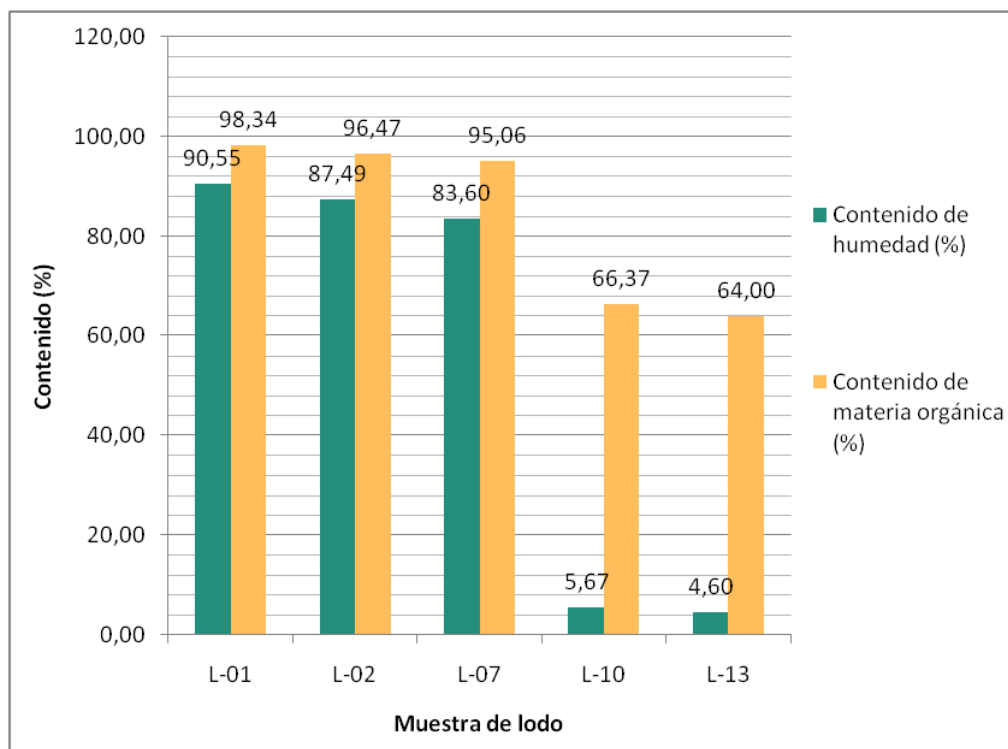


**Figura 34.** Determinación de contenido de humedad y contenido orgánico

En la figura siguiente se observa la variación del porcentaje de humedad y contenido de materia orgánica, conforme se aumenta la edad de secado de las muestras analizadas.

**Cuadro 33.** Contenido de humedad y contenido orgánico de muestras de lodo

Ensayo	Muestra				
	L-01	L-02	L-07	L-10	L-13
Contenido de humedad (%)	90,55	87,49	22,1	5,67	4,60
Contenido de materia orgánica (%)	98,34	96,47	95,06	66,37	64,00



**Figura 35.** Variación de contenido de humedad y materia orgánica

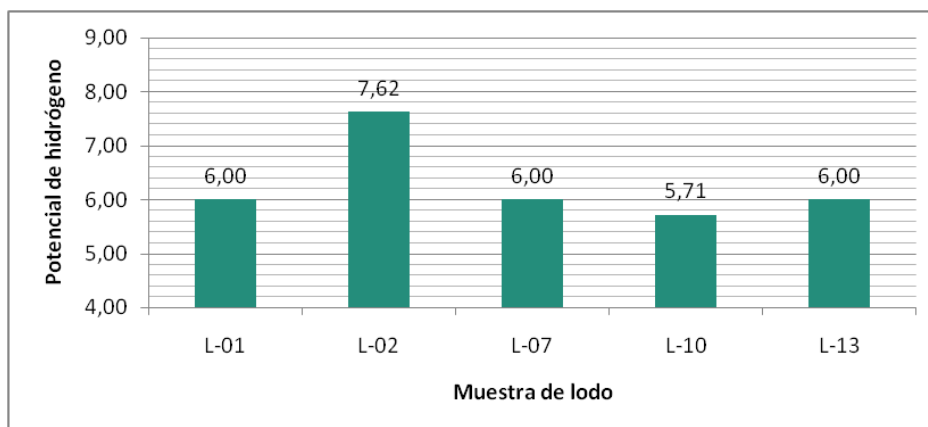
#### 4.3.4 Potencial de hidrógeno

Para determinar el potencial de hidrógeno se utiliza un medidor digital, el cual indica el valor buscado. En el cuadro siguiente se presentan los resultados obtenidos.

**Cuadro 34.** Potencial de hidrógeno de muestras de lodo

Muestra				
L-01	L-02	L-07	L-10	L-13
6,00	7,62	6,00	5,71	5,60





**Figura 36.** Variación de potencial de hidrógeno de muestras de lodo

#### 4.4 Caracterización geotécnica

El lodo residual es un material que se caracteriza por la relación entre su contenido de humedad y su trabajabilidad; tal como se ha observado en secciones anteriores, lodos con edades jóvenes están asociados con altos contenidos de humedad, lo cual dificulta realizar ensayos en los cuales se requiere un material seco y suelto.

Debido a lo anterior, los ensayos geotécnicos se realizan únicamente para las muestras de lodo que presentan condiciones adecuadas, tal como se ha mencionado anteriormente. En respuesta a este proceso de selección, la caracterización geotécnica se realiza para las muestras L-07, L-10 y L-13. Entre los lineamientos de la norma ASTM, se indica que el suelo destinado para realizar las pruebas debe encontrarse en estado seco y en algunos casos tamizado por determinada malla; sin embargo en esta investigación el comportamiento del suelo para distintos contenidos de humedad es un objetivo fundamental, por lo que el ensayo es realizado con la humedad que contiene el lodo.

La muestra de lodo L-07 contiene el mayor porcentaje de humedad con el cual es posible realizar la caracterización, esta humedad corresponde a un 22,1%; para humedades mayores el material presenta una consistencia sólida plástica y grumos, lo cual dificulta la realización de los ensayos; esta información se puede corroborar en la sección 4.2.5 Características físicas, en donde se presentan las condiciones físicas asociadas a un porcentaje de humedad. Es importante mencionar que para la muestra L-07 el material es utilizado con la humedad de 22,1% y sin tamizar.

La muestra de lodo L-10 contiene un porcentaje de humedad de 5,7%, este contenido de humedad está asociado con partículas más sueltas y de menor tamaño, por lo que es posible tamizarlo y así cumplir con todos los lineamientos de las normas utilizadas. De igual manera, la muestra de lodo L-13 tiene un porcentaje de humedad de 4,4% por lo que también presenta las condiciones para cumplir con la norma utilizada. A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos geotécnicos.

#### 4.4.1 Gravedad específica (ASTM D-854)

La prueba de gravedad específica es realizada tomando en cuenta la norma ASTM D-854 y las modificaciones especificadas anteriormente. Este procedimiento requiere la saturación del material durante 24 horas en un picnómetro, para luego ser calentado y agitado de modo tal que las burbujas sean extraídas; esto se observa en la Figura 37.



**Figura 37.** Determinación de gravedad específica de muestras de lodo

En el cuadro siguiente se muestran los resultados obtenidos para las muestras utilizadas.

**Cuadro 35.** Valores de gravedad específica para muestras de lodo

<b>Muestra</b>	<b>Gravedad específica (Gs)</b>
L-07	2,39
L-10	1,80
L-13	1,90

#### **4.4.2 Granulometría (ASTM D-422)**

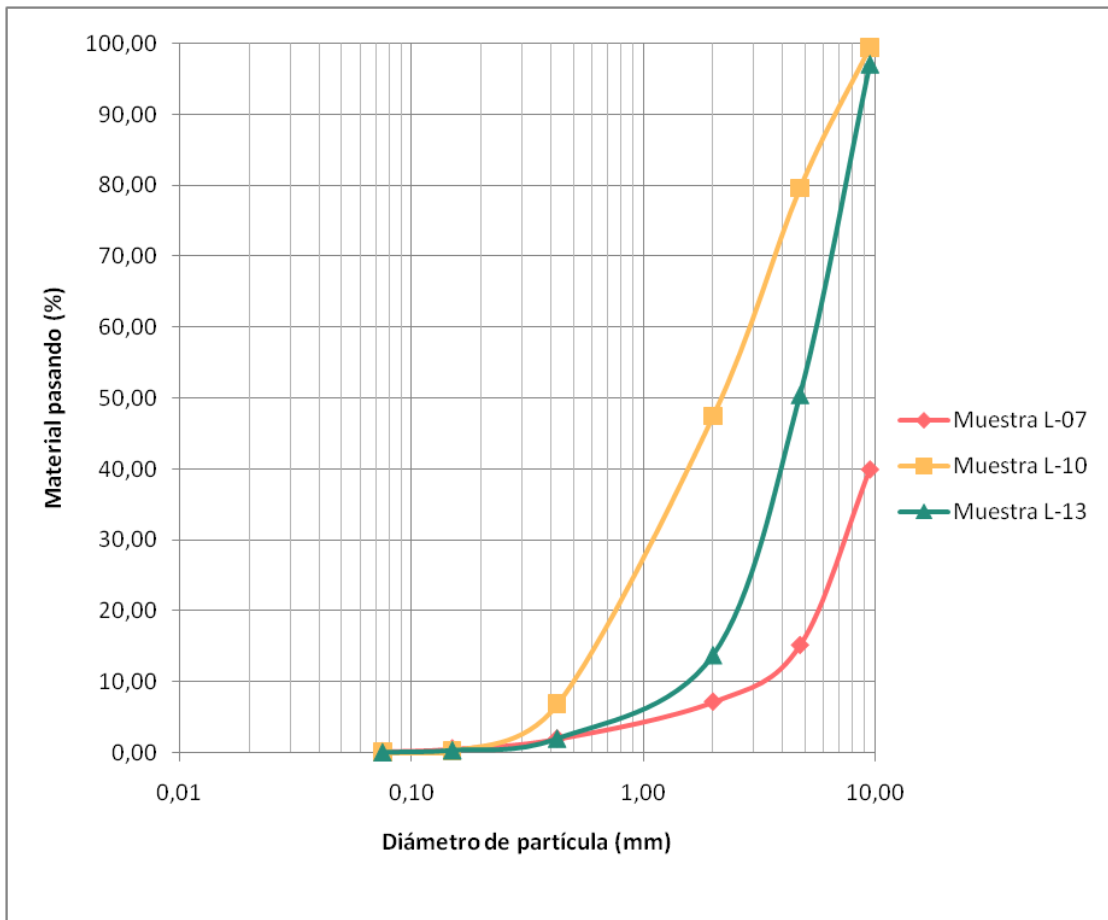
El ensayo de granulometría es realizado para las muestras de lodo L-07, L-10 y L-13; en este ensayo únicamente se incumple con el porcentaje de humedad de la muestra de lodo L-07, pues no se encuentra en estado seco. Al realizar el ensayo de granulometría, se obtiene los resultados mostrados en el cuadro siguiente.

Es importante indicar que no se utiliza el hidrómetro, debido a que luego de determinar la granulometría gruesa, no hay material retenido en la malla más fina; de manera que esta prueba no se realiza.

**Cuadro 36.** Granulometría de muestras de lodo

<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Porcentaje pasando (%)</b>		
	<b>L-07</b>	<b>L-10</b>	<b>L-13</b>
9,52	39,96	99,42	97,02
4,75	15,18	79,54	50,39
2,00	7,19	47,40	13,70
0,43	2,00	6,80	1,93
0,15	0,60	0,25	0,29
0,08	0,20	0,00	0,00

Con la información anterior es posible construir la curva granulometría de las muestras de lodo; esto se muestra en la siguiente figura.



**Figura 38.** Curvas granulométricas de muestras de lodo

Es importante mencionar que se realiza únicamente el ensayo de granulometría gruesa, pues el material presenta bajos o nulos porcentajes de partículas finas; incluso para las condiciones más secas, en las cuales el material es quebradizo y suelto. Para realizar el ensayo de granulometría no se lava el material, pues de lo contrario se altera su contenido de humedad.

#### **4.4.3 Límites de consistencia (ASTM D-4318)**

El ensayo es realizado únicamente para las muestras L-10 y L-13, pues para el resto de muestras de lodo no se presentan las condiciones adecuadas; pues el alto contenido de humedad y la ausencia de material fino es un inconveniente en la realización de la prueba.

En el cuadro siguiente se presentan los resultados obtenidos para las muestras de lodo estudiadas; tal como se observa, se tienen una condición no plástica en el material.

**Cuadro 37.** Resultados de límite líquido de muestras

Muestra	Número de golpes por determinación			Condición
	1	2	3	
L-10	13	15	12	No plástico
	12	11	14	
L-13	12	14	15	No plástico
	13	14	12	

#### 4.4.4 Clasificación (ASTM D-2487)

La clasificación de un suelo puede realizarse tomando en cuenta criterios de varios sistemas; en esta investigación se considera el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Estos sistemas toman en consideración principalmente la distribución de tamaño de partículas y la plasticidad del suelo, en el caso del lodo residual, el criterio de clasificación es la distribución de tamaño de partícula, pues tal como se mostró en secciones anteriores, el material es no plástico. En el Cuadro 38 se presentan los resultados de clasificación.

**Cuadro 38.** Clasificación de muestras de lodo

Sistema de clasificación	Aspectos que considera el sistema	Muestra		
		L-07	L-10	L-13
SUCS	Distribución de tamaño de partículas, coeficiente de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc)	Turba (Pt)	Arena bien gradada (SW)	Arena mal gradada (SP)
AASHTO	Distribución de tamaño de partículas y plasticidad	A-8	A-1-b o A-3	A-1-b o A-3

## **CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DE SUELO ARTIFICIAL**

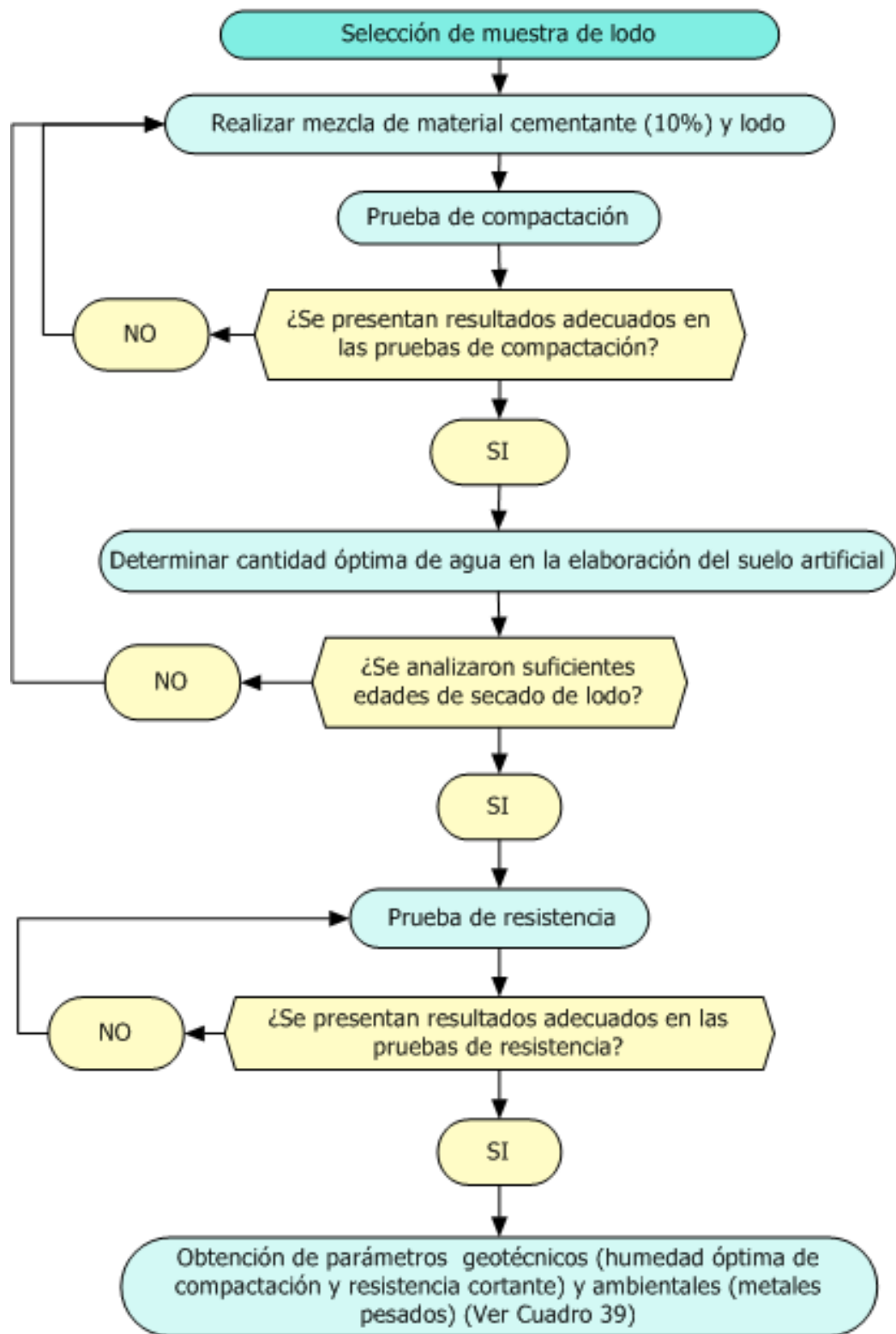
---

### **5.1 Metodología de caracterización**

Tal como se ha mencionado anteriormente, varias de las características del suelo artificial son dependientes del lodo residual; por lo tanto muchas de sus características pueden predecirse, por ejemplo la distribución de partículas. Por otro lado, la elaboración del suelo artificial, consiste en la adición de material cementante al lodo residual; corresponde a un proceso de higienización del lodo (Ver Figura 2), un proceso conocido en el tratamiento de lodo residual. Por las razones expuestas, se realiza un cribado en el diseño del experimento, pues varios de los comportamientos del suelo artificial son predecibles (dependientes del lodo residual) o conocidos (mejora de calidad ambiental con la adición de material cementante). Debido a esto, en la caracterización del suelo artificial no se realizan los ensayos ambientales descritos para el lodo residual, pues es conocido que la calidad ambiental será mayor a la del lodo con el cual el suelo es elaborado. Únicamente se realizan pruebas de metales pesados, pues estos contenidos no son determinados para el lodo residual.

Respecto a los ensayos geotécnicos, el objetivo principal de caracterizar el suelo artificial es conocer y comparar el comportamiento mecánico del suelo según la edad o estado de humedad del lodo empleado en su elaboración; para lo cual se realizan ensayos de compactación y de resistencia, además se considera la facilidad de elaboración y manipulación del suelo artificial en función de su humedad. A partir de esto es posible determinar la edad del lodo con la cual se obtienen mayores densidades, mayor resistencia y mejores condiciones de su manipulación.

En la Figura 39 se presenta el esquema de elaboración y caracterización del suelo artificial. Este proceso inicia con la mezcla del lodo residual y el material cementante, sin la adición de agua para realizar la mezcla, pues la cantidad de agua es determinada mediante los ensayos de compactación; estos ensayos son realizados con los lodos en las edades previamente seleccionadas. Al finalizar las pruebas de compactación es importante verificar que los resultados sean adecuados, pues a partir de estos resultados será posible la fabricación de muestras de suelo artificial y pastillas para los ensayos de resistencia.



**Figura 39.** Esquema de elaboración y caracterización de suelo artificial

En el cuadro siguiente se presentan las pruebas que son realizadas al suelo artificial.

**Cuadro 39.** Ensayos de caracterización para suelo artificial

Área	Parámetro	Metodología de prueba
Ambiental	Metales pesados	Procedimiento
Geotecnia	Compactación	Norma ASTM D-698
	Resistencia cortante	Norma ASTM D-3080

## 5.2 Descripción de la muestra

En esta sección se indican las características del suelo artificial elaborado a partir del lodo residual; las características del suelo son dependientes del lodo, por lo tanto es importante referirse a las características del material de desecho, estas se encuentran en 4.2 Descripción de muestra.

### 5.2.1 Selección de muestras para ensayos

A partir del estudio del lodo en diferentes edades de secado, es posible seleccionar el material que presenta mejores condiciones para ser utilizado en la elaboración del suelo artificial; estas muestras corresponden a las utilizadas en los ensayos de compactación y de resistencia, y se indican en el cuadro siguiente:

**Cuadro 40.** Características de muestras utilizadas en elaboración de suelo artificial

Muestra	Humedad (%)	Tiempo de secado (Horas)	
		Lecho de secado	Horno a 60 °C
S-07	22,1	288,0	47,5
S-10	5,7	288,0	103,5
S-13	4,4	288,0	223,5

Tal como se indicó anteriormente, las edades a utilizar son seleccionadas según su trabajabilidad y el cumplimiento de las normas empleadas en la investigación.



### 5.2.2 Elaboración y composición de suelo artificial

Tal como se ha indicado anteriormente, el suelo artificial está compuesto por lodo residual, cemento y agua. En el Cuadro 41 se especifican las proporciones de los componentes del suelo artificial, así como una breve descripción de cada uno.

**Cuadro 41.** Componentes del suelo artificial

Componente	Contenido (%)	Descripción
Lodo residual	90%	Lodo residual proveniente de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas. En la sección 4.2 Descripción de muestra se detalla sobre este material
Material cementante	10%	Portland Tipo I
Agua	Humedad óptima de compactación	Agua potable a temperatura ambiente

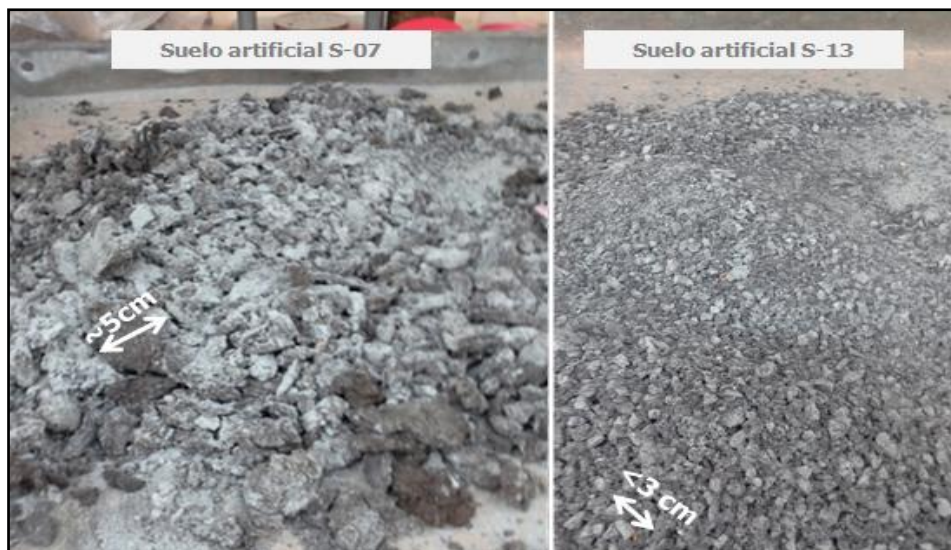
Las proporciones de lodo residual y material cementantes (90% y 10%) indicadas en el Cuadro 41 toman en consideración los estudios realizados por Rivera (2012). Anteriormente se explicó que en su investigación se determinó la resistencia cortante de suelo artificial elaborado con diferentes porcentajes de cemento Portland tipo I (10%,20%,30%), en donde la mayor resistencia se obtuvo con un 30% de cemento. A pesar que en el trabajo de Rivera se obtiene una mayor resistencia con un 30% de cemento, esto es considerado excesivo y perjudicial para las aplicaciones del suelo desde el punto de vista económico; por lo que se utiliza un porcentaje menor.

### 5.2.3 Características físicas

En términos generales, el suelo artificial tiene características muy similares a la del lodo con el cual es elaborado; el lodo conserva características tales como tamaño de partículas y consistencia al ser mezclado con agua y cemento. Al adicionar material cementante se presentan cambios que se pueden prever: el lodo se torna grisáceo debido al color del cemento y se generan partículas más finas al homogenizar y remover el material. Sin embargo, es importante mencionar la emisión de fuertes olores al adicionar agua a la mezcla, el olor no es desagradable, pero sí irritante, es decir, se dificulta la respiración en el sitio y se percibe ardor en los ojos. En el Cuadro 42 se presenta la descripción física del suelo artificial y en la Figura 40 se muestra el suelo artificial elaborado.

**Cuadro 42.** Descripción física de muestras de suelo artificial

Muestra	Lodo utilizado	Color	Olor	Consistencia	Clasificación
S-07	L-07	Gris	La mezcla de material cementante y lodo tiene olor de leve a muy leve; sin embargo al adicionar agua el olor es muy fuerte	Sólido frágil	T <sub>1</sub> y T <sub>2</sub>
S-10	L-10	Gris oscuro			
S-13	L-13				



**Figura 40.** Características físicas de suelo artificial

Por otro lado, en el cuadro siguiente se puede observar la descripción de los procesos que se realizaron durante la investigación. Esto permite prever los cambios en el material para un proceso específico.

**Cuadro 43.** Descripción de procesos de suelo artificial

Proceso		Cambios observados				Clase
		Color	Olor	Partículas		
Elaboración de suelo artificial	Adición de material cementante	Se torna grisáceo		Se agregan partículas finas, las cuales deben mezclarse adecuadamente con el resto del material		
	Fabricación de pastillas		No presenta cambios	No presenta cambios		R <sub>1</sub>
Secado al horno a 60 °C - 120 °C		No presenta cambios				
Compactación				Las partículas se compactan		R <sub>2</sub>
Elaboración de suelo artificial	Adición de agua a la mezcla		Emite un fuerte olor	Las partículas se expanden levemente debido a la absorción del agua		R <sub>3</sub>

R1: Riesgo Clase 1, procedimientos de menor riesgo

R2: Riesgo Clase 2, procedimientos de riesgo medio

R3: Riesgo Clase 3, procedimientos de mayor riesgo

### 5.3 Caracterización ambiental

La adición de material cementante a los lodos provenientes del tratamiento de aguas es una herramienta aplicable para el tratamiento de desechos con contenidos orgánicos; la presencia de cemento permite la solidificación del material y la estabilización de los residuos. La solidificación proporciona una mayor resistencia, menor compresibilidad y menor permeabilidad del material; mientras que la estabilización permite un manejo más adecuado pues se disminuye la liberación de contaminantes y la toxicidad de estos, esto es fundamental cuando se trata de lodos con desechos peligrosos; además controlan que la materia orgánica no entre en putrefacción. Debido a esto, la calidad ambiental del suelo artificial coincide con la calidad ambiental del lodo residual; estos resultados se observan en 4.3 Caracterización ambiental.

Sin embargo, debido a los usos proyectados para el suelo artificial, es importante determinar el contenido de metales pesados del suelo; estos valores se muestran en el cuadro siguiente:

**Cuadro 44.** Metales pesados de muestra de suelo artificial S-10

<b>Metal</b>	<b>Contenido</b>
Cadmio	N.D.
Cromo	16
Cobalto	4
Níquel	19
Plomo	N.D.

N.D.: No detectado

Observación: El límite de detección del Cd es de 1 mg/kg

### 5.4 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica del suelo artificial es realizada para las muestras descritas anteriormente, en el Cuadro 42. Al igual que en el caso del lodo residual, los procedimientos son realizados tomando en consideración los lineamientos de la norma ASTM, pero realizando modificaciones para conservar las características del lodo residual. A continuación se presentan los resultados de los ensayos de compactación y resistencia cortante.

#### 5.4.1 Proctor Estandar (ASTM D-698)

El ensayo de Compactación ASTM D-698 es realizado para el suelo artificial, elaborado con las muestras de suelo artificial S-07, S-10 y S-13, fabricado con lodo L-07, L-10 y L-13, respectivamente. En el caso de las muestras S-10 y S-13 se cumple de manera total con la norma establecida, mientras que para la muestra S-07 esto no es posible; pues el material no es tamizado, tal como se comentó en secciones anteriores.

Durante el ensayo, es necesaria la realización de múltiples puntos para la rama seca y la rama húmeda; pues debido al contenido de agua inicial del lodo y a la adición del material cementante, no es posible realizar estimaciones de las densidades en el laboratorio, sino que se debe determinar hasta obtener el contenido de humedad mediante la diferencia de pesos del material húmedo y seco; por lo tanto, para algunas muestras se realizan más de cinco puntos, cantidad típica en este ensayo. Además, en la rama seca el material es más difícil de compactar que en la rama húmeda, pues el material absorbe gran cantidad de agua y para las humedades asociadas a la rama seca, el lodo se presenta en una condición con apariencia muy seca. En la figura siguiente se muestra la preparación de la mezcla y la realización de tres determinaciones de la muestra S-13.



**Figura 41.** Compactación de muestra S-13

En el Cuadro 45 se indican las humedades y densidades secas de las muestras de lodo estudiadas.

**Cuadro 45.** Resultados de compactación de muestras de suelo

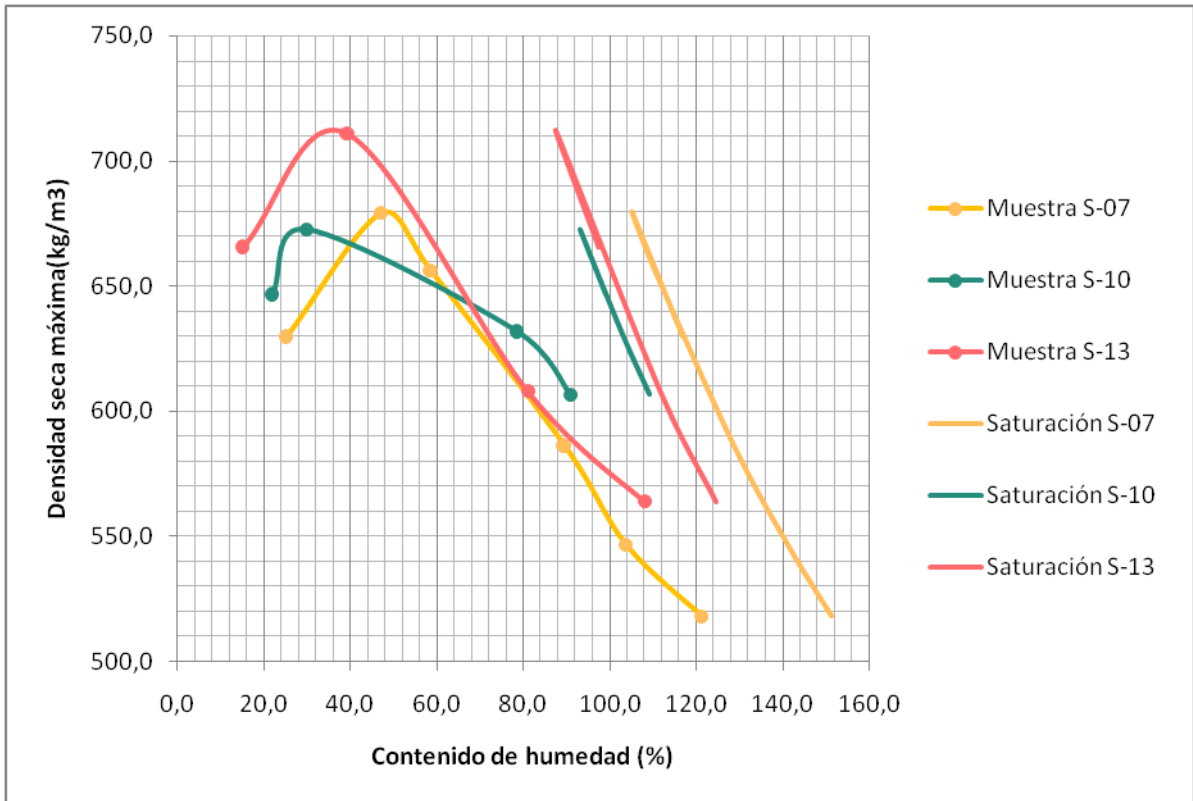
<b>Muestra</b>	<b>Condición</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>
S-07	Rama seca	25,3	629,8
		47,2	679,3
	Rama húmeda	58,6	656,2
		89,5	586,4
		103,7	546,6
		121,3	518,0
		142,7	460,9
S-10	Rama seca	22,0	646,7
		30,0	672,4
	Rama húmeda	78,6	631,8
		90,9	606,6
		115,4	529,3
S-13	Rama seca	15,2	665,4
		39,3	710,6
	Rama húmeda	81,1	607,8
		108,0	563,9
		133,3	486,0

Con la información anterior, es posible elaborar la Curva de Saturación para las muestras estudiadas; para la realización de la curva de compactación, también es importante conocer la línea de saturación; por lo tanto se determinan los siguientes porcentajes de humedad para una condición de saturación completa:

**Cuadro 46.** Porcentajes de humedad para condición de saturación completa de muestras de suelo artificial S-07, S-10 y S-13

<b>Muestra</b>	<b>Humedad para saturación completa (%)</b>	<b>Densidad seca (kg/cm<sup>3</sup>)</b>
S-07	116,9	629,8
	105,4	679,3
	110,5	656,2
	128,7	586,4
	141,1	546,6
	151,2	518,0
	175,1	460,9
S-10	99,1	646,7
	93,2	672,4
	102,7	631,8
	109,3	606,6
	133,4	529,3
S-13	97,5	665,4
	88,0	710,6
	111,8	607,8
	124,6	563,9
	153,0	486,0

Con la información anterior es posible realizar la curva de compactación de humedad para las muestras de suelo artificial en estudio; tal como se muestra a continuación:



**Figura 42.** Curvas de compactación y saturación total de muestras de suelo artificial

Finalmente, en el Cuadro 47 se muestra la humedad y densidad óptima de compactación de las muestras de lodo S-07, S-10 y S-13:

**Cuadro 47.** Humedad óptima de compactación de muestras de suelo artificial

Muestra	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima(kg/m <sup>3</sup> )
S-07	47,80	680,78
S-10	46,74	725,98
S-13	39,34	710,83

Es importante mencionar que la humedad óptima indica la cantidad de agua que se debe adicionar a la mezcla seca de lodo residual y material cementante. Los cálculos realizados para la determinación de la curva de compactación y saturación se encuentran en Apéndice 3. Memoria de cálculo.



#### 5.4.2 Corte Directo (ASTM D-3080)

La prueba de corte directo corresponde a un ensayo que permite determinar los parámetros de resistencia cortante de un suelo, en este caso, de las muestras de suelo artificial. Para la realización de este ensayo se utiliza el equipo de corte directo, el cual permite la falla de muestras de suelo bajo distintas condiciones y la digitalización de los datos.

En la figura siguiente se puede observar el equipo utilizado; así como la caja de corte en la cual se coloca la pastilla que se quiere fallar, la muestra de suelo es colocada en la caja de corte y posteriormente se genera la falla en una superficie presupuesta por el equipo.



**Figura 43.** Equipo de corte directo

Para realizar la falla, es necesario elaborar un espécimen con características específicas. Mediante el ensayo de compactación se determinó un porcentaje de humedad óptimo de compactación; es decir, una cantidad de agua que permite obtener la mayor densidad al compactar. Este valor de humedad es utilizado para la fabricación de un espécimen de compactación, el cual luego de ser realizada debe ser tallado para fabricar el espécimen con las dimensiones adecuadas para la caja de corte. En la figura siguiente se observa la pastilla de compactación de la cual se extrae el espécimen de corte directo; finalmente, se observa el espécimen fabricado y preparado para colocarlo en la caja de corte.



**Figura 44.** Elaboración de pastilla de corte directo

Luego de preparar el equipo, se realiza la falla de la pastilla de suelo artificial; en este punto se debe determinar el tipo de falla que se quiere realizar. La falla puede realizarse bajo condiciones no drenadas y no consolidadas, o en condiciones drenadas y consolidadas, en esta investigación se realizan ensayos en condición no drenada y no consolidada para las dos muestras de suelo elaboradas (muestra S-07 y S-10), la muestra S-13 es descartada por su similitud con la muestra S-10 y la necesidad de gran cantidad de calor para lograr su estado

de humedad; posteriormente se selecciona la muestra con mejor comportamiento y se realizan ensayos en condición drenada y consolidada, la cual representa una condición más crítica para el suelo, especialmente en el caso de un suelo que clasifica como arena. La muestra seleccionada para ser fallada en esta condición es la muestra S-10. A continuación se detallan los resultados para cada uno de los tipos de falla.

- Falla en condición no consolidada - no drenada: en la Figura 45 se observa la pastilla preparada, así como el espécimen luego de ser fallada en condición no drenada y no consolidada; es importante observar la superficie de falla a la mitad de la muestra, esta superficie de falla es predeterminada por el equipo. Para este tipo de falla, las superficies observadas presentaban bastantes irregularidades, especialmente en el caso de la muestra S-07.



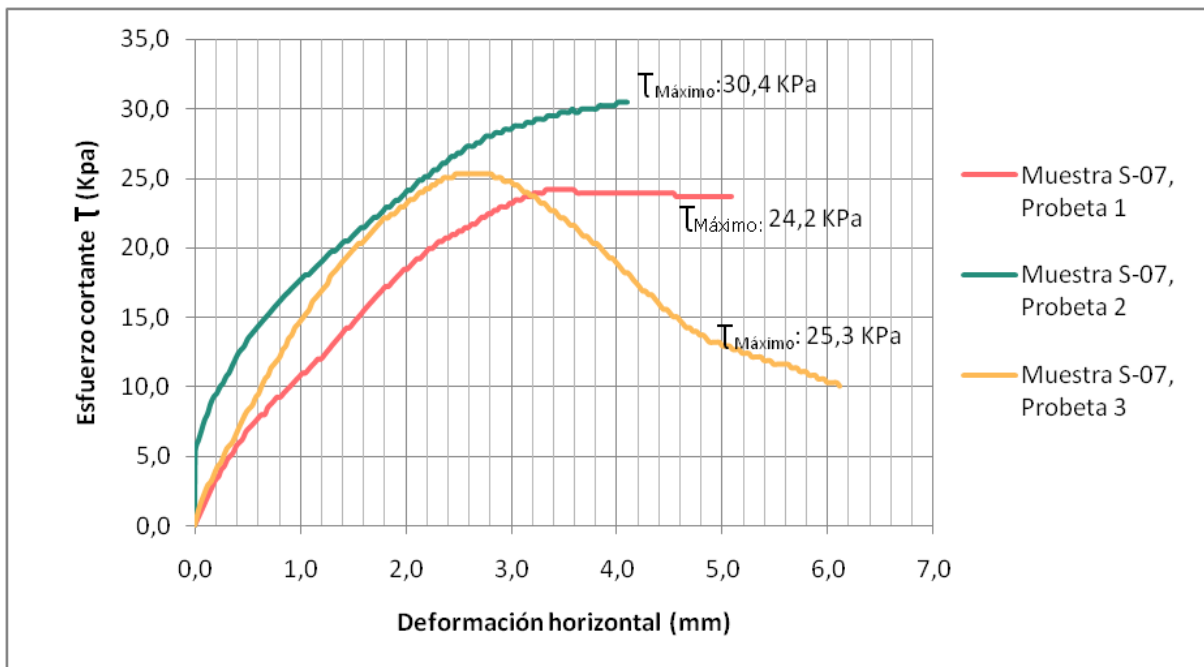
**Figura 45.** Falla de pastilla corte directo no consolidado-no drenado

En el cuadro siguiente se determinan las características de las muestras utilizadas para las fallas en condición no drenada y no consolidada, así como los esfuerzos y deformación máximo obtenido para cada una de las muestras.

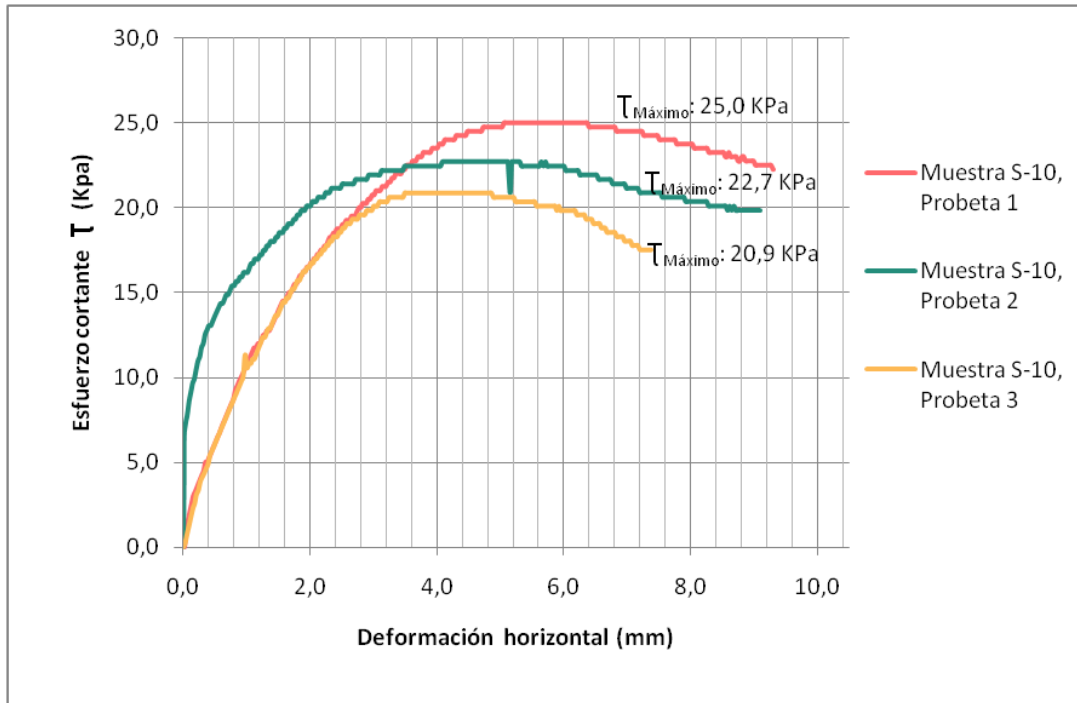
**Cuadro 48.** Características de especímenes de ensayo corte directo NC-ND

Características		Muestra S-07			Muestra S-10		
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Iniciales	Densidad seca ( $\text{g/cm}^3$ )	0,629	0,637	0,690	0,680	0,700	0,685
	Diámetro (mm)	61,9	62,7	60,3	61,8	60,6	60,9
	Altura (mm)	26,7	26,9	25,6	26,4	26,4	25,6
Finales	Esfuerzo normal (KPa)	16,3	15,9	17,2	16,3	17,0	16,8
	Esfuerzo cortante (KPa)	24,2	30,4	25,3	25,0	22,7	20,9
	Deformación (%)	8,3	6,6	10,1	15,0	8,4	7,9

A partir del ensayo de corte directo se obtienen diagramas de esfuerzo-deformación, en la Figura 46 y Figura 47 se presentan los diagramas de las muestras de suelo S-07 y S-10, en condición no drenada y no consolidada; esto permite observar la variación del esfuerzo conforme aumenta la deformación de la pastilla.

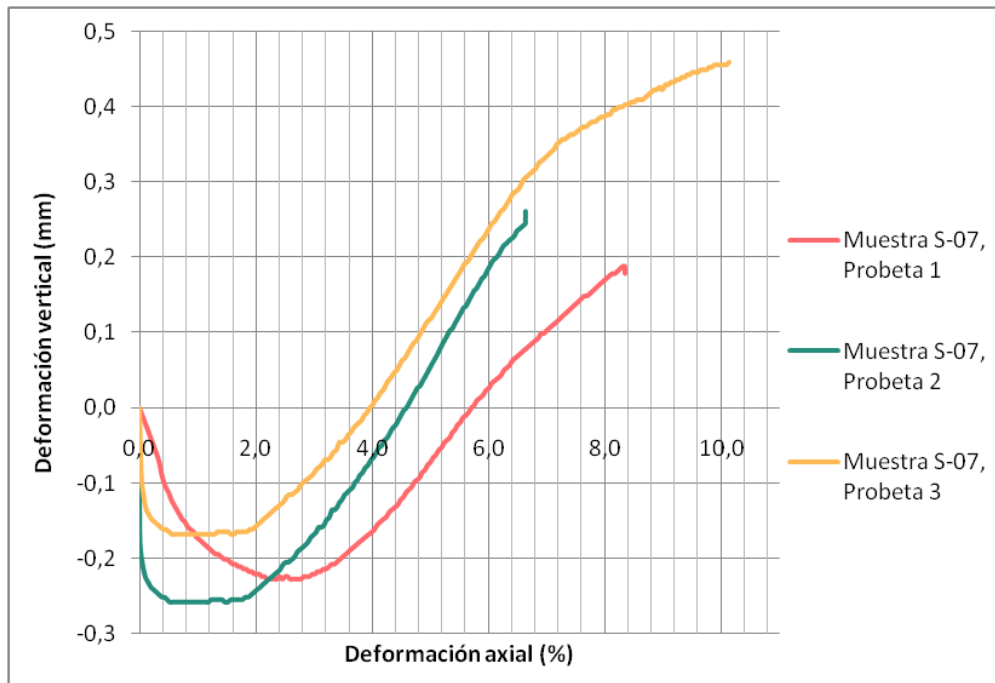


**Figura 46.** Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra S-07, condición NC-ND

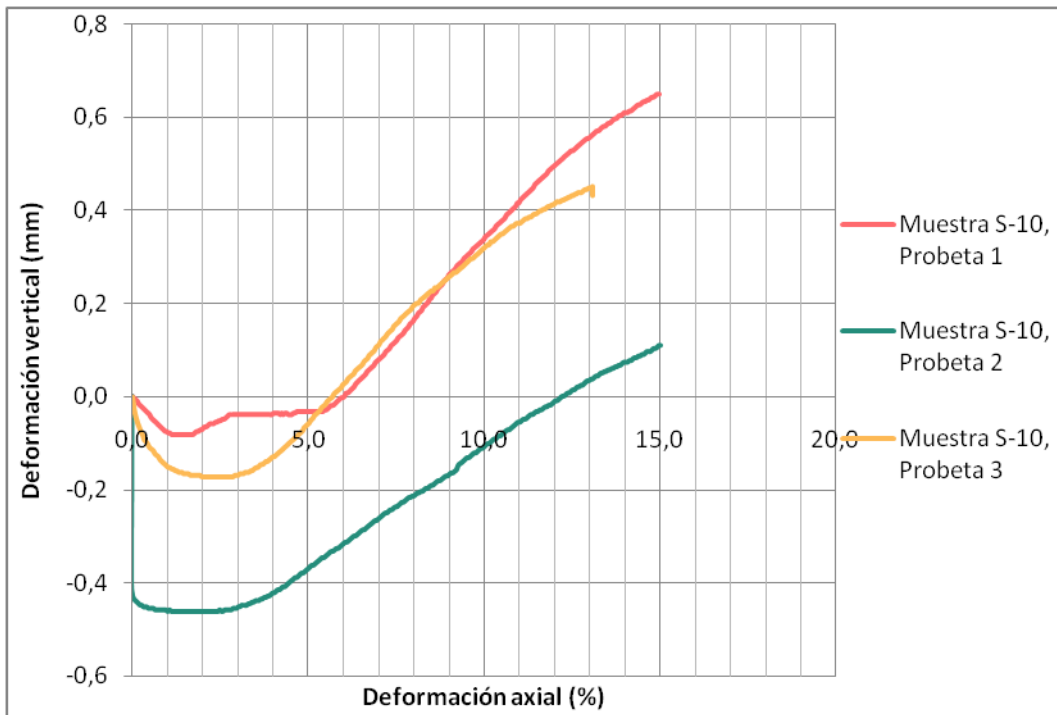


**Figura 47.** Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra S-10, condición NC-ND

También, se puede obtener la relación entre la deformación vertical y la deformación axial; tal como se muestra a continuación.



**Figura 48.** Deformación axial y deformación vertical de muestra S-07



**Figura 49.** Deformación axial y deformación vertical de muestra S-10, condición NC-ND

- Falla en condición drenada – consolidada: en la Figura 50 se observa la muestra preparada para realizar el ensayo en condición drenada y saturada, también se muestra el espécimen luego de la falla. En las fallas realizadas, las muestras se encuentran saturadas, por lo cual la falla es aún más irregular que en la condición anterior, además al extraer el material de la caja de corte es difícil que conserve su forma pues debido al agua la muestra pierde su condición compacta.



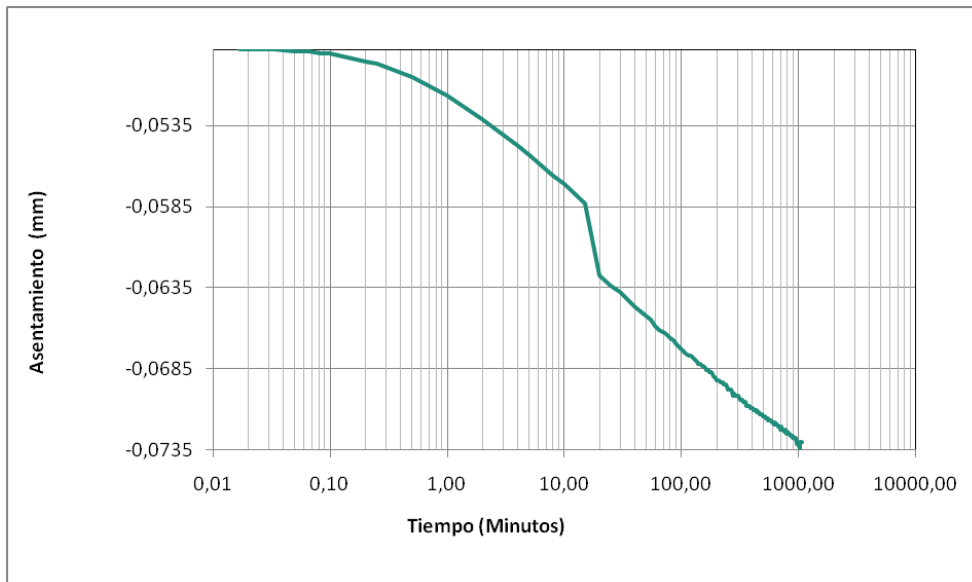
**Figura 50.** Falla de pastilla corte directo tipo consolidado-drenado

En el cuadro siguiente se presentan las características de las pastillas utilizadas en la falla de corte directo, en condición drenada y consolidada; así como los esfuerzos y deformaciones máximas de las pastillas.

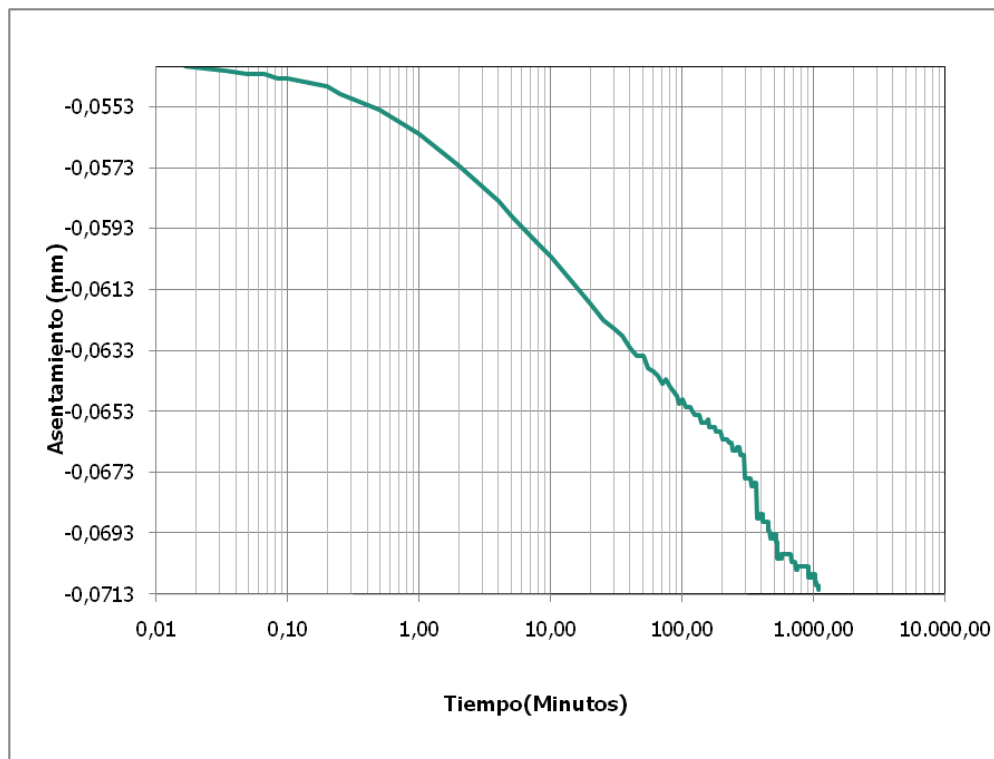
**Cuadro 49.** Características de especímenes de ensayo corte directo CD

Características		Muestra S-10			
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Iniciales	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,665	0,628	0,699	0,687
	Diámetro (mm)	61,8	61,8	60,7	60,3
	Altura (mm)	26,5	26,5	2,6	25,8
Finales	Esfuerzo normal (KPa)	16,3	16,3	16,9	17,2
	Esfuerzo cortante (KPa)	18,1	15,3	12,7	18,4
	Deformación (%)	7,7	8,9	14,5	8,1

Ahora, es importante mencionar que la muestra primero es saturada en la caja de corte, por lo cual se mantiene sumergida por un tiempo adecuado para lograr su saturación, (cerca de 20 minutos); posteriormente la pastilla es consolidada por un lapso de 24 horas, esto quiere decir, que se aplica una fuerza normal sobre la pastilla, de modo que ésta sufra un asentamiento debido a la carga aplicada. En las figuras siguientes se observan los gráficos que muestran la variación del asentamiento (cambio en la altura de la pastilla) conforme aumenta el tiempo de consolidación para cada muestra. Los análisis de estos resultados se muestran en el Capítulo 8 de este documento.

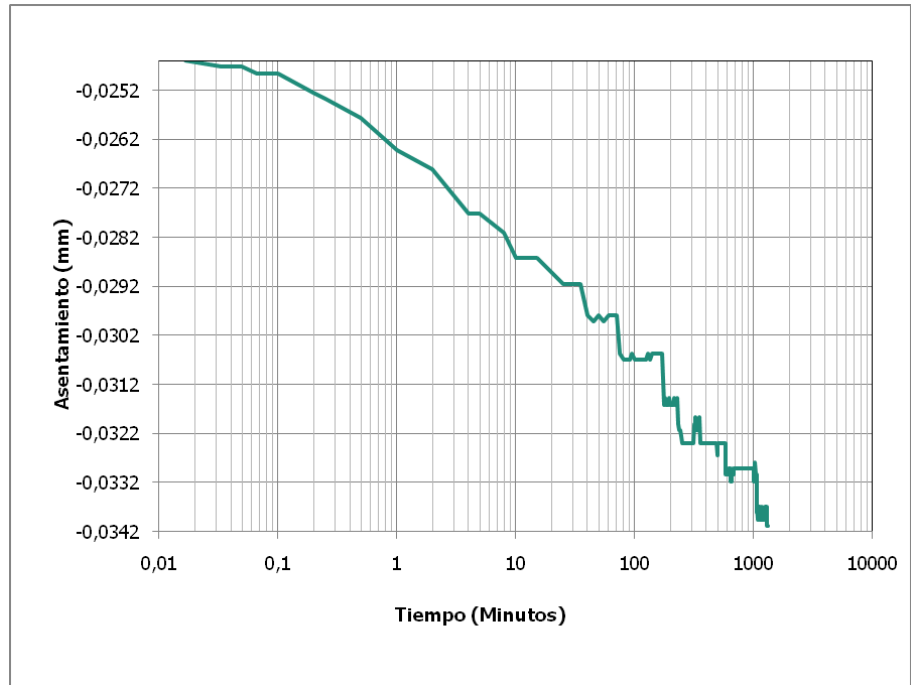


**Figura 51.** Consolidación de la muestra S-10, Probeta 1



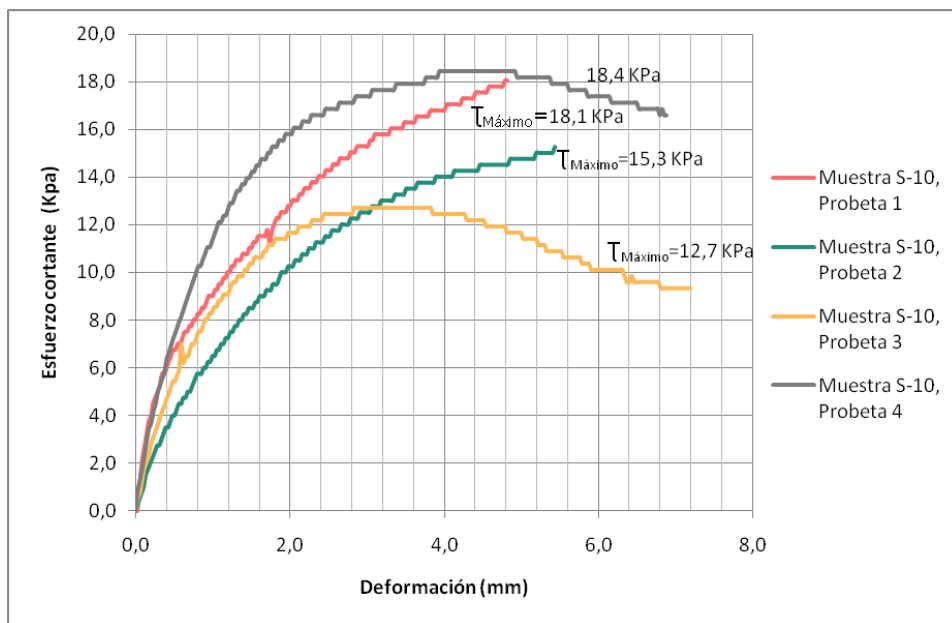
**Figura 52.** Consolidación de la muestra S-10, Probeta 3





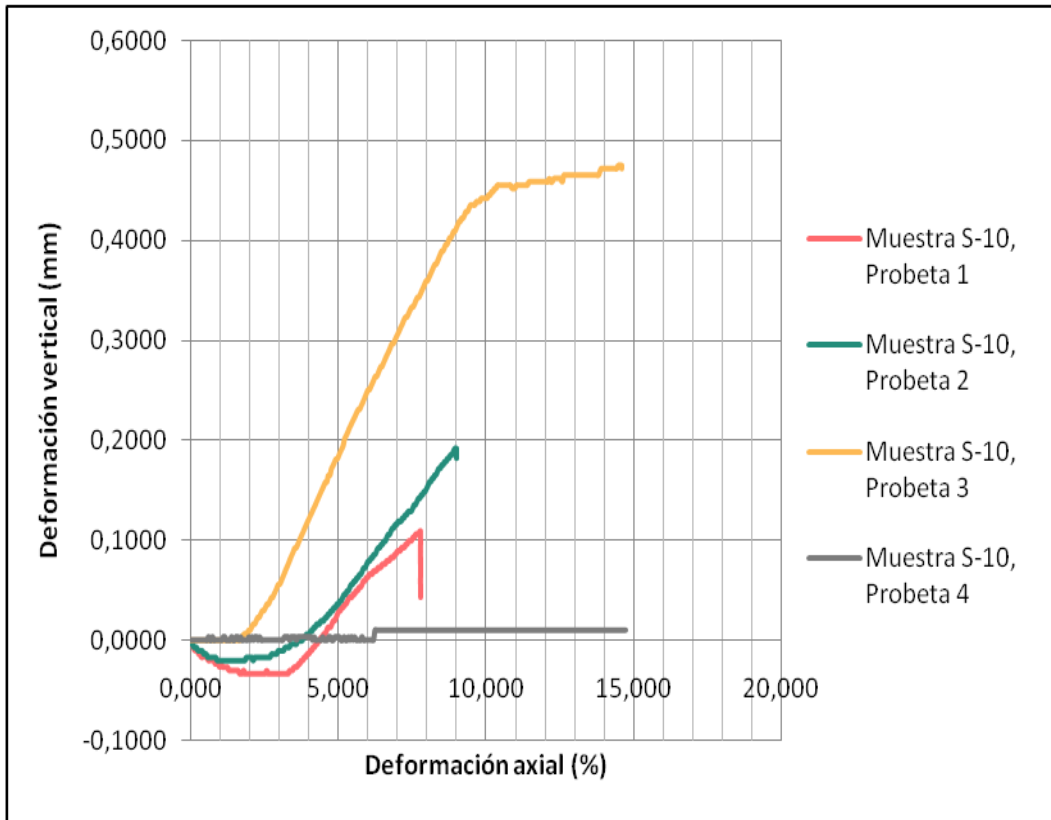
**Figura 53.** Consolidación de la muestra S-10, Probeta 4

Luego de finalizar el proceso de consolidación, se inicia la falla de la pastilla. A partir de la falla de las muestras, es posible obtener un diagrama de esfuerzo-deformación en condición drenada y consolidada; en la figura siguiente se presenta.



**Figura 54.** Diagrama de esfuerzo-deformación de muestra S-10, condición CD

Durante la falla, la pastilla sufre una deformación axial y una deformación vertical, esto se muestra en la figura siguiente.



**Figura 55.** Deformación axial y deformación vertical de muestra S-10, condición CD

Finalmente, se determinan los parámetros de resistencia del suelo artificial, para lo cual se determina el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante máximo. Es necesario explicar que se realizaron dos puntos de falla (con dos cargas distintas), pero para cada carga se realizaron dos muestras; los valores de esfuerzo cortante y normal se muestran a continuación.

**Cuadro 50.** Esfuerzos normales y cortantes de muestra S-10

Probeta	Carga aplicada (Kg)	Esfuerzo normal (KPa)			Esfuerzo cortante máximo (KPa)		
		Probeta	Promedio	Desviación estándar	Probeta	Promedio	Desviación estándar
1	15,17	49,59	50,84	1,77	18,10	18,25	0,21
4		52,09			18,40		
2	10,17	33,21	33,80	0,83	15,30	14,00	1,84
3		34,38			12,70		

A partir de los datos anteriores, se traza la línea de mejor ajuste y se determinan los siguientes parámetros.

**Cuadro 51.** Parámetros de resistencia cortante de muestra S-10

Parámetro	Valor
Cohesión c	0,00
Ángulo de fricción $\phi$	20,74

Los cálculos y análisis realizados para este ensayo se detallan en Apéndice 3. Memoria de cálculo. Mientras que el análisis de los resultados mostrados se muestra en el Capítulo 8.

## **CAPITULO 6: EVALUACIÓN DE APLICACIONES DEL SUELO ARTIFICIAL**

---

En este capítulo se determina la viabilidad de utilizar el lodo residual y el suelo artificial en diferentes aplicaciones. En la primera sección de este capítulo se presentan los criterios económicos, geotécnicos, ambientales y legales que deben ser considerados para determinar si es posible utilizar el material. Posteriormente se presenta la calidad ambiental y geotécnica del material, para luego determinar el resultado de la evaluación.

### **6.1 Criterios de evaluación**

Tal como se mencionó anteriormente, en la evaluación de aplicaciones del suelo artificial es necesario considerar aspectos económicos, técnicos, ambientales y legales; pues la viabilidad de las alternativas involucra estos factores. A continuación se detallan los criterios que se toman en cuenta en esta evaluación.

- Criterios legales: actualmente, en Costa Rica se cuenta con un conjunto de leyes y reglamentos (Ver 2.4.1 Marco legal) que regulan el manejo y disposición de aguas residuales; sin embargo, para los lodos residuales no se cuenta con reglamentación vigente en donde se definan las características físicas o químicas que debe tener el material para un determinado uso.

Desde hace varios años se encuentra en proceso la propuesta del Reglamento para la gestión integral de lodos y biosólidos, en la propuesta, se definen parámetros de análisis obligatorio para distintas disposiciones o usos; sin embargo este documento aún no es de carácter oficial. Esto evidencia que en Costa Rica aún no existe un marco reglamentario que regule la manipulación y disposición de los lodos residuales.

- Criterios ambientales: en el estudio de viabilidad de un material es fundamental tomar en cuenta los efectos que éste material puede generar en el medio ambiente; especialmente en el caso de un material cuya naturaleza es contaminante. El lodo es un desecho del tratamiento de aguas residuales, por lo tanto cobra mayor importancia la revisión de criterios ambientales y asegurar su cumplimiento.

En la mayoría de las ocasiones, los criterios ambientales se relacionan con el marco reglamentario asociado; pues las leyes deberían responder a la preocupación de regular el uso de materiales que ponen en riesgo el medio ambiente y la salud pública. Sin embargo, tal como se mostró en la sección anterior, este no es el caso de Costa Rica; por lo que en esta investigación se utiliza como referencia las regulaciones y normas de otros países, así como el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, en donde se definen parámetros de calidad ambiental para las aguas residuales, pero se extrapola a los lodos residuales debido a la ausencia de reglamentación. En conclusión, como criterios ambientales se utiliza la norma creada por Agencia de Protección Ambiental y el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica.

- Criterios geotécnicos: en este caso, los criterios técnicos que permiten definir la viabilidad del material corresponden a los requerimientos de un suelo para ser utilizado como material de construcción. Para relacionar los parámetros geotécnicos con la calidad mecánica del suelo, se utiliza la teoría de mecánica de suelos; los criterios utilizados corresponden a la información de cada parámetro geotécnico, presentado en 2.2.1 Caracterización geotécnica del suelo artificial. Además se utiliza la información mostrada en 2.2.3 Uso del suelo como material constructivo.

Los criterios anteriormente descritos se sintetizan en el cuadro siguiente.

**Cuadro 52.** Criterios para análisis de uso de suelo artificial

<b>Criterio</b>		<b>Referencia</b>
Legal		En Costa Rica no se cuenta con regulación para lodos y biosólidos
Técnico	Ambiental	Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y normativa de Agencia de Protección Ambiental
	Geotécnico	Teoría de mecánica de suelos

## **6.2 Calidad ambiental**

Mediante la caracterización ambiental del lodo residual y el suelo artificial, es posible determinar la calidad del material. Para esto se toman en cuenta los resultados de pruebas ambientales en contraposición con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y normativa de Agencia de Protección Ambiental.

**Cuadro 53.** Calidad ambiental de muestra L-01

Parámetro		Resultado	Evaluación
Contenido de nitrógeno y fósforo	Nitrógeno total	26,26 mg/L	Cumple con límite de 50 mg/L
	Fósforo	69,86 mg/L	No cumple con límite de 25 mg/L
Grado de contaminación ambiental	Demanda química de oxígeno	61,60 mg/L	Cumple con límite de 150 mg/L
	Demanda biológica de oxígeno	30,80 mg /L	Cumple con límite de 50 mg/L
Calidad ambiental	Contenido orgánico	98,34 %	Según teoría no es aceptable
	Contenido de humedad	90,55 %	Según teoría no es aceptable
	Potencial de hidrógeno	6,00	Cumple con el rango límite
Proceso de estabilización e higienización		Digestión y deshidratación	No tiene un proceso de higienización
Calidad ambiental			Baja

**Cuadro 54.** Calidad ambiental de muestra L-02

Parámetro		Resultado	Evaluación
Contenido de nitrógeno y fósforo	Nitrógeno total	63,60 mg/L	No cumple con límite de 50 mg/L
	Fósforo	362,04 mg/L	Cumple con límite de 25 mg/L
Grado de contaminación ambiental	Demanda química de oxígeno	87,00 mg/L	Cumple con límite de 150 mg/L
	Demanda biológica de oxígeno	43,50 mg /L	Cumple con límite de 50 mg/L
Calidad ambiental	Contenido orgánico	96,47 %	Según teoría no es aceptable
	Contenido de humedad	87,49 %	Según teoría no es aceptable
	Potencial de hidrógeno	7,62	Cumple con el rango límite
Proceso de estabilización e higienización		Digestión y deshidratación	No tiene un proceso de higienización
Calidad ambiental			Baja

**Cuadro 55.** Calidad ambiental de muestra L-07 y S-07

Parámetro		Resultado	Evaluación
Contenido de nitrógeno y fósforo	Nitrógeno total	295,46 mg/L	No cumple con límite de 50 mg/L
	Fósforo	69,41 mg/L	No cumple con límite de 25 mg/L
Grado de contaminación ambiental	Demanda química de oxígeno	39,80 mg/L	Cumple con límite de 150 mg/L
	Demanda biológica de oxígeno	19,9 mg /L	Cumple con límite de 50 mg/L
Calidad ambiental	Contenido orgánico	95,06 %	Según teoría no es aceptable
	Contenido de humedad	22,10%	Según teoría es aceptable
	Potencial de hidrógeno	6,00	Cumple con el rango límite
Proceso de estabilización e higienización		Digestión, secado e higienización	Según teoría es aceptable
Calidad ambiental			Aceptable

**Cuadro 56.** Calidad ambiental de muestra L-10 y S-10

Parámetro		Resultado	Evaluación
Contenido de nitrógeno y fósforo	Nitrógeno total	25,80 mg/L	Cumple con límite de 50 mg/L
	Fósforo	3,00 mg/L	Cumple con límite de 25 mg/L
Grado de contaminación ambiental	Demanda química de oxígeno	113,6 mg/L	Cumple con límite de 150 mg/L
	Demanda biológica de oxígeno	56,8 mg /L	No cumple con el límite de 50 mg/L. Este dato no es consistente con los resultados anteriores <sup>1</sup>
Calidad ambiental	Contenido orgánico	66,37 %	Según teoría es aceptable
	Contenido de humedad	5,67 %	Según teoría es aceptable
	Potencial de hidrógeno	5,71	Cumple con el rango límite
Proceso de estabilización e higienización		Digestión, secado e higienización	Según teoría es aceptable
Metales pesados		Variable para cada metal	Cumple con límites permisibles según EPA
Calidad ambiental			Alta

<sup>1</sup> Este valor no es posible, pues la muestra S-10 es originaria de una muestra S-07 más seca. Se asume que debe ser cerca de 19,9 mg /L

**Cuadro 57.** Calidad ambiental de muestra L-13 y S-13


Parámetro		Resultado	Evaluación
Contenido de nitrógeno y fósforo	Nitrógeno total	31 mg/L	Cumple con límite de 50 mg/L
	Fósforo	1,00 mg/L	Cumple con límite de 25 mg/L
Grado de contaminación ambiental	Demanda química de oxígeno	105,6 mg/L	Cumple con límite de 150 mg/L
	Demanda biológica de oxígeno	52,65 mg /L	No cumple con el límite de 50 mg/L. Este dato no es consistente con los resultados anteriores <sup>1</sup>
Calidad ambiental	Contenido orgánico	64,00 %	Según teoría es aceptable
	Contenido de humedad	4,60 %	No hay límite en el país, pero según teoría es aceptable
	Potencial de hidrógeno	5,60	Cumple con el rango límite
Proceso de estabilización e higienización		Digestión, secado e higienización	Según teoría es aceptable
Calidad ambiental			Alta

<sup>1</sup> Este valor no es posible, pues la muestra S-10 es originaria de una muestra S-07 más seca. Se asume que debe ser cerca de 19,9 mg /L

Además, de la calidad ambiental de cada de lodo y suelo artificial analizada, es importante determinar si se presentan mejoras importantes en cuanto a la calidad del material con el proceso de secado e higienización; es decir, con el secado en el horno y la adición de cemento. Por lo tanto, en el cuadro siguiente se analizan las muestras de manera global.



**Cuadro 58.** Tendencia de calidad ambiental de muestras de lodo y suelo artificial

Parámetro	Calidad ambiental por muestra				
	L-01	L-02	L-07 / S-07	L-10 / S-10	L-13 / S-13
Contenido de nitrógeno y fósforo					
Grado de contaminación ambiental					
Carga orgánica					
Contenido de humedad					
Potencial de hidrógeno					
Proceso de estabilización e higienización			•	•	•
Metales pesados					
Tendencia de calidad ambiental	Mayor porcentaje de humedad				
	Menor calidad				

Código de color	
	Calidad ambiental alta
	Calidad ambiental aceptable
	Calidad ambiental baja
	No realizado
•	Se recomienda mayor investigación y experimentación en el tema

### **6.3 Calidad geotécnica**

Mediante la caracterización geotécnica que se mostró anteriormente es posible definir la calidad del suelo artificial. Esto permitirá indicar si es adecuado utilizar el suelo artificial en los usos que se tienen proyectados.

Para determinar la calidad geotécnica, se utiliza la caracterización geotécnica del lodo residual y el suelo artificial, en contraposición con la teoría de mecánica de suelos y documentos con especificaciones técnicas del material. Empleando la teoría de mecánica de suelos es posible relacionar los parámetros determinados en laboratorio con características y comportamientos típicos del suelo. Esto se presenta en Cuadro 59, Cuadro 60 y Cuadro 61.

Además de analizar cada muestra, es necesario estudiar de manera global la totalidad de las muestras, pues esto permite determinar si se presentan tendencias de mejora en el comportamiento del suelo al aumentar su edad de secado. Esto se muestra en Cuadro 62.

**Cuadro 59.** Calidad mecánica de muestra L-07 y S-07

Parámetro		Resultado	Evaluación
Índice y clasificación	Gravedad específica	2,39	Valor típico de limos con trazos de materia orgánica
	Granulometría	Clasifica como turba (SUCS), A-8 (AASHTO)	En ambos casos clasifica como material altamente orgánico y de baja calidad
	Clasificación		
	Plasticidad		
Comportamiento mecánico	Humedad de compactación y densidad seca	47,80% y 680,78 kg/m <sup>3</sup>	El material tiene comportamiento arenoso Contenido de humedad muy alto y una baja densidad seca

**Cuadro 60.** Calidad mecánica de muestra S-10

Parámetro		Resultado	Evaluación
Índice y clasificación	Gravedad específica	1,80	Valor típico de turba, es decir, suelo de mala calidad
	Granulometría	Clasifica como arena bien gradada (SUCS), A-1-b o A-3 (AASHTO)	En ambos casos clasifica como un material de alta calidad
	Clasificación		
	Plasticidad		
Comportamiento mecánico	Humedad de compactación y densidad seca	47,74% y 725,98 kg/m <sup>3</sup>	El material tiene comportamiento arenoso Contenido de humedad muy alto y una baja densidad seca
	Esfuerzo cortante máximo (NC-ND)	10,46 KPa	El material tiene bajo esfuerzo
	Resistencia cortante	13 KPa	Baja capacidad
	Ángulo de fricción	20,74°	Ángulo muy bajo, incluso menor que un limo

**Cuadro 61.** Calidad mecánica de muestra S-13

Parámetro		Resultado	Evaluación
Índice y clasificación	Gravedad específica	1,90	Valor típico de turba (mala calidad)
	Granulometría	Clasifica como arena mal gradada (SUCS), A-1 o A-3 (AASHTO)	En ambos casos clasifica como un material de calidad aceptable
	Clasificación		
	Plasticidad	No plástico	El material tiene comportamiento arenoso
Comportamiento mecánico	Humedad de compactación y densidad seca máxima	39,34% y 710,83 kg/m <sup>3</sup>	Contenido de humedad muy alto y una baja densidad seca

**Cuadro 62.** Tendencia de calidad mecánica de muestras de lodo y suelo artificial

Parámetro	Muestra		
	L-07/S-07	L-10/S-10	L-13/S-13
Índice y clasificación	Gravedad específica		
	Granulometría y clasificación		
	Plasticidad		
Comportamiento mecánico	Compactación	•	•
	Resistencia cortante	•	•

Código de color	
	Calidad geotécnica alta
	No se puede relacionar con calidad geotécnica
	Calidad geotécnica baja
•	Se recomienda mayor investigación y experimentación en el tema

## **6.4 Evaluación de aplicaciones**

En la sección anterior se establece de manera general cuál es la calidad del material desde el punto de vista ambiental y geotécnico; sin embargo, para determinar si el lodo y el suelo artificial son aptos para ser utilizados, es importante considerar las especificaciones asociadas a cada uso, de manera que se debe realizar una revisión y análisis más detallado. A continuación se presenta la evaluación de uso del lodo artificial y el suelo artificial para distintas aplicaciones.

### **6.4.1 Material de relleno en obras conexas a carreteras, caminos y puentes**

Durante las obras civiles es común realizar rellenos en el terreno; el proceso de relleno requiere el conocimiento del material que se está utilizando para rellenar, pues esto define gran parte de las condiciones en las cuales se debe realizar el relleno.

Para evaluar si un material puede ser utilizado, es importante realizar ensayos de índice y clasificación, así como de resistencia; el ensayo de compactación es especialmente importante pues define las condiciones de compactación, es decir, el agua y energía que se deben aplicar para realizar el proceso. Adicionalmente a esto, se debe tener conocimiento del uso del suelo que se dará sobre el relleno, pues esto define si la capacidad soportante del suelo es adecuada para el tipo de estructura que se construirá.

Sin embargo, en este caso, se analiza la aplicación del suelo artificial como material de relleno en sitios donde no se colocarán estructuras sobre el relleno; pues es conocido que no se deben asentar obras sobre suelos orgánicos. A esto se debe aunar el fenómeno expansivo que se ha observado en los lodos y en el suelo artificial bajo condiciones saturadas; la presencia de este fenómeno confirma que no es posible construir estructuras sobre el suelo artificial, pues se pone en riesgo la integridad de las obras. De modo que el uso del suelo artificial como material de relleno para cimentar obras es descartado.

Pero tal como se indicó, es importante continuar la evaluación para sitios en los cuales no se colocarán estructuras. Este tipo de sitios es posible encontrarlos en zonas conexas a la construcción de carreteras, caminos y puentes; pues típicamente cuando se construyen estas zonas, se dañan terrenos que luego deben ser rellenados con material de una calidad menor. Sobre esto se detalló en la sección 2.2.3 Uso del suelo como material constructivo; en esta

sección se hace referencia al Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes.

El documento mencionado, indica cuáles son las características que debe tener el material de relleno que se puede utilizar. Este material debe ser libre de raíces, semillas y materiales deletéreos, debe estar compuesto por material granular y fino. En el cuadro siguiente se realiza una lista de chequeo con lo indicado en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes, así como la conclusión de la evaluación.

**Cuadro 63.** Lista de chequeo para material de relleno en construcción

Aspecto a evaluar	Muestra		
	S-07	S-10	S-13
Libre de raíces y semillas	✓	✓	✓
Libre de material deletéreo (venenoso)	✓	✓	✓
Material compuesto por material granular y fino <sup>1</sup>	✓	✓	✓
Tamaño máximo de 75 mm	X	✓	✓
Clasificación AASHTO A-1, A-2, A-3	X	✓	✓
Calidad ambiental <sup>2</sup>	Aceptable	Alta	Alta
Resultado de evaluación	Rechazado	Aprobado con restricción	Aprobado con restricción

<sup>1</sup> Considerando la adición de material cementante como finos

<sup>2</sup> Considerando la información mostrada en 6.2 Calidad ambiental

Según la información mostrada en el cuadro anterior, el suelo artificial S-07 no presenta características adecuadas para ser utilizado como material de relleno en obras conexas a la construcción de carreteras, caminos y puentes.

El suelo artificial S-10 y S-13 cumple adecuadamente los requisitos para ser utilizado; por lo tanto, según la revisión bibliográfica realizada y el trabajo de laboratorio, el material es apto para ser utilizado como relleno en sitios donde se haya degradado el terreno y sea necesario su relleno. Sin embargo, es importante mencionar que este relleno cuenta con una restricción esencial: no es posible utilizar el material como relleno en sitios donde sea posible la construcción de cualquier tipo de estructura.

Es claro que al momento de realizar un relleno no se tiene conocimiento del uso del suelo futuro, por lo tanto se debe tener precaución en este tema. Sin embargo, esta recomendación de uso es en sitios que ya fueron degradados por la construcción de una obra mayor, por lo tanto se recomienda el registro y documentación del sitio en donde se utiliza este tipo de material.

#### **6.4.2 Control de erosión en obras**

La erosión es un impacto ambiental que se presenta debido a diversos factores, entre ellos se encuentra la construcción de obras civiles. La erosión es un efecto de la pérdida de fertilidad y de los procesos de degradación; típicamente, las áreas erosionadas tienen bajos contenidos de materia orgánica y vida en el suelo.

Durante la construcción de obras, se deben tomar las consideraciones necesarias para evitar que se presente la erosión de los sitios cercanos; esto se logra asegurando el equilibrio entre los organismos del suelo. Por lo tanto, en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de carreteras, caminos y puentes se indican las especificaciones que debe tener el material utilizado para el control de erosión; en el cuadro siguiente se muestra una lista de chequeo de los requisitos del material, así como la conclusión de la evaluación.

A partir de la información, es posible observar que el lodo residual puede ser utilizado en el control de erosión con tierra vegetal; sin embargo, existen restricciones de su uso pues no cumplió con las especificaciones. En todos los casos se debe determinar el contenido de carbono para revisar el cumplimiento de la relación, así como determinar el contenido de hojas (recordar que el lodo residual es originario de una diversa materia orgánica). Además, se debe revisar nuevamente el potencial de hidrógeno para verificar si cumple o no con esta especificación.

**Cuadro 64.** Lista de chequeo para control de erosión con tierra vegetal

Material	Característica	Muestra		
		L-07	L-10	L-13
Musgo	Libre de piedras y palos	✓	✓	✓
	Contenido mínimo de hojas descompuestas: 75%	N.D.	N.D.	N.D.
	Color café o pardo	✓	✓	✓
	Potencial de hidrógeno: 3,5 - 7,5	✓	✓	✓
	Textura fibrosa, porosa o esponjosa	✓	✓	✓
Compost	Material libre de maleza y patógenos	✓	✓	✓
	Material orgánico parcialmente descompuesto	✓	✓	✓
	Relación carbón/nitrógeno: 25/1 - 35/1	N.D.	N.D.	N.D.
	Relación carbón/fósforo: 12/1 - 240/1	N.D.	N.D.	N.D.
	Potencial de hidrógeno: 6,0 - 7,8	✓	X	X
	Contenido máximo de agua: 40%	✓	✓	✓
	Tamaño de partículas máximo: 25 mm	x	✓	✓
	Contenido mínimo de materia orgánica: 50%	✓	✓	✓
Contenido máximo de materiales extraños <sup>2</sup> : 2%	✓	✓	✓	
Calidad ambiental <sup>1</sup>		Aceptable	Alta	Alta
Resultado de evaluación		Rechazado	Aprobado con restricción	Aprobado con restricción

<sup>1</sup> Considerando la información mostrada en 6.2 Calidad ambiental

<sup>2</sup> Vidrio, metal, plástico, entre otros

### 6.4.3 Recubrimiento de tierra y agregado para taludes

Al igual que en los dos casos anteriores, durante la construcción de carreteras, caminos y puentes, puede ser necesario el recubrimiento de taludes; por lo tanto se cuenta con normativa asociada a esta práctica. En el cuadro siguiente se indica la evaluación del uso de suelo artificial en el recubrimiento de tierra y agregado.



**Cuadro 65.** Lista de chequeo para recubrimiento de tierra y agregado para taludes

Característica	Muestra		
	S-07	S-10	S-13
Material suelto y friable	✓	✓	✓
Libre de basura, troncos, raíces, piedras y malezas	✓	✓	✓
Contenido de materia orgánica entre 3 a 10 % (AASHTO T267)	x	x	x
Contenido de arena entre 20 a 70% (AASHTO T88)	x	x	x
Contenido de limos entre 10 a 60% (AASHTO T88)	x	x	x
Contenido de arcillas entre 5 a 60% (AASHTO T88)	x	x	x
Potencial de hidrógeno entre 6 y 8 (AAHSTO T289)	✓	x	x
Calidad ambiental <sup>1</sup>	Aceptable	Alta	Alta
Resultado de evaluación	Rechazado	Rechazado	Rechazado

<sup>1</sup> Considerando la información mostrada en 6.2 Calidad ambiental

#### **6.4.4 Recuperación de sitios de extracción minera no metálica**

En secciones anteriores (Ver 2.2.3 Uso del suelo como material constructivo) se hizo referencia a la problemática que se presenta durante la extracción minera, específicamente, sobre los impactos ambientales producidos sobre el suelo; pues se forman desniveles, depresiones artificiales y pérdida de la capa vegetal, entre otros. Debido a estos problemas se requiere material de relleno y material orgánico que permita recuperar las zonas degradadas.

Para estas acciones de recuperación se analiza el uso del lodo residual como material de relleno y de cubierta vegetal. Respecto a las especificaciones técnicas del material, en el país no se cuenta con reglamentación que indique las características más apropiadas del relleno o del suelo; sin embargo, los objetivos de la recuperación de estos sitios son claros, y además son consistentes con los objetivos del relleno y control de erosión en obras conexas a carreteras y caminos, para los cuales sí existe normativa. Debido a esta similitud y a la ausencia de requerimientos en la recuperación de zonas mineras, se utilizan los mismos criterios de evaluación que en el caso anterior.

**Cuadro 66.** Lista de chequeo para uso en recuperación de zonas de extracción minera

Aplicación	Muestra					
	L-07	L-10	L-13	S-07	S-10	S-13
Relleno de terrenos	-	-	-	Rechazado	Aprobado con restricción	Aprobado con restricción
Control de erosión y recuperación de capa vegetal	Rechazado	Aprobado con restricción	Aprobado con restricción	-	-	-
Recubrimiento de tierra y agregado en taludes	-	-	-	Rechazado	Rechazado	Rechazado
Resultado de evaluación	Rechazado	Aprobado con restricción	Aprobado con restricción	Rechazado	Dependiente del uso	Dependiente del uso

A partir de la información anterior, se puede observar que el lodo residual estudiado puede ser utilizado en el control de erosión y recuperación de la capa vegetal en los sitios de extracción minera, siempre y cuando sea tipo L-10 o L-13. Por otro lado, el suelo artificial S-07 no es aceptado para ningún uso, mientras que el suelo artificial S-10 y S-13 puede ser utilizado para relleno de terrenos con restricción de uso, pero no en el recubrimiento de taludes. Las restricciones de uso son consistentes con las restricciones indicadas en las secciones 6.4.1 Material de relleno en obras conexas a carreteras, caminos y puentes y 6.4.2 Control de erosión en obras.

## **7. CAPÍTULO 7: ELABORACIÓN DE SUELO ARTIFICIAL**

---

Luego de determinar que es posible utilizar el suelo artificial, es importante detallar sobre la elaboración del suelo. En este capítulo se pretende brindar una orientación en los diferentes procesos que involucran la realización del suelo. Se incluye la descripción y secuencia de los procedimientos, así como las características requeridas en el lodo y en el suelo artificial; esto con el objetivo de sistematizar el proceso y los materiales utilizados. También, se presenta una estimación del costo unitario del suelo artificial y una guía de manipulación del material.

El objetivo de este capítulo, además de orientar el proceso, pretende ser una herramienta para normalizar la caracterización y elaboración del suelo artificial; esto permitirá la comparación de resultados obtenidos en diferentes investigaciones.

La elaboración del suelo artificial se puede dividir en cuatro etapas: extracción del lodo de la planta de tratamiento, secado y almacenamiento del lodo, realización de la mezcla y el control de las características del material en cada uno de estos procesos. A continuación se detalla cada una de las etapas mencionadas.

### **7.1 Extracción de lodo**

La extracción de lodo de la planta de tratamiento es determinante en la elaboración del suelo artificial, pues muchas de las características del suelo son dependientes de las condiciones iniciales del lodo utilizado; especialmente su calidad. Tal como se mencionó en secciones anteriores, existen diversos tipos de plantas de tratamiento así como diferentes niveles de depuración del agua residual; por lo tanto es importante tomar en consideración el tipo de planta de tratamiento de la cual se extrae el lodo pues esto influye en la calidad y cantidad del material generado. Es importante mencionar que incluso plantas del mismo tipo y con un mismo nivel de depuración, pueden presentar funcionamientos distintos entre sí; la selección de la planta de tratamiento debe tomar en cuenta varios factores, los cuales se detallan a continuación:

- Tipo de tratamiento de las aguas residuales: en esta investigación se decidió utilizar una planta de tratamiento de lodos activados, pues este tipo de tratamiento genera cantidades de lodos mayores que otras plantas. Esto permite disponer de mayor cantidad de

material para ser empleado y además responde a la necesidad de utilizar el material de los sitios en donde se presenta mayor generación de desechos.

- Volumen de lodo generado: la cantidad de lodo generado es dependiente de la magnitud de la planta de tratamiento; por lo tanto es conveniente utilizar plantas de tratamiento en donde se genere mayor cantidad de lodo.

- Adecuado funcionamiento de la planta de tratamiento: se debe tomar en cuenta la operación y control que se presenta en la planta, pues es importante considerar si se utiliza lodo generado en condiciones de funcionamiento normales.

- Condiciones de secado del lodo: un factor importante en la elaboración del suelo es la humedad del material al momento de ser extraído del lecho de secado, esta humedad depende principalmente del tiempo que el lodo se mantenga en el lecho de secado, por lo tanto es fundamental tener conocimiento del tiempo promedio de secado; a pesar que para este tiempo existen recomendaciones y requerimientos técnicos, generalmente el tiempo se rige por la cantidad de lodo generado y la disponibilidad del espacio para su secado en la planta. Además del tiempo, influye la exposición a los rayos solares que se presenta en el lecho de secado, pues se ha observado que para condiciones de secado similares (igual cantidad de tiempo en lecho de secado y lodo de una misma purga) se presentan humedades distintas al tiempo de extracción; únicamente por la ubicación de los lechos de secado, su protección del agua de lluvia y exposición del sol.

Luego de seleccionar la planta de tratamiento que presente las condiciones más favorables, es posible extraer el lodo; es recomendable que la humedad no sea superior al 80% pues de lo contrario su manipulación es complicada debido a la consistencia líquida del material.

Respecto a la extracción, si el material será utilizado para realizar pruebas de laboratorio, es conveniente recolectar el material con palas y almacenarlo en un medio impermeable para su transporte. Sin embargo, esta sección se enfoca en su uso a una mayor escala, por lo que después de extraer el material, este debe ser dispuesto en un sitio donde pueda terminar de deshidratarse.

## **7.2 Secado**

Uno de los mayores inconvenientes en la manipulación del lodo es el alto porcentaje de humedad que contiene; en el lecho de secado su porcentaje de humedad es reducido de manera importante y se pueden llegar a humedades en donde el lodo es manipulable. Sin embargo, según el uso que se pretende dar al material, es necesario su secado mediante la aplicación de calor; el secado del lodo no solamente tiene como objetivo la reducción del porcentaje de humedad y la reducción del volumen del lodo, sino que también reduce el olor del material y le da un comportamiento más estable.

Para realizar la caracterización ambiental del material, no hay requerimientos de la humedad del lodo; pues típicamente estas pruebas se realizan a fluidos, por lo tanto la alta humedad del lodo no representa dificultades. Respecto a las pruebas geotécnicas, es necesario el secado del lodo; pues estas pruebas requieren procesos que no pueden ser realizados con humedades altas, las normas American Association for Testing and Materials (ASTM) incluyen la aplicación de fuerza y tamizado del suelo, para lo cual es necesario un material seco, por lo tanto algunos ensayos fueron realizados con humedades superiores al rango común; como resultado de la etapa experimental se logra determinar un límite de humedad según la prueba que se proyecta realizar, esto se muestra en el cuadro siguiente.

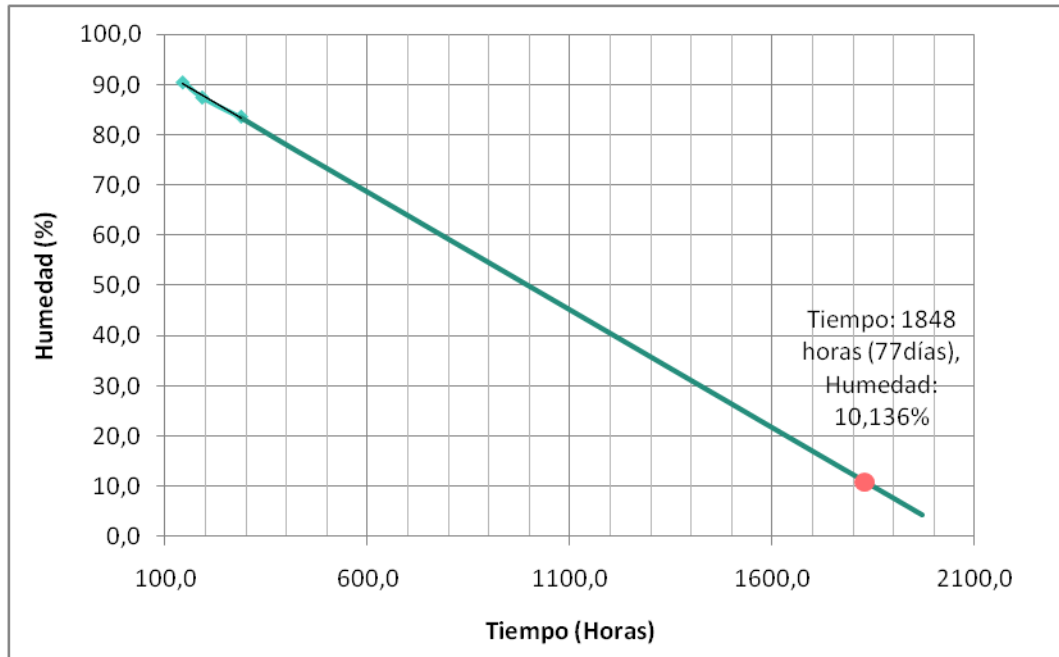
**Cuadro 67.** Límite de contenido de humedad según prueba

Área	Ensayo	Prueba	Humedad máxima (%)		Modificación para cumplimiento parcial de la norma
			Cumplimiento total de norma	Cumplimiento parcial de norma	
Ambiental	Carga orgánica	DBO	N.A.	N.A.	-
		DQO	N.A.	N.A.	-
	Nitrato		N.A.	N.A.	-
	Nitrito		N.A.	N.A.	-
	Nitrógeno amoniacal		N.A.	N.A.	-
	Fósforo		N.A.	N.A.	-
	índice	pH	N.A.	N.A.	-
		Contenido de humedad	N.A.	N.A.	-
		Contenido de materia orgánica	N.A.	N.A.	-
Geotecnia	índice	Gravedad específica	5,7	22,1	Sin tamizar y sin secar
		Granulometría	5,7	22,1	
		Límites de Atterberg	5,7	10,9	
	Compactación	Proctor Estándar	5,7	48,5	
	Resistencia cortante	Corte directo condición drenada	5,7	48,5	
		Corte directo condición no drenada	5,7	48,5	

NA: No aplica, pues los procedimientos se pueden realizar en líquidos y sólidos

Durante la etapa experimental de esta investigación, el material extraído de la planta de tratamiento fue secado al horno para lograr una humedad trabajable; a pequeña escala, esto no representa un aumento en el costo del trabajo. Sin embargo, a una escala mayor, esto sí tiene un impacto importante; por lo tanto, en esta investigación se analiza la posibilidad de obtener material con bajas humedades con secado al aire; para esto, se estudia una muestra de lodo que permanece expuesta al aire en laboratorio durante 77 días.

En la Figura 56 se observa la proyección de tiempo de secado, realizada a partir de datos experimentales y teóricos (Ver Cuadro 26); en esta figura se proyecta el tiempo que se debe mantener el lodo para llegar a una determinada humedad.



**Figura 56.** Proyección de humedad para un tiempo de 77 días en PTAR

Se puede observar que el lodo residual que permanece 77 días en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas debería tener un contenido de humedad de 10,136%. Es importante mencionar que esto aplica únicamente para la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, pues en otras plantas los tiempos de secado varían considerablemente y con una velocidad de secado más favorable; este tiempo es excesivo pues normalmente el lodo no debe requerir tanto tiempo de secado al aire bajo condiciones adecuadas de operación. Sin embargo, en este caso el diseño se ajusta a las condiciones de la planta Boulevard Las Palmas, aunque estas no sean óptimas.

Ahora, la muestra que permanece secando al aire, para un tiempo de 77 días tiene una humedad de 15%; en el cuadro siguiente se resume esta información. Es decir, entre la proyección y el dato experimental, se tiene una diferencia de 4,8% de humedad; la diferencia se puede atribuir a la diferencia de condiciones entre la planta de tratamiento y el laboratorio.

En el cuadro siguiente se muestran las características finales de la muestra de lodo que se mantuvo 77 días secado al aire en laboratorio.

**Cuadro 68.** Clasificación de muestra de suelo seca al aire

Características de muestra		Clase
Contenido de humedad (%)	15%	T <sub>1</sub>
Contenido de materia orgánica (%)	66%	

Se puede observar que una muestra seca al aire tiene características finales que permiten clasificarla como T<sub>1</sub>, es decir, un material muy trabajable. Por lo tanto, es posible tener material con humedades adecuadas para la elaboración suelo sin el uso de secado al horno; para este fin se debe adecuar un sitio en el cual se pueda almacenar y secar el material de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas. Este sitio de secado corresponde a un área en la cual se pueda mantener el material de una forma similar al lecho de secado, pero en un área más reducida y con condiciones menos exigentes de drenaje.

Debido a que es posible dar uso al suelo artificial y también es posible obtener la humedad adecuada mediante secado al aire, se procede a esquematizar el área de almacenamiento y secado del lodo en la planta Boulevard Las Palmas; en las secciones siguientes se presenta esta información.

### 7.2.1 Dimensionamiento

Luego de determinar que sí es posible obtener lodo seco mediante secado al aire, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos para el diseño de una estructura en la cual se pueda secar el material:

- Utilizando la Figura 22 se puede determinar que al retirar el material luego de permanecer 15 días en el lecho, tiene una humedad de 80,072%; es decir, para el diseño de la estructura de almacenamiento, la humedad inicial es 80%.

- Se proyecta que el material debe deshidratarse hasta llegar a una humedad de 15%, lo cual implica que el material debe permanecer al aire durante 72 días, tomando en cuenta la proyección de la Figura 22. Por lo tanto, se diseña para mantener el material durante 75 días en el área de secado



- Se pretende construir un área de secado con cinco secciones, de modo que se pueda almacenar el lodo generado durante 75 días, en donde se realizan 5 ciclos de secado de 15 días cada uno.

A partir de la información experimental anteriormente descrita, y en conjunto con datos teóricos de producción de lodo, es posible identificar los criterios de dimensionamiento, esto se muestra en el cuadro siguiente.

**Cuadro 69.** Dimensionamiento de estructura

<b>Criterio de dimensionamiento</b>	Tasa de sólidos de lodo producida, población y ciclo de secado
<b>Ecuación</b>	$C = \frac{M}{V}$ <p>C: Concentración de sólidos (kg/m<sup>3</sup>)  M: Masa de sólidos (kg)  V: Volumen de lodo (m<sup>3</sup>)</p>
<b>Datos de entrada</b>	Tasa de sólidos: 40 gSs/hab·día <sup>1</sup> Población: 952 habitantes Concentración de sólidos inicial: 20% Contenido de humedad inicial: 80% Contenido de humedad final: 15% Ciclo de secado en lecho: 15 días Ciclo de almacenamiento en área de secado: 75 días Altura de lámina: 25 cm
<b>Dimensiones</b>	Cinco celdas de 11,40m <sup>2</sup>

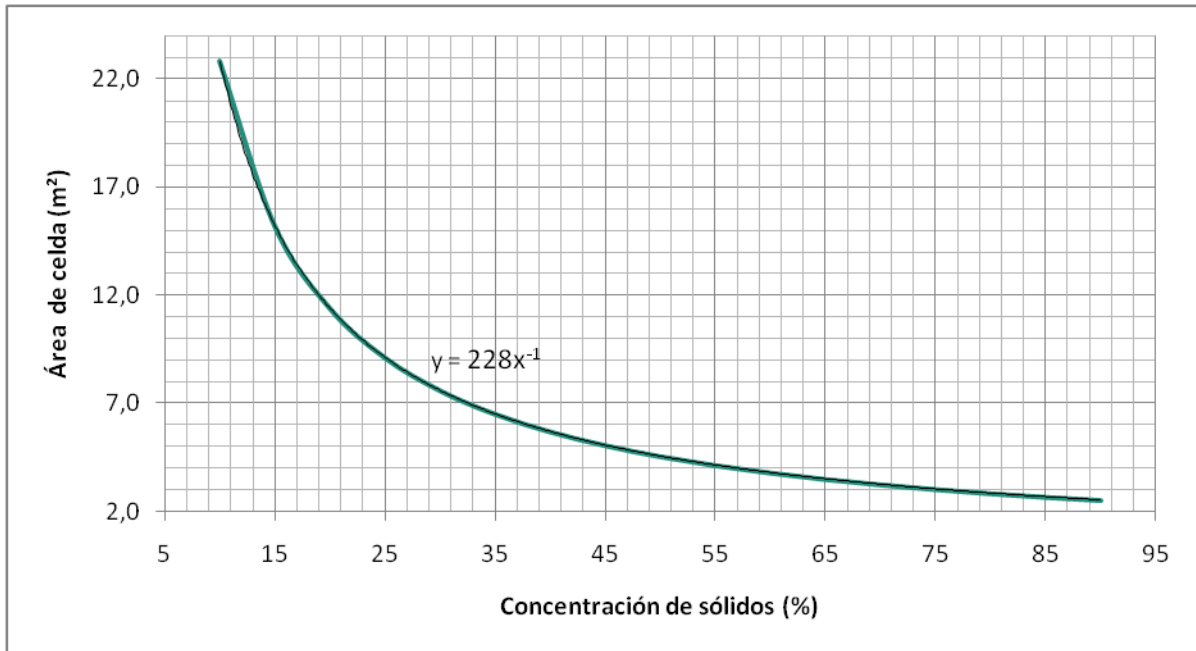
<sup>1</sup> En el Cuadro 4 se presenta la producción típica del lodo deshidratado

En el cuadro anterior se puede observar que el dimensionamiento depende de la concentración de sólidos o del contenido de humedad inicial; es decir, del nivel de deshidratación que tiene el material cuando es retirado del lecho de secado, en el caso de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas se diseña para una concentración de sólidos inicial de 20%, pero este valor es considerablemente alto, por lo tanto se determina el área para distintos contenidos de sólidos inicial; tal como se muestra a continuación.

**Cuadro 70.** Área de almacenamiento según contenido de humedad

Contenido de humedad (%)	Contenido de sólidos (%)	Contenido de sólidos (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Área celda (m <sup>2</sup> )	Área total (m <sup>2</sup> )	Lado para celda cuadrada (m)
90	10	100	5,7	22,8	114,0	4,8
85	15	150	3,8	15,2	76,0	3,9
80	20	200	2,9	11,4	57,0	3,4
75	25	250	2,3	9,1	45,6	3,0
70	30	300	1,9	7,6	38,0	2,8
65	35	350	1,6	6,5	32,6	2,6
60	40	400	1,4	5,7	28,5	2,4
55	45	450	1,3	5,1	25,3	2,3
50	50	500	1,1	4,6	22,8	2,1
45	55	550	1,0	4,1	20,7	2,0
40	60	600	1,0	3,8	19,0	1,9
35	65	650	0,9	3,5	17,5	1,9
30	70	700	0,8	3,3	16,3	1,8
25	75	750	0,8	3,0	15,2	1,7
20	80	800	0,7	2,9	14,3	1,7
15	85	850	0,7	2,7	13,4	1,6
10	90	900	0,6	2,5	12,7	1,6

En la figura siguiente se puede observar la variación del área de cada celda, según la concentración de sólidos con la cual ingresa el material en el área de secado.

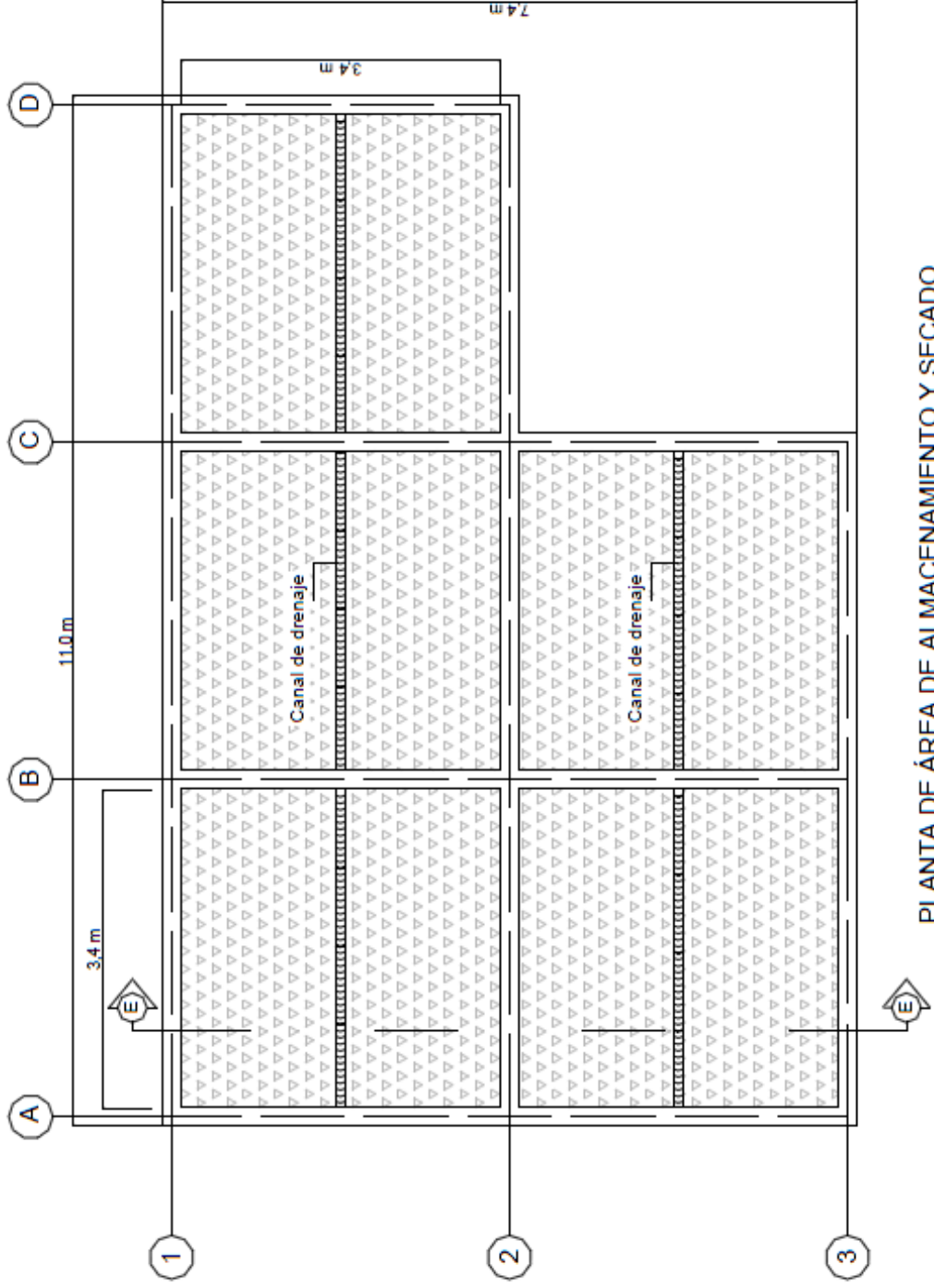


**Figura 57.** Área de celda requerida según concentración de sólidos

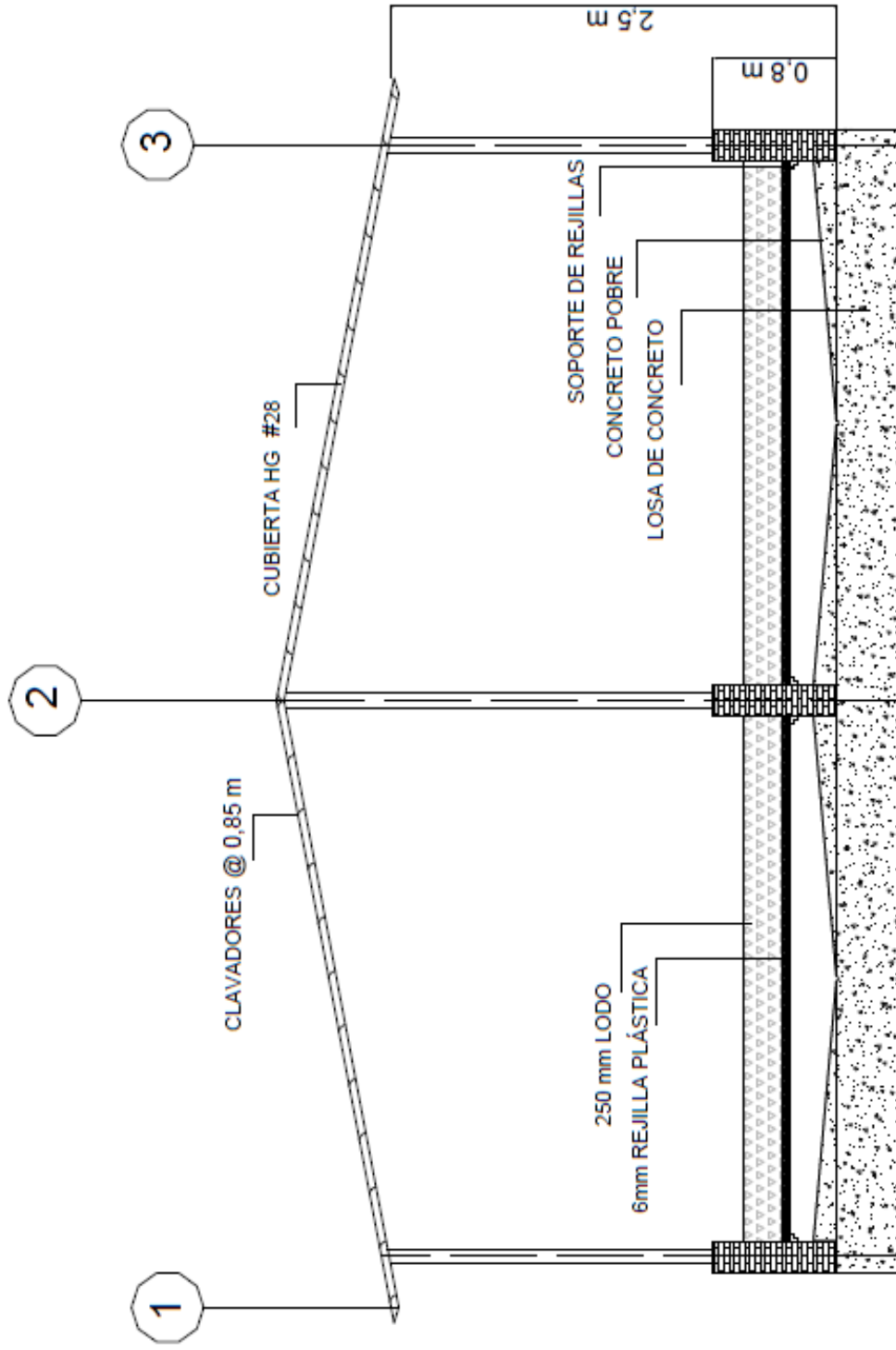
El detalle de los cálculos realizados para el dimensionamiento, se encuentra Apéndice 3. Memoria de cálculo.

### 7.2.2 Estructura

Además del dimensionamiento, es necesario determinar el sistema de drenaje de lixiviados y la protección de agua de lluvia. Según lo observado durante la fase experimental de la investigación y la revisión de bibliografía, luego de cierto contenido de humedad el drenaje del lecho de secado no influye en la deshidratación del material, y la tarea de secado recae en la exposición al aire. Por lo tanto, no se utiliza un sistema de drenaje con arena y piedra como típicamente tienen los lechos de secado, sino que se utiliza un sistema de rejillas de modo que el lixiviado sea evacuado del área pero considerando que la cantidad de agua es reducida. En las figuras siguientes se muestran los diagramas del sitio de almacenamiento del lodo residual.



**Figura 58.** Vista en planta de área de almacenamiento y secado



CORTE E-E

Figura 59. Corte E-E de área de almacenamiento y secado

### **7.3 Mezcla**

El proceso de mezcla de lodo con material cementante y agua corresponde a la etapa en la cual se fabrica el suelo artificial; pues antes de este procedimiento únicamente se utiliza lodo residual. Para realizar la mezcla es necesaria la previa preparación del lodo residual, por lo que se deben haber realizado las etapas de extracción y secado de manera adecuada; además es fundamental haber definido las proporciones con las cuales se quiere realizar el material, estas proporciones deben ser consistentes con los objetivos de la investigación o aplicación del suelo. En este caso, se tiene como objetivo la aplicación geotécnica, por lo tanto la cantidad de agua es determinada mediante ensayos de compactación; mientras que el porcentaje de cemento responde al factor económico. Sin embargo, estos porcentajes pueden variar según los objetivos de estudio planteados.

De igual forma, los objetivos de esta investigación rigen el orden de la mezcla; primero se agrega el cemento al lodo residual y posteriormente se agrega el agua de manera paulatina. Esto responde a los requerimientos del ensayo de compactación, pero este orden puede invertirse en caso de que los objetivos de la investigación lo requieran.

Para realizar la mezcla es importante contar con un espacio adecuado para la fabricación del suelo, pues la mezcla de material genera un ambiente irritante, incluso en pequeñas cantidades de material.

### **7.4 Control de calidad**

En la realización del suelo artificial es fundamental determinar cuáles son los parámetros que se deben medir y controlar, pues esto permite asegurar que el suelo sea realizado con los materiales adecuados y que a su vez el resultado sea adecuado.

## 7.5 Presupuesto

Los costos de la elaboración del suelo artificial se pueden agrupar en costo inicial y operativo; en el costo inicial se considera la construcción de una estructura para el almacenamiento y secado al aire del lodo residual, pues tal como se explicó en secciones anteriores, no es posible mantener el lodo por un tiempo prolongado en el lecho de secado, por lo que se requiere un sitio para que llegue a una humedad trabajable.

Respecto a los costos operativos, se toma en cuenta el material cementante para la elaboración del suelo y la mano de obra de los operadores. En el cuadro siguiente se especifican los costos que son considerados en el presupuesto y los que se encuentran fuera del alcance de la investigación.

**Cuadro 71.** Costos considerados en presupuesto de suelo artificial

<b>Costo</b>	<b>Costo considerado</b>	<b>Costo no considerado</b>
Inicial	Materiales de estructura de almacenamiento y secado	Permisos y trámites de construcción
		Movimiento de tierra según topografía del sitio
		Mano de obra de construcción
Operativo	Material cementante	Transporte de material al sitio de uso
	Equipo de seguridad y operación	Revisión de calidad del material (Pruebas de calidad ambiental y suelos)
	Salario de operador	

### 7.5.1 Costo inicial

La elaboración del suelo artificial requiere la construcción del sitio de secado y almacenamiento, tal como se indicó anteriormente. El costo inicial corresponde a la construcción de este sitio; tomando en cuenta la información mostrada en 7.2.2 Estructura, se calculan los materiales y costos; tal como se muestra a continuación.

**Cuadro 72.** Presupuesto de inversión inicial

Código	Actividad	Unidad	Cantidad	Costo (₡)	
				Unitario	Total
<b>1</b>	<b>Trazo</b>				
1.1	Regla 2,5x7,5 cm	unid	1	1480	1480
1.2	Estacas (Reglas 2,5x7,5) cm	unid	1	1480	1480
<b>2</b>	<b>Fundaciones</b>				
2.1	Excavación	m <sup>3</sup>	11,4	3500	39900
2.2	Losa de concreto fc'=210 kg/cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	11,4	59670	680238
2.3	Acero #3 @25cm	unid	15	1375	20625
<b>3</b>	<b>Divisiones de mampostería</b>				
3.1	Bloques Clase A (12x20x40x)	unid	332	350	116200
3.2	Acero #3 @80cm	unid	5	1375	6875
3.3	Aros #2 @20cm	kg	1,5	535	802,5
3.4	Concreto de relleno fc'=210 kg/cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0,1	60195	6019,5
3.5	Mortero de pega	m <sup>3</sup>	0,1	3000	300
<b>4</b>	<b>Drenaje interno</b>				
4.1	Lámina PVC (1,22x2,44)	unid	10	8500	85000
4.2	Pegamento PVC	unid	1	1650	1650
<b>5</b>	<b>Estructura de techo</b>				
5.2	Tubo estructural 72x72x1,80mmx600cm	unid	4	17500	70000
5.3	Lámina HG #28 ondulada 81x305 cm	unid	30	10300	309000
5.4	Pegamento PVC	unid	1	1650	1650
5.5	Clavadores	unid	24	400	9600
5.6	Tornillos	unid	100	30	3000
Total (₡)					1 353 820

### 7.5.2 Costo operativo

Además del costo inicial, se deben considerar las tareas de operación y mantenimiento del sitio; en este aspecto se incluyen equipos y operarios. En el cuadro siguiente se observa la estimación del costo operativo de manera anual.



**Cuadro 73.** Presupuesto de costo operativo

Código	Actividad	Unidad	Cantidad		Costo (₡)	
			Quincenal	Anual	Unitario	Anual
<b>1</b>	<b>Retiro del material</b>					
1.1	Retiro de lecho <sup>1</sup>	h	16,0	388,8	10500,0	4082400,0
1.2	Retiro de almacenamiento <sup>1</sup>	h	16,0	388,8	10500,0	4082400,0
1.3	Carretillo	unid	-	2,0	30000,0	60000,0
1.4	Pala	unid	-	3,0	6300,0	12600,0
<b>2</b>	<b>Mezcla con cemento</b>					
2.1	Mano de obra <sup>1</sup>	h	8,0	194,6	10500,0	2043720,0
2.2	Cemento	kg	57,0	1385,1	134,0	185603,4
<b>3</b>	<b>Equipo de seguridad</b>					
3.1	Guantes	unid	-	4,0	6500,0	26000,0
3.2	Mascarilla	caja	-	1,0	10000,0	10000,0
3.3	Anteojo de seguridad	unid	-	4,0	1200,0	4800,0
3.4	Vestimenta de protección	unid	.	4,0	15000,0	60000,0
Total (₡)						10567523,4

<sup>1</sup> Considerando una jornada laboral de 8 horas de dos operarios adicionales cuando se requieren las actividades

A partir del costo anual y la producción anual de lodo, se puede determinar el costo unitario de suelo artificial y de lodo residual.

**Cuadro 74.** Costo unitario de lodo residual y suelo artificial

Descripción	Suelo artificial		Lodo residual	
	Costo por m <sup>3</sup> (₡)	Porcentaje (%)	Costo por m <sup>3</sup> (₡)	Porcentaje (%)
Retiro del material	615,0	78,0	617,6	98,8
Mezcla con cemento	166,4	21,1	0,0	0,0
Equipo de seguridad	7,5	1,0	7,6	1,2
Total	788,9	100,0	625,1	100,0

## **7.6 Guía de manipulación de lodo y suelo artificial**

En esta sección se presentan recomendaciones para la protección de las personas y el medio ambiente al manipular el material. El lodo residual, al igual que el resto de materiales contaminantes, requiere de cuidados y precauciones para asegurar que su manipulación no sea perjudicial para las personas que lo tratan; debido a eso, en esta investigación se considera importante utilizar la experiencia de campo y laboratorio para proporcionar recomendaciones en este aspecto.

En la manipulación de lodo y realización de ensayos, es posible identificar riesgos asociados a un procedimiento determinado. En el Cuadro 77 se presenta la clasificación de procedimientos en clase  $R_1, R_2, R_3$ , donde  $R_3$  es la condición más crítica; así como el riesgo y el equipo asociado a cada procedimiento.

**Cuadro 75.** Guía de elaboración de suelo artificial

Etapa	Recomendaciones <sup>1</sup>		
	Generales	Según escala	
		Laboratorio	Campo
Extracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Seleccionar tipo de tratamiento adecuado (nivel y tipo). Se recomienda el sistema de lodos activados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Extraer el material con una pala, tomar fracciones de varios puntos del lecho y luego realizar una mezcla homogénea</li> <li>•Transportar el material en bolsas o recipientes plásticos, para evitar la pérdida de humedad del material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Extraer de manera manual o utilizar sistema mecánico si la planta dispone de este tipo de sistemas</li> <li>•Transportar en camiones de carga y proteger el material de la humedad</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Seleccionar una planta de tratamiento con buen funcionamiento, verificar le eficiencia del tratamiento mediante datos recopilados. Se debe consultar al encargado de operación por el funcionamiento (tiempo de secado, regularidad de purga)</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verificar las condiciones del lecho de secado (drenaje, protección de lluvia) y características finales del lodo deshidratado</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verificar que el material extraído tenga una humedad menor al 80%</li> </ul>		
Secado	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Secar a temperatura de 60°C, el tiempo se debe seleccionar según el porcentaje de humedad deseado (Ver Cuadro 25)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Considerar humedades límite indicadas en este documento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Se recomienda estudiar maneras económicas y sostenibles de secar el material, pues requiere largos tiempos de secado para lograr la condición óptima</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•No exceder la temperatura de 120°C si se quieren conservar las características típicas del lodo residual y secar a temperaturas de al menos 550°C por 3 horas si se quiere eliminar la totalidad de materia biodegradable</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Realizar una prueba de secado antes de secar la totalidad del material para verificar que se comporta de manera típica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Secar en horno de laboratorio</li> </ul>	















1: Según las pruebas realizadas en esta investigación

**Cuadro 76.** Guía de elaboración de suelo artificial (Cont.)

Etapa	Recomendaciones <sup>1</sup>		
	Generales	Según escala	
		Laboratorio	Campo
Mezcla	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verificar que los materiales se encuentren en estado suelto; esto sugiere que es favorable el lodo seco, pues de lo contrario el material se encuentra en láminas o fracciones mayores y se dificulta la homogenización del material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Definir el orden de realización de la mezcla según el objetivo de estudio.</li> <li>•Se recomienda agregar el cemento y luego adicionar la cantidad de agua requerida</li> <li>• Realizar la mezcla en una bandeja de metal, extendiendo el lodo para luego adicionar cemento y agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verificar que la reacción generada por la mezcla no sea perjudicial para las personas y el medio ambiente</li> </ul>
Control de calidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Definir los parámetros de calidad que serán evaluados; así como la metodología, regularidad y límites aceptables de estos parámetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Comparar objetivos, procedimientos y resultados con normativa y bibliografía</li> </ul>	

1: Según las pruebas realizadas en esta investigación

**Cuadro 77.** Clasificación de procedimientos

Clase	Descripción	Riesgo	Equipo
R <sub>1</sub>	Almacenamiento / Secado en lecho / Saturación		
	Secado al horno a 60 C		
R <sub>2</sub>	Recolección de lecho / Compactación		
	Quebra y tamizaje		
	Secado al horno a más de 120C		
R <sub>3</sub>	Aplicación de calor luego de secado		
	Adición de agua y cemento		

**Cuadro 78.** Simbología de riesgos y equipo en el manejo de lodo residual

Pictograma	Descripción
	Contacto humano con aguas residuales y lodos
	Contacto con superficies calientes
	Inhalación de partículas finas
	Inhalación de gases irritantes
	Contaminante para el medio ambiente
	Guantes
	Guantes aislantes
	Mascarilla
	Mascarilla anti-gases
	Lentes de protección
	Vestimenta de protección

## **CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

### **8.1 Planta de tratamiento**

#### **8.1.1 Relación entre eficiencia de tratamiento y calidad de lodo**

El lodo residual, y por lo tanto el suelo artificial, son dependientes del funcionamiento de la planta de tratamiento, pues se ha observado que los problemas presentados en el tratamiento del agua se ven reflejados en las características del lodo residual.

En la sección 3.4 Eficiencia del tratamiento, se comenta sobre las características del agua residual de la planta de tratamiento, determinadas por Baudrit (2015), quien indica altas eficiencias en el proceso de depuración del agua residual, lo cual indica que la planta de tratamiento cumple con su objetivo. Respecto a los lodos residuales que se generan, en el trabajo de Baudrit se indica que hay problemas con el secado del material, pues la humedad es alta debido a problemas en el drenaje del lecho; en conclusión, en la investigación de Baudrit se indica que la planta tiene un buen funcionamiento, a pesar de los problemas en el tratamiento de lodos.

Sin embargo; es importante mencionar lo observado durante la investigación realizada, pues no es consistente con lo anterior. Durante las visitas a la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, se observaron diversos problemas: dificultad en el secado de lodos, arrastre de lodos al río Pacacua y lodos mal digeridos; por lo tanto, es importante evaluar la representatividad de los parámetros de calidad que se consideran para determinar si una planta tiene un adecuado funcionamiento.

Uno de los problemas más importantes observados en la planta de tratamiento, es la dificultad en el secado de lodos. Este problema no se puede atribuir al funcionamiento de la planta, pues no se realizaron los análisis necesarios para relacionar las aguas residuales y tratadas con el lodo generado; se considera que este problema está asociado a las condiciones de drenaje. En repetidas ocasiones se consultó al encargado de operación de la planta de tratamiento, y se indicó que la dificultad de secado está asociada a las condiciones climáticas; el clima es un factor importante en la deshidratación de los lodos pero no se le

puede atribuir el mal funcionamiento de los lechos de secado pues no es típico que afecte de manera tan importante.

Por otro lado, en los lodos se ha observado la presencia de lodo sin estabilizar y el estado de descomposición de los lodos residuales, esto se puede asociar a lodos mal digeridos (mal funcionamiento en el digestor aerobio); por lo tanto, es importante la revisión de la planta, pues es posible que no funcione de manera adecuada. Las situaciones anteriormente descritas se observaron en las visitas realizadas durante la investigación, el detalle de las visitas se encuentra en 3.6 Descripción de visitas.

En la sección mencionada, se observa que durante algunas visitas no se logró recolectar material debido a que no se encontraba en estado satisfactorio. Además se debe mencionar que periódicamente se consulta por el estado de los lodos y el encargado de operación recomienda no utilizarlos, debido a su alto contenido de humedad.

Ahora, es importante indicar que una buena calidad del lodo se refiere a que sus características luego del tratamiento sean satisfactorias; es decir, que el material se encuentre deshidratado, con poco olor, sin insectos ni materia en estado de putrefacción. Estas características son dependientes del tratamiento de agua y de lodo de la planta de tratamiento; una planta con un deficiente funcionamiento es probable que genere lodos con bajas calidades. Sin embargo, es importante indicar que el buen funcionamiento no solamente se debe medir con parámetros numéricos, sino que son fundamentales las visitas al sitio y la revisión del agua tratada y del lodo deshidratado.

En síntesis, para la realización del suelo artificial, es fundamental contar con lodos deshidratados y bien digeridos; esto conlleva que para la realización del suelo es primordial que la planta de tratamiento tenga un funcionamiento adecuado, pues en el tratamiento del agua y del lodo se definen características importantes del lodo y el suelo artificial.

### **8.1.2 Efecto de condiciones climáticas en la deshidratación de lodo**

En secciones anteriores (Ver 3.5 Características climáticas del sitio), se describen las condiciones climáticas de Ciudad Colón, en el cual se ubica la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas. El clima es un factor importante en el tratamiento final de los lodos residuales, pues la temperatura y la precipitación de los días previos a la recolección del lodo,



influyen en el tiempo de secado del material; especialmente cuando los lechos de secado no están debidamente protegidos de la lluvia.

En Costa Rica se presentan dos épocas: seca y lluviosa; durante la época seca es una ventaja que los lechos de secado se encuentren expuestos, pues es justamente el aire y el sol lo que permite el tratamiento; sin embargo, en la época lluviosa estas condiciones ocasionan que el secado se dificulte y tarde más días en deshidratarse. Al observar las fechas de las visitas del Cuadro 22 y los picos de precipitación mostrados en la Figura 15, es posible notar que las visitas en las cuales el lodo presentaba altas humedades, coinciden con los meses de mayores precipitaciones.

En el diseño de los lechos de secado, las condiciones climáticas pueden ser consideradas de manera indirecta (dependiendo del método de diseño utilizado), cuando las condiciones climáticas son consideradas se reflejan en la cantidad de días estimados para deshidratar el lodo (menos días si es un sitio con altas temperaturas o poca precipitación); sin embargo, no se cuenta con un método de diseño en el cual se consideren de manera directa y numérica las condiciones climáticas. Adicionalmente a esta deficiencia, en el país no se cuenta con un sistema unificado para el diseño del tratamiento de lodos, de modo que depende del criterio del diseñador. Este es uno de los tantos puntos en los cuales se hace visible la necesidad de utilizar métodos unificados y que respondan a las condiciones y necesidades del país en cuanto al tratamiento de aguas.

Durante la investigación realizada fue posible observar el efecto del clima en la deshidratación del lodo, por esto es posible indicar que efectivamente hay una relación entre las condiciones climáticas y el tiempo de secado del material; así como en la humedad final del lodo residual. Determinar de manera más exacta esta relación es un tema fundamental por investigar.

## **8.2 Efectos observados**

### **8.2.1 Relación entre características del lodo y el suelo artificial**

El suelo artificial es elaborado a partir del lodo residual, tal como se ha explicado. Por lo tanto, las características físicas del suelo artificial son dependientes de las características del lodo residual; se podría decir que son las mismas, a excepción de cambios en el color (se

torna gris), olor (cuando se realiza la mezcla es fuerte, luego desaparece) y la presencia de finos provocada por el cemento.

Desde el punto de vista ambiental y geotécnico, las características del suelo artificial también son dependientes del lodo; aunque en este caso, debido a diversos estudios se conoce que son superiores. La adición de material cementante en el lodo residual, es un proceso ampliamente utilizado en la higienización del lodo. Según la teoría, este proceso permite reducir los contenidos patógenos desde el punto de vista ambiental; mientras que desde la mecánica, permite que el material mejore su comportamiento y aumente su resistencia (Rivera, 2012). Estos efectos positivos han sido estudiados por los autores referidos por lo que se supone que las características determinadas para el lodo son mejoradas cuando se adiciona cemento. (Von Sperling, 2001)

Por lo tanto, en este análisis se considera que las características físicas del lodo y el suelo artificial son las mismas, mientras que las características ambientales y geotécnicas del suelo artificial son dependientes pero superiores a las del lodo residual; esto fue considerado de esta manera en la evaluación de aplicaciones.

### **8.2.2 Edad de secado como parámetro de calidad de lodo**

La edad de secado del lodo es definida como el tiempo que se mantiene en el lecho de secado, generalmente este tiempo se expresa en días. Este parámetro es considerado en el diseño (en algunos casos) y operación de los lechos de secado, pues está relacionado con la dimensión de los lechos, el funcionamiento de la planta y la calidad ambiental del lodo residual; la edad de secado es un parámetro que se relaciona principalmente con la humedad del material, pues edades de secado bajas se asocian con un material húmedo, mientras que edades mayores están asociadas a lodos en estado más seco.

Típicamente, el lodo se mantiene en los lechos de secado durante un tiempo que se considere suficiente para su deshidratación (entre una y dos semanas), pero muchas veces este tiempo se ve afectado por un mal funcionamiento en la planta, aumentos en el caudal de aguas residuales, vertidos ilegales, condiciones climáticas adversas, entre otros; son muy diversas las razones por las cuales el lodo llega a una avanzada edad de secado pero su estado sigue siendo húmedo.

Por lo tanto, la edad de secado avanzada no asegura una condición de humedad óptima, mucho menos una calidad ambiental satisfactoria; de modo que la edad de secado, tal como es definida, no es un parámetro que siempre pueda asociarse con la calidad del lodo.

En la investigación realizada, mediante visitas de campo y pruebas de laboratorio fue posible comprobar que lodos con una misma edad de secado, presentan características físicas muy distintas; esto sugiere definir la edad de secado de una manera alternativa al tiempo que se mantiene el lodo en el lecho de secado. En esta investigación, tal como se detalló en la sección 4.2.3 Edad de secado, se refiere al porcentaje de humedad del material y al tiempo que permanece en lecho o en horno a 60°C; esto permitió tener un parámetro más confiable en la determinación de la edad de secado, pues se basa en una característica propia del material.

### **8.2.3 Comparación de procesos de secado de lodo**

En esta investigación es posible observar que conforme se aumenta el tiempo de secado, se da una disminución en el porcentaje de humedad de material; lo cual es consistente con el comportamiento esperado. En la etapa experimental de este proyecto, se deshidrata el material de dos maneras: en lecho de secado y al horno a 60°C.

Retomando el tema de los diferentes procesos de secado, en la Figura 21 se puede observar que la curva de secado en la planta de tratamiento presenta una tendencia lineal, en donde la humedad disminuye conforme pasa el tiempo, a una razón de 0,047. La velocidad de esta disminución responde a las condiciones de deshidratación en el lecho, es decir, la curva de secado es representativa para la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas o para plantas de tratamiento que tengan un funcionamiento similar; pues de lo contrario se pueden dar variaciones en la curva de secado presentada en esta investigación. La deshidratación del lodo es sensible a múltiples aspectos (clima, calidad del lodo, funcionamiento de planta), por lo que es importante continuar la investigación sobre la deshidratación de lodo bajo distintas condiciones. En resumen, la curva de secado en planta de tratamiento es válida únicamente para la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas. Además, se debe mencionar que el número de edades de secado provenientes de la planta son limitadas, pues el material no se mantiene por más de quince días. Debido a esto se realiza un cálculo teórico, sobre lo que se comentará más adelante.

Por otro lado, en la Figura 21 se tiene la curva de secado en horno a 60 °C. Se puede observar que tiene una pendiente más fuerte en las primeras horas de secado y una tendencia que ajusta de mejor manera a una función logarítmica; es importante notar que a una temperatura de 60 °C, cuando el lodo alcanza bajas humedades (4%) la función es asintótica, por lo que el lodo no llega a humedades más bajas aunque permanezca más tiempo en el horno. Se debe mencionar que este proceso de secado se encuentra bajo condiciones controladas, por lo tanto se espera que la relación tiempo y humedad sea similar en otras pruebas, siempre y cuando el secado tenga la misma temperatura y el lodo presente características iniciales similares al utilizado en esta investigación.

En el secado del lodo residual es importante tomar en cuenta varios factores. El primero es la temperatura del horno, pues se busca que el material llegue a estados secos pero preservando las propiedades del lodo residual; es decir, eliminando únicamente el agua presente en el material. La eliminación de la materia orgánica requiere de temperaturas de 550°C por un período de tres horas; sin embargo, en el laboratorio se pudo comprobar que el material es sensible para temperaturas superiores a 120 °C. Por lo tanto, si se quieren preservar las características del material, es importante mantener bajas temperaturas y alargar el período de secado. Bajo estas condiciones de secado, se tiene un material deshidratado pero que conserva sus propiedades, y que además sigue siendo muy sensible a la presencia de humedad, pues aún contiene gran cantidad de materia orgánica.

Por otro lado, al acortar el tiempo de secado y al aumentar la temperatura, se observa que el material presenta importantes cambios físicos; se pierde gran cantidad de materia orgánica, por lo que el lodo residual es más estable que el lodo seco al aire por un largo tiempo. Otro punto importante es la emisión de gases durante el secado de lodos a altas temperaturas, pues al ser secado al horno a temperaturas superiores a 120 °C, despiden un olor fuerte e irritante.

El proceso de secado más adecuado es dependiente de los objetivos que se tengan para la deshidratación del lodo; el proceso de secado en lechos es ampliamente utilizado y permite el tratamiento del material a un bajo costo, en donde el inconveniente es el requerimiento de grandes áreas. Para la realización de suelo artificial, este método requiere un largo período para que el material se deshidrate y estabilice, pero es más económico que el secado al horno. El secado al horno permite obtener un material mucho más estable y fácil

de manipular, pero tiene un costo energético importante; debido a esto se considera necesaria la experimentación con otros métodos de secado. Aunque en el país típicamente se utilizan lechos de secado, existen más alternativas para este tratamiento; entre ellas se encuentra el secado solar.

Tal como se mencionó anteriormente, se realiza un cálculo teórico de los tiempos de secado en lecho para las humedades logradas en laboratorio, esto se observa en la Figura 22. Se puede notar que para llegar a estas humedades se requieren largos tiempos de secado, en donde la diferencia crítica se presenta para una humedad cercana a 5%, pues se requieren 65 días más de secado en lecho que en el horno.

#### **8.2.4 Relación entre edad de secado y características físicas de lodo y suelo artificial**

En el tratamiento de lodos residuales, uno de los procesos más comunes es la deshidratación por medio de lechos de secado. Este sistema consiste en depositar lodos en un lecho con un drenaje y expuesto al aire, de modo que la exposición al aire se encargue de la deshidratación del material. Los efectos de este tratamiento son ampliamente conocidos y aprovechados en el tratamiento de lodos, pues se permite la reducción de agua, volumen y contaminantes de los lodos residuales; esto fue comprobado mediante la observación de muestras.

El lodo residual con poco tiempo de secado (inferior a cinco días) tiene altos contenidos de agua, por lo cual su volumen y consistencia líquida dificultan su manipulación y disposición final, los lodos más húmedos resultan más complicados de trabajar. Por otro lado, lodo con mayores edades de secado (superior a diez días), es un material fácil de manipular; estos son los efectos más conocidos e importantes de la edad de secado del lodo residual. En el Cuadro 28 es posible observar las variaciones en las características físicas del lodo conforme aumenta su edad, estos cambios se pueden atribuir a la reducción de agua y de materia orgánica en el material.

El lodo, conforme aumenta su edad, toma colores más oscuros, en donde los mayores cambios se presentan cuando al material se seca al horno. Respecto al olor, disminuye considerablemente su olor conforme se disminuye su porcentaje de agua, tanto en el secado al horno como en el secado al aire; de igual manera sucede con la consistencia del material:

al aumentar su edad de secado, el material pasa de una consistencia líquida hasta llegar a sólido quebradizo. En cuanto a sus partículas, al aumentar la edad las partículas se separan y fragmentan (debido en gran medida a la pérdida de humedad), además que con el tiempo desaparecen partículas orgánicas.

A su vez, estas características físicas están directamente asociadas con la trabajabilidad del material, por lo que en términos generales, se puede decir que lodo con mayores edades de secado presenta características físicas más favorables y que el aumento en el tiempo de secado es conveniente para la realización del suelo artificial y su posterior uso.

### **8.2.5 Procesamiento de muestra**

Anteriormente, en el Cuadro 29 se detalló sobre el comportamiento del lodo residual bajo distintos procesos que se realizan cuando el material es manipulado en campo y en el laboratorio; esto permite prever el comportamiento del material y tener un patrón de comparación. En general, los procesos que afectan de manera más importante son los que involucran variaciones en la humedad por medio de aplicación de calor o adición de agua al material seco. Entre los efectos más notables cuando el material es secado al horno a temperaturas de al menos 60°C se encuentra la emisión de gases, siendo mayor cuando el material es expuesto a altas temperaturas; también se observó la volatilización de materia orgánica y una importante reducción en el tamaño de las partículas del lodo residual. Respecto a la exposición del material a temperaturas superiores a 60°C, es importante controlar la temperatura y tiempo en el horno, pues de lo contrario el material se ve afectado.

Tal como se indicó anteriormente, el segundo proceso que afecta el material, es la adición de agua al material seco. Cuando el lodo residual se encuentra con bajas humedades (incluso menores a 5%) y es nuevamente humedecido, es posible notar que la mayor parte de las partículas se hinchan y absorben el agua agregada; esto permite suponer que el material es expansivo. Ahora, es necesario aclarar que esto sucede con el material que es secado al horno a 60°C, pues cuando el material es secado a temperaturas superiores a 120°C, no se presenta esta situación.

Se mencionó que el lodo secado a temperaturas mayores a 120°C es físicamente similar a la ceniza; además tiene bajos contenidos de agua y materia orgánica, por lo cual tiene un comportamiento mucho más estable ante los distintos procesos que típicamente se realizan en campo y laboratorio. Este material casi no tiene olor, no se hincha con la presencia de humedad y es fácil de trabajar, lo cual representa una gran ventaja en la manipulación y disposición del lodo residual; sin embargo, para lograr estas condiciones es necesario mantener el lodo a altas temperaturas por un período considerable, lo cual genera un gasto energético y económico importante. Para la producción masiva de lodo, es necesario utilizar una estructura de secado y almacenamiento, pues es una alternativa más sostenible que el uso del horno.

Respecto a la diferencia entre un material secado a 60°C y a 120°C, se atribuye a un contenido de materia orgánica distinto; pues probablemente a 120°C se volatiliza mayor contenido orgánico que a 60°C. Se pudo comprobar que esta diferencia en el contenido orgánico genera cambios en sus características físicas.

Sin embargo, con la adición de material cementante se presentan dificultades. Tal como se ha indicado en secciones anteriores, cuando al lodo residual se adiciona cemento y cal, el material despiden un olor fuerte e irritante; según la teoría, este olor es debido a causa de la volatilización del amonio presente en el lodo residual.

### **8.3 Ensayos de caracterización**

#### **8.3.1 Efecto de edad de secado en la calidad ambiental**

La deshidratación del lodo residual es un proceso ampliamente utilizado para mejorar la calidad ambiental del material, por lo tanto en esta investigación se espera que a mayor edad de secado se tenga un material con mejores características desde el punto de vista ambiental. A continuación se analizan los resultados obtenidos para los parámetros estudiados.

- Contenido de fósforo y nitrógeno: en la Figura 32 se puede observar la variación del contenido de nitrógeno total y fósforo para las muestras de lodo analizadas. Es posible notar que el nitrógeno se mantiene en el rango de 24 a 70 mg/L, a excepción de una muestra (L-07) que tiene un contenido de 295,46 mg/L; este valor es atípico y no es consistente con el rango de valores del resto de las muestras. En el caso del fósforo, los valores se encuentran

dentro del rango de 3 mg/L a 70 mg/L, a excepción de una muestra (L-02) que tiene un contenido de 362,04 mg/L; de igual forma, este valor no es típico ni consistente con el resto de muestras analizadas. Ahora, es importante notar que las edades de secado mayores (muestra L-10 y L-13) tienen bajos contenidos de minerales. Respecto al cumplimiento de la legislación, la mayoría de las muestras cumplen con el límite permitido.

- Carga orgánica: el grado de contaminación (DQO y DBO) de las muestras analizadas se presenta en la Figura 33. Respecto al valor de DBO, los valores se mantienen en un rango de 19,9 mg/L y 57 mg/L, mientras que los valores de DQO se encuentran entre 40 mg/L y 115 mg/L. Es importante notar que las muestras con mayor contenido contaminante son las muestras L-10 y L-13, las cuales tienen mayor edad de secado y por lo tanto deberían tener los contenidos más bajos. Este comportamiento no es el esperado, pues estas muestras estuvieron en secado al horno por un tiempo considerable y por lo tanto la materia biodegradable debería ser menor; por lo tanto esto no se considera como una tendencia en el comportamiento del lodo. Este valor no es posible debido a que las muestras L-10 y L-13 son originarias de muestras L-07; por lo tanto estos valores se rechazan.

Se utiliza una relación de DBO/DQO típica de las aguas residuales; sin embargo, es necesario verificar esta relación para el lodo. Este parámetro ha sido ampliamente utilizado para caracterizar el agua residual, pero para el lodo normalmente no se utiliza.

- Carga orgánica y contenido de humedad: es posible observar que la muestra L-01 tiene los mayores contenidos de materia orgánica y humedad, 98% y 90% respectivamente, mientras que la muestra L-13 tiene los menores contenidos, 64% y 4,60%. En este caso sí se observa una tendencia en la mejora de la calidad del lodo, pues a mayor edad de secado se tiene menor contenido orgánico y menor humedad; en este parámetro el secado sí tuvo un efecto importante.

Existe una relación importante entre el contenido de humedad y los resultados de granulometría y clasificación del material; pues cuando el material tiene altos contenidos de humedad forma láminas y esto produce resultados negativos en cuanto a su distribución de partículas. Para menores contenidos de humedad, el material tiene una condición más suelta, lo cual permite obtener una distribución de partículas más adecuada. Respecto a sus



propiedades mecánicas, los ensayos de compactación y resistencia, indican que no hay diferencias entre la muestra más seca y las muestras húmedas.

- Potencial de hidrógeno (pH): los valores obtenidos de potencial de hidrógeno se encuentran entre 5,71 y 7,62, no se presenta una tendencia entre las muestras ni mejoras en las muestras más secas, todas tienen valores típicos.

### **8.3.2 Efecto de edad de secado en la calidad geotécnica**

Las mejoras en la calidad geotécnica del lodo conforme se aumenta la edad de secado, no es un tema ampliamente estudiado, por lo cual es uno de los objetivos principales de esta investigación. Sobre temas similares se han realizados algunos estudios (Rivera, 2012), pero es necesaria la observación y análisis de información para determinar si se presentan mejoras o tendencias.

- Gravedad específica: se puede notar que la muestra L-07 tiene un valor superior al resto de las muestras analizadas, la muestra L-07 tiene una gravedad específica de 2,39 mientras que las muestras L-10 y L-13 tienen valores de 1,80 y 1,90, respectivamente.

Estos valores de gravedad específica podrían asociarse con las características de las muestras y con la manera en la cual se realizaron las pruebas. La muestra L-07 presenta una trabajabilidad de clase T<sub>2</sub>, lo cual indica que sus características físicas son favorables; sin embargo, son muy distintas a las características de las muestras L-10 y L-13, con clase T<sub>1</sub>. La muestra L-07 no se encontraba completamente seca al momento de realizar la prueba, mientras que el resto de muestras sí; además, la muestra L-07 no fue tamizada y por lo tanto tenía partículas de mayor tamaño que lo indicado en la norma y que el resto de muestras. Es posible pensar que estos factores contribuyen en la diferencia respecto a las otras muestras.

Por otro lado, los valores de gravedad específica se pueden asociar con un determinado tipo de suelo. A partir de esta información se puede decir que las muestras analizadas corresponden a suelos orgánicos de baja calidad.

- Granulometría: en la Figura 38 se presenta la distribución de los tamaños de partículas de tres muestras de lodo analizadas; se puede observar que la muestra de lodo L-10 y L-13 presenta una distribución de tamaño similar; en donde la mayor parte de las

partículas tienen diámetros menores a 9,52 mm y 4,75 mm; mientras que la muestra de suelo L-07 tiene en su mayoría partículas con un diámetro superior a 9,52 mm.

Una prueba de granulometría permite determinar si un suelo es bien gradado, es decir, si presenta una distribución de partículas uniforme y que propicie un comportamiento mecánico favorable; pues típicamente una buena granulometría se asocia a suelos de mejor comportamiento. En el caso de las muestras de lodo residual, las muestras de lodo L-10 y L-13 si bien no presentan una granulometría óptima, presentan una distribución de partículas más satisfactoria que la muestra L-07. En este caso, las diferencias pueden ser debidas a que para valores de humedad más altos, las partículas de lodo forman láminas o al menos partículas más grandes que las formadas por un material seco y suelto. Naturalmente, esto también sucede con un suelo típico, por lo cual en la norma se indica que el material debe encontrar en estado seco; sin embargo para cumplir con los objetivos de la investigación, la prueba se realizó con la muestra L-7 con un contenido de humedad de 22,1%. Ahora, esta granulometría será fundamental para la clasificación de suelos, sobre lo que se detallará más adelante.

- Límites de consistencia: se debe notar que el límite líquido indica que el lodo residual es no plástico, por lo cual la prueba no fue completada adecuadamente. En comparación con investigaciones anteriores (Rivera, 2012), se presentan diferencias importantes, pues para las muestras de lodo analizadas se encontraron condiciones de plasticidad distintas. Al manipularlo y clasificarlo, este es más cercano a una arena que a un suelo de tipo cohesivo. Sin embargo, es importante extender los estudios sobre este tema.

- Clasificación: para la clasificación del suelo se consideran dos sistemas: el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). En ambos casos, se utiliza únicamente la granulometría del lodo, pues es un suelo no plástico; además se debe mencionar que en este caso se considera más apropiada la clasificación del sistema SUCS, en donde la muestra de lodo L-07 es clasificada como turba debido a sus características físicas, es decir, un material con una baja calidad. Respecto a las muestras L-10 y L-13, estas se clasifican como arena bien gradada y arena mal gradada, respectivamente. En este caso, se observan mejores resultados para las muestras de material con una mayor edad de secado.

- Compactación: respecto a la compactación se presentan diferencias importantes entre las edades de secado del suelo, las densidades secas máximas se mantienen alrededor de  $675 \text{ kg/m}^3$  y las humedades óptimas cerca de 40%; la densidad seca es baja y la humedad alta. La forma de la curva de compactación puede ser asociada a un tipo de suelo específico, generalmente las densidades se encuentran entre  $1325 \text{ Kg/m}^3$  y  $2141 \text{ Kg/m}^3$  por lo que la curva del suelo artificial no se puede relacionar con ningún tipo de suelo; las humedades generalmente se encuentran entre 5% y 25%, por lo que la humedad tampoco es un criterio de comparación.

- Resistencia cortante: en cuanto a la resistencia cortante, se realizaron dos tipos de ensayos: condición no consolidada-no drenada y condición drenada consolidada. Para la condición no consolidada-no drenada, se utilizan las muestras S-07 y S-10; para la muestra S-07 se fallan tres pastillas y se tiene un esfuerzo cortante promedio de 27,0 KPa, mientras que para tres pastillas S-10 se tiene un promedio de 22,0 KPa; en general los valores no presentan gran diferencia por lo que no se encuentra ninguna tendencia en los resultados. Los diagramas de esfuerzo cortante vs. deformación horizontal permiten relacionar la forma de la curva con un determinado comportamiento del material; típicamente, los suelos pueden tener dos comportamientos: blando o rígido; esto se puede observar en la curva de esfuerzo-deformación de un suelo, en el caso del suelo artificial, el comportamiento en la mayor parte de los casos es blando, lo cual es consistente con una arena blanda. Este comportamiento blando indica que el suelo es altamente deformable al aplicar esfuerzos cortantes, así como al desarrollo de cambios volumétricos en condición drenada, según la teoría de mecánica de suelos (Vargas, 2013).

Respecto a la forma de las curvas, dos probetas de la muestra S-07 tienen un comportamiento blando, solamente una de las muestras tiene una curva con comportamiento rígido, es decir, que luego de llegar al esfuerzo máximo continúa deformándose; en el caso de la muestra S-10 todas tienen una curva que se asocia a comportamiento blando.

Ahora, en este ensayo también se realizan curvas que relacionan la deformación axial con la deformación vertical. En el caso de las muestras S-07 se puede observar que al inicio de la falla tienen una importante contracción en su altura mientras que axialmente no se deforman de manera importante, pero luego la deformación axial y vertical aumenta considerablemente. Este comportamiento también se repite con la muestra S-10. En estas

curvas es posible observar que para ambas muestras se presenta una probeta en la cual la deformación vertical aumenta considerablemente mientras la deformación axial se mantiene casi nula.

En el caso del suelo residual, se determinó que es de grano grueso, por lo que es importante el proceso de carga en condición drenada y consolidada, pues la condición drenada es crítica para los suelos de grano grueso. Para realizar este ensayo se utilizó únicamente la muestra S-10 pues es la que presenta mejores características y es más trabajable (Clase  $T_1$ ).

El proceso de falla de esta muestra inicia con la consolidación, lo cual genera gráficos que muestran la variación del asentamiento en el tiempo, en las cuatro probetas se puede observar que la altura de la pastilla disminuye con el paso del tiempo; tal como se espera.

Ahora, respecto a las curvas de deformación y es fuerza cortante, los esfuerzos máximos obtenidos se encuentran alrededor de 15 KPa, naturalmente más bajos que en la condición anterior. De igual forma que en la condición no consolidada-no drenada, el comportamiento del material es blando si se toma como criterio la forma de la curva.

En esta prueba, se pueden determinar los esfuerzos cortantes máximos y esfuerzos normales asociados a una carga dada; en este caso se utilizaron dos cargas y en cada carga se realizaron dos pruebas. Es importante mencionar que típicamente se prefiere realizar mayor variaciones de carga que repeticiones de una misma carga, de tal modo que se puedan obtener suficientes puntos para el ajuste de la recta; sin embargo en este caso se realizó de la manera indicada. En general, las probetas falladas con una misma carga se comportaron de manera similar; esto se comprueba con las desviaciones estándar determinadas en la sección de caracterización geotécnica de este documento. A partir de esta prueba, se determinó el ángulo de fricción ( $20,7^\circ$ ); el ángulo de fricción es considerablemente bajo, lo cual provoca que la resistencia cortante del suelo también sea baja. Este valor no es típico de arenas, incluso es más bajo que el valor típico de limos.

Respecto a una tendencia o aumento en la calidad geotécnica del suelo, esto no es observado; las mejoras están más asociadas a una cuestión de trabajabilidad y facilidad de realización de pruebas que a un tema mecánico.

### **8.3.3 Relación entre trabajabilidad, calidad ambiental y geotécnica**

Para analizar la relación entre la calidad ambiental y geotécnica del material, se debe sintetizar la información de las dos secciones anteriores: con el aumento de la edad de secado efectivamente se da una mejora desde el punto de vista ambiental; mientras que en el área de geotecnia se da una mejora en la granulometría y clasificación, pero mecánicamente la mejora no es significativa (las curvas de compactación y las curvas de esfuerzo-deformación son similares); por lo tanto se determina que no hay relación entre la calidad mecánica y la ambiental.

Respecto a la trabajabilidad, en la evaluación y clasificación del material se puede observar que existe una relación estrecha entre la trabajabilidad y la calidad ambiental; una buena calidad ambiental está asociada a condiciones de manipulación favorables.

### **8.4 Usos del material**

En la evaluación de los posibles usos del lodo y el suelo artificial, se determina que el lodo residual con humedades cercanas a 5% puede ser utilizado para control de erosión y recuperación de capa vegetal; sin embargo el lodo residual con humedad mayor a 20% no es conveniente utilizarlo en ninguna aplicación, pues sus características no son adecuadas para los usos planteados; por otro lado, el suelo artificial únicamente puede ser utilizado en relleno de terrenos cuando tiene humedades cercanas a 10% y con la restricción de no construir sobre los terrenos que se rellenan.

Es importante mencionar que debido a los usos proyectados, se evalúa el uso del suelo artificial para los rellenos y los recubrimientos de taludes, pero no para aplicarlo en el control de erosión y recuperación de capa vegetal; pues debido a su contenido cementante es recomendable no utilizarlo cuando se pretende el crecimiento de vegetación.

En la sección 6.4 Evaluación de aplicaciones, no se encuentran usos sin restricción; pues en todos los casos se incumplió algún parámetro o se considera que a pesar de cumplir todos los criterios de evaluación, es necesario extender la investigación y experimentación. Al igual que el resto de materiales constructivos, es fundamental una exhaustiva etapa de investigación para hacer uso de manera segura y responsable del material; esta situación que

se presenta con todos los materiales, tiene mayor importancia cuando se trata de desechos o materiales que tienen comportamientos variables.

Las restricciones indicadas para los usos del suelo no se deben atribuir a la variabilidad y naturaleza del material, sino más bien a una etapa típica de un material que se encuentra en etapa de investigación; con mayores estudios es posible mejorar las características del material y utilizarlo de manera segura.

Respecto a los usos, es fundamental mencionar el costo de la elaboración del suelo artificial; en este aspecto se considera el costo inicial y operativo de la realización del material. El costo inicial corresponde a la construcción de una estructura de secado y almacenamiento, de forma que se evite el uso de hornos para el secado del material; esta estructura permite conservar el material hasta llevarlo a humedades bajas (10% o 15%), lo cual reduce considerablemente los costos energéticos del secado.

Es importante mencionar que esta estructura es necesaria en la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, debido a los altos contenidos de humedad que tienen los lodos al ser retirados de los lechos de secado; esta situación no es típica ni óptima en las plantas de tratamiento, pero es la condición de la planta utilizada durante la investigación, por lo tanto se debe trabajar con los requerimientos y posibilidades de la planta. Es probable que en el país existan plantas donde solamente se requiera un mayor tiempo de secado del material y no la construcción de un sitio de secado; pues como se observa en la curva de variación de área según contenido de sólidos (Ver Figura 57), el área es muy pequeña (cerca de 2 m<sup>2</sup>) cuando el contenido de sólidos es alto.

Respecto a los costos operativos, estos sí son necesarios en todas las plantas de tratamiento, pues no dependen de las condiciones del material ni del funcionamiento de la planta. Anualmente, estos costos superan considerablemente la inversión inicial, tal como se mostró en secciones anteriores. También es importante observar que en los costos operativos, el rubro con mayor costo es el traslado del lodo entre las unidades de la planta, y no la adición de cemento al material; sin embargo, es importante analizar el uso de cal en lugar del cemento.

## **CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

### **9.1 Conclusiones**

Respecto a la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, se tienen las siguientes conclusiones:

- En Costa Rica, no se cuenta con reglamentación ni control adecuados para la recolección y disposición final de los lodos residuales del tratamiento de aguas. Por lo que típicamente se depositan en las zonas verdes cercanas a la planta de tratamiento, pero en múltiples ocasiones se depositan lodos húmedos o mal digeridos. Es necesario mayor control sobre estas prácticas.

- Las características climáticas influyen en el tratamiento de deshidratación de los lechos de secado, pues en la temporada lluviosa el proceso de secado requiere más tiempo que en la época seca. Esto puede ocasionar que se extraiga lodo húmedo y que además sea depositado en el suelo.

- Sobre la calidad de los lodos de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, los lodos residuales tienen altos contenidos de humedad; esto debido a problemas en el sistema de drenaje de los lechos. Además, se cree que hay un mal funcionamiento en la planta de tratamiento, debido a la presencia de lodos mal digeridos en el lecho de secado. Es importante mencionar, que el funcionamiento de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas tiene deficiencias importantes en el tratamiento de la línea de lodos.

- Se concluye que para la planta de tratamiento, lodos con misma edad de secado pero de distintas purgas no tienen necesariamente las mismas características físicas ni ambientales. Por lo tanto es importante considerar otros parámetros tal como la humedad o el contenido orgánico.

Sobre el secado del lodo residual, se puede concluir:

- La edad de secado del lodo definida como los días que se mantiene en el lecho de secado es un parámetro de calidad subjetivo. Dependiendo del funcionamiento de la planta, el tiempo de secado en el lecho no indica qué calidad ambiental tiene el material. Además, de la edad de secado del lodo es importante referirse a su contenido de humedad.

- En la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas, la relación entre el contenido de humedad del lodo y el tiempo que se mantiene en el lecho de secado, corresponde a una función que se ajusta al tipo lineal. Mientras que la relación entre el contenido de humedad del lodo y el tiempo que se mantiene en horno a 60 °C se ajusta a una función logarítmica. El secado al horno es considerablemente más rápido que el secado en la planta, pues para porcentajes de humedad bajos (5%) se tienen diferencias de hasta 60 días.

- En el secado en horno del lodo residual, es importante definir de manera cuidadosa la temperatura del horno. Para no volatilizar la totalidad de materia orgánica y conservar la naturaleza del material, se observó que una temperatura de 60 °C es satisfactoria. Si la temperatura es superior a 120°C se volatiliza gran cantidad de materia orgánica y cambian las características del material respecto al secado a 60 °C; sin embargo, eso no es factible debido al consumo energético; por lo que se recomienda un adecuado tratamiento de deshidratación del lodo en la planta de tratamiento o utilizar una estructura de secado y almacenamiento. Durante la realización del proyecto, se observó que es posible obtener lodo con bajos contenidos de humedad (10%-6%) mediante el secado al aire.

- Se concluye que el secado en horno es favorable para la estabilización del lodo. Permite obtener un material con mejor calidad ambiental, pues tiene menor contenido orgánico y menor humedad; desde el punto de vista geotécnico tiene mejor granulometría. Además, es considerablemente más trabajable.

- Se concluye que los procesos que mayor riesgo generan en el manejo de lodo residual son los asociados a la aplicación de calor al lodo o al suelo, esto debido a la emisión de gases de amonio.

A partir de los ensayos de caracterización, se concluye:

- Mediante la realización de ensayos se logró caracterizar de manera ambiental y geotécnica el material estudiado. Además se lograron identificar las tendencias y relaciones en los casos que estas se presentaron; el material mejora ambientalmente cuando tiene mayor edad de secado, mecánicamente no se observan mejoras.

- En la mayoría de los casos los ensayos fueron realizados según las normas y procedimientos establecidos; sin embargo, en los ensayos geotécnicos se presentó mayor



dificultad para su realización, pues la humedad del material que proviene de los lechos de secado es muy alta en comparación con los requerimientos para un suelo típico. Debido a esto fue necesario el secado en horno, pues de lo contrario no sería posible realizar los ensayos satisfactoriamente. Se concluye que aunque el lodo residual puede tener ciertas características similares a un suelo, es necesario ajustar las normas utilizadas y llevar el lodo hasta cierta humedad para realizar las pruebas de manera adecuada.

- Se concluye que para las edades más jóvenes (humedades mayores a 50%) únicamente es posible realizar pruebas de caracterización ambiental, mientras que para lodos con edades mayores (humedades menores a 9%) es posible realizar pruebas de caracterización ambiental y geotécnica. Sin embargo, para realizar el suelo artificial, es posible utilizar humedades desde un 20% de contenido de humedad; en esta investigación se recomienda utilizar un 15%, pues para esta condición de humedad el material es manipulable y la mezcla con el cemento se puede realizar de mejor manera.

- Se concluye que las características físicas del lodo se pueden asociar con su calidad ambiental y geotécnica, así como con su trabajabilidad. Lodo con características físicas como las detalladas para T1 presenta mejor calidad ambiental y geotécnica. Esto permite asociar un material trabajable con un lodo más apropiado para ser depositado en el suelo.

- El contenido orgánico y el porcentaje de humedad son los valores que más cambian cuando el lodo aumenta su edad de secado.

- A partir de los ensayos geotécnicos, se encuentra que el secado del lodo favorece la granulometría del material, así como la clasificación; pero tal como se indicó, mecánicamente no hay mejoras.

- En los ensayos geotécnicos realizados, se observan diferencias importantes entre la muestra L-07 y las muestras L-10 y L-13; específicamente en cuanto a granulometría, clasificación y gravedad específica. Esto se atribuye a la presencia de humedad y de contenido orgánico más alto de la muestra L-07, lo cual puede provocar la diferencia de los resultados. Por lo tanto, se concluye, que el lodo seco (humedades menores a 9%) es más adecuado para ser tratado como un suelo.

- Según las curvas de esfuerzo cortante-deformación, el suelo artificial tiene un comportamiento blando. En general, a partir de los ensayos de resistencia se concluye que el ángulo de fricción del suelo artificial es considerablemente bajo; a esto se debe agregar el alto contenido orgánico del material, por lo cual no es recomendable su uso para cimentar estructuras.

- El ensayo que mejor se puede relacionar con la consistencia y la trabajabilidad del lodo, es el contenido de humedad; esto se debe a que el lodo se ve altamente influenciado por los cambios de humedad (en cuanto a su consistencia, trabajabilidad, granulometría y clasificación). En cuanto a la clasificación y caracterización de lodo, el punto de partida es el contenido de humedad del material.

- Al caracterizar el lodo residual y suelo artificial, es fundamental tener conocimiento del tratamiento que se le brinda en la planta de tratamiento; esto incluye el tipo de tratamiento pero especialmente las condiciones operativas, pues esto influye en el resultado del lodo residual y el suelo artificial. Una caracterización completa del material, debe iniciar con el control de las condiciones de operación de la planta.

- Los ensayos de caracterización de suelos han sido utilizados para determinar parámetros geotécnicos del lodo; luego de esto, los resultados se han utilizado para clasificar y evaluar el lodo tomando en cuenta la teoría de mecánica de suelos. Sin embargo, se debe recordar que el lodo tiene un origen y características químicas distintas a las de un suelo típico, por lo cual se considera necesaria la investigación para establecer una caracterización específica para el lodo y no suponer que el lodo se comporta como un suelo.

- El lodo es clasificado como material granular; sin embargo, en cuanto a compactación y resistencia, no presenta valores típicos de la arena, esto confirma la conclusión anterior: no se pueden establecer relaciones entre parámetros del lodo residual, pues éstos han sido determinadas para suelos típicos.

En cuanto a las aplicaciones del suelo, se concluye:

- Los parámetros más importantes para los usos estudiados son contenido de materia orgánica y humedad, su potencial de hidrógeno y su granulometría. Debido a que los usos proyectados están asociados a suelos orgánicos, los parámetros como resistencia y

compactación no son trascendentes en la toma de decisiones; pues por su pobre calidad mecánica no se evalúan usos que requieran alta calidad.

- El lodo extraído de la planta de tratamiento Boulevard Las Palmas tiene características típicas, pero su contenido de humedad sí es considerablemente alto debido a problemas operativos de la planta. Esto implica que los costos presentados en esta investigación pueden ser superiores a los requeridos en plantas con un mejor funcionamiento.

- En esta investigación se aprueba el uso del lodo y el suelo artificial para la realización de rellenos (en los casos que no se realicen construcciones en el sitio), para el control de erosión y la recuperación de zonas mineras. Sin embargo, la salud y seguridad

## **9.2 Recomendaciones**

Luego de la investigación realizada, se pueden brindar una serie de recomendaciones; estas son importantes en el seguimiento de la experimentación e investigación del tema de lodo residual.

Sobre el secado del lodo, se recomienda:

- Realizar curvas de secado para otras plantas de tratamiento, esto permite comparar el tiempo y razón de secado de plantas en las cuales se modifiquen las condiciones operativas; se recomienda realizar estas curvas en plantas que tengan diferente tratamiento de aguas y de lodos, pues esto permitiría asociar el secado con el tratamiento brindado. De igual forma se considera importante realizar estas curvas bajo otras condiciones climáticas para cuantificar el efecto del clima en el secado del material.

- Realizar curvas de secado para diferentes condiciones de secado en laboratorio, es decir, a diferentes temperaturas a la utilizada en esta investigación. En este caso es importante no sólo estudiar la humedad, sino también la reducción de la materia orgánica para tiempos similares pero diferentes temperaturas.

- Se recomienda estudiar el efecto del contenido de humedad a nivel químico y microscópico; tal como determinación de área superficial e hinchamiento del material.

Respecto a los ensayos de caracterización:

- Se recomienda llevar el lodo artificial a una condición de bajo contenido orgánico y realizar los ensayos mecánicos para observar si se presentan mejoras al reducir este parámetro. Sin embargo, es posible que esto requiera mayor energía, por lo que también es necesaria la valoración energética del material para aprovechar el calor que se le aplique, de lo contrario es posible que no resulte factible aunque sus características mecánicas mejoren; además siempre se debe considerar el impacto ambiental de la energía requerida.

- En el caso de continuar con el estudio de las aplicaciones recomendadas, es importante analizar su contenido de patógenos; aunque según el proceso de higienización es seguro su uso, se deben hacer análisis de rigor. También, siguiendo con las aplicaciones recomendadas, se deberían realizar ensayos sobre la capacidad erosiva del material, así como ensayos de consolidación y de plasticidad haciendo uso de la Norma Británica BS 1377, pues esto permitirá confirmar los resultados obtenidos en cuanto a plasticidad.

En términos generales, sobre la investigación y estudio de lodos, se recomienda:

- La búsqueda de maneras de estabilización e higienización del material que consideren aspectos económicos, ambientales, técnicos, legales y sociales; brindar tratamientos efectivos a los lodos residuales implican una mayor posibilidad de hacer uso de ellos.

- Se debe tomar en consideración la regulación indicada en el Reglamento para manejo y disposición final de lodos y biosólidos (2015).

- Se recomienda investigar sobre la capacidad del lodo para su aplicación como abono y fertilizante; sobre este tema se han realizado diversas investigaciones, pero es necesario que en el país se cuente con legislación y normalización de procesos, así como un intermediario entre los sitios generadores de lodo y los sectores que pueden aprovecharlo.

- Es fundamental la búsqueda de alternativas para el reuso del lodo residual; pero también es importante la educación ambiental en la sociedad, el agua es un recurso valioso y fundamental para todas las formas de vida, por lo cual debe ser utilizado de manera consciente y responsable. El consumo de agua es necesario para la vida humana, pero los

beneficios de un consumo racional se trasladan a gran cantidad de ámbitos: social, económico y ambiental.

- Mayor comunicación entre las diferentes áreas de estudio. Es necesario el intercambio de información entre el campo de la geotecnia, la agronomía y la ingeniería ambiental y civil; la combinación de conocimientos de estas tres áreas puede permitir la identificación de usos del lodo residual. Es importante que el reuso de este material y todos los materiales de desecho se vea como un problema que vincula diversas áreas, y no únicamente de su área de estudio más próxima: la diversidad de perspectivas permite la visualización de mayores oportunidades para el reuso de desechos.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

### Artículos

Angulo, Francisco. (2013). *Manejo, disposición y desecho de las aguas residuales en Costa Rica*. Estado de la Nación, Costa Rica, 2013.

Eróstegui, Carlos. (2009). *Contaminación por metales pesados*. Revista Científica Médica Cochabamba v.12n.1.. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013)

Ramírez, Rosa; Roberte, Nathalie; Millán, Sandra. (2006). *Aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa*. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Lodos%20de%20la%20ETAP%20Los%20Berros.pdf>

Latinosan, Conferencia Latinoamericana de Saneamiento. (2007). *Saneamiento para el desarrollo: ¿Cómo estamos en 21 países de América Latina y el Caribe?*. Disponible en: [http://www.unicef.org/lac/documento\\_LATINOSAN.pdf](http://www.unicef.org/lac/documento_LATINOSAN.pdf)

Romero Esquivel, Luís Guillermo, Vargas Camareno, Maricruz, Padilla Barrantes, Francisco. (2007). *Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica*. Estudio de caso en lodo de electrodeposición. Avances en Química: [Fecha de consulta: 16 de abril de 2015] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93320303>

Valerio, Oscar. (2011). *Ensayos triaxiales para suelos*. Disponible en: [revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/839](http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/839)

### Libros

Baudrit, Daniel. (2015). *Caracterización física, química y microbiológica de los lodos generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales ordinarias y sus posibles usos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Chinchilla, Jesús. (1997). *Estudio del tratamiento lagunar de los lodos provenientes de tanques sépticos domésticos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Das, Braja. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson Learning, 2001.

González, Carlos. (2005). *Estudio del efecto de los lodos residuales de la empresa Extralum como aditivo en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Metcalf & Eddy, INC. (1991). *Wastewater Engineering*. McGraw Hill Book Co., Nueva York, 1991.

Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse – 4th ed.* New York: Mc Graw Hill.

Orozco, Alvaro. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. Acodal, Colombia, 2005.

Redondo, Angie. (2014). *Propuesta para el manejo y disposición de lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable de Tres Ríos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Rivera, Jonathan. (2012). *Caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Ugalde, Sebastián. (2013). *Tratamiento y disposición final de los lodos en la planta de tratamiento de agua potable de Barranca*. Proyecto de graduación para el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Unda, Francisco. (1999). *Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública*. Limusa, México, 1999.

Vargas, William. (2013). *Notas de curso Mecánica de Suelos I*. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Vidal, Paola. (2014). *Notas de curso Análisis Ambiental I*. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Von Sperling, Marcos. (2001). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná.

### **Reglamentos**

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. San José

Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. (2007). Disponible: Fuentes/Reglamento%20de%20vertidos.pdf

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN). (2009). Guía de gestión ambiental para la minería no metálica .Editorial Unicornio, San José, Costa Rica.

### **Referencias electrónicas**

Angulo, Francisco. (2013). *Manejo, disposición y desecho de las aguas residuales en Costa Rica*. Disponible en: [www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/019/angulo\\_2013.pdf](http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/angulo_2013.pdf)

Castillo, Hermilio. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte*. Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt7.pdf>

Cerón, Oswaldo. (2004). *Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción*. Disponible en: [http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-05.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-05.pdf)



Climate Data, (s.f.). *Clima: Costa Rica*. Disponible en: <http://es.climate-data.org/location/230802/>

GEDAR. (Gestión y tratamientos de aguas y residuos). (2011). *Clasificación de los sólidos de agua residual*. Disponible en: <http://www.gedar.es/clasificacion-de-los-solidos-del-agua-residual/>

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). Atlas Climatológico. Recuperado de <http://www.imn.ac.cr/>

Limón, Juan. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: ¿Problema o recurso?* Disponible en: [http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf)

López, Francys. (2010). *Suelos: Límites de Atterberg*. Disponible en: <http://trabsuelos.blogspot.com/p/limites-de-atterberg.html>

Oropeza, Norma. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. Disponible en: [www.dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://www.dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf)

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. Disponible en: [www.conavi.go.cr/wps/wcm/connect/c341d35f-7579-4b76-8250-576edbe47fe0/CR-2010.pdf?MOD=AJPERES](http://www.conavi.go.cr/wps/wcm/connect/c341d35f-7579-4b76-8250-576edbe47fe0/CR-2010.pdf?MOD=AJPERES)

Ministerio de Salud Pública. (2013). *Manejo de Lodos en Costa Rica: Contexto político, legal e institucional*. Disponible en: [www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch\\_training/db/event\\_upload\\_folder/97/Day\\_3\\_-\\_3.MSalud.pdf](http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch_training/db/event_upload_folder/97/Day_3_-_3.MSalud.pdf)

Mora, Darner. (2012). *Agua para consumo y saneamiento*. Disponible en: [http://www.paho.org/cor/index.php?gid=219&option=com\\_docman&task=doc\\_view](http://www.paho.org/cor/index.php?gid=219&option=com_docman&task=doc_view)

Restrepo, Felipe. (2010). *Análisis granulométrico*. Disponible en: <http://suelosudea.blogspot.com/p/analisis-granulometrico.html>

Ruiz, Carlos. (2010). La plasticidad del suelo. Disponible en: <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/plasticidad-del-suelo-limites-de.html>

Fernández, Roca (s.f.). Contaminación de suelos por metales pesados. Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo, Galicia. Disponible en: [http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion\\_suelos\\_metales\\_pesados.htm](http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion_suelos_metales_pesados.htm)

Sorrequeta, Augusto. (2004). *Aguas Residuales: Reuso y Tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para Latinoamérica*. Disponible en: [www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/pluginfile.php/2784/mod\\_resource/content/0/2\\_Aguas\\_residuales\\_protegido\\_.pdf](http://www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/pluginfile.php/2784/mod_resource/content/0/2_Aguas_residuales_protegido_.pdf)

Toro, Guido. (2009). *País enfrenta toneladas de basura*. Disponible en: [fundacionambio.org/article/pais-enfrenta-toneladas-de-basura/](http://fundacionambio.org/article/pais-enfrenta-toneladas-de-basura/)

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Datos de laboratorio de ensayos ambientales

#### Cuadro 79. Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-01

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

Descripción		Valor
Peso (g)	Beaker+Agua destilada	406,43
	Beaker+Agua destilada+Lodo	414,16
	Lodo	7,73
Volumen (mL)	Agua destilada	200,00

#### Cuadro 80. Parámetros de calidad para muestra L-01

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

Parámetro	Ensayo	No. Prueba	Valor leído	Valor corregido
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	1	0,600	15,52
	Nitrito	1	0,385	9,96
	Nitrógeno	1	0,030	0,78
	Fósforo	1	2,700	69,86
Grado de contaminación	DQO (mg/L)	1	308,000	61,60
Índices	pH	1	6,000	6,00

#### Cuadro 81. Contenido de materia orgánica para muestra L-01

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

No. Prueba	Masa (g)			Materia orgánica (%)	
	Cápsula	Lodo+Cápsula	Lodo seco+Cápsula	Muestra	Promedio
1	34,022	40,232	34,130	98,261	98,344
2	23,626	27,442	23,686	98,428	

**Cuadro 82.** Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-02

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Descripción		Valor
Peso (g)	Beaker+Agua destilada	1400,00
	Beaker+Agua destilada+Lodo	1402,04
	Lodo	2,04
Volumen (mL)	Agua destilada	1000,00

**Cuadro 83.** Parámetros de calidad para muestra L-02

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Parámetro	Ensayo	No. Prueba	Valor leído	Valor corregido
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	1	No realizado	No realizado
	Nitrito	1	0,000	0,00
	Nitrógeno amoniacal	1	0,130	63,60
	Fósforo	1	0,740	362,04
Grado de contaminación	DQO (mg/L)	1	87,000	87,00
Índices	pH	1	7,620	7,62

**Cuadro 84.** Contenido de materia orgánica para muestra L-02

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

No. Prueba	Masa (g)			Materia orgánica (%)	
	Cápsula	Lodo+Cápsula	Lodo seco+Cápsula	Muestra	Promedio
1	32,724	35,537	32,810	96,943	96,469
2	30,483	36,401	30,720	95,995	
3	31,804	37,259	31,980	96,774	

**Cuadro 85.** Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-07

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

Descripción		Valor
Peso (g)	Beaker+Agua destilada	407,93
	Beaker+Agua destilada+Lodo	413,52
Volumen (mL)	Agua destilada	200,00

**Cuadro 86.** Parámetros de calidad para muestra L-07

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

Parámetro	Ensayo	No. Prueba	Valor leído	Valor corregido
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	1	5,600	200,36
	Nitrito	1	0,008	0,29
	Nitrógeno amoniacal	1	2,650	94,81
	Fósforo	1	1,940	69,41
Grado de contaminación	DQO (mg/L)	1	199,000	39,80
Índices	pH	1	6,000	6,00

**Cuadro 87.** Contenido de materia orgánica para muestra L-07

Fecha de realización: 25 de julio, 2015

No. Prueba	Masa (g)			Materia orgánica (%)	
	Cápsula	Lodo+Cápsula	Lodo seco+Cápsula	Muestra	Promedio
1	31,810	35,630	32,014	94,660	95,058
2	34,955	40,434	35,204	95,455	

**Cuadro 88.** Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-10

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Descripción		Valor
Peso (g)	Beaker+Agua destilada	386,62
	Beaker+Agua destilada+Lodo	396,62
Volumen (mL)	Agua destilada	200,00

**Cuadro 89.** Parámetros de calidad para muestra L-10

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Parámetro	Ensayo	No. Prueba	Valor leído	Valor corregido
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	1	0,700	14,00
	Nitrito	1	0,000	0,00
	Nitrógeno amoniacal	1	0,590	11,80
	Fósforo	1	0,150	3,00
Grado de contaminación	DQO (mg/L)	1	568,000	113,60
Índices	pH	1	5,710	5,71

**Cuadro 90.** Contenido de materia orgánica para muestra L-10

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

No. Prueba	Masa (g)			Materia orgánica (%)	
	Cápsula	Lodo+Cápsula	Lodo seco+Cápsula	Muestra	Promedio
1	30,649	32,954	31,436	65,857	66,367
2	34,933	37,309	35,720	66,877	

**Cuadro 91.** Mezcla de lodo y agua destilada para muestra L-13

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Descripción		Valor
Peso (g)	Beaker+Agua destilada	386,62
	Beaker+Agua destilada+Lodo	396,62
Volumen (mL)	Agua destilada	200,00

**Cuadro 92.** Parámetros de calidad para muestra L-13

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

Parámetro	Ensayo	No. Prueba	Valor leído	Valor corregido
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	1	0,650	12,000
	Nitrito	1	0,001	10,000
	Nitrógeno amoniacal	1	0,580	9,000
	Fósforo	1	0,110	1,000
Grado de contaminación	DQO (mg/L)	1	564,000	105,300
Índices	pH	1	6	6

**Cuadro 93.** Contenido de materia orgánica para muestra L-13

Fecha de realización: 5 de mayo, 2015

No. Prueba	Masa (g)			Materia orgánica (%)	
	Cápsula	Lodo+Cápsula	Lodo seco+Cápsula	Muestra	Promedio
1	31,908	31,971	31,036	64,001	64,00
2	32,467	36,104	34,920	64,040	

## Apéndice 2. Datos de laboratorio de ensayos geotécnicos

**Cuadro 94.** Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-07

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

Descripción	Descripción	Valor
Datos para una temperatura T	Número de picnómetro	31,0
	Masa de picnómetro (g)	167,0
	Masa de picnómetro y lodo (g)	197,1
	Masa de lodo (g)	30,1
	Masa de picnómetro, lodo y agua (g)	672,8
	Temperatura del agua	26,0
	Masa de cápsula para determinar peso seco	393,9
	Masa de cápsula y lodo (g)	1004,1
	Masa de cápsula y lodo seco (g)	408,0
Datos para corrección por humedad	Masa de picnómetro y agua (g)	664,6

**Cuadro 95.** Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-10

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

Descripción	Descripción	Valor
Datos para una temperatura T	Número de picnómetro	36,0
	Masa de picnómetro (g)	168,6
	Masa de picnómetro y lodo (g)	219,7
	Masa de lodo (g)	50,4
	Masa de picnómetro, lodo y agua (g)	686,4
	Temperatura del agua	26,5
	Masa de cápsula para determinar peso seco	422,2
	Masa de cápsula y lodo (g)	1359,4
	Masa de cápsula y lodo seco (g)	466,5
Datos para corrección por humedad	Masa de picnómetro y agua (g)	666,7

**Cuadro 96.** Datos para determinación de gravedad específica de muestra L-13

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

<b>Descripción</b>		<b>Valor</b>
Datos para una temperatura T	Número de picnoméetro	37,0
	Masa de picnoméetro (g)	171,8
	Masa de picnoméetro y lodo (g)	222,6
	Masa de lodo (g)	50,8
	Masa de picnoméetro, lodo y agua (g)	689,6
	Temperatura del agua	26,5
	Masa de cápsula para determinar peso seco	410,0
	Masa de cápsula y lodo (g)	1075,1
	Masa de cápsula y lodo seco (g)	453,8
Datos para corrección por humedad	Masa de picnoméetro y agua (g)	668,9

**Cuadro 97.** Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-07

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

<b>Malla</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Porcentaje retenido (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje pasando (%)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>
No. 3/8	60,1	60,04	60,04	39,96	9,52
No.4	24,80	24,78	84,82	15,18	4,75
No.10	8,00	7,99	92,81	7,19	2,00
No. 40	5,20	5,19	98,00	2,00	0,43
No. 100	1,40	1,40	99,40	0,60	0,15
No. 200	0,40	0,40	99,80	0,20	0,08
Charola	0,20	0,20	100,00	0,00	-
Total	100,1	100,00	-	-	-



**Cuadro 98.** Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-10

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

<b>Malla</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Porcentaje retenido (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje pasando (%)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>
No. 3/8	2,8	0,58	0,58	99,42	9,52
No.4	96,50	19,88	20,46	79,54	4,75
No.10	156,00	32,14	52,60	47,40	2,00
No. 40	197,10	40,61	93,20	6,80	0,43
No. 100	31,80	6,55	99,75	0,25	0,15
No. 200	1,20	0,25	100,00	0,00	0,08
Charola	0,00	0,00	100,00	0,00	-
Total	485,4	100,00	-	-	-

**Cuadro 99.** Datos para determinación de curva granulométrica de muestra L-13

Fecha de realización: 20 al 27 de junio, 2015

<b>Malla</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Porcentaje retenido (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje pasando (%)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>
No. 3/8	11,4	2,98	2,98	97,02	9,52
No.4	178,40	46,63	49,61	50,39	4,75
No.10	140,40	36,70	86,30	13,70	2,00
No. 40	45,00	11,76	98,07	1,93	0,43
No. 100	6,30	1,65	99,71	0,29	0,15
No. 200	1,10	0,29	100,00	0,00	0,08
Charola	0,00	0,00	100,00	0,00	-
Total	382,6	100,00	-	-	-

**Cuadro 100.** Datos de elaboración de suelo S-07

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

<b>Material</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Muestra L-21	2921,6
Cemento	292,0
Agua	Variable para cada pastilla

**Cuadro 101.** Datos de elaboración de suelo S-10

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

<b>Material</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Muestra L-11	2500,00
Cemento	250,00
Agua	Variable para cada pastilla

**Cuadro 102.** Datos de elaboración de suelo S-13

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

<b>Material</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Muestra L-14	3204,4
Cemento	320,0
Agua	Variable para cada pastilla

**Cuadro 103.** Dimensiones de molde metálico para prueba de compactación

<b>Dimensión</b>	<b>Valor</b>
Diámetro (cm)	10,20
Altura (cm)	11,90
Volumen (cm <sup>3</sup> )	972,38
Masa de molde sin anillo (g)	4377,90

**Cuadro 104.** Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-07

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

Pastilla	Masa (g)			Humedad de compactación (%)
	Cápsula	Cápsula+Suelo artificial	Cápsula+Suelo artificial seco	
1	55,3	98,7	90,0	25,3
2	52,1	102,0	86,0	47,2
3	54,5	86,7	74,8	58,6
4	55,4	80,6	68,7	89,5
5	55,5	115,4	84,9	103,7
6	56,5	102,3	77,2	121,3
7	55,7	117,6	81,2	142,7

**Cuadro 105.** Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-10

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

Pastilla	Masa (g)			Humedad de compactación (%)
	Cápsula	Cápsula+Suelo artificial	Cápsula+Suelo artificial seco	
1	54,5	110,0	100,0	22,0
2	53,0	105,0	93,0	30,0
3	53,5	117,7	98,1	46,0
4	54,4	101,9	81,0	78,6
5	56,1	182,5	122,3	90,9
6	55,6	118,5	84,8	115,4

**Cuadro 106.** Datos para determinar humedad de pastillas de muestra S-13

Fecha de realización: 23 de julio, 2015

Pastilla	Masa (g)			Humedad de compactación
	Cápsula	Cápsula+Suelo artificial	Cápsula+Suelo artificial seco	
1	53,0	110,0	102,5	15,2
2	57,0	75,8	70,5	39,3
3	54,4	85,0	71,3	81,1
4	56,3	98,1	76,4	108,0
5	53,3	92,5	70,1	133,3

### Apéndice 3. Memoria de cálculo

#### Obtención de curva de secado en planta de tratamiento

Para obtener el tiempo de secado en planta de tratamiento para determinada humedad, se realiza la corrección de las pendientes de los tiempos de secado determinados en el horno. Esto permite obtener una curva de secado en planta de tratamiento de manera teórica. Para esto se debe calcular la pendiente de la curva de secado en planta de tratamiento, utilizando los datos conocidos (humedades de muestra L-01, L-02 y L-03):

$$m_1 = \frac{\Delta w}{\Delta t_1} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Ahora, se calcula la pendiente de la recta para un punto determinado de la curva de secado en horno:

$$m_2 = \frac{\Delta w}{\Delta t_2} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Y se despeja la siguiente ecuación:

$$\Delta t'_2 = \frac{\Delta w}{m_1} = \left( \frac{m_2}{m_1} \right) \Delta t^2 \quad \text{[Ecuación 5]}$$

El cálculo se repite para cada punto de humedad y finalmente se obtiene la curva de secado en planta de tratamiento de manera teórica. Estos resultados se muestran en Cuadro 26.

#### Cálculo de gravedad específica

Con el fin de determinar la gravedad específica del lodo, se realiza el ensayo de laboratorio normado por ASTM D-854, con lo cual se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 35. Estos resultados se obtienen a partir de los procedimientos realizados en laboratorio y los cálculos mostrados a continuación. En secciones anteriores, se indicó que la gravedad específica corresponde a la relación entre el peso unitario del agua y del material estudiado:

$$G_s = \frac{\text{Peso unitario de sustancia} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Peso unitario de agua} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

En el laboratorio, esto se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_1 - W_2} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

$W_s$ : Peso seco del lodo después del horno (g)

$W_1$ : Peso del picnómetro y el agua según su calibración (g)

$W_2$ : Peso del picnómetro con muestra de lodo y agua hasta marca de calibración (g)

Los datos anteriores son obtenidos de los ensayos de laboratorio. Para ejemplificar el cálculo, se utilizan los datos de la muestra L-07:

$$G_{s(T)} = \frac{(408,0 - 393,9)\text{g}}{(408,0 - 393,9)\text{g} + 664,6 - 672,8} = 2,38$$

### **Cálculo de curva granulométrica**

Con el fin de obtener el porcentaje pasando de la fracción gruesa, se siguen los siguientes pasos, los cuales están ejemplificados con la muestra L-07.

$$W_s = (W_c + W_s) - W_c \quad [\text{Ecuación 8}]$$

$$\text{Masa de suelo retenida} = 595,4 \text{ g} - 535,3\text{g} = 60,1 \text{ g}$$

Conociendo la masa retenida se puede calcular el porcentaje retenido de la siguiente forma:

$$\% \text{Retenido} = \left( \frac{W_{\text{retenido}}}{W_{\text{muestra original}}} \right) * 100 \quad [\text{Ecuación 9}]$$

$$\% \text{Retenido} = \left( \frac{60,1\text{g}}{100,1} \right) * 100 = 60,04\%$$

A partir del porcentaje retenido se calcula el porcentaje retenido acumulado:

$$\text{Porcentaje retenido acumulado} = \sum \text{Retenido hasta la malla específica} \quad [\text{Ecuación 10}]$$

$$\text{Porcentaje pasando} = 100\% - \text{Porcentaje Retenido Acumulado} \quad [\text{Ecuación 11}]$$

$$\text{Porcentaje pasando} = 100 - 60,04 = 39,96\%$$

El mismo procedimiento se realiza con cada una de las mallas utilizadas.

### **Procedimiento de clasificación de suelo**

Para clasificar el lodo residual se utiliza el sistema de clasificación SUCS, para lo cual se consideró el procedimiento descrito a continuación. Se utiliza la muestra de lodo residual L-07 para ejemplificar el proceso.

Primero, se determina el porcentaje pasando el tamiz No.4, este corresponde a 15% del material por lo tanto el suelo se clasifica como grava; luego se determina su porcentaje pasando el tamiz No.200 para clasificar si el suelo se encuentra limpio o con finos, en este caso el suelo clasifica como limpio. Ahora, para determinar si se encuentra bien o mal gradado, se determinan los coeficientes de uniformidad y curvatura,  $C_u$  y  $C_c$ , respectivamente:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{10 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 3,3$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{7,5 \text{ mm}^2}{3 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}} = 1,875$$

Los coeficientes de uniformidad y curvatura indican que el lodo L-07 corresponde a grava mal gradada en el sistema de clasificación SUCS.

Respecto al sistema de clasificación AASHTO, el proceso de clasificación simplemente consiste en contraponer la granulometría de la muestra de suelo para compararla con las granulometrías típicas del sistema.

### **Cálculo de curva de compactación**

Para realizar la curva de compactación se utiliza el procedimiento descrito a continuación, el cual se ejemplifica con la muestra S-07. Primero, se calcula el volumen que es contenido por el molde, conociendo las dimensiones del molde mostradas en el Cuadro 103:

$$V = \left( \frac{\text{Diámetro de molde}}{2} \right)^2 * \pi * \text{Altura de molde}$$

$$V = \left( \frac{10,20}{2} \right)^2 * \pi * 11,90 = 972,38 \text{ cm}^3$$

Al realizar las pastillas de compactación, se debe determinar la masa de suelo húmedo compactado, de la siguiente manera:

$$\text{Masa}_{\text{suelo húmedo compactado}} = \text{Masa}_{\text{suelo húmedo compactado +molde}} - \text{Masa}_{\text{molde}} \quad [6]$$

$$\text{Masa}_{\text{suelo húmedo compactado}} = 5145,00 \text{ g} - 4377,90\text{g} = 767,10 \text{ g}$$

Conociendo estos datos se puede determinar la densidad húmeda para la muestra de suelo compactada:

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \frac{\text{Masa}_{\text{suelo compactado húmedo}}}{\text{Volumen}_{\text{suelo compactado húmedo}}} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \frac{767,10 \text{ g}}{972,38 \text{ cm}^3} = 788,9 \text{ kg/m}^3$$

Ahora, de la muestra compactada se debe determinar su porcentaje de humedad:

$$M_{\text{suelo húmedo}} = M_{\text{suelo húmedo +cápsula}} - M_{\text{cápsula}}$$

$$M_{\text{suelo húmedo}} = 98,7\text{g} - 55,3\text{g} = 43,4\text{g}$$

$$M_{\text{suelo seco}} = M_{\text{suelo seco + cápsula}} - M_{\text{cápsula}}$$

$$M_{\text{suelo seco}} = 90,00\text{g} - 55,3\text{g} = 34,7\text{g}$$

Además se determina el porcentaje de humedad:

$$\%W = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{suelo seco}}} * 100 \quad [11]$$

$$\%W = \frac{8,77\text{g}}{34,7\text{g}} * 100 = 25,3 \%$$

Conociendo los contenidos de humedad y la densidad húmeda, se puede calcular la densidad seca de la siguiente manera:

$$\gamma_{\text{seca}} = \frac{\gamma_{\text{húmeda}}}{\left(1 + \frac{\text{Porcentaje de humedad}}{100}\right)} \quad [\text{Ecuación 13}]$$

$$\gamma_{\text{seca}} = \frac{788,9 \text{ kg/m}^3}{\left(1 + \frac{25,3 \text{ \%}}{100}\right)} = 629,8 \text{ kg/m}^3$$

Con el fin de determinar la humedad óptima para obtener la máxima densidad seca se realiza la curva de compactación, donde se utilizan como parámetros los valores de densidad seca y de porcentaje de humedad, los cuales fueron calculados como se explicó anteriormente. Se trazan dos curvas que se intersecan entre sí y luego se realiza una curva suave en la envolvente de la intersección; de ésta gráfica es posible tomar el punto máximo de la curva como la densidad seca máxima y el porcentaje de humedad máximo asociado; para obtener la humedad óptima se utiliza el método gráfico descrito, pero debe coincidir con el valor calculado al igualar las ecuaciones de las dos curvas para obtener la intersección, tal como se muestra:

$$2,254x + 572,92 = -2,2967x + 790,56$$

$$W_{\text{óptima}} = x = 47,8 \%$$



También se elabora la Curva de Saturación Teórica utilizando los valores de la densidad seca y el contenido de humedad para la saturación completa, el cual se calcula:

$$W_{\text{saturada}} = \frac{\text{Densidad}_{\text{agua}} * G_{\text{suelo}} - \text{Densidad}_{\text{seca del suelo}}}{G_{\text{suelo}} * \text{Densidad}_{\text{seca del suelo}}} * 100 \text{ [Ecuación 14]}$$

$$W_{\text{saturada}} = \frac{1 * 2.39 - 629,8 \text{ kg/m}^3}{2.39 * 629,8 \text{ kg/m}^3} * 100 = 116,9\%$$

Los resultados del resto de muestra se encuentran en la sección 5.4.1 Proctor Estandar (ASTM D-698).

### **Cálculo de ángulo de fricción y resistencia cortante**

Para el cálculo de la resistencia cortante, es necesario determinar los esfuerzos cortantes y normales bajo distintas condiciones de carga. Tal como se indicó anteriormente, se realizaron ensayos bajo dos condiciones de carga, y dos pruebas para cada carga. Debido a que se tienen dos valores para cada punto, se utiliza un valor promedio.

Los valores de esfuerzo cortante se determinan a partir de las curvas de esfuerzo y deformación, de donde se determina el esfuerzo cortante máximo; mientras que el esfuerzo normal se calcula considerando la carga utilizada y el peso adicional debido al equipo de corte directo.

Esto se ejemplifica para una carga de 15 kg; a la carga seleccionada se le debe agregar el peso debido al equipo:

$$\text{Carga total} = \text{Carga aplicada} + \text{Equipo de corte}$$

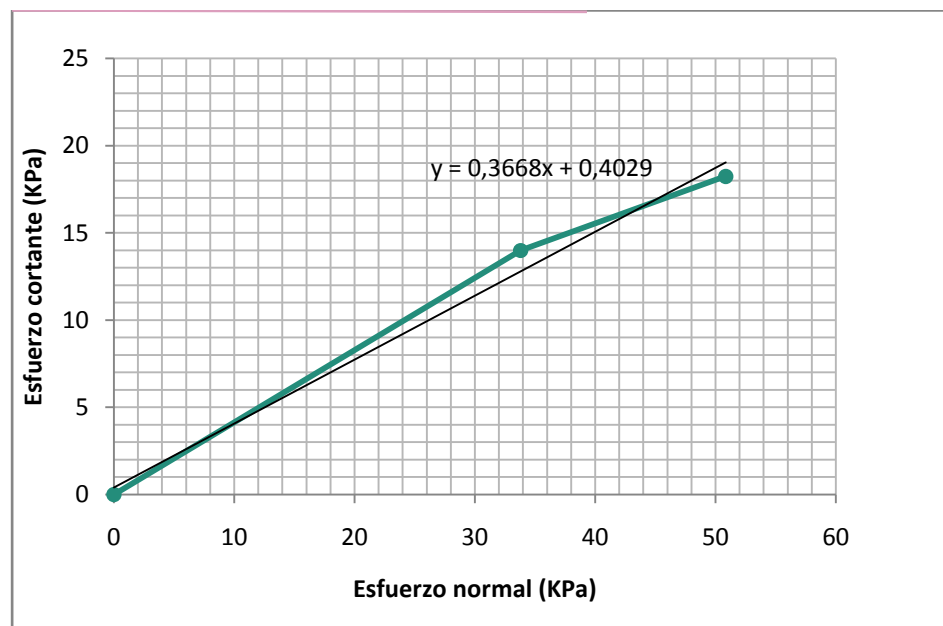
$$\text{Carga total} = 15\text{kg} + 0,168 \text{ kg} = 15,168 \text{ kg} = 148,75 \text{ N}$$

Conociendo el área de la probeta utilizada, se calcula el esfuerzo normal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{148,75 \text{ N}}{29,99 \text{ cm}^2} = 4,95 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 49,59 \text{ kPa}$$

El esfuerzo promedio al considerar los resultados de la segunda prueba realizada, es de 50,83 KPa con una desviación estándar de 1,77; mientras que el esfuerzo cortante promedio es de 18,25 KPa con una desviación estándar de 0,21. El procedimiento se repite con los resultados de la carga de 10kg y se obtiene un esfuerzo cortante promedio de 14,00 KPa con desviación estándar de 1,84 y un esfuerzo normal asociado de 33,80 KPa con una desviación estándar de 0,83. Conociendo estos datos, se puede realizar un gráfico de los esfuerzos cortantes y normales, tal como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 60.** Recta de mejor ajuste de esfuerzo cortante y normal

Utilizando la recta de mejor ajuste es posible determinar el ángulo de fricción, el cual es de  $20,74^\circ$  y el valor de cohesión es de 0, típico de las arenas.

## ANEXOS

### Anexo 1. Antecedentes de la investigación

“Caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial. (Rivera J., 2012)”

**Cuadro 107.** Resumen de resultados, Rivera (2012)

Parámetro	Muestra					
	PTH		PTH			
Cemento (%)	0,00	30,00	0,00	10,00	20,00	30,00
Humedad (%)	60,90	-	20,10	-	-	-
Gravedad específica	2,01	-	2,05	-	-	-
Límite plástico (%)	90	79	37	39	41	41
Límite líquido (%)	104	90	51	43	43	42
Humedad óptima (%)	-	57,00	-	34,00	34,00	31,00
Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	-	1405,00	-	1282,00	1282,00	1345,00
Esfuerzo máximo (Kpa)	-	158,23	-	252,82	315,81	359,41
Fósforo (mg/l)	0,84	-	> 0,9	-	-	-
Fósforo reactivo (mg/l)	1,93	-	> 2,05	-	-	-
Nitrato (mg/l)	0,00	-	0,64	-	-	-
Nitrito (mg/l)	2,04	-	< 0,385	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	>3,3	-	> 3,3	-	-	-
Cobre (mg/l)	0,0065	-	0,0232	-	-	-
Arsénico (mg/l)	0,001	-	0,0609	-	-	-
Mercurio (mg/l)	0,0298	-	0,001	-	-	-
Cadmio (mg/l)	0,0026	-	0,001	-	-	-
Plomo (mg/l)	0,0045	-	0,0055	-	-	-
Carga orgánica (g)	18,71	-	3,19	-	-	-
pH	5,30	-	4,00	-	-	-
DQO (mg/l)	221,00	-	51,00	-	-	-
DBO (mg/l)	12,00	-	0,00	-	-	-

Fuente: Rivera, 2012

