

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES”

TEMA:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE INDUSTRIAL PARA
Lodos DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS
RESIDUALES”**

AUTOR:

DANNY OSWALDO GARCÍA TAPIA

Guayaquil - Ecuador

2018

RESUMEN

El presente proyecto de investigación, se enfoca en la necesidad de buscar alternativas sustentables para la disposición de desechos sólidos, como son lodos generados en Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), para la comuna de Tenguel en la provincia del Guayas.

Las cantidades de lodo a tratar se estimaron desde su origen y cantidades a tratar, utilizando metodología técnica para tratamiento de aguas residuales domésticas. Para el tratamiento idóneo del lodo, se investigaron técnicas utilizadas en otros países que ya poseen una vasta experiencia en el Tratamiento Mecánico Biológico (MBT), que sirvan de referencia para el medio local.

El dimensionado del proceso de compostaje, partió desde la técnica escogida de Pilas Aireadas Estáticas (ASP), después se determinó la razón óptima de C/N, requerimientos de humedad, y cantidades óptimas de sustratos mezcla.

Seguido a esto se calcularon los requerimientos de aireación por oxidación, humedad y calor, partiendo de metodologías como estequiometría, y capacidad calorífica, la presión necesaria se estimó a base de la teoría de mecánica clásica de fluidos y comportamiento de flujo del aire a través de lechos de materia orgánica.

Finalmente, el arreglo de la planta se determinó con el tamaño y número de las pilas necesarias, el diseño de la pila, el sistema de aireación, los equipos de transporte y mezclado, los espacios requeridos para compostaje, curado y almacenaje del sustrato final, además de las áreas administrativas para su óptima operación.

Palabras Clave: PTAR, desecho sólido, ASP, MBT, C/N, Tenguel

ABSTRACT

The present research project focuses on the need to look for sustainable alternatives for the disposal of solid waste, such as sludge generated in Wastewater Treatment Plants (WWTP), for the Tenguel commune in the province of Guayas.

The quantities of sludge to be treated were estimated from their origin and quantities to be treated, using technical methodology for domestic wastewater treatment. For the ideal treatment of the mud, techniques used in other countries that already have a vast experience in the Biological Mechanical Treatment (MBT), which serve as reference for the local environment, were investigated.

The sizing of the composting process started from the chosen technique of Static Aerated Pipes (ASP), after which the optimum C / N ratio, moisture requirements and optimum amounts of mixed substrates were determined.

Following this, the aeration requirements for oxidation, humidity and heat were calculated, starting from methodologies such as stoichiometry, and heat capacity, the necessary pressure was estimated based on the theory of classical fluid mechanics and airflow behavior through beds of organic matter.

Finally, the arrangement of the plant was determined with the size and number of batteries required, the design of the pile, the aeration system, the transport and mixing equipment, the spaces required for composting, curing and storage of the final substrate, besides the administrative areas for its optimal operation

Keywords: WWTP, Solid Waste, ASP, MBT, C/N ratio, Tenguel,

DEDICATORIA

A Dios por su grandeza y sabiduría ya que todo este mundo es parte de su creación y solo somos aprendices para poder entender su obra universal. A mi madre que siempre dedicó su esfuerzo en sus horas más cansadas a enseñarme a ser una persona íntegra llena de valores y principios. A mi esposa Norma por darme la alegría de siempre contar con su ayuda en los momentos más difíciles de nuestro hogar. A mis hijos Alejandro (+), Daniela y Sebastián que me llenan de esperanza para poder continuar en esta aventura tan corta que se llama vida.

Danny García

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional durante toda esta carrera académica.

A los profesores de la Maestría en Ciencias Ambientales por compartir su conocimiento en cada clase asistida para que logre ser un profesional más preparado que pueda contribuir al desarrollo del Ecuador.

Agradezco además a mi tutor de proyecto, Alby Aguilar Ing. Msc. por su contribución y guía en cada capítulo de este proyecto de graduación.

En fin, agradezco a todas las personas involucradas en mi proyecto de graduación que de forma directa o indirecta fueron mi inspiración para poder culminar este maravilloso logro académico.

Danny García

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponden exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponden exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Química** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.



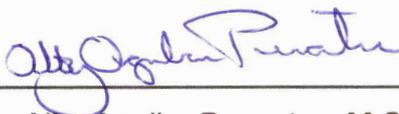
Danny Oswaldo García Tapia

Autor

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Nadia Flores Manrique, M.Sc.
Presidente del Tribunal



Alby Aguilar Pesantes, M.Sc.
Director de Proyecto de Titulación



Ángel Ramírez Mosquera, Ph.D
Vocal

FIRMA DEL AUTOR



Danny Oswaldo García Tapia

ABREVIATURAS O SIGLAS

<i>AC</i>	Aportes comerciales
<i>AD</i>	Aporte domestico
<i>AI</i>	Aportes industriales
<i>AIT</i>	Aportes institucionales
<i>ASP</i>	Pilas aireadas estáticas
<i>BVS</i>	Solidos volátiles biodegradables
<i>C/N</i>	Razón carbono nitrógeno
<i>CO</i>	Carga orgánica
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>DBO</i>	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>Dot</i>	Consumo por habitante
<i>F</i>	Factor de caudal pico
<i>FSS</i>	Solidos suspendidos fijos
<i>INEC</i>	Instituto Nacional de Estadística y Censos
<i>m.c.a.</i>	Metros de columna de agua
<i>Mol</i>	Moles
<i>P</i>	Población servida
<i>PTAR</i>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
<i>P_x</i>	Producción de lodos
<i>Q</i>	Caudal
<i>QCE</i>	Aportaciones por conexiones erradas
<i>Q_i</i>	Caudal por infiltración
<i>Q_{lodo}</i>	Caudal de lodo
<i>Q_{MD}</i>	Caudal medio diario de aguas residuales
<i>Q_{MH}</i>	Caudal máximo horario
<i>Q_n</i>	Caudal de diseño
<i>Q_{trat}</i>	Caudal de tratamiento
<i>R</i>	Coefficiente de retorno
<i>r</i>	Tasa de crecimiento
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>RH</i>	Humedad relativa
<i>S</i>	Concentración de DBO5 sustrato efluente
<i>S_o</i>	DBO5 del sustrato afluente
<i>SS</i>	Sólidos suspendidos
<i>TSS</i>	Sólidos suspendidos Totales
<i>TULAS</i>	Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria
<i>US EPA</i>	United states environmental protection agency
<i>USDA</i>	United States Department of Agriculture
<i>V_d</i>	Volumen del digester de lodos
<i>VSS</i>	Solidos suspendidos volátiles
<i>w</i>	Humedad específica
<i>Y</i>	Factor de rendimiento
<i>γ_{agua}</i>	Peso específico del agua

ρ_{lodo} Gravedad específica del lodo

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1.1	Introducción 1
1.2	Antecedentes 3
1.3	Planteamiento del problema 6
1.4	Justificación 7
1.5	Alcance 8
1.6	Objetivos del Proyecto 9
1.6.1	Objetivos específicos 9
1.7	Metodología 9
CAPÍTULO II	11
2.1	Marco Teórico 11
2.1.1	Definición de lodo 11
2.1.2	Origen de los lodos 11
2.1.3	Cantidades de lodos producidas 18
2.1.4	Compostaje de desechos sólidos 21
2.1.5	Origen y fundamentos del compostaje 23
2.1.6	Sistemas de compostaje 26
2.1.7	Técnicas de compostaje 28
2.1.7.1	Pilas aireadas o estáticas 30
2.1.7.2	Pilas estáticas con aireación forzada 32
2.1.7.3	Compostaje en Contenedor/Túnel/Bolsa 35
2.1.7.4	Silos/Reactores verticales 36
2.1.7.5	Pilas volteadas 37
2.1.7.6	Cama agitada 39
2.1.7.7	Compostaje en tambor 40
2.1.8	Criterios de Selección Sistema de Compostaje 42
2.1.9	Gestión de residuos sólidos 43
2.1.10	Marco legal en Ecuador 44
CAPÍTULO III	46
3.1	Metodología 46
3.2	Área de estudio 46
3.3	Datos de Diseño 48

3.3.1	Año horizonte de proyección de diseño	49
3.3.2	Caudal de población a servir	49
3.3.2.1	Aporte doméstico AD	49
3.3.2.2	Factor o coeficiente de retorno R	50
3.3.2.3	Consumo por Habitante dot	50
3.3.2.4	Población P y Tasa de crecimiento r	50
3.3.2.5	Aportes comerciales AC	52
3.3.2.6	Aportes industriales AI	52
3.3.2.7	Aportes institucionales AIT	52
3.3.3	Caudal medio diario de aguas residuales Q_{MD}	53
3.3.4	Caudal máximo horario Q_{MH}	53
3.3.4.1	Factor de caudal pico	53
3.3.5	Caudal por infiltración Q_i	54
3.3.6	Aportaciones por conexiones erradas Q_{CE}	54
3.3.7	Caudal de diseño Q_n	55
3.3.8	Caudal de tratamiento Q_{Trat}	56
3.3.9	Cálculo de cantidad de lodos a producirse	57
3.3.9.1	Filtro Percolador	69
3.3.9.2	Digestor de Lodos	76
3.3.9.3	Masa de sólidos secos	81
3.3.9.4	Volumen de lodos efluente	82
3.3.9.5	Área superficial del deshidratador	84
3.4	Compostaje de desechos por pilas dinámicas	84
3.5	Flujograma de proceso de compostaje de lodos	85
3.6	Caracterización del material a compostar	87
3.7	Contenido de humedad y razón C/N	89
3.7.1	Cálculo de contenido de Humedad	89
3.7.2	Razón C / N	92
3.8	Requerimientos de aire	98
3.8.1	Requerimiento de aire por estequiometría	99
3.8.2	Requerimiento de aire por remoción de agua	112
3.8.3	Demanda de aire por remoción de calor	119
3.8.4	Tasa de aireación	122
3.9	Pérdida de carga en el sistema de compostaje	124
3.9.1	Pérdida de carga o energía en sistema de tuberías	124
3.9.2	Pérdida de carga en el sustrato	131

3.10	Diseño de la pila	138
3.9.3	Tamaño y número de pilas	138
3.11	Infraestructura y equipos necesarios.....	141
3.11.1	Zona de recepción	141
3.11.2	Área de compostaje o fermentación	142
3.11.3	Área de Control de olores	143
3.11.4	Área de maduración	144
3.11.5	Balsa de lixiviados	145
3.11.6	Sistema de riego.....	146
3.11.7	Área de almacenaje y distribución	147
3.11.8	Área administrativa	148
3.11.9	Equipos y maquinaria	149
CAPÍTULO IV		153
4.1	Análisis de resultados	153
4.1.1	Cantidades de lodos generados	153
4.1.2	Sustratos a mezclar	153
4.1.3	Energía y cantidad de aire	155
4.1.4	Equipamiento y diseño de la instalación	156
4.1.5	Costos	156
CAPÍTULO V		157
5.1	Conclusiones	157
5.2	Recomendaciones	159
Referencias		160
Anexos.....		165

LISTADO DE FIGURAS

Ilustración II.1 Diagrama de tratamiento primario	13
Ilustración II.2 Diagrama de tratamiento secundario	15
Ilustración II.3 Balance masas SS y DBO sistema tratamiento agua residual ..	20
Ilustración II.4 Temperaturas alcanzadas según fases de compostaje	21
Ilustración II.5 Detalle de pila estática con aireación por convección	31
Ilustración II.6 Compostaje de pila estática con aireación forzada	32
Ilustración II.7 Sistema de pila estática aireada extendida	34
Ilustración II.8 Contenedores de compostaje	35
Ilustración II.9 Sistema de compostaje por silo en Portlad Oregon.....	36
Ilustración II.10 Compostaje de pila estática con máquina volteadora	37
Ilustración II.11 Planta de compostaje de cama agitada	40
Ilustración II.12 Esquema de compostaje de tambor giratorio horizontal.....	41
Ilustración III.1 Área del estudio, parroquia Tenguel	47
Ilustración III.2 Relación tiempo de retención Vs % de remoción	64
Ilustración III.3 Partes de un filtro percolador	69
Ilustración III.4 Esquema de biopelícula formada en el filtro percolador	70
Ilustración III.5 Esquema de proceso de filtro de etapa simple.....	73
Ilustración III.6 Diagrama de proceso de compostaje de lodos	86
Ilustración III.7 Diagrama general balance de masas para compostaje.....	113
Ilustración III.8 Humedad específica en función de la temperatura	114
Ilustración III.9 Sección típica de filtro de pila para método ASP.....	122
Ilustración III.10 Arreglo de tubería para método ASP	123
Ilustración III.11 Esquema de pila de compostaje	128
Ilustración III.12 Gradiente de presión bagazo caña+ estiércol ave	134
Ilustración III.13 Gradiente de presión cáscara de café + estiércol ave	134

Ilustración III.14 Imagen del ventilador seleccionado	137
Ilustración III.15 Arreglo de pila para método ASP	138
Ilustración III.16 Dimensión de pila seleccionada	139
Ilustración III.17 Distribución de aire en pila para método ASP	139
Ilustración III.17 Forma de condensar la humedad del aire en pila ASP	140
Ilustración III.17 Espesor de cubierta en pila por método ASP	140
Ilustración III.17 Detalle de la tubería en pila por método ASP	141
Ilustración III.21 Zona de recepción y mezclado técnica ASP	142
Ilustración III.17 Zona de fermentación técnica ASP	143
Ilustración III.17 Esquema de funcionamiento de un biofiltro	144
Ilustración III.17 Área de maduración para técnica ASP	145
Ilustración III.17 Balsa de lixiviados para técnica ASP	146
Ilustración III.17 Técnica de riego para sistema ASP	147
Ilustración III.17 Área de maduración para técnica ASP	148
Ilustración III.17 Área administrativa propuesta	149
Ilustración III.21 Equipo triturador	150
Ilustración III.21 Equipo pala mecánica	151
Ilustración III.21 Equipo criba de tambor rotatorio	152

LISTADO DE TABLAS

Tabla II-1. Lodos comunes generados en agua cruda y agua residual	12
Tabla II-2. Población y tasa de producción de lodos miembros UE 2003	19
Tabla II-3. Criterios de la selección según método de compostaje	43
Tabla III-1. Parámetros de partida de caudales a tratar	48
Tabla III-2. Evolución de tasa de crecimiento poblacional de Tenguel	51
Tabla III-3. Caudales típicos para conexiones erradas.....	55
Tabla III-4. Caudal de diseño para el año 2029.....	56
Tabla III-5. Caudal de diseño para el año 2045.....	57
Tabla III-5. Composición físico química típica de agua residual domestica	59
Tabla III-6. Resumen de cargas contaminantes	61
Tabla III-7. Cargas contaminantes definidas para el diseño	61
Tabla III-8. Concentración carga contaminante del agua de efluente.....	62
Tabla III-9. Carga contaminante de ingreso	63
Tabla III-10. Valores de las constantes empíricas a y b	65
Tabla III-11. Eficiencia de remoción año 2029 para DBO_5	65
Tabla III-12. Eficiencia de remoción año 2029 para SST	65
Tabla III-13. Eficiencia de remoción año 2045 para DBO_5	66
Tabla III-14. Eficiencia de remoción año 2045 para SST	66
Tabla III-15. Carga contaminante removida por el clarificador primario.....	67
Tabla III-16. Carga contaminante de salida en clarificador primario	68
Tabla III-17. Criterios de diseño para filtros percoladores	71
Tabla III-18. Carga contaminante para el caudal medio año 2045	73
Tabla III-19. Parámetros filtro percolador sin recirculación año 2045	74
Tabla III-20. Parámetros filtro percolador con recirculación año 2045.....	75
Tabla III-21. Carga contaminante de SST a la salida año 2045	76

Tabla III-22. Datos de entrada digestor de lodos año 2045	77
Tabla III-22. Parámetros operacionales coeficientes cinéticos digestor	78
Tabla III-23. Coeficientes cinéticos típicos en agua residual doméstica	79
Tabla III-24. Porcentaje de N, C y % humedad de ciertos materiales.....	88
Tabla III-25. Detalle de mezcla requerida para compostaje lodo residual.....	96
Tabla III-25. Resumen mezcla requerida según calculadora de compostaje	97
Tabla III-26. Masa atómica de los elementos del sustrato.....	99
Tabla III-27. Cantidades de O ₂ y CO ₂ por reacción de sustrato.....	102
Tabla III-28. Composición en porcentaje para Gallinaza y Estiércol.....	102
Tabla III-29. Composición química elemental de Gallinaza y Estiércol.....	104
Tabla III-30. Requerimiento molar de O ₂ y CO ₂ para mezcla de sustrato	104
Tabla III-31. Requerimiento en g de O ₂ para oxidación total del sustrato	105
Tabla III-32. Requerimiento kg de O ₂ para componentes del sustrato	105
Tabla III-33. Datos de sustrato a compostar madera.....	108
Tabla III-34. Datos de sustrato degradante hongo	108
Tabla III-35. Coeficientes de oxidación de compuestos resultantes	109
Tabla III-36. Requerimiento g O ₂ / g sustrato oxidación madera-hongo	110
Tabla III-37. g O ₂ / g sustrato promedio para oxidación madera-hongo.....	111
Tabla III-38. Requerimiento de g O ₂ para compostaje.....	111
Tabla III-39. Valores para sólidos totales (S) y sólidos volátiles (V)	115
Tabla III-40. Volumen de aire necesario por sustrato a compostar.....	117
Tabla III-41. Aire requerido total por remoción de humedad.....	118
Tabla III-42. Aire requerido total para remoción de calor.....	121
Tabla III-43. Aire requerido total para remoción de calor.....	121
Tabla III-44. Parámetros para el arreglo de tuberías	124
Tabla III-45. Factores de fricción para accesorios	127
Tabla III-46. Modelos resultantes según ecuación de Shedd	133

Tabla III-47. Modelo de ventilador seleccionado137

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

El presente proyecto propone un diseño para un sistema de compostaje industrial para lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales, el cual abarca un problema actual en la sociedad, que trae consecuencias negativas en la salud, calidad de vida y medio ambiente, y que es derivado de una mala disposición de lodos de desecho. Este desecho es un subproducto generado en los procesos de las plantas de tratamiento municipales, industrias alimenticias, agropecuarias, etc. y constituye un desafío para el manejo adecuado de residuos y su disposición final. El uso de tecnologías obsoletas no amigables con el medio ambiente, la falta de recursos o nuevas técnicas de tratamiento de desechos son limitantes para la adecuada gestión de los lodos.

Los desechos generados por los conglomerados urbanos se componen por desechos sólidos y aguas residuales urbanas, para este último componente existe una amplia variedad de sistemas de tratamiento para efluentes, cada uno con diferentes técnicas, infraestructuras y eficiencias. La mayoría de las técnicas de tratamiento de agua residual tiene en común la generación de lodos o fangos resultantes de estos tratamientos. Los lodos producidos en las diferentes etapas y procesos del tratamiento suelen ser de consistencia líquida o semisólida con contenidos de humedad variable. El porcentaje de materia sólida que se puede encontrar en los lodos está en el rango del 0.5% al 10% (F. Dilek Sanin, 2011). Sin embargo, se debe caracterizar el tipo de lodo antes de empezar un tratamiento. Los lodos generados del tratamiento de aguas residuales urbanas son muy diferentes a los lodos generados por una procesadora de pescado o una procesadora de aceite de palma, es decir, las características del lodo dependerán del tipo y origen de las aguas que fueron tratadas.

La correcta disposición final de los lodos generados por las plantas de tratamiento de agua es un problema complejo al que se debe atender de forma

adecuada y con conocimientos avanzados en este campo. Aunque en la actualidad, la gestión de este tipo de residuo puede ser su disposición en un relleno sanitario o la combustión para la generación de energía; estas operaciones tienen como consecuencias el requerimiento de cada vez mayor cantidad de tierra para el uso de rellenos sanitarios y la contaminación del aire por combustión de materia con poco poder calórico como es el lodo. De lo antes expuesto, se hace imperativo realizar la investigación de nuevas tecnologías que permitan la revalorización de residuos con la consecuente generación de subproductos a partir de un desecho y de esta forma alcanzar una economía circular.

La investigación de esta problemática actual se realizó por el interés en la búsqueda de un método para el tratamiento de lodos de desecho que conlleve a la revalorización del desecho y a su utilización en un nuevo proceso. Los nuevos complejos o Plantas de Tratamiento de Agua Residual Urbana (*PTAR*) de gran envergadura que se establecerán en la ciudad gestionadas por el gobierno local, como *PTAR* Esclusas y *PTAR* Merinos que se localizarán al sur y al norte de la ciudad respectivamente, que gestionarán aproximadamente el 80% de las aguas residuales de la urbe. Elevarán de forma considerable la producción de lodos que deberán gestionarse de forma adecuada, sin contar los lodos generados por instituciones privadas como urbanizaciones, industria agrícola, de alimentos y pecuaria que tendrán que disponer correctamente el desecho lodo.

En el marco teórico metodológico, la investigación se realizó a través una serie de experiencias documentadas en otras ciudades del mundo en el tema del manejo de lodos, en las cuales se pudo encontrar diferentes técnicas para el compostaje de lodos, cada una con sus respectivas ventajas y desventajas. En el ámbito local se recogieron experiencias de las plantas que funcionan en la ciudad y los problemas que se han suscitado durante su operación en el manejo de lodos. En cuanto al diseño de la instalación de tratamiento de lodos, se buscó apoyo en la literatura técnica para la selección del método y equipos adecuados.

Durante la investigación una de las principales limitantes fue la poca experiencia

en el ámbito local en el compostaje de lodos de desecho, por esta razón la mayoría de la investigación se fundamenta en experiencias llevadas a cabo en otros países que sí poseen estándares y legislación para el tratamiento de lodos de desecho a través de la técnica de compostaje.

Finalmente, la propuesta de una instalación funcional según el tipo de lodo a tratarse, en la que se determina su capacidad de tratamiento y equipos necesarios que permita conformarse como una idea inicial de la posible aplicación de esta tecnología en nuestro medio permitiendo ser un punto de partida para la investigación y desarrollo de esta técnica de tratamiento de desechos.

1.2 Antecedentes

El porcentaje de población servida por Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales varía considerablemente acorde a la población de cada país. Las cantidades producidas de lodos en las Plantas de Tratamiento de agua en la sociedad moderna son impresionantes, debido al aumento de la densidad poblacional en las ciudades y que cada vez más personas tienen acceso al sistema de aguas servidas, solo en Estados Unidos la producción de lodos se estimó en alrededor de 7.5 millones de materia seca producida por las plantas de tratamiento para el año 2010 y cada vez más la falta de espacio cercano disponible para rellenos sanitarios y las restricciones por legislaciones ambientales son problemas a los que se enfrentan las ciudades modernas.

La producción de lodos a nivel mundial se encuentra en aumento y está sobrepasando las proyecciones estimadas. Solo en Estados Unidos el aumento de la producción de lodos se debe principalmente a la modernización de las plantas de tratamiento y la legislación ambiental cada vez más rígida. En grandes ciudades donde la disposición de tierra para relleno sanitario es limitada, enfrentar este problema es más crítico.

La información de los métodos de disposición final de los lodos de agua residuales es aún incierta. *“En algunos países europeos la principal práctica es*

el relleno sanitario (50 a 75%), mientras que el resto es dispuesto para agricultura, fertilizante o acondicionamiento de suelos (25 a 35%) o en otras prácticas como restauración de bosques y parques (ISWA's Working Group on Sewage & Waterworks Sludge, 1998)", la incineración de lodos se considera la peor práctica debido a su impacto ambiental y elevado costo.

En los Estados Unidos de América, la Agencia para la Protección del ambiente "United States Environmental Protection Agency (US EPA)" proyecta la disposición producción de lodos o biosólidos según la siguiente tabla

Tabla 1.2. Proyección de porcentaje de lodos uso y disposición final

AÑO	USO BENEFICIO			Total	DISPOSICIÓN FINAL			
	Aplicación al Suelo	Tratamiento Avanzado	Otro Uso Beneficioso		Disposición Superficial Relleno Sanitario	Incineración	Otro	Total
1998	41%	12%	7%	60%	17%	22%	1%	40%
2000	43%	13%	8%	63%	14%	22%	1%	37%
2005	45%	13%	8%	66%	13%	20%	1%	34%
2010	48%	14%	9%	70%	10%	19%	1%	30%

Nota. Recuperado de "Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States", (United States Environmental Protection Agency, 1999), página 35.

Dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales los lodos extraídos pueden llegar a poseer un contenido de sólido que varía entre el 0.5% y el 10% de su peso (F. Dilek Sanin, 2011), según la etapa o proceso en el que se origine, por lo tanto, tienen una condición de semisólido, y es justamente el contenido de agua lo que hace difícil su manejo, existen actualmente diferentes métodos de tratamiento para el lodo como la digestión aerobia y la digestión anaerobia, tratamiento de lodos activados, compostaje, etc., cada tecnología posee ventajas y desventajas, sin embargo el tratamiento adecuado de los lodos puede representar un costo elevado, debido a que se debe remover el agua y su contenido orgánico.

En Ecuador no se posee registro de las cantidades de lodos producidos por plantas de agua residual doméstica o industriales, así como también del tipo de

disposición final que se les da, la modernización y el crecimiento poblacional de grandes ciudades como Guayaquil y Quito apuntan a la construcción plantas de tratamiento de aguas residuales que generarán lodos de desecho y brindarán registros de generación de este tipo de desecho.

La mayoría de las técnicas de tratamiento de agua residual tiene en común la generación de lodos o fangos resultantes de estos tratamientos. Existen diferentes experiencias alrededor del mundo en cuanto a técnicas de gestión de lodos de desecho, el compostaje de lodos es una alternativa de tratamiento óptimo para la media y pequeña escala en plantas de tratamiento de agua residual. Sin embargo *“la calidad del lodo a compostarse juega un papel importante debido al contenido de contaminantes peligrosos como metales pesados y patógenos que influyen en el uso del lodo residual al suelo (Yuang-Song, 2000)”*.

Experiencias en otros países del uso de lodo para compostaje y su uso en agricultura posee detractores, debido a la cantidad de componentes peligrosos que puede llegar a contener el lodo, esto es porque en las plantas de tratamiento se mezclan un sinnúmero de sustancias utilizadas por los usuarios de la red de agua de alcantarillado, un reporte presentado por la *National Research Council NRC* en el 2002, redacta los principales riesgos asociados al uso de lodos de desecho en agricultura, donde define que *“los biosólidos son mezclas complejas que contienen componentes orgánicos e inorgánicos y microorganismos de las aguas residuales de hogares, instalaciones comerciales e industriales, así como compuestos añadidos o formados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, (National Research Council (NRC), 2002)”* por esta razón los lodos deben ser analizados para seleccionar el tratamiento idóneo según su caracterización.

Alrededor del mundo se han estudiado técnicas de compostaje que buscan material de aporte que ayude a acelerar el proceso de compostaje, es así como, el uso de aserrín o materia rica en celulosa en diferentes proporciones ayuda en la eficiencia del proceso, investigaciones en este tema han concluido que el

aserrín puede ser considerado un buen agente de carga para el uso en compostaje de lodos, en otras técnicas los lodos son mezclados con desecho sólidos municipales, se conoce que la variación de la temperatura es clave en la técnica de compostaje, existen técnicas de compostaje como aireación forzada, pilas trapezoidales, reactor cilíndrico, reactor rotatorio, compostaje estático, etc.

En Ecuador, el compostaje es y ha sido utilizado en agricultura para la degradación de los desechos de los cultivos agrícolas, aunque no se tiene registro de las cantidades de materia orgánica que se tratan con esta técnica, la experiencia en la aplicación agrícola es de gran valor como punto de referencia.

Por las razones expuestas anteriormente, las plantas de tratamiento de lodos residuales son diseñadas para reducir los efectos adversos de estos desechos sobre la salud pública y el ambiente.

1.3 Planteamiento del problema

Un tipo de desecho generado por la actividad humana, son los lodos de desecho producidos en las plantas de tratamiento de agua residual urbana. Actualmente en el Ecuador no se tiene registro de la cantidad de lodos generados por el tratamiento de aguas residuales de las grandes ciudades. Esto se debe a que existen pocas plantas de tratamiento de agua residual, las que existen son instalaciones privadas utilizadas en pequeñas urbanizaciones e industrias, de las que no se posee información de la cantidad y disposición final que le dan al lodo que generan.

Normalmente, los lodos generados de los procesos de las plantas de tratamiento se disponen en rellenos sanitarios o vertederos, lo que no soluciona el problema de la disposición final de los lodos, debido a que acortan la vida útil de los rellenos sanitarios y el coste del transporte que a veces se hace por grandes distancias desde las plantas de tratamiento al relleno sanitario.

Los lodos generados de las plantas de tratamiento contienen materia orgánica y

nutrientes que pueden ser aprovechados en otras actividades. Sin embargo, para poder aprovechar o disponer los lodos, deben ser estabilizados para reducir la atracción de vectores, los olores y los riegos a la salud.

La construcción de plantas de tratamiento de gran capacidad en la ciudad de Guayaquil que empezarán su operación en el año 2019 representará un reto para el manejo de desechos de este tipo debido a una mayor cantidad de lodos que se deben disponer de forma adecuada. Lo que hace importante la búsqueda de nuevas alternativas amigables con el medio ambiente en el campo de manejo de residuos sólidos.

1.4 Justificación

Las plantas de tratamiento de agua residual urbana, la industria alimenticia, la agropecuaria, etc., manejan concentraciones considerables de materia orgánica en sus efluentes, que cuando se tratan, generan lodos que tienen generalmente como disposición final el relleno sanitario o bien su incineración como material de combustión para generación térmica y eléctrica. Sin embargo, se deben buscar alternativas amigables con el medio ambiente, pues la disposición en un relleno sanitario no aprovecha el potencial de nutrientes que posee el lodo, mientras que, por otra parte, la incineración del lodo seco como combustible de aporte genera cenizas y emisiones a la atmósfera que sería otro tipo de contaminante a tratar.

Actualmente no existe legislación local clara acerca del manejo de lodos, sin embargo, se resume al lodo como un desecho peligroso especial según sea su origen, para los lodos de plantas de tratamiento estos primero deben ser estabilizados para proceder con su disposición final

La ciudad de Guayaquil cuenta cada vez con más plantas de tratamiento de tamaño mediano y pequeño, que se han desarrollado en los complejos habitacionales como las urbanizaciones privadas, además de la industria alimenticia avícola, pesquera, camaronera, de embutidos, etc., por lo que a futuro

más plantas de tratamiento se sumarán a la generación de lodos.

En la actualidad se busca modelos de desarrollo sostenible, donde se aproveche de forma amigable todos los elementos que se pueda recuperar y devolverlos al medio ambiente de forma inocua, los minerales básicos contenidos en los residuos orgánicos para el desarrollo de seres vivos como fósforo, potasio, etc., pueden nuevamente volver el ciclo biogénico y nuevamente reusarse en el medio ambiente. Por esta razón el compostaje de lodos es una alternativa que merece especial atención debido a su impacto favorable en el medio ambiente.

1.5 Alcance

EL presente proyecto tiene como finalidad diseñar las instalaciones mínimas necesarias para una planta de compostaje de lodos, que refleje las características y ventajas de utilizar este método de tratamiento de residuos.

El diseño se plantea para servir a la población rural de Tenguel, perteneciente al Cantón Guayaquil con una población estimada de 8000 habitantes, se comenzará con el cálculo de caudal de agua residual afluyente, después se continuará con la estimación de lodos producidos a través del proceso de lodos activados, posteriormente con la cantidad de lodo se procederá con la caracterización del lodo para su compostaje, finalmente la selección del método a utilizar, el dimensionado de la planta, los equipos necesarios y la distribución general de la instalación. Para el desarrollo de esta propuesta se utilizarán como puntos de partida, los análisis típicos de agua residual y lodos municipales encontrados en la literatura técnica debido a la similitud con el agua residual local.

Esta investigación pretende ser una referencia para el diseño de plantas de compostaje a nivel local, que permita conocer las ventajas y desventajas de la tecnología seleccionada. Al final se hará una evaluación teórica de los posibles problemas de operación y mantenimiento de la planta de compostaje de lodos.

1.6 Objetivos del Proyecto

Diseñar una planta de compostaje de lodos como solución alternativa a la disposición final de desechos sólidos actual como lo es el relleno sanitario para los lodos generados en plantas de tratamiento

1.6.1 Objetivos específicos

- a) Tener una alternativa para la gestión de los desechos generados por las plantas de tratamiento.
- b) Minimizar el impacto ambiental que causa la disposición final de los lodos en los rellenos sanitarios o por la incineración de los lodos de plantas de tratamiento de agua residual.
- c) Determinar los procesos necesarios para la correcta operación de la planta de compostaje.

1.7 Metodología

La metodología para emplear en el siguiente trabajo investigativo se basará en tres fases:

Estado exploratorio: Recolección de información del estado de las plantas de tratamiento existentes en la ciudad de Guayaquil o de plantas de tratamiento de agua residual similares.

Estado descriptivo: Recolección de datos con el cual se obtendrá una información más precisa y confiable que involucren los procesos generadores de lodos que se encuentran en los procesos de las plantas de tratamiento actualmente.

Estado predictivo y proyectivo: Formulación de alternativas de solución que faciliten mejorar impacto ambiental de la disposición final de lodos, dando

cumplimiento a los lineamientos ambientales de la Legislación Ecuatoriana.

CAPÍTULO II

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Definición de lodo

El lodo residual, es un subproducto de desecho generado en los procesos que ocurren dentro de una planta depuradora de aguas residuales domésticas o industriales. Según la United States Environmental Protection Agency (US EPA) una definición para lodo es “lodo es cualquier sólido, semisólido o residuo generado por una planta de tratamiento de agua residual municipal, comercial o industrial, planta de tratamiento de agua o instalación de control de contaminación de aire, exclusiva del efluente tratado de una planta de tratamiento de aguas residuales”. Su producción en volumen es considerable, además del contenido de materia orgánica como DBO o COD, sólidos suspendidos, disueltos o volátiles, químicos inorgánicos (nitrógeno, fósforo y compuestos sulfurosos), metales y microorganismos, que deben ser manejados de forma adecuada para que no se conviertan en un problema.

2.1.2 Origen de los lodos

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son diseñadas para reducir los efectos adversos de estos componentes sobre la salud pública y el ambiente. Según (F. Dilek Sanin, 2011), “Los lodos extraídos de los procesos de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales tienen un contenido en sólido que varía entre el 0.5% y el 12% de su peso”, por lo tanto, tienen una condición de semisólido, y es justamente el contenido de agua lo que hace difícil su manejo, existen actualmente diferentes métodos de tratamiento para el lodo como la digestión aerobia y la digestión anaerobia, tratamiento de lodos activados, cada tecnología con sus ventajas y desventajas, sin embargo el tratamiento adecuado de los lodos puede representar un costo elevado, debido a que se debe remover el agua y su contenido orgánico.

Los lodos que se generan en los procesos de una planta de tratamiento se pueden clasificar en:

- a. Lodo primario proveniente de la sedimentación.
- b. Lodo secundario proveniente del tratamiento biológico.
- c. Lodos digeridos provenientes de los dos procesos anteriores, separados o mezclados.
- d. Lodos provenientes de la coagulación y sedimentación.
- e. Lodos provenientes de plantas de desarenadores y rejillas.

Cada uno con características diferenciadas según la etapa de proceso en la que se generaron, los mismos, no pueden ser dispuestos de forma directa por las razones expuestas anteriormente, por lo que según su característica se puede relacionar un efecto según se muestra en la tabla siguiente.

Los lodos que se generan en los procesos de una planta de tratamiento se pueden clasificar en:

Tabla II-1. Lodos comunes generados en agua cruda y agua residual

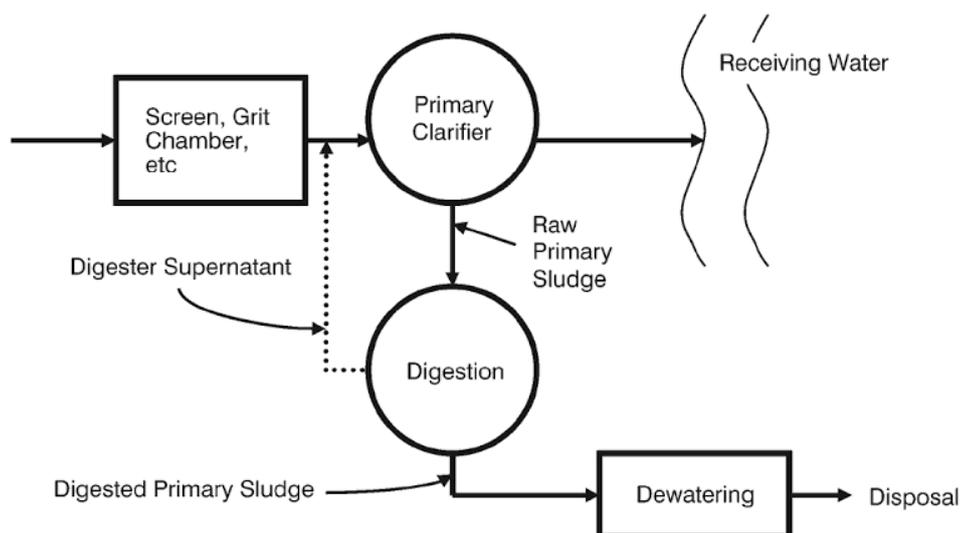
Origen del lodo	Concentración de sólidos %	Características
Lodo primario crudo	4 - 8	Repugnante, mal olor; gris-marrón; no drena bien en lechos de secado, pero puede ser desecado mecánicamente; alta concentración de patógenos peligrosos.
Lodo primario anaeróbicamente digerido	6 - 10	Se deseca bien en lechos de secado; negro; rancio; produce un gas leve
Humus filtrado	3 - 4	esponjoso; marrón
Lodo activado	0.5 – 1.5	Bajo olor; amarillo-marrón; esponjoso; difícil de desecar; muy activo biológicamente
Mezcla digerida (Lodo primario + lodo activado)	2 - 4	Negro-marrón; produce gas; rancio; no tan fácil de desecar como el lodo primario digerido
Digestión aeróbica	1 – 3	Amarillo-marrón; algunas veces difícil de desecar; biológicamente activo
Lodo con compuestos de aluminio	0.5 – 1.5	Gris-amarillo; sin olor; muy difícil de desecar

Nota. Adaptado de "Sludge Engineering, The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges", (F. Dilek Sanin, 2011, pág. 6)

“La cantidad de lodos es ampliamente dependiente del sistema de tratamiento que se le da al agua residual. El tipo de tratamiento como, por ejemplo, el químico versus el biológico crea diferentes tipos de lodos, en la precipitación química de lodos se agrega cantidades de químicos tales como componentes ferrosos, férricos, aluminio, polímeros, etc.; que hacen su tratamiento más complejo” (F. Dilek Sanin, 2011, pág. 1).

Por esta razón los lodos para compostaje deben ser lodos estabilizados, un lodo no estabilizado es conocido como *lodo crudo*, generalmente producido en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, siendo el mismo, fuente de patógenos y olores muy desagradables, un lodo estabilizado es aquel que contiene una cantidad mínima de patógenos, evitando de esta forma riesgos a la salud de las personas que manejen este desecho. La caracterización del lodo es la fase inicial y una de las más importantes del proceso de tratamiento, debido a que de este análisis se seleccionará el tratamiento más adecuado (F. Dilek Sanin, 2011).

Ilustración II.1 Diagrama de tratamiento primario



Nota. Recuperado de "Sludge Engineering, The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges", (F. Dilek Sanin, 2011, págs. 4, Destech Publications Inc.).

El diagrama II.1 muestra una planta típica de tratamiento primario, este fue el primer método ampliamente usado y aun lo continúa siendo en algunas partes del mundo, su objetivo principal, es remover los sólidos sedimentables del agua residual y

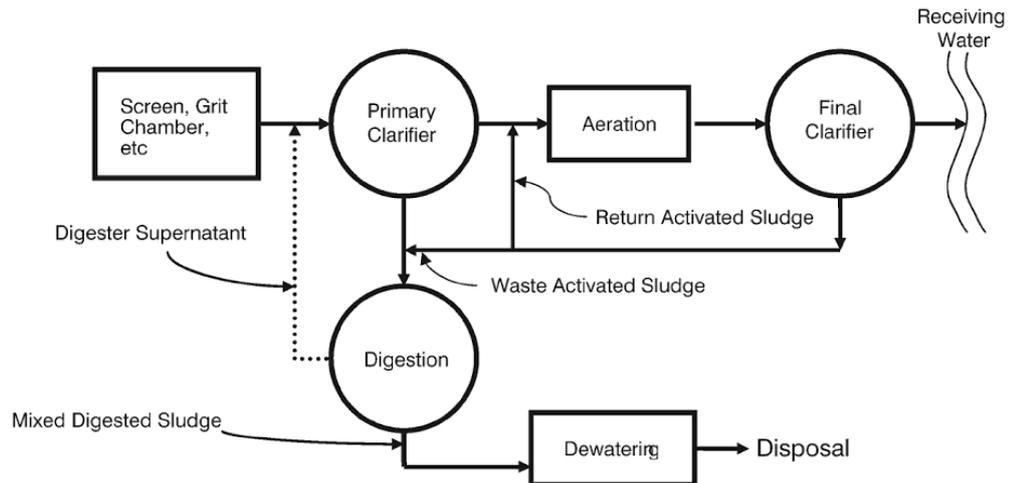
hacerla más manejable, con esta remoción de sólidos parte de la DBO es también eliminada. El clarificador primario también conocido como tanque decantador o menos apropiadamente como tanque de sedimentación, opera con el principio de hacer que los sólidos más pesados decanten al fondo del tanque y los más livianos floten en la superficie, este material flotante denominado escoria o nata es retirado y tratado con los sólidos decantados o dispuesto con los lodos generados en la planta.

Los sólidos removidos en este tanque son conocidos como *lodo primario crudo*, que es un lodo muy difícil de manejar. Este lodo es frecuentemente digerido para lograr hacerlo más manejable y entonces se le conoce como *lodo digerido primario*, es decir el lodo debe someterse a un proceso de aireación. Ciertos digestores operan para permitir que una ligera parte de este lodo o *flotante* en el digestor sea bombeado al inicio de la planta de tratamiento (F. Dilek Sanin, 2011).

Otra forma de estabilizar lodos residuales es a través de la digestión anaerobia, según (F. Dilek Sanin, 2011), “La digestión anaerobia logra una reducción del 40% de los compuestos orgánicos volátiles, disminución considerable de malos olores y una significativa destrucción de patógenos peligrosos”. Es decir, el lodo digerido por este método puede ser directamente dispuesto en el suelo o desecado en lechos de secado antes de su disposición final.

Una forma de mejorar el sistema de tratamiento primario es la adición de químicos como cloruro férrico u otros químicos similares en la clarificación primaria, estos químicos permiten la coagulación y decantación de los sólidos en suspensión, esta acción también conlleva a una considerable reducción de los de DBO, este sistema es llamado “*Sistema de Tratamiento Primario Químicamente Aumentado* y los lodos generados de este sistema se conocen como *Lodo Primario Químicamente Aumentado*” (F. Dilek Sanin, 2011).

Ilustración II.2 Diagrama de tratamiento secundario



Nota. Recuperado de "Sludge Engineering, The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges", (F. Dilek Sanin, 2011, pág. 4; Destech Publications Inc.)

La ilustración II.2 muestra la operación típica de una planta de tratamiento secundario (diseñada para tanto para remover sólidos como DBO), este sistema es una variación del sistema básico de lodos activados. La biomasa es degradada por la demanda de oxígeno que esta misma necesita, el aire necesario es dirigido a la mezcla por difusores o mecánicamente por aireadores, el consumo de oxígeno de las bacterias hace que la biomasa aumente por la creación de nuevas células que se alimentan de la materia orgánica contenida en el lodo del tanque aireado, para resolver esto, el exceso de lodo debe ser decantado en otro tanque clarificador, y una parte de la biomasa debe ser retornada al tanque aireado para ser reusada. "En este proceso, los microorganismos consumen la materia orgánica disuelta y producen CO₂, agua y más microorganismos, esto reduce la demanda de oxígeno del líquido" (F. Dilek Sanin, 2011).

Este sería el sistema ideal para remover y disponer la materia orgánica que se encuentra en el agua; desafortunadamente la cantidad de microorganismos que se generan, exceden lo requerido por el sistema, por lo tanto, parte de esa biomasa debe ser desechada. "Ese desecho es conocido como *desecho de lodo activado* y representa unos de los dolores de cabeza del tratamiento de aguas residuales, una forma de tratarlo es mezclarlo con el lodo crudo primario y llevarlo a un digester anaeróbico, el resultado es llamado *lodo digerido mezclado*, este lodo es

generalmente secado antes de su disposición final” (F. Dilek Sanin, 2011).

Una alternativa a la digestión anaerobia, que se utiliza en plantas de lodos activados es la digestión aeróbica, que es simplemente una extensión del sistema de aireación, el lodo activado es aireado por algunos días en otro tanque, hasta que se estabilice en términos de demanda de oxígeno y sólidos volátiles, el resultado de este proceso es llamado *lodo aeróbicamente digerido* (F. Dilek Sanin, 2011).

En las últimas décadas la remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno es considerada importante en la remoción de demanda de oxígeno, materiales y sólidos, sus cantidades en los efluentes de Plantas de Tratamiento son limitados debido a los nuevos estándares de tratamiento. Para alcanzar este tipo de remoción se utiliza lo que se llama Sistema de Tratamiento Terciario (Avanzado), este tipo de tratamiento puede ser aplicado por diferentes tipos de técnicas, ya sea por métodos fisicoquímicos o técnicas biológicas.

Para la remoción de nitrógeno, por una serie de procesos biológicamente anóxicos. El material nitrogenado es convertido en gas. (F. Dilek Sanin, 2011) sostiene que, para este tipo de sistemas el fósforo soluble (fosfato) es reducido a través de microorganismos dentro de altas tasas de fósforo almacenado. El fósforo es entonces removido en los sólidos de lodos activados. Ambos tratamientos de fósforo y nitrógeno requieren una operación cuidadosa, reactores especiales deben ser diseñados en sistemas de lodos activados para producir alternadamente condiciones aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas.

Otra forma de remoción de nutrientes es el uso de químicos como sales de hierro y aluminio, que ayudan a precipitar las moléculas de fosfato a sólidos. Estos sólidos son añadidos al proceso de lodos. Cuando los químicos son añadidos al clarificador primario, los precipitados son recolectados con el lodo crudo primario. Cuando los químicos son añadidos en el tanque de aireación, o menos comúnmente al lodo al inicio de la clarificación, los precipitados son removidos con el lodo residual activado. Para esto (F. Dilek Sanin, 2011) describe que, “este proceso de precipitación química resulta en la producción de lodos que tiene algunas veces características impredecibles. La adición de químicos a los efluentes secundarios resulta en lodos similares al agua de lodos de plantas de agua y estos son muy

difíciles de deshidratar”.

Otra fuente de lodos en el tratamiento de agua, son los residuos generados del tratamiento para agua potable. El sulfato de aluminio (alúmina), es el químico más ampliamente utilizado para la coagulación y floculación en el tratamiento de agua, esta adición de químico produce un lodo conocido como lodo residual de alúmina (Epstein, 2011), el cual es comúnmente descargado en la red recolección de aguas o bien a los cuerpos de agua. El problema de este lodo no es tanto la cantidad de lodo sino el hecho de que la mayoría de las veces, este lodo descargado es resultado de la limpieza de tanques decantadores lo que no es una práctica correcta, pues los lodos generados en plantas de tratamiento de agua deben ser tratados de igual forma.

A continuación, se hace un resumen de los tipos más conocidos de lodos según si origen y composición.

Lodo crudo primario, comúnmente con concentración de sólidos secos en el orden del 4-8%, es un lodo de fuerte olor y pobre rentabilidad que necesita equipo mecánico para la reducción de humedad, un dolor de cabeza para las plantas de tratamiento de agua residual.

Lodo digerido anaeróbicamente, drenará bien en lechos de secado, pero es más difícil secarlo por medios mecánicos, es de color oscuro y posee un olor no tan desagradable.

Humus filtrado, originado de los filtros percoladores, es un ligero lodo activado esponjoso. Contiene bastante humedad, con un porcentaje de sólidos entre el 0.5-1.5%, su color esta entre el rango del amarillo al casi negro, sin embargo, la coloración marrón es la más deseable. La forma de este tipo de lodo dependerá del método de operación de la planta de tratamiento, del sustrato y el tipo de alimento de las bacterias.

Lodo digerido mixto, es una combinación de lodo primario y lodo activado, el de color ligeramente marrón y no demasiado oloroso, no es sencillo secarlo, además

de que aún posee actividad biológica elevada.

Lodo de desecho de alúmina, proviene de las plantas de tratamiento y puede diferir también en color dependiendo del tipo de material removido de agua, aunque su color frecuentemente esta entre el grisáceo y amarillo. Es muy difícil de deshidratar, pero tiene la ventaja de sus relativa inactividad biológica y estabilidad.

Existen variadas clases y tipo de lodos que son generados en plantas de tratamiento de agua y agua residual, se han listado solo los lodos más comunes con sus respectivas características y dificultades de tratamiento.

2.1.3 Cantidades de lodos producidas

Las cantidades producidas de lodos en las Plantas de Tratamiento de agua en la sociedad moderna son impresionantes, debido al aumento de la densidad poblacional en las ciudades y que cada vez más personas tienen acceso al sistema de aguas servidas, solo en Estados unidos la producción de lodos se estimó en alrededor de 7.5 millones de materia seca producida por las plantas de tratamiento para el año 2010 y cada vez más la falta de espacio cercano disponible para rellenos sanitarios y las restricciones por legislaciones ambientales son problemas a los que se enfrentan las ciudades modernas (Epstein, 2011).

El primer paso para el diseño de una facilidad de tratamiento de lodos, es una buena estimación de la cantidad de lodos. Para la estimación de lodos producidos en una comunidad, un alcance de esto puede ser asumir una cierta tasa de producción de masa-habitante/tiempo. En algunos países ya se posee información estimada de la cantidad de lodo producido como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla II-2. Población y tasa de producción de lodos miembros UE 2003

Estado Miembro o País	Población al 2003 <i>[hab]</i>	Lodos Producidos 2003 <i>[tms]</i>	Tasa de generación de lodo <i>[g/hab/día]</i>
Austria	8,082,000	115,448	39.1
Bélgica	10,355,800	99,592	26.3
Dinamarca	5,383,500	(2002) ^(a) 140,021	71.3
Finlandia	5,206,300	150,000	78.9
Francia	59,635,000	(2002) ^(a) 910,255	41.8
Alemania	82,536,700	2,172,196	72.1
Grecia	11,006,400	79,757	19.9
Irlanda	3,963,600	42,147	29.1
Italia	57,321,100	905,336	43.2
Luxemburgo	448,300	7,750	47.4
Holanda	16,192,600	550,000	93.1
Portugal	10,407,500	(2002) ^(a) 408,710	107.6
España	41,550,600	1,012,157	66.7
Suiza	8,940,800	220,000	67.4
Reino Unido	59,328,900	1,360,366	62.8
Total/Promedio	380,359,100	8,173,735	58.9

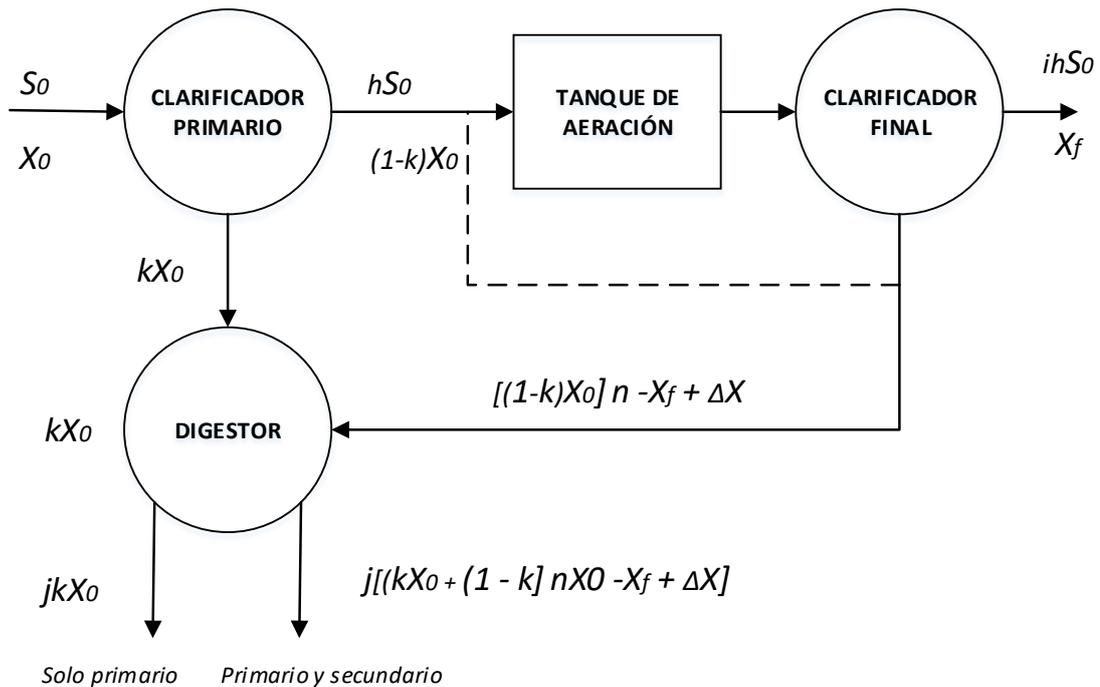
^(a)La población del 2003 fue usada en el cálculo

Nota. Adaptado de "Sludge Engineering, The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges", (F. Dilek Sanin, 2011, pág. 8)

En la tabla II.2, se aprecia que la tasa de producción de lodos varía entre 20-108 g sólido seco/hab/día en diferentes países europeos, el amplio rango está en función de la población servida por las plantas de tratamiento, así como el grado de tratamiento aplicado y las personas conectadas a sistemas de alcantarillado sanitario. Un promedio asumido para la de tasa de producción de lodos se podría aproximar a 60 g/hab/día.

Un método más sofisticado para la obtención de la cantidad de lodo producido es un balance de masas, a continuación, se muestra el esquema típico para este tipo de tratamiento.

Ilustración II.3 Balance masas SS y DBO sistema tratamiento agua residual



Nota. Adaptado de "Sludge Engineering, The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges", (F. Dilek Sanin, 2011, págs. 9, Destech Publications Inc.)

Donde:

- S_o DBO del influente (5 días, 20° C), kg/h
- X_o Sólidos suspendidos del influente SS, kg/h
- h Fracción de DBO no removida en el clarificador primario
- i Fracción de DBO no removida in la aireación o filtro percolador
- X_f SS del efluente de la planta, kg/h
- k Fracción de X_o removido en el clarificador primario
- j Fracción de sólidos no destruidos en la digestión
- ΔX Cantidad neta de sólidos producidos por acción biológica, kg/h
- Y Rendimiento $\Delta X / \Delta S$, donde $\Delta S = hS_o - ihS_o$

La *DBO* entrante (S_o) puede ser estimada de forma razonable como 250 mg/l. La carga que ingresa a la planta puede ser calculada como 250 mg/l veces el caudal que ingresa (Q) como $m^3/h \times 10^{-3} = kg/h$. De la misma forma puede X_o ser calculado como 225 mg/l x el caudal (Q). El valor de k puede ser asumido alrededor de los

0.60. el valor para h es alrededor del 0.7, lo que indica que el clarificador primario no es muy eficiente método para remover la DBO (lo que es normal pues no está diseñado para esto) (F. Dilek Sanin, 2011).

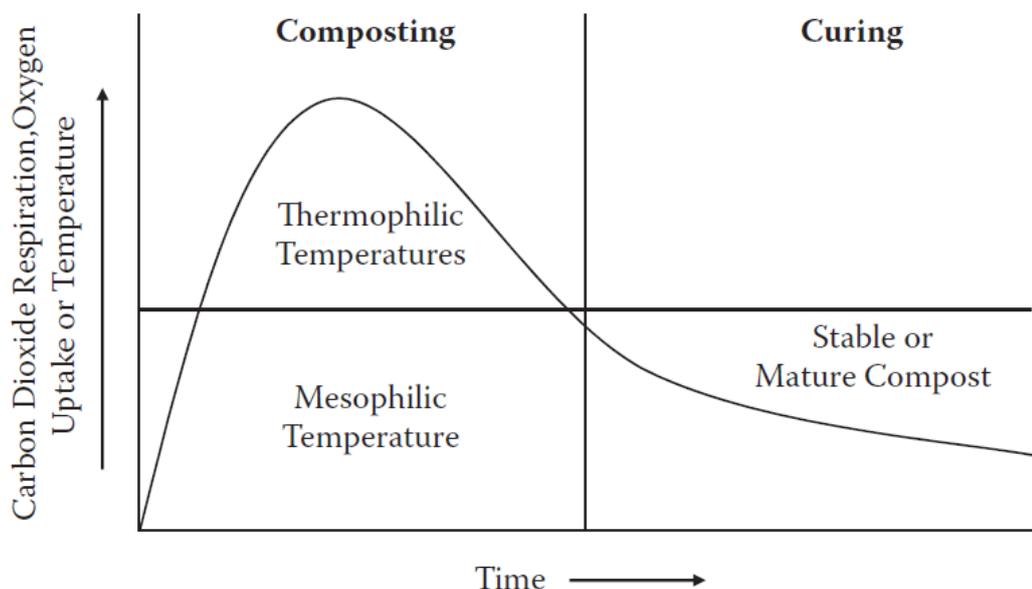
2.1.4 Compostaje de desechos sólidos

¿Qué es el compostaje?

Existen diferentes definiciones que aplican el término “compostaje”, el cual puede ser definido como sigue:

El compostaje es un proceso controlado que envuelve la descomposición de componentes orgánicos originarios de plantas y animales a través de una secuencia de comunidades microbianas desarrollándose bajo condiciones aeróbicas, resultando en un aumento de la temperatura lo que deriva en un material orgánico humificado y estabilizado. El producto resultante se llama compost (Díaz & et al, 2007).

Ilustración II.4 Temperaturas alcanzadas según fases de compostaje



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 16; CRC Press)

(García Morales & al, 2015) sostiene que el compostaje es un proceso biológico natural, que se lleva bajo condiciones aeróbicas controladas. En este proceso los microorganismos como bacterias y hongos descomponen la materia orgánica en sustancias simples. La efectividad del proceso de compostaje es dependiente de las condiciones ambientales presentes en el sistema de compostaje como, por ejemplo, oxígeno, temperatura, humedad, materia agregada, tamaño de la materia orgánica y actividad de la población microbiana.

El compostaje no es un proceso complicado ni desconocido, el reciclado natural de la materia ocurre de forma continua en la naturaleza. La materia orgánica es metabolizada por los microorganismos y después consumida por los invertebrados, los nutrientes resultantes son retornados al suelo para sustentar el crecimiento de otros seres vivos.

(Haug, 1994, pág. 1) sostiene que no existe una definición universal para la de definición de compostaje, por lo que una definición valida es, “el compostaje es la descomposición y estabilización biológica de sustratos orgánicos, bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas de plantas que puede ser beneficioso para la aplicación al suelo “.

Para (Román, Martínez, & Pantoja), afirman que:

“Es posible interpretar el compostaje como el sumatorio de procesos metabólicos complejos realizados por parte de diferentes microorganismos que, en presencia de oxígeno, aprovechan el nitrógeno (N) y el carbono (C) presentes para producir su propia biomasa. En este proceso, adicionalmente, los microorganismos generan calor y un sustrato sólido, con menos C y N, pero más estable, que es llamado compost”, (2013, pág. 25).

2.1.5 Origen y fundamentos del compostaje

Se puede dividir la evolución del compostaje en tres fases:

1. Primera fase (1933-1949): el compostaje era una técnica sencilla fundamentado en el compostaje realizado en zonas rurales, el cual es realizado a pilas (montículos) a campo abierto, cubiertas con suelo para mantener dentro el calor, la ventilación es natural. Uno de los primeros métodos para la aplicación de compostaje para la gestión de residuos fue en la india en 1933, donde se denominó al proceso *Indore process*, el que fue utilizado ampliamente en ese país (Díaz & et al, 2007, pág. 8).
2. Fase de investigación y desarrollo (1970s-1980s): el tratamiento de los desechos sólidos municipales comenzó a ser un serio problema para el desarrollo de las ciudades y el incremento de población, por esta razón este fue un periodo próspero para la investigación y desarrollo del compostaje, para los años 90, 11 tipos de tecnología de compostaje fueron desarrolladas y probadas. In 1975, el equipo de investigación de Beltsville (Maryland) Agriculture desarrolló la técnica que hoy se conoce como aerated static pile (ASP) o pilas aireadas estáticas (Epstein, 2011).
3. Fase de aplicación extensiva (1990s al presente): se estudia y evalúa la tecnología de compostaje, actualmente se extiende el compostaje para el tratamiento de desechos sólidos municipales y el tratamiento de lodos residuales.

El compostaje es llevado a cabo por tres tipos de bacterias, que son las que definen las fases del compostaje (Trauman & et al, 1996).

Bacterias psicrófilas: organismos que pueden vivir a temperaturas por debajo de los 5°C

Bacterias mesófilas: organismos que pueden vivir a temperaturas entre los 15°C y 35 °C

Bacterias termófilas: organismos que pueden vivir a temperaturas relativamente

altas sobre los 45 °C

Fase Mesófila. Generalmente el compostaje comienza con temperaturas del orden mesofílico o temperatura ambiente, para luego progresivamente en pocos días la temperatura se eleve hasta los 45°C, este aumento de temperatura se debe a la actividad microbiana de los microorganismos que generan calor a través del consumo de fuentes sencillas de C y N. Al descomponerse compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede llegar a valores entre 4.0 o 4.5. La duración de esta fase es relativamente corta, entre dos y ocho días.

Fase Termófila o de Higienización. Cuando la materia orgánica de compostaje llega a temperaturas mayores de 45°C, las bacterias que se han desarrollado a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) mueren y son reemplazadas por microorganismos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), este cambio en la población del tipo de microorganismos facilita la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina que son polímeros orgánicos que dan la consistencia dura y leñosa a los restos vegetales como la madera.

El nitrógeno contenido en la materia orgánica es transformando en amoníaco por acción de los microorganismos, lo que resulta en una elevación del pH. Para (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), “a partir de 60 °C aparecen bacterias que producen esporas y actinobacterias, que se encargan de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono complejos”. La duración de la fase termófila puede ser de unos cuantos días hasta meses, esto dependerá del tipo de materia orgánica para compostaje, condiciones climáticas del sitio, y otros factores

Para algunos autores, esta fase se le puede dar el nombre de fase de higienización, debido a que el calor generado contribuye a la destrucción de bacterias patógenas y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* Según (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), durante esta fase “a temperaturas sobre los 55°C se eliminan quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado lo que es muy importante”.

La temperatura es directamente proporcional a la actividad de los microorganismos en el sistema de compostaje, es así como, cuando la tasa metabólica de los microbios acelera, la temperatura del sistema también aumenta, lo opuesto también ocurre y es así como manteniendo la temperatura por sobre los 54°C durante tres o cuatro días favorece la destrucción de organismos patógenos.

A una temperatura de 68 °C la materia orgánica se descompondrá en la mitad del tiempo que, a 54°C, sobre los 55°C puede resultar en la destrucción de ciertas poblaciones de microbios, sin embargo, la temperatura declinará y las poblaciones de bacterias se regenerarán (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993).

Fase de Enfriamiento o Mesófila II. Al consumirse las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en la materia orgánica en compostaje, la temperatura desciende entre los 40-45°C. A lo largo de esta fase, la degradación de polímeros como la celulosa continúa, y la aparecen hongos que pueden ser observados a simple vista. Por debajo de 40 °C, la población de organismos mesófilos se recupera y reinician su actividad y el pH de la materia orgánica desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

En la etapa posterior otros organismos como, ciempiés, milpiés, hongos, cochinillas y lombrices ayudan en el proceso.

Fase de Maduración. Es un período que tiene una duración de meses a temperatura ambiente, durante este tiempo se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

Tareas como remover el material a compostar para oxigenar y homogenizar la mezcla de materiales son necesarias. (Haug, 1994) sostiene que la adición de cierto de tipos de desechos (desechos sólidos orgánicos, contenido de celulosa) es necesario para una mejor mezcla a compostar son algunas consideraciones que se deben tener en cuenta en el proceso.

Beneficios del compostaje

El compostaje transforma los desechos orgánicos en material reusable (compost), para las plantas, por esta razón tiene una importante función en la mejora de suelos agrícolas. El compostaje de desechos ofrece los siguientes beneficios:

- ✓ Reduce la masa y volumen inicial de los desechos en aproximadamente un 50%. Esta reducción es debido a la mineralización de los componentes orgánicos, la pérdida de agua y la modificada porosidad. (Das & Keener & Eklind & Kirchmann, 1997, 2000).
- ✓ La pérdida de materia orgánica direcciona la concentración de sustancias minerales en el compost. (Kirchmann & Widen, 1994)
- ✓ La transformación de la materia orgánica fresca desde el desecho en materia orgánica estabilizada aumenta el enriquecimiento del suelo.
- ✓ Los organismos patógenos son destruidos debido al aumento de la temperatura.
- ✓ Las semillas de malas hierbas son destruidas por la combinación del aumento de la temperatura y agentes inhibidores.

2.1.6 Sistemas de compostaje

El proceso de compostaje es un procedimiento de tratamiento y reducción de residuos. La calidad del compost resultante, es el resultado del control en el contenido de nutrientes y materia orgánica, así como también, la separación de sustancias indeseables como restos de plástico, vidrio o metal en la mezcla de materia orgánica de inicio.

Para el compostaje de varios tipos de residuos, primero deben homogeneizarse completamente, es necesario que en la mezcla de materia orgánica se equilibre la relación carbono/nitrógeno, la humedad en la mezcla debe estar entre el 55% y 60%, proveer una distribución igualitaria del oxígeno lo que se puede lograr con aireación forzada y esponjar la mezcla de materia orgánica, que se alcanza con la adición de astillas de madera o aserrín. Si están siendo compostados materiales

con contenidos altos en nitrógeno, el mezclado es particularmente crítico (Hernández, 2003).

Los lodos producidos en plantas de tratamientos de aguas residuales municipales e industria alimenticia son potenciales candidatos para compostaje. La materia orgánica del fango puede oscilar del 5% al 70% de sus sólidos totales (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Para aguas residuales municipales el contenido de sólidos llega solo a 12% dependiendo de su procedencia.

El manejo, tratamiento y disposición de lodos producidos en plantas de tratamiento de agua residual es un problema que actualmente representa un reto. Debido a su alto contenido de humedad, que debe ser reducida a través de la mezcla con materiales secos ricos en celulosa como aserrín antes de que puedan ser compostados. Los fangos según su procedencia deben tratarse en procesos que permitan llegar a temperaturas altas para destruir los microorganismos patógenos. Finalmente, la presencia de metales pesados y otros contaminantes pueden limitar la utilidad del fango compostado (Epstein, 2011).

Bajo condiciones favorables de temperatura, humedad y ventilación la degradación de la materia orgánica ocurre de forma natural, sin embargo, en la naturaleza la descomposición de la materia orgánica puede llevar meses e incluso años, según el medio en que se encuentre. Para optimizar las condiciones adecuadas y acelerar el proceso, la materia orgánica debe ser volteada a intervalos apropiados según el aumento o disminución de la temperatura, para aumentar al máximo la actividad microbiana involucrada en el proceso de compostaje.

Si las condiciones aerobias no se mantienen, es de esperarse la aparición de problemas de olores, para mitigar los problemas de olores, en las plantas de compostaje que están cerca de poblaciones urbanas, se utilizan sistemas de tratamiento de olores de tipo biológico.

Los diferentes sistemas de compostaje tratan de optimizar cada uno de los factores que intervienen en el compostaje, a través de diferentes técnicas o métodos, aunque se puede resumir que la meta en común, es la reducción en el tiempo que

toma alcanzar todo el proceso de compostaje. En general se puede afirmar, que no existe técnica de compostaje objetivamente mejor, las condiciones particulares de cada instalación como clima de la localidad, distancia a recorrer para conseguir los ingredientes de la mezcla, la disponibilidad de energía, agua potable, etc.; deben evaluarse para desarrollar un programa exitoso de compostaje. Otros factores asociados a la materia orgánica como los nutrientes, el grado de trituración, el pH y el contenido de humedad se ajustan mezclando y acondicionando diferentes materiales. Algunos sistemas incluyen el removido de los materiales como parte del proceso de compostaje. El suministro de oxígeno y el control de la temperatura se pueden realizar tanto por la convección natural o ventilación forzada, lo que es clave por los costos operativos en los que se incurre debido al uso de energía para ventilación forzada. La mezcla del material también ayuda a mantener niveles óptimos de oxígeno y temperatura (Díaz & et al, 2007).

2.1.7 Técnicas de compostaje

Existen variadas técnicas de compostaje que se pueden aplicar según las necesidades de espacio, disponibilidad de energía, costos, etc., cada técnica posee sus ventajas y desventajas, sin embargo, no es el objetivo poner juicio de mérito entre un sistema de compostaje u otro.

La selección de un particular sistema de compostaje para una comunidad o compañía se privada o municipal, puede depender de algunas consideraciones, las que pueden incluir:

- Económicas
- Tipo y cantidad de desechos
- Potencial ubicación de la instalación
- Aspectos regulatorios y políticos
- Consideraciones ambientales
- Productos relacionados al mercado

Algunos municipios o agencias anteponen el costo económico de la instalación como parámetro principal, siendo en la práctica una decisión desafortunada por seleccionar la más pobre tecnología.

Algunos sistemas de compostaje tienen como principal restricción el requerimiento de espacio o que sean aplicables para una pequeña operación, como universidades, parques, prisiones, etc. que solo requieren sistemas de compostaje compactos. Por ejemplo, el parque de diversiones de Disney World utiliza sistemas de compostaje en contenedores para sus desechos de alimentos.

Algunos tipos de desechos homogéneos como los de la industria de alimentos no necesita una preparación preliminar como la separación de contaminantes peligrosos como los desechos municipales (Epstein, 2011).

La ubicación de las instalaciones no solo afecta el tipo de tecnología a utilizarse, sino otros tipos de inversiones de capital a realizarse. Una instalación puede ubicarse cerca de una comunidad urbana o dentro de un parque industrial que significa en la utilización de grandes sistemas de control de olores que cuando la instalación se ubica en una zona rural. Los aspectos regulatorios deben ser considerados, las regulaciones para compostaje de sólidos se refieren a la cantidad de patógenos y vectores en la operación de la planta de compostaje, para el compostaje de lodos residuales en otros países se requiere análisis químico.

Las regulaciones en lo referente a la calidad del compost se enfocan a contenido de patógenos, metales pesados y propiedades físicas como la presencia de materia extraña como metal, plástico y vidrio en el compost (Epstein, 2011).

Las consideraciones ambientales son muy importantes en la ubicación de la instalación y apropiado tipo de sistema de compostaje. Consideraciones meteorológicas, como dirección del viento pueden generar afectación de malos olores a comunidades cercanas a la planta, en estos casos la utilización de barreras vegetales son una opción considerablemente efectiva y económica.

Finalmente, la calidad del producto requerido por el mercado. En algunas

instalaciones de compostaje se puede producir compost como fertilizante para utilización en jardines, bosques de reforestación, etc.

Clasificación general de Tecnologías de Compostaje

Según (Epstein, 2011), la clasificación más genérica de los sistemas de compostaje los ubica en dos grandes categorías: estática y volteada o agitada. En ciertos casos se combina la aireación y la agitación. Estas tecnologías se dividen como sigue:

A. Sistemas estáticos

- a) Pilas aireadas o estáticas
- b) Pilas estáticas con aireación forzada
- c) Contenedor/Túnel/Bolsa
- d) Silos/Reactores verticales

B. Sistemas volteados o sistemas agitados

- a) Pilas volteadas
- b) Tambor rotatorio
- c) Camas agitadas

2.1.7.1 Pilas aireadas o estáticas

La mayoría de los sistemas estáticos proveen aire a través de sopladores. Sin embargo, en los sistemas estáticos la pila es aireada por la diferencia térmica que existe durante el proceso de compostaje, a través del fenómeno de convección que hace que el aire por diferencia de temperatura se eleva a través de la pila entregando el oxígeno necesario para la descomposición de la materia orgánica.

Este sistema utiliza tuberías perforadas abiertas a la atmosfera, la materia a compostar es colocada sobre las tuberías. En el centro de la pila el calor aumenta, entonces el aire frío ingresa a través de la tubería y provee el oxígeno. La figura a continuación muestra como el sistema es construido y utilizado (Epstein, 2011).

Ilustración II.5 Detalle de pila estática con aireación por convección



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities

Management", (Epstein, 2011, pág. 84; CRC Press)

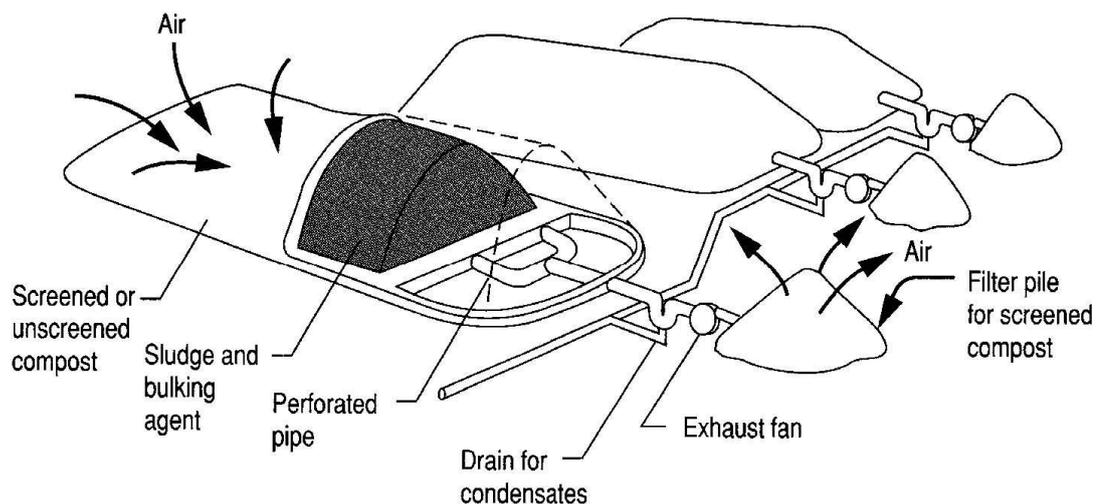
Este método se utiliza generalmente para manejo de lodos de estiércol de ganado, es de bajo costo para el uso en granjas y desechos animales. Se ha demostrado que este método alcanza una temperatura de 55° C o mayor por tres días, logrando la reducción de atracción de vectores y obteniendo un producto estable. Este método no es aprobado por la U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) para su aplicación en reducción de patógenos para lodos residuales o biosólidos.

2.1.7.2 Pilas estáticas con aireación forzada

La siguiente técnica de sofisticación del compostaje es la pila estática ventilada, fue desarrollada en 1975 por investigadores de la US Department of Agriculture (USDA) en que se coloca la mezcla de materia orgánica sobre una serie o sistema de tuberías de PVC perforadas o un fondo falso poroso, el sistema de tuberías es conectada a un equipo electromecánico que aspira o inyecta aire a través de la pila, el objetivo de este método es reducir los olores aspirándolos y enviándolos a un biofiltro, además reduce la pérdida de calor debido a que el aire ingresa por la superficie externa de la pila, lo que permite además ahorro de energía

Cuando se ha formado la pila y colocado sobre el sistema de tuberías, no se debe voltear la pila de materia orgánica hasta que todo el proceso de compostaje finalice.

Ilustración II.6 Compostaje de pila estática con aireación forzada



Nota. Recuperado de "Handbook of Solid Waste Management", (Tchobanoglous G. , 2002, págs. 442, McGraw-Hill)

Cuando la temperatura en la mezcla de materia orgánica es mayor al valor óptimo, se puede configurar controladores electrónicos que permiten la el encendido, variación de velocidad o apagado del ventilador, para que solo suministre el aire necesario para enfriar la pila abasteciéndola de oxígeno, la aplicación de estos controles automáticos conlleva al ahorro energético durante el proceso.

Debido a que en esta técnica no se emplean equipos para voltear la mezcla de materia orgánica durante el proceso de compostaje, las pilas estáticas ventiladas son recomendadas en su uso en materia orgánica homogénea como lodos procedentes de pantas depuradoras de agua residual doméstica.

Los lodos se mezclan con materiales que posean un buen grado de porosidad como astillas de madera o serrín, lo que resulta en una mezcla que posee intersticios donde los microorganismos pueden formar una película biológica líquida delgada en la que tiene lugar la descomposición de la materia orgánica (Tchobanoglous G. , 2002).

Esta técnica logra relativamente una rápida degradación de los residuos orgánicos en nutrientes asimilables para las plantas, debido a que la aireación controlada aumenta la actividad microbiana durante el proceso de compostaje. Este método, es también uno de los más económicos, ya que requiere poca intervención mecánica (volteo), aunque es necesario el consumo de electricidad para los equipos de aireación

La capacidad en el proceso de compostaje para este método es escalable añadiendo más número de unidades de aireadores, aunque el requerimiento de espacio es extenso.

El proceso puede llegar a durar de 4 a 8 semanas, para luego transportarse y apilarse la materia orgánica durante 1 a 6 meses para que continúe con el proceso de fermentación final. Puede utilizarse en combinación con otras tecnologías de compostaje (Epstein, 2011).

Ilustración II.7 Sistema de pila estática aireada extendida



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 87; CRC Press)

Existen algunos aspectos relacionadas a las pilas estáticas con aireación forzada y numerosas configuraciones del sistema:

- Totalmente abiertas
- Parcialmente encapsuladas con techado o los lados
- Totalmente encapsuladas
- La temperatura para destrucción de patógenos debe ocurrir a través de la masa a ser compostada. Esto es logrado con apropiada aireación y aislamiento
- La temperatura adecuada para la destrucción de patógenos debe ocurrir durante tres días consecutivos según especificación de la USEPA.
- El sistema de aireación debe ser dimensionado para proveer niveles de oxígeno de manera uniforme, excediendo el 10% de toda la masa
- La pila debe ser lo suficientemente porosa para tener una adecuada aireación, esto se logra con material poroso rico en celulosa como aserrín.

2.1.7.3 Compostaje en Contenedor/Túnel/Bolsa

Estos sistemas generalmente son aplicados a pequeñas instalaciones y son efectivos para el control de olores, esos sistemas generalmente son ventilados y horizontales, las principales diferencias entre estos sistemas son la forma en ser cargados, descargados y ventilados.

Ilustración II.8 Contenedores de compostaje



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 93; CRC Press)

La mayoría de túneles, contenedores y bolsas son utilizados para volúmenes relativamente bajos de materia orgánica y donde se debe evitar los problemas de olores debido a comunidades cercanas. Estos sistemas requerirán mezclado y preparación final a través de un cribado o cernido, necesitan espacio para el curado o maduración, aunque generalmente se lo puede realizar dentro del mismo contenedor, es indispensable la aireación forzada y control de olores. Esta tecnología se usa desde el año 1980.

2.1.7.4 Silos/Reactores verticales

Esta tecnología fue común in los Estados Unidos durante 1980's, actualmente su construcción se encuentra descontinuada. Este sistema tuvo muchos problemas entre los que se tiene: excesiva compactación, pobre aireación y dificultad de extraer el material, en una localidad de Hartford, Connecticut, USA fue destruida por un incendio.

Ilustración II.9 Sistema de compostaje por silo en Portlad Oregon



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 96; CRC Press)

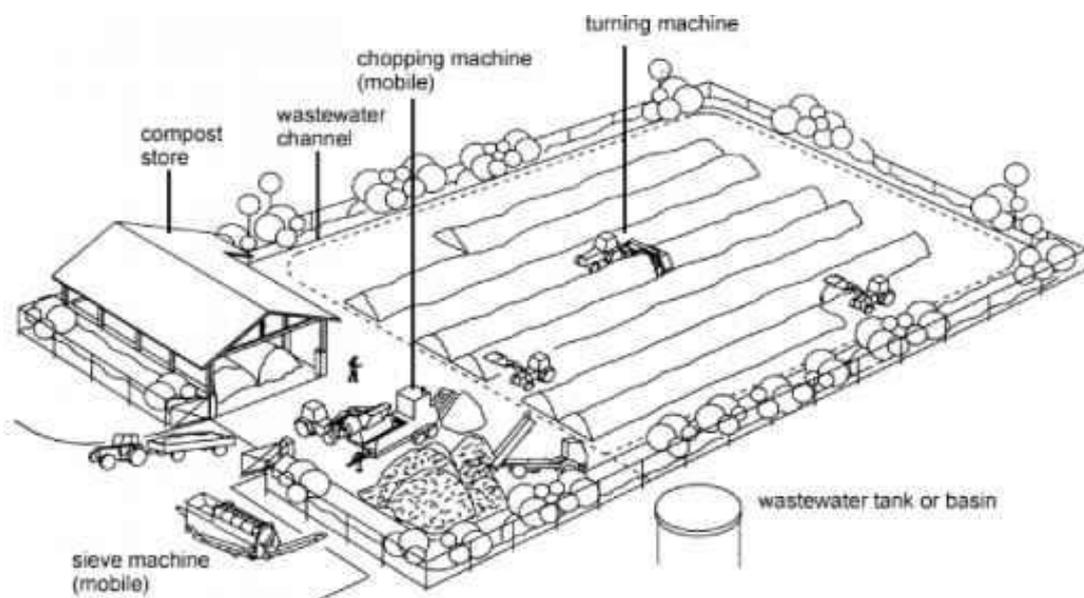
Para evitar estos problemas algunos sistemas europeos y asiáticos fueron contruidos con múltiples pisos y agitadores, moviendo el material desde abajo hacia arriba. La ventaja de estos sistemas es el espacio utilizado (Epstein, 2011).

2.1.7.5 Pilas volteadas

El método o técnica para compostaje en pilas estáticas volteadas es de muy baja complejidad, y es el más económico y el más utilizado de todas las técnicas, debido a su extendido a gran escala. En esta técnica la mezcla de materia orgánica se apila sobre el suelo evitando que se comprima en exceso, la geometría forma y medida de la pila es importante para conseguir esto.

Las pilas son ventiladas por convección natural, el aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados (Junta de Andalucía, 2016).

Ilustración II.10 Compostaje de pila estática con máquina volteadora



Nota. Recuperado de "Barnard Health Care Anaerobic Degradation", (Barnard Health Care, 2017). <https://www.barnardhealth.us/anaerobic-degradation/coo.html>

La forma, geometría y tamaño óptimo de la pila está muy ligado al tamaño de partícula, porosidad, humedad, tipo y grado de degradación de la materia orgánica, todo esto influye en la circulación del aire en la sección de la pila. Se debe realizar la mezcla adecuada de desechos sólidos, la porosidad de la materia a compostar se logra agregando un material de volumen que es generalmente aserrín, astillas de madera, pasto seco, u otro sustrato que provea Carbono, la adición de Nitrógeno

también es importante, por lo que se debe cuidar la relación C/N entre 25-35, tamaño de partícula entre 2 mm a 5 mm material que se aplica por capas, ubicando entre cada capa material de volumen o tierra, el pH inicial debe ser neutro y en caso de ser necesario se debe agregar carbonato de calcio (Ca) para estabilizarlo, humedad constante entre 40-60%, la temperatura máxima deber ser de 70° C (adecuada entre 55-65°C), el tamaño recomendado de la pila es de 1.20 m a 2.00 m de altura de forma trapezoidal, la base puede ser de 2.00 m, se recomienda protegerla del sol, viento, frio y lluvia (Tchobanoglous G. , 2002).

El sistema de pilas es utilizado para el compostaje de biosólidos y regulado por la USEPA, esta regulación requiere que la pila alcance los 55°C durante 5 días consecutivos con un mínimo de 5 volteos por pila, el objetivo de esta actividad es que la masa entera alcance alta temperatura para la destrucción de patógenos (Epstein, 2011).

El tamaño y forma de las pilas son determinantes para lograr una buena circulación de aire en todo el cuerpo y sección de la pila, lo que permite mantener la temperatura dentro del rango apropiado. Si una pila es demasiado grande, la parte baja se comprimirá lo que impedirá que el oxígeno no pueda llegar al centro, lo que creará zonas anaerobias y problemas de olores, por lo contrario, si la pila es demasiado pequeña el calor generado por la descomposición de la materia orgánica no podrá ser retenido y la pila no calentará de forma adecuada.

El tamaño óptimo de la pila estará en función con el tipo de material y temperatura ambiente del lugar. Las dimensiones de las pilas pueden ser de 1.5 a 2.7 m de altura y 2.7 a 6.1 m de ancho (Epstein, 2011).

Cuando la pila es constituida, la única operación requerida a realizar es el volteo o mezclado de la pila, a través del uso de equipo mecánico. La frecuencia dependerá del tipo de material, de la variación en el contenido de humedad y la velocidad que se desea para realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 – 10 días (Esteve, 2012). El volteo de la pila es necesario para homogeneizar la mezcla y controlar la temperatura, esto permite la eliminación del calor generado en exceso, control de la humedad y recuperar la porosidad perdida debido a que

durante el proceso de degradación de la materia orgánica el material de la pila se asienta lo que para mejora la ventilación.

Después de cada volteo, la temperatura desciende del orden de 5 o 10 °C, subiendo de nuevo en caso de que el proceso no haya terminado (Esteve, 2012). El compostaje en pilas estáticas volteadas es un proceso bastante sencillo y escalable para residuos orgánicos homogéneos. Se ha utilizado con éxito en la agricultura durante siglos para compostar estiércol, residuos vegetales, fangos y residuos sólidos municipales (Junta de Andalucía, 2016).

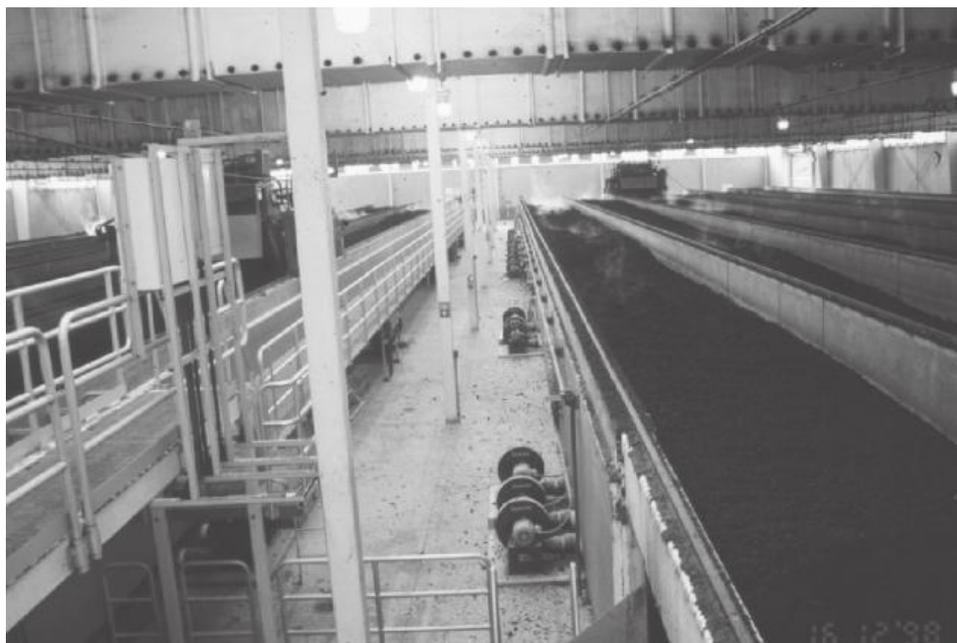
El proceso logra buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantienen las condiciones aerobias y el contenido de humedad (Valverde Orozco, 2015). Sin embargo, las emisiones son grandes y los olores pueden ser un problema significativo.

2.1.7.6 Cama agitada

Existen numerosas variaciones del sistema de cama agitada, son sistemas horizontales que utilizan agitadas normalmente utilizan un canal de concreto aireado de 1.50 m de altura y 6 m de ancho, asistido por máquinas volteadoras u otro sistema de volteo. Este sistema se utiliza principalmente para el compostaje de desechos limpios como biosólidos, digestato anaerobio, estiércol y lodos de pulpas. Utiliza aireación forzada a lo largo de toda la cama y la máquina voltea el material de forma diaria, trasladando el material nuevo desde la parte inicial de la cama al final de esta, lo que lo convierte en un sistema continuo.

El proceso de compostaje dura alrededor de 21 días, el material al final de la cama es descargado a una transportadora que lleva el material hacia el área de curado (Epstein, 2011).

Ilustración II.11 Planta de compostaje de cama agitada



Nota. Recuperado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 99; CRC Press)

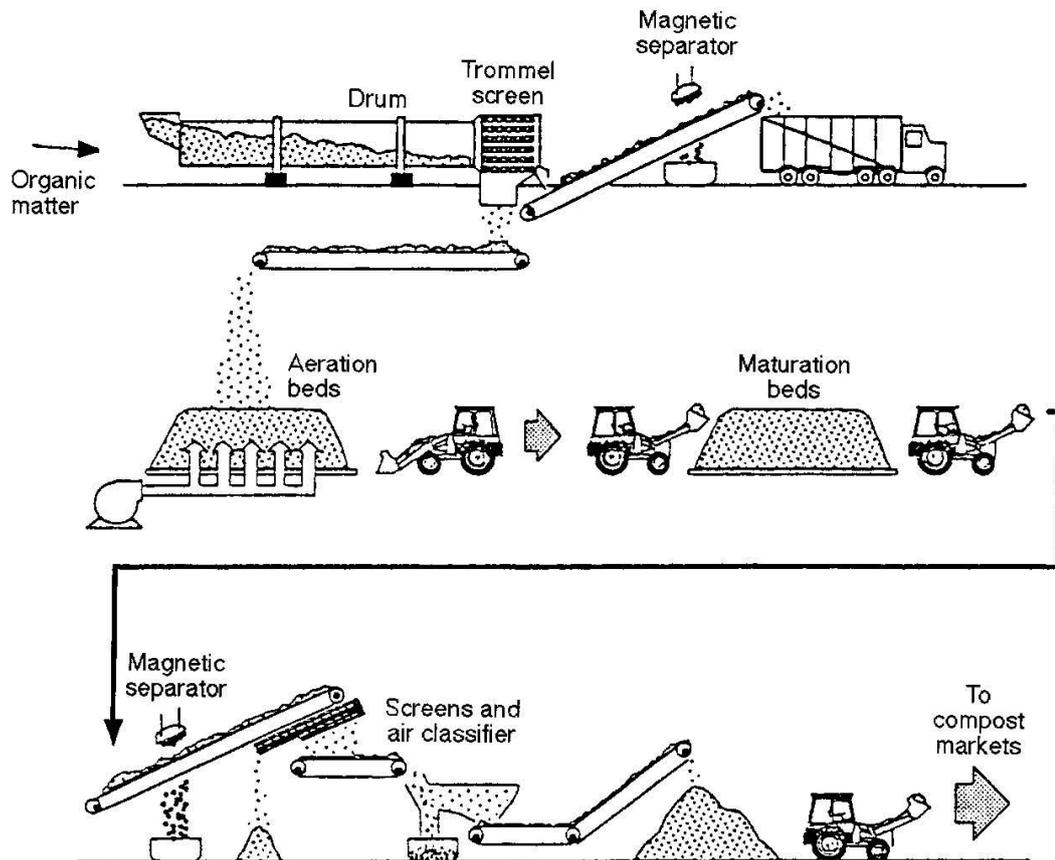
Este sistema es ideal para instalaciones que procesan entre 5,000 y 20,000 toneladas de materia orgánica por año. El sistema de compostaje por camas volteada es un sistema encapsulado y necesita un biofiltro justo después de la instalación para el tratamiento de olores (Epstein, 2011).

2.1.7.7 Compostaje en tambor

El proceso de compostaje se da dentro de un tambor que se encuentra permanentemente en rotación lenta. Estos tambores se construyen para trabajar de forma continua o bien por cargas, son de diferentes tamaños y formas. Están contruidos en acero y la mayoría de ellos incorporan aislamiento térmico, principalmente este sistema es utilizado en países centroeuropeos y nórdicos (Esteve, 2012).

Posee las ventajas de utilizar poco espacio, más rápida producción de compost, buen control de parámetros de compostaje, control de olores dentro de la misma planta, control de lixiviados (Epstein, 2011).

Ilustración II.12 Esquema de compostaje de tambor giratorio horizontal



Nota. Recuperado de "Handbook of Solid Waste Management", (Tchobanoglous G. , 2002, págs. 446, McGraw-Hill)

La materia orgánica, se pesa y registra, para posteriormente ser descargada en la zona de recepción. En esta zona se deposita dentro del tambor mediante el uso de una pala cargadora, con una nula preparación o selección de la materia orgánica, directamente es ingresada al alimentador del tambor rotatorio de compostaje. La alimentación de los desechos y su distribución al interior del tambor se ejecuta de forma totalmente automática gracias al movimiento rotacional del tambor.

La descomposición de la materia orgánica se da dentro del tambor de compostaje, gracias al movimiento de rotación intermitente de la unidad de compostaje, el desecho que normalmente está contenido dentro de bolsas plásticas, es desenrollado y homogeneizado de forma óptima.

Las emisiones de olor, las cuales alcanzan máximos al principio de la

descomposición, son extraídas por el sistema de ventilación del tambor y dirigidas a un biofiltro para su eliminación (Esteve, 2012). El lixiviado de los residuos, que se libera durante la descomposición de la materia orgánicas es recirculado dentro del tambor y distribuido por la rotación intermitente del tambor, lo que permite que el los lixiviados se mantengan dentro del sistema de compostaje.

El sistema de tambor rotatorio no provee el compostaje de forma completa, el tiempo de retención en los tambores rotatorios está en el rango de 24 horas a 7 días, dependiendo de las especificaciones del fabricante, seguido de este período se debe realizar el proceso de curado usualmente realizado por pilas aireadas o bahías aireadas (Epstein, 2011).

2.1.8 Criterios de Selección Sistema de Compostaje

Existen algunos factores que intervienen en el tipo de método de compostaje a utilizar, siendo alguno de orden de costo económico, localización, cantidad de material a compostar, tipo de materia orgánica y regulaciones locales. La mayor razón por la que la tecnología de compostaje no es utilizada ampliamente para el tratamiento de desecho solidos municipales, es debido al bajo costo de operación que representan los rellenos sanitarios para las comunidades (Epstein, 2011).

El tratamiento de desechos sólidos municipales es más complejo debido a que estos desechos no son homogéneos en comparación con los biosólidos. En Estados Unidos las regulaciones estatales como *EPA 40CFR Part 503 biosolids rule* ayudaron a promover el compostaje de lodos de agua residuales y biosólidos, sin embargo, el relleno sanitario es la opción más económica para la gestión de lodos residuales seguido del compostaje (Epstein, 2011).

Tabla II-3. Criterios de la selección según método de compostaje

Criterios para la Selección del sistema de Compostaje							
Sistema de compostaje	Volumen	Distancia Instalación		Tipo de Materia Para Compostar			
		0.8-1,609 Km	>1,609 Km	Desechos de jardín	Lodos Biosólidos	Desechos Alimentos	Residuos Sólidos Municipales
Pila estática	Alto		x	x			
Pila estática cubierta	Alto	x	x		x		
Pila aireada agitada individual	Bajo Mediano	x	x		x	x	
Pila aireada agitada extendida	Mediano Alta	x	x		x		
Sistema con cubierta	Mediano Alta	x	x		x		x
Cama agitada	Mediano Alta	x	x		x		x
Contenedor/Bolsa	Bajo	x	x		x	x	

Nota. Adaptado de "Industrial Composting Environmental Engineering and Facilities Management", (Epstein, 2011, pág. 103; CRC Press)

2.1.9 Gestión de residuos sólidos

El manejo correcto de desechos sólidos se está convirtiendo en una tarea fundamental para entidades gubernamentales nacionales e internacionales, en la elaboración de procedimientos, legislaciones y controles operacionales para su tratamiento y disposición final, debido a los impactos ambientales como contaminación de suelo, agua y aire asociados por la mala disposición de los desechos

El crecimiento de la población y su consumo implica la generación de residuos y por tanto impactos de contaminación ambiental que requieren de una gestión integral para proteger la salud de la población y precautelar los servicios ambientales que brindan los recursos naturales

Sin embargo, aún no se posee a nivel del Ecuador reglamento específico en cuanto

al manejo y disposición de lodos residuales o lodos de desecho provenientes de plantas de tratamiento municipales o plantas industriales.

2.1.10 Marco legal en Ecuador

En Ecuador la normativa para el manejo y disposición de lodos aún no se encuentra muy desarrollada, sin embargo, el estado ecuatoriano en su Constitución redacta lo siguiente:

Art 395, numeral 2 “Reconoce como principio ambiental que las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional”.

Queda así entonces ratificada la importancia del cuidado ambiental, siendo el ente regulatorio el Estado Ecuatoriano, lo que obliga a cumplir con responsabilidad ambiental a las personas o entes que generen desechos dentro del territorio nacional.

En Ecuador existe el “Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente” que antes de su fecha de publicación se lo conocía como Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), en ambos textos se establecen en el Libro VI los controles ambientales, divididos en los siguientes anexos:

Anexo I: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua

Anexo II: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados

Anexo III: Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión

Anexo IV: Norma de Calidad Aire Ambiente

Anexo V: Límites Máximos Permisibles de Niveles de Ruido Ambiente para Fuentes Fijas y para Vibraciones

Anexo VI: Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos

El anexo VI se refiere al manejo de desechos, sin embargo este fue derogado por el Acuerdo Ministerial 028 publicado el 13 de febrero de 2015, en el que se hace énfasis al control ambiental a través de organismos estatales y municipales, todavía se hace referencia al uso de rellenos sanitarios como disposición final de los residuos sólidos y recuperación de materiales reciclables, no así al manejo de lodos residuales y el artículo 5.2.1.3 redacta “Los sedimentos, lodos de tratamiento de aguas residuales y otras tales como residuos del área de la construcción, cenizas, cachaza, bagazo, o cualquier tipo de desecho doméstico o industrial, no deberán disponerse en aguas superficiales, subterráneas, marinas, de estuario, sistemas de alcantarillado y cauces de agua estacionales secos o no, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales referentes a los desechos sólidos peligrosos o no peligrosos, de acuerdo a su composición”.

En abril del 2010 se crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (MAE-PNGIDS), con el objetivo primordial de impulsar la gestión de los residuos sólidos en los municipios del Ecuador, con un enfoque integral y sostenible, con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, a través de estrategias, planes y actividades de capacitación, sensibilización y estímulo a los diferentes actores relacionados.

El Acuerdo ministerial 028 fue derogado el 04 de mayo del 2015, por el Acuerdo Ministerial 061 en el que se dan cambios en cuanto a emitir tablas de control de parámetros de las emisiones y efluentes.

Aun así, el cumplimiento de las normativas existentes no se da de forma íntegra, hacen falta campañas de control, y apoyo integral de todos los involucrados en las actividades que generen impactos ambientales.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

Para el diseño de cualquier instalación de tratamiento de desechos, el punto de partida en el dimensionamiento es conocer cuál va ser el desecho que se tratará, como ya se ha redactado en líneas anteriores el objetivo principal es el compostaje de lodos residuales.

El presente proyecto se desarrolla como complemento al subproducto del tratamiento de aguas residuales urbanas, por lo que la planta de compostaje cierra el proceso de economía circular, devolviendo con valor agrado un residuo como fertilizante.

Para el objeto de estudio de este proyecto se ha tomado como punto de partida una localidad con población rural por poseer plantas de tratamiento de aguas residuales homogéneas, es decir que, a diferencia de las grandes ciudades, los lodos resultantes del tratamiento de agua residual serán también homogéneos, facilitando la operación de la instalación de compostaje.

3.2 Área de estudio

El área de estudio del proyecto abarca una extensión de 130 Ha que cubre la totalidad del poblado de Tenguel.

La parroquia rural de Tenguel-Ecuador pertenece al cantón Guayaquil, provincia del Guayas, está atravesada, en dirección Este-Oeste, por el río del mismo nombre, el mismo que nace en las estribaciones de los Andes, y se despliega a lo largo y ancho de una llanura costera aluvial. Su principal actividad económica descansa en la actividad agropecuaria.

Tenguel está ubicada a 170 Km de Guayaquil, se encuentra dentro de la jurisdicción del cantón Guayaquil en la provincia del Guayas y limita:

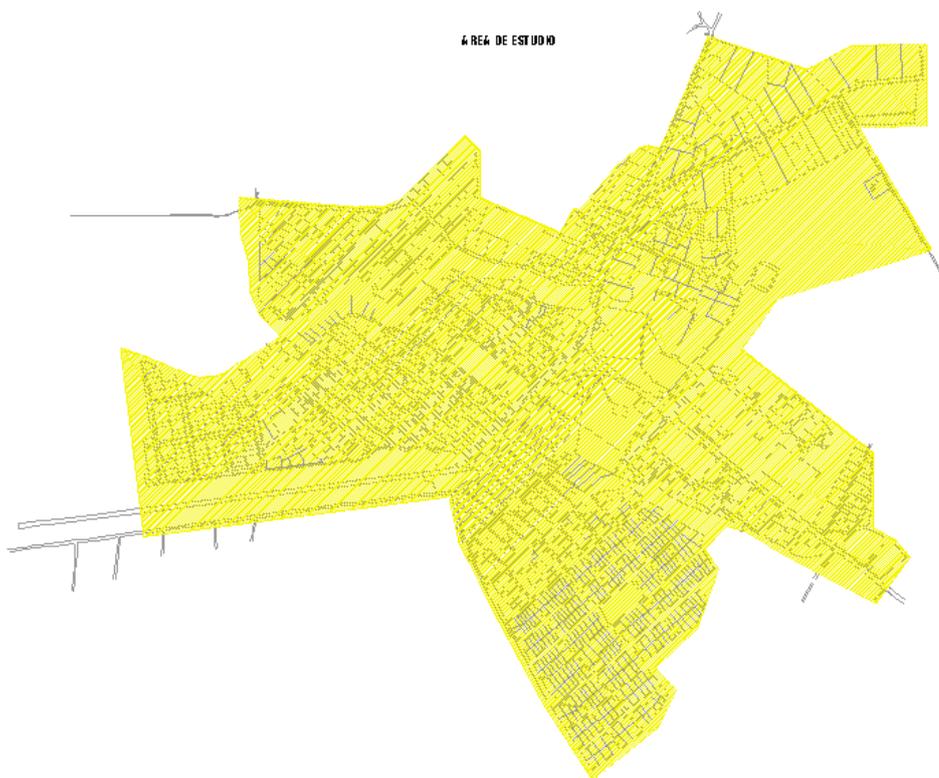
Al Norte con el cantón Balao, provincia del Guayas

Al Sur con el cantón el Guabo, en la provincia de El Oro

Al Este con el cantón Camilo Ponce Enríquez en la provincia de El Azuay

Al Oeste con el golfo de Guayaquil como lo demuestra el siguiente mapa.

Ilustración III.1 Área del estudio, parroquia Tenguel



La población actual es del orden de los 7,030 habitantes, según el último censo nacional del año 2010, con una estimación de la población al año 2018 de 8498 habitantes a una tasa de crecimiento del 2.4% anual. El relieve topográfico del centro poblado es relativamente plano y su altitud media está entre 4 y 8 m.s.n.m. El área de estudio de la población de Tenguel abarca una extensión de 130 hectáreas, que cubre la totalidad de dicho centro poblado (Interagua, 2015).

Actualmente se encuentra en fase de construcción la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la parroquia Tenguel, que utilizará la tecnología por biodegradación del agua residual, la misma que generará lodos residuales como desecho, por lo que una planta de compostaje de lodos residuales sería el

complemento a la PTAR. La gestión de los desechos sólidos de Tenguel se realiza con su transporte hacia la ciudad de Guayaquil por la empresa operadora Puerto Limpio. Tratar los lodos de forma local representaría un ahorro en costos de transporte y espacio utilizado en el relleno sanitario de la ciudad de Guayaquil.

3.3 Datos de Diseño

Para el pre-dimensionamiento de la instalación, es necesario conocer el volumen teórico a procesar o la tasa de producción de lodos estabilizados de la PTAR propuesta, aunque no es el alcance de este proyecto el diseño de una planta de tratamiento, se realizará una revisión del cálculo de los caudales a tratar por la PTAR y el volumen de lodos producidos.

Los futura PTAR originará lodos residuales. Los caudales de agua residual se han obtenido a partir de los datos de población de la Parroquia de Tenguel del Censo de 2010, con una población de 7030 habitantes, este número de habitantes dará un aporte de agua residual que debe calcularse, al que se llamará caudal de diseño.

Tabla III-1. Parámetros de partida de caudales a tratar

Parámetro	Valor-Unidad
Área de aporte	130 Ha
Consumo por habitante	150 l/hab-día
Tasa de crecimiento	2.40%
Año horizonte	2029 (Fase 1) / 2045 (Fase 2)
Factor de retorno	80%
Coefficiente de Punta	2,91 (Fase 1) / 2,81 (Fase 2)
Caudal aportaciones erradas	10% del caudal máximo horario
Caudal por infiltraciones	3,25 l/s (0,025 l/s/ha x 130 ha)

Fuente: (El Autor, 2017)

La justificación de cada uno de los parámetros considerados en la tabla anterior se detalla a continuación.

3.3.1 Año horizonte de proyección de diseño

Para proyectos de tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales, los horizontes de diseño se los realiza para periodos largos, para el caso del proyecto se ha proyectado dos fases, siendo el año horizonte el 2029 en la fase y a partir de ese año al final del periodo en el año 2045 como fase II, año en el que la planta de compostaje de lodos debería estar a límite de su capacidad instalada, al igual que la PTAR.

3.3.2 Caudal de población a servir

Para sistemas de alcantarillado tanto de aguas residuales como pluviales, se plantea la metodología detallada en libro Diseño de Estaciones de Bombeo de (TBF Flygt S.A., 2004), que explica el cálculo de caudales de aporte para poblaciones. El agua residual urbana está constituida por la suma de sus aguas domésticas, industriales, comerciales e institucionales, en caso de que un tipo de aporte no exista, este simplemente no se suma. Para esta metodología se definen continuación los siguientes parámetros de cálculo.

3.3.2.1 Aporte doméstico AD

El aporte doméstico estará dado por la siguiente expresión, (TBF Flygt S.A., 2004).

$$AD = \frac{P \times Dot. \times R}{86400} \quad (III-1)$$

Donde:

Símbolo	Descripción	Unidad
AD	Caudal medio diario de aguas residuales domesticas	[l/s]
$Dot.$	Consumo por habitante	[l/hab.-día]
P	Población servida	[hab.]
R	Coefficiente de retorno	[%]

El coeficiente de retorno R es la relación entre el agua limpia consumida y la vertida a la red de saneamiento.

3.3.2.2 Factor o coeficiente de retorno R

El factor de retorno es la cantidad de agua expresada en porcentaje que es regresada al sistema de drenaje de aguas servidas después de ser utilizada por una población o comunidad, en la literatura técnica se acepta como factor de retorno recomendado 80%. Para sistemas de saneamiento aplicados a la ciudad de Guayaquil el valor adoptado en el Plan Maestro de agua potable y alcantarillado.

3.3.2.3 Consumo por Habitante dot

El valor del consumo diario de agua por habitante, conocido como la dotación por habitante, dependerá del nivel socio económico de la población asentada en la zona de estudio.

Tomando como referencia Plan Maestro de Agua Potable, Alcantarillado Sanitario y Alcantarillado Pluvial de Guayaquil (INTERAGUA, 2015), se ha considerado una dotación de 150 l/hab-día hasta el año 2029 (fase 1) y de 175 l/hab-día a partir de ese año al final del periodo en el año 2045, por considerarse una zona rural en desarrollo y por no tener información de desarrollos urbanísticos o industriales a futuro en la zona.

3.3.2.4 Población P y Tasa de crecimiento r

La información estadística de cómo la población se ha ido desarrollado, a lo largo de los años en Tenguel es un tanto limitada. Se cuenta sólo con la información del censo del año de 1990; del VI Censo de Población y V de Vivienda, realizado el 25 de noviembre del 2001 y el Censo de Población y Vivienda 2010.

Los datos del crecimiento demográfico en el centro poblado de Tenguel se presentan en la siguiente tabla.

Tabla III-2. Evolución de tasa de crecimiento poblacional de Tenguel

Año	Población <i>hab.</i>	Tasa <i>%</i>	Observaciones
1990	4,350	--	Dato no disponible
2001	5,508	2.17	Censo
2010	7,030	2.75	Censo

Fuente: (INEC, 1990-2001-2010)

La tasa de crecimiento poblacional del Ecuador al año 2016 es del 1.5% según el INEC, al no tener datos más precisos de a tasa de crecimiento, se asumirá que la tasa de crecimiento de Tenguel es de 2.4% para razones de cálculo.

Para la estimación de la población a servir se tiene la siguiente formulación, que utiliza el método de crecimiento geométrico que se resumen en la siguiente ecuación:

$$P_f = P_0 (1 + r)^t \quad \text{(III-2)}$$

Donde:

Símbolo	Descripción	Unidad
P_f	Población futura	[<i>hab</i>]
P_o	Población inicial	[<i>hab</i>]
r	Tasa de crecimiento	[%]
T	Número de periodos (años) a proyectarse	[<i>años</i>]

Se debe tener cuidado en el uso de esta expresión ya que conduce a veces a resultados algo exagerados, en especial para poblaciones comenzando a desarrollarse, ya que tienden a tener tasas de crecimiento elevadas mientras alcanzan su estabilización. Este método es por lo tanto recomendable para poblaciones que se encuentran en pleno desarrollo y por períodos cortos en el futuro (10-15 años). Sin embargo, si la tasa de crecimiento es baja como el caso del proyecto 2.40%, se puede utilizar para este fin.

3.3.2.5 Aportes comerciales *AC*

Debido a la población fluctuante de los sectores comerciales durante las horas del día y durante los días de la semana, los valores de densidad y máxima población de consumo por habitante son difíciles de evaluar. Sin embargo, para propósitos de diseño se adopta un caudal medio diario de 2.0 l/s-Ha , suponiendo un porcentaje de alto retorno. Este valor se multiplica por el área de la población en hectáreas A_p , (TBF Flygt S.A., 2004).

$$AC = 2.0 \frac{\text{l/s}}{\text{Ha}} \times A_p \quad (\text{III-3})$$

3.3.2.6 Aportes industriales *AI*

Los aportes industriales deberían determinarse por cada vertido en particular ya que estas fluctúan muy sustancialmente según el tipo y tamaño de la industria, así como el grado de recirculación y los procesos de tratamiento. Sin embargo, para pequeña industria localizada y polígonos de industria ligera, para estimar el aporte industrial puede utilizarse un caudal de 1.5 l/s-ha de zona industrial (TBF Flygt S.A., 2004). Este valor se multiplica por el área de la población en hectáreas A_p , sin embargo, al ser un área rural se considerará como valor cero.

$$AI = 1.5 \frac{\text{l/s}}{\text{Ha}} \times A_p \quad (\text{III-4})$$

3.3.2.7 Aportes institucionales *AIT*

Los aportes de aguas concentradas, tales como cuarteles, hospitales, escuelas, hoteles, universidades y establecimientos similares, deberán manejarse como aportes domésticos calculados con una densidad de población de 500 hab/Ha , un consumo de 250 l/hab-día y un coeficiente de retorno de 90% , que equivale a adoptar del área bruta de la concentración especial (TBF Flygt S.A., 2004).

$$AIT = 1.3 \frac{\text{l/s}}{\text{Ha}} \times A_p \quad (\text{III-5})$$

3.3.3 Caudal medio diario de aguas residuales Q_{MD}

El caudal medio diario de aguas residuales Q_{MD} , estará dado por la sumatoria de los diferentes aportes determinados, de acuerdo con lo anterior expuesto (TBF Flygt S.A., 2004).

$$Q_{MD} = AD + AC + AI + AIT \quad (\text{III-6})$$

3.3.4 Caudal máximo horario Q_{MH}

El sistema de alcantarillado debe estar diseñado para evacuar la punta diaria de caudal del día de máximo aporte. El caudal máximo horario del día máximo Q_{MH} , se puede determinar multiplicando el caudal medio diario Q_{MD} por un factor de caudal pico f comprendido entre 2 y 3 (TBF Flygt S.A., 2004).

$$Q_{MH} = f \times Q_{MD} \quad (\text{III-7})$$

3.3.4.1 Factor de caudal pico

El factor de caudal pico es conocido también como coeficiente de mayoración o en inglés “peak flow factor”, y representa el aumento súbito del caudal de descarga en una red de agua residual por una población. Se calcula mediante diferentes metodologías.

El cálculo de este factor en función del Q_{MD} , a través de la ecuación propuesta por Tchobanoglous, válida para un rango de 4.00 a 5,000.00 l/s

$$f = \frac{3,70}{Q_{MD}^{0,0733}} \quad (\text{III-8})$$

Otro modo de cálculo del factor del factor de caudal pico es propuesto por Babbitt y

Baumann (1958) en función de la población P , donde está entre $1 \leq P \leq 1000$, donde P se debe expresar en miles.

$$f = \frac{5}{P^{0.2}} \quad (\text{III-9})$$

Harmon propone el cálculo a también en función de la población P , en donde P se debe expresar en miles. Esta fórmula es válida para $1 \leq P \leq 1000$.

$$f = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (\text{III-10})$$

Los resultados de estas fórmulas son similares, sin embargo, para este proyecto se tomará el factor de caudal pico de Harmon.

3.3.5 Caudal por infiltración Q_i

Los aportes por infiltración dependerán de la localización de las conducciones respecto al nivel freático de la zona y al estado de conservación de estas. Para el presente proyecto, se estimará suponiendo un aporte de 3,25 l/s (0,025 l/s/ha x 130 ha), la ecuación utilizada recomendada por (TBF Flygt S.A., 2004) es.

$$Q_i = 0.025 \frac{l - s}{Ha} \times A_p \quad (\text{III-11})$$

3.3.6 Aportaciones por conexiones erradas Q_{CE}

Aunque se trate de redes separativas de aguas residuales y pluviales, frecuentemente aparecerán conexiones erradas, las cuales corresponden básicamente a la incorporación de los desagües pluviales (bajantes de los tejados y los patios) no controladas a la red sanitaria; en estos casos, se debe evaluar tales caudales y adicionarlos al caudal de diseño de aguas negras. En general, para los sistemas de alcantarillados separados, las redes internas son proyectadas en forma independiente desde el interior de las edificaciones, por tal razón no deberían

presentarse aportes por conexiones erradas en los colectores sanitarios. Sin embargo, como medida preventiva del diseño se considerará los siguientes aportes.

Tabla III-3. Caudales típicos para conexiones erradas

Sector S	Coefficiente de conexiones erradas C_{ce}
1: Residencial	0.0001 l/s-hab
2: Comercial, Institucional o Industrial	0.20 l/s-Ha

Nota. Recuperado de "Bombas Sumergibles y Estaciones de Bombeo", (TBF Flygt S.A., 2004)

Tomando en cuenta lo expuesto, la ecuación anterior se tiene según (TBF Flygt S.A., 2004)

$$Q_{ce} = 0,001 \frac{l/s}{Hab} \times P + 0,20 \frac{l/s}{Hab} \times A_{R-C-I} \quad (III-12)$$

3.3.7 Caudal de diseño Q_n

Finalmente, el caudal de diseño Q_n de agua residual que recibirá la PTAR se obtendrá sumando al caudal máximo horario del día máximo, los aportes por infiltración y por conexiones erradas según (TBF Flygt S.A., 2004) será.

$$Q_n = Q_{MH} + Q_i + Q_{CE} \quad (III-13)$$

Donde:

- Q_n Caudal de diseño en l/s
- Q_{MH} Caudal máximo horario en l/s
- Q_i Caudal debido a infiltraciones en l/s
- Q_{CE} Caudal por conexiones erradas en l/s

El caudal de diseño es el que se considera para estaciones de bombeo, debido a que es el máximo caudal posible que se puede dar como ingreso de aguas residuales, es más bien de tipo probabilístico, sin embargo, se debe calcular para tener capacidad suficiente de bombeo frente al ingreso de agua de agua que pueda hacer rebosar el sistema de alcantarillado de una población o comunidad.

3.3.8 Caudal de tratamiento Q_{Trat}

El caudal de tratamiento Q_{Trat} , es aquel caudal que la PTAR estará en posibilidades de tratar, este considera la suma del caudal medio diario Q_{MD} , el caudal de infiltración Q_i y el caudal de conexiones erradas Q_{CE} . Este caudal de tratamiento difiere del caudal de diseño en magnitud, pues no considera mayoraciones de caudal, se lo puede definir de la siguiente forma.

$$Q_{Trat} = Q_{MD} + Q_i + Q_{CE} \quad (\text{III-14})$$

De todos los parámetros anotados anteriormente para el presente proyecto se tiene el siguiente resumen para los años 2029 (Fase I) y 2045 (Fase II):

Tabla III-4. Caudal de diseño para el año 2029

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
<i>A</i>	Área residencial bruta a servir	<i>Ha</i>	130.00
<i>D</i>	Densidad bruta de población año 2029	hab./ <i>Ha</i>	84.86
<i>Dot.</i>	Consumo por habitante	<i>l/hab.-día</i>	150.00
<i>P</i>	Población servida año 2029	<i>hab.</i>	11,032.00
<i>R</i>	Coefficiente de retorno	%	0.80
<i>AD</i>	Caudal aporte doméstico de aguas residuales	<i>l/s</i>	15.32
<i>AC</i>	Aportes comerciales	<i>l/s-Ha</i>	0.52
<i>AI</i>	Aportes industriales	<i>l/s-Ha</i>	0.00
<i>AIT</i>	Aportes institucionales	<i>l/s-Ha</i>	0.34
Q_{MD}	Caudal medio diario de aguas residuales	<i>l/s</i>	16.18
Q_{MH}	Caudal máximo horario QMH	<i>l/s</i>	47.12
Q_i	Caudal de infiltración	<i>l/s</i>	3.25
Q_{CE}	Aportaciones por correcciones erradas	<i>l/s</i>	5.52
Q_n	Caudal de diseño	<i>l/s</i>	55.89
Q_{Trat}	Caudal de Tratamiento	<i>l/s</i>	24.95

Fuente: (El Autor, 2017)

Tabla III-5. Caudal de diseño para el año 2045

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
<i>A</i>	Área residencial bruta a servir	<i>Ha</i>	<i>130.00</i>
<i>D</i>	Densidad bruta de población año 2039	hab./ <i>Ha</i>	<i>124.03</i>
<i>Dot.</i>	Consumo por habitante	<i>l/hab.-día</i>	<i>175.00</i>
<i>P</i>	Población servida año 2045	<i>hab.</i>	<i>16,123.30</i>
<i>R</i>	Coeficiente de retorno	%	<i>0.80</i>
<i>AD</i>	Caudal aporte doméstico de aguas residuales	<i>l/s</i>	<i>26.13</i>
<i>AC</i>	Aportes comerciales	<i>l/s-Ha</i>	<i>0.52</i>
<i>AI</i>	Aportes industriales	<i>l/s-Ha</i>	<i>0.00</i>
<i>AIT</i>	Aportes institucionales	<i>l/s-Ha</i>	<i>0.34</i>
<i>Q_{MD}</i>	Caudal medio diario de aguas residuales	<i>l/s</i>	<i>26.98</i>
<i>Q_{MH}</i>	Caudal máximo horario QMH	<i>l/s</i>	<i>74.11</i>
<i>Q_i</i>	Caudal de infiltración	<i>l/s</i>	<i>3.25</i>
<i>Q_{CE}</i>	Aportaciones por correcciones erradas	<i>l/s</i>	<i>8.06</i>
<i>Q_n</i>	Caudal de diseño	<i>l/s</i>	<i>85.43</i>
<i>Q_{Trat}</i>	Caudal de Tratamiento	<i>l/s</i>	<i>38.30</i>

Fuente: (El Autor, 2017)

3.3.9 Cálculo de cantidad de lodos a producirse

Una vez calculada la cantidad de agua residual que se tratará, se tiene uno de los parámetros de inicio para calcular la cantidad de lodos producidos. Como se redactó en el capítulo II apartado 2.1.2, la cantidad y tipo de lodos producidos dependerá del tipo de tratamiento del agua residual, para el presente proyecto se considerará que los lodos se generarán de un proceso de depuración consistente en un pretratamiento y un proceso biológico mediante reactores de crecimiento asistido (filtros percoladores).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), se define como la cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica (Raffo Lateca & Ruiz Lizama, 2014). Para determinar la concentración de DBO₅ en mg/l, lo prudente es llevar cabo un muestreo del agua residual y su respectivo análisis en laboratorio.

Cuando no se tiene análisis por laboratorio se puede estimar teniendo la contribución de DBO en g por habitante-día, según (Córtes Martínez & Treviño Cansino, 2017, pág. 34) “Afini (1989 citado por Rolim, 2000) realizó estudios acerca de la contribución de materia orgánica por persona y concluyó lo siguiente: 45 g/hab-día para ciudades pequeñas; 60 g/hab-día para ciudades medianas y 75 g/hab-día para ciudades grandes”.

Se debe definir la carga contaminante de ingreso en el agua residual, para aguas residuales urbanas, a continuación, se muestra los valores de composición típica del agua residual domestica bruta.

Tabla III-6. Composición físico química típica de agua residual domestica

Contaminantes	Unidad	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos Suspendidos (SS)	mg/l	100	202	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos Sedimentables	mg/l	5	10	20
D. bioquímica oxígeno 5 días (DBO ₅)	mg/l	110	220	400
Carbón orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
D. química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno total (en la forma N) (NT)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amonio libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total (en la forma P) (PT)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros*	mg/l	30	50	100
Sulfatos*	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	50	100	200
Grasas y aceites (G y A)	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	NMP/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁹
Comp. orgánicos volátiles (COVs)	µg/l	<100	100-400	>400

* Los valores deben aumentarse en la cantidad en que estos compuestos se hallan presentes en las aguas de suministro.

Fuente: Metcalf y Eddy (1991).

Para la estimación de la cantidad de carga orgánica (CO) se puede utilizar la siguiente ecuación (Córtes Martínez & Treviño Cansino, 2017).

$$C.O. = \frac{P \times DBO_{\text{Contribución}}}{1000} \quad (\text{III-15})$$

Donde:

C.O Carga orgánica en kg
P Población servida en hab.
DBO_{contribución} Contribución de DBO₅ en g/hab-día

Para calcular la contribución de DBO en mg/l del afluente que llega la PTAR se utiliza la siguiente ecuación (Córtes Martínez & Treviño Cansino, 2017).

$$DBO_{\text{afluente}} = \frac{C.O. \times 1000}{Q_{MD}} \quad (\text{III-16})$$

Donde:

C.O Carga orgánica en kg
Q_{MD} Caudal medio de agua residual afluente en m³/día
DBO_{afluente} DBO₅ en mg/l

Para el cálculo de cargas contribución de carga orgánica por persona se utilizó el valor de 45 g/hab-día para ciudades pequeñas, la tabla siguiente resume los valores de parámetros de diseño y cargas contaminantes.

Tabla III-7. Resumen de cargas contaminantes

Concepto	Unidad	Año 2029	Año 2045
Población de diseño (P)	<i>hab.</i>	11,032.00	16,123.00
Caudales			
Caudal medio diario AS (Q_{MD})	<i>l/s</i>	16.18	26.98
Factor de mayoración (f)		2.91	2.75
Caudal máximo horario de AS (Q_{MH})	<i>l/s</i>	47.12	74.11
Caudal aportación erradas (Q_{ce})	<i>l/s</i>	5.62	8.17
Caudal por infiltraciones (Q_f)	<i>l/s</i>	3.25	3.25
Total, de aguas residuales (Q_{maxt})	<i>l/s</i>	55.99	85.53
Total, de aguas residuales asumido (Q_{maxt})	<i>l/s</i>	60.00	85.00
Caudal medio (Q_{medt})	<i>l/s</i>	25.05	38.40
Caudal medio asumido (Q_{medt})	<i>l/s</i>	25.00	38.00
Cargas			
Carga de sólidos (SST)	<i>g/hab./día</i>	52	52
Carga de sólidos calculada (SST)	<i>mg/l</i>	410	360
Carga de materia orgánica (DBO_5)	<i>g/hab./día</i>	45	45
Carga de materia orgánica calculada (DBO_5)	<i>mg/l</i>	355	311
Carga de materia orgánica asumida (DBO_5)	<i>mg/l</i>	350	350
Carga de SST asumida (SST)	<i>mg/l</i>	400	350

Fuente: (El Autor, 2017)

A partir de los caudales resultantes y de las cargas calculadas, los datos de cargas contaminantes adoptados para el dimensionamiento son los siguientes:

Tabla III-8. Cargas contaminantes definidas para el diseño

Parámetro	Fase 1	Fase 2
Carga de materia orgánica (DBO_5)	350 mg/l	350 mg/l
Carga de sólidos totales en suspensión (SST)	400 mg/l	350 mg/l

Fuente: (El Autor, 2017)

La calidad de agua de descarga de la PTAR debe cumplir como mínimo lo redactado en la normativa ambiental para la descarga de aguas residuales para el presente estudio, estos parámetros tendrán efecto en la producción de lodos,

debido a que a mayor capacidad de remoción de materia orgánica la producción de lodos será mayor. Los valores esperados de la salida del tratamiento secundario para filtros percoladores de agua de efluente son mostrados a continuación.

Tabla III-9. Concentración carga contaminante del agua de efluente

Parámetro	Valor adoptado
Carga de materia orgánica (DBO ₅)	<*35 mg/l
Carga de sólidos totales en suspensión (SST)	<*65 mg/l
PH	6-8
Nitrógeno -NTK (valor adoptado)	<15mg/l

*Nota: *Cumple límite máximo permisible de descarga a cuerpos de agua dulce según TULSMA*

Fuente: (El Autor, 2017)

La justificación de los valores de arriba se dan continuación.

Primero, se debe calcular la carga de DBO₅ y los SST de entrada que ingresarán a la PTAR en el clarificador primario. Despejando la ecuación III-16, se obtiene la siguiente relación para cada carga contaminante:

$$C.O._{DBO} = \frac{DBO_5 \times Q_{medt}}{1000} \quad (III-17)$$

$$C.O._{SST} = \frac{SST \times Q_{medt}}{1000} \quad (III-18)$$

Donde:

$C.O._{DBO}$ Carga orgánica DBO en kg

$C.O._{SST}$ Carga orgánica sólidos suspendidos totales en kg

Q_{medt} Caudal medio de tratamiento en m³/día

DBO_5 DBO₅ en mg/l

SST Sólidos suspendidos totales en mg/l

Para el año 2019 se tiene un caudal adoptado de 25 l/s (2160 m³/día) y para el año 2045 un caudal adoptado de 38 l/s (3,283.20 m³/día), con lo que se obtiene para cada contaminante respectivo lo siguiente.

Tabla III-10. Carga contaminante de ingreso

Concepto	Unidad	Año 2029	Año 2045
Q_{medt}	m ³ /día	2,160.00	3,283.20
DBO_{5carga}	kg DBO ₅ /d	756.00	1,149.12
SST_{carga}	kg SST/d	864.00	1,149.12

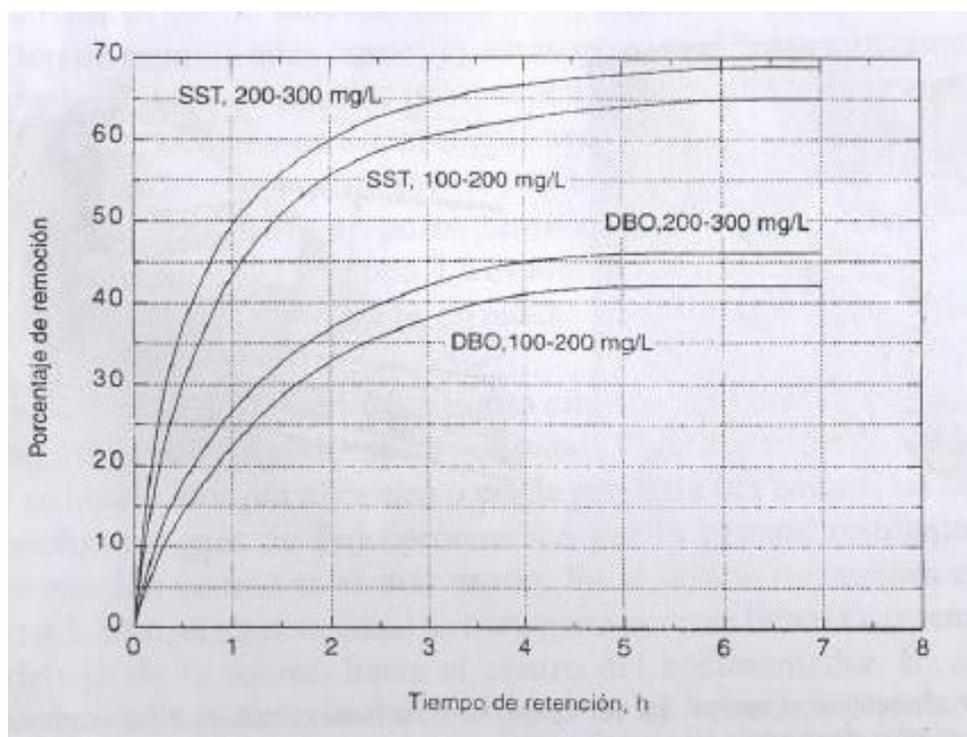
Fuente: (El Autor, 2017)

Se ha considerado al inicio del tratamiento un clarificador primario (no objeto del estudio) que reduce la carga DBO₅, el objetivo es separar los sólidos fácilmente sedimentables y hacer el tratamiento secundario más eficiente. Los sedimentadores básicamente realizan su trabajo haciendo que el agua circule a una velocidad horizontal mínima que permita que los sólidos por efecto de la gravedad caigan en el fondo.

Según Metcalf-Eddy los tanques de decantación primaria se proyectan para proporcionar un tiempo de retención de 90 a 150 minutos.

Se han realizado observaciones de la eficiencia en la remoción de SST y DBO₅ en función de la carga de concentración del afluente y el tiempo de retención en tanques de sedimentación primaria en funcionamiento, el gráfico desarrollado (Metcalf & Eddie, 1996) se muestra a continuación.

Ilustración III.2 Relación tiempo de retención Vs % de remoción



Nota. Recuperado de (Metcalf & Eddie, 1996)

Las curvas de la figura anterior pueden modelarse matemáticamente como una hipérbola, a través de la expresión.

$$R = \frac{t}{a + bt} \quad (\text{III-19})$$

Donde:

Símbolo	Descripción	Unidad
R	Porcentaje de remoción de DBO ₅ ó SST esperado	%
t	Tiempo nominal de retención	h
a	Constante empírica	--
b	Constante empírica	--

Los valores de las constantes toman los siguientes valores a 20 °C, según (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Tabla III-11. Valores de las constantes empíricas a y b

Variable	a	b
DBO	0.018	0.020
SST	0.0075	0.014

Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 2000)

Con los valores de las constantes a y b , los porcentajes de eficiencia de remoción de carga contaminante de DBO₅ y SST para los años 2029 y 2045 se dan según como:

Tabla III-12. Eficiencia de remoción año 2029 para DBO₅

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
a	Coeficiente DBO ₅	--	0.018
b	Coeficiente DBO ₅	--	0.020
t	Tiempo	h	2.38
R	Eficiencia de remoción	%	36.28

Fuente: (El Autor, 2017)

Tabla III-13. Eficiencia de remoción año 2029 para SST

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
a	Coeficiente SST	--	0.0075
b	Coeficiente SST	--	0.0140
t	Tiempo	h	2.38
R	Eficiencia de remoción	%	58.30

Fuente: (El Autor, 2017)

Tabla III-14. Eficiencia de remoción año 2045 para DBO₅

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
<i>a</i>	Coeficiente DBO ₅	--	0.018
<i>b</i>	Coeficiente DBO ₅	--	0.020
<i>t</i>	Tiempo	<i>h</i>	2.52
<i>R</i>	Eficiencia de remoción	%	36.84

Fuente: (El Autor, 2017)

Tabla III-15. Eficiencia de remoción año 2045 para SST

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
<i>a</i>	Coeficiente SST	--	0.0075
<i>b</i>	Coeficiente SST	--	0.0140
<i>t</i>	Tiempo	<i>h</i>	2.52
<i>R</i>	Eficiencia de remoción	%	58.91

Fuente: (El Autor, 2017)

Por lo tanto, la concentración de contaminante removido por el clarificador para el año 2029 se da como.

$$DBO_{removida} = 350 \frac{mgDBO_5}{l} \times 0.3628 \times 2160 \frac{m^3}{h} \times 0.001 = 274.0 \frac{kgDBO_5}{dia}$$

$$SST_{salida} = 400 \frac{mgSST}{l} \times 0.5830 \times 2160 \frac{m^3}{h} \times 0.001 = 503.75 \frac{kgSST}{dia}$$

Para el año 2045 los cálculos son similares, se presenta el resumen en la siguiente tabla, esta será la carga de salida del clarificador primario.

Tabla III-16. Carga contaminante removida por el clarificador primario

Concepto	Unidad	% Remoción	Año 2029	% Remoción	Año 2045
<i>DBO₅ removida</i>	<i>kg DBO₅/día</i>	36.28	274.28	36.84	423.36
<i>SST removida</i>	<i>kg SST/día</i>	58.30	503.75	58.91	676.90

Fuente: (El Autor, 2017)

Con estos valores de concentración de carga contaminante removida, se procederá a calcular el caudal de lodos primarios que salen del clarificador, para esto se asumirá una gravedad específica de lodo de 1.05 y contenido de sólidos en el lodo del 4.4% (MetCalf & Eddie, 1995), a través de la siguiente ecuación.

$$Q_{lodo} = \frac{\text{Masa de TSS}}{\text{peso específico}_{lodo} \times \% \text{ sólidos}_{lodo}} \quad (\text{III-20})$$

Para el año 2029 que se tienen los siguientes cálculos.

$$Q_{lodo} = \frac{503.75 \frac{\text{TSS kg}}{\text{día}}}{1.05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 0.044 \times 1000} = 10.90 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Este es el caudal que se debe evacuar del sedimentador primario, por lo que el caudal y la concentración de salida de DBO₅ que será enviado a la siguiente etapa (filtro percolador) es.

$$Q_{DBO_5 \text{ salida}} = Q - Q_{lodo} \quad (\text{III-21})$$

$$Q_{DBO_5 \text{ salida}} = 2160.00 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 10.90 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 2,149.10 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

La carga de salida será.

$$DBO_{salida} = DBO_5 \text{ carga} - DBO_{removida} \quad (\text{III-22})$$

Por lo que se tiene.

$$DBO_{salida} = 756 \frac{kg DBO_5}{día} - 274.28 \frac{kg DBO_5}{día} = 481.72 \frac{kg DBO_5}{día}$$

La concentración de salida de DBO₅ que sale del clarificador primario es.

$$DBO_{5\ salida} = \frac{481.72 \frac{kg DBO_5}{día}}{2,149.00 \frac{m^3}{día} \times 1000} = 224.15 \frac{mg\ 5DBO_5}{l}$$

La carga de salida de TSS será.

$$TSS_{salida} = TSS_{5\ carga} - TSS_{removida} \quad (\text{III-23})$$

Por lo que se tiene.

$$TSS_{salida} = 864 \frac{kg\ TSS}{día} - 503.75 \frac{kg\ TSS}{día} = 360.25 \frac{kg\ TSS}{día}$$

El resumen de resultados para los años 2029 y 2045 se tiene en la siguiente tabla.

Tabla III-17. Carga contaminante de salida en clarificador primario

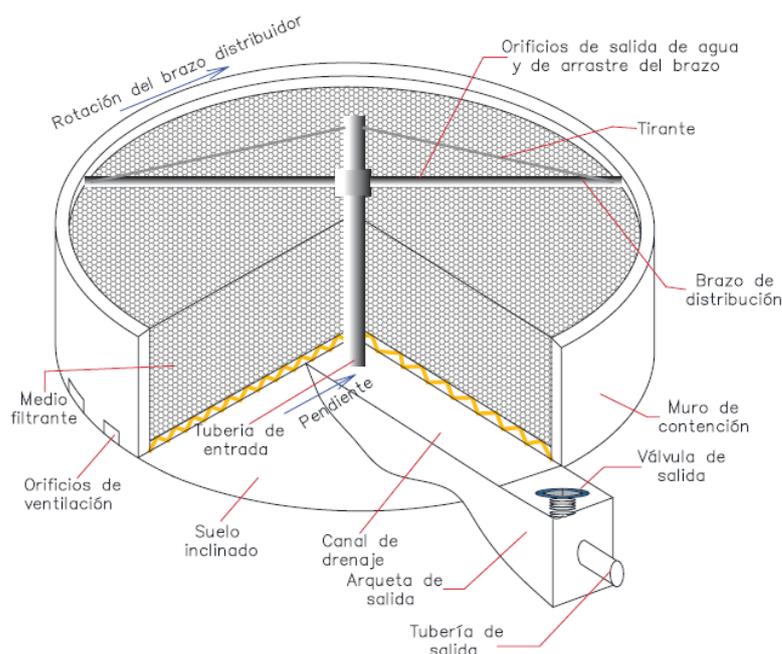
Concepto	Año 2029	Año 2045	Unidad
Carga de TSS removida	503.75	676.90	Kg TSS/día
	232.22	206.17	mg TSS/l
Gravedad específica del lodo	1.05	1.05	g/cm ³
Contenido de sólidos del lodo	4.40%	4.4	
Caudal de lodos primarios	10.90	14.65	m ³ /día
Q DBO ₅ de salida	2,149.10	3,268.55	m ³ /día
Carga DBO ₅ salida	481.72	725.76	kg DBO ₅ /d
Concentración de DBO ₅ de salida	224.15	222.04	mg DBO ₅ /l
Carga de TSS de salida	360.25	472.22	kg TSS/día
Concentración de TSS de salida	167.63	144.47	mg TSS/l

Fuente: (El Autor, 2017)

3.3.9.1 Filtro Percolador

Los filtros percoladores también llamados biofiltros en realidad no realizan un proceso físico de filtrado, más bien, el agua residual a tratar se escurre desde arriba hacia abajo por un medio poroso o lecho en el que se encuentra una biopelícula de microorganismos que consumen la materia orgánica en el agua que se escurre a través del medio poroso (Lozano Rivas, 2012).

Ilustración III.3 Partes de un filtro percolador



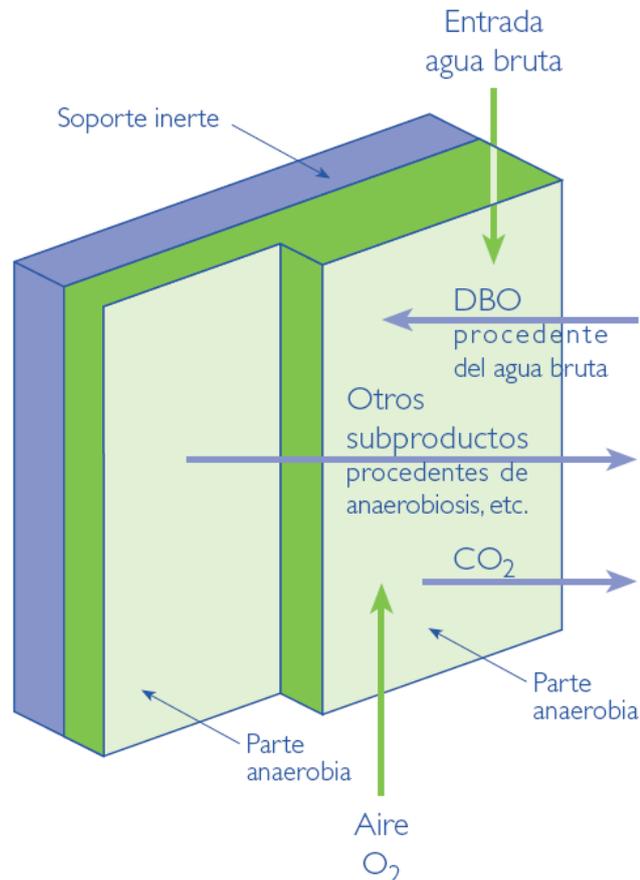
Nota: Recuperado de "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento", (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 5)

El lecho o medio poroso generalmente es constituido por piedras y actualmente con el desarrollo de nuevos materiales el medio puede ser plástico, a este medio se fijan bacterias, hongos, insectos, caracoles, y en filtros que permiten el paso de luz solar pueden desarrollarse algas etc.

Al iniciarse la operación del biofiltro, en la parte superior del medio se desarrollarán mayor cantidad de microorganismos, lo que hace que en la parte superior la biopelícula sea de mayor espesor, al ocurrir esto los organismos de la parte del medio inferior se quedan con poco alimento y oxígeno, lo que hace que comiencen

a alimentarse de su propia biomasa (fase endógena) y terminen por desprenderse, este proceso se repite de forma continua lo que hace que el biofiltro no se colmate.

Ilustración III.4 Esquema de biopelícula formada en el filtro percolador



Nota: Recuperado de "Manual de Fito Depuración, Filtros de Macrófitas en Flotación", (Beascochea, Muñoz, & Fernández de la Mora, 2005, pág. 43)

Los filtros percoladores se clasifican según su carga hidráulica o carga orgánica como de baja tasa y alta tasa.

Los filtros percoladores de alta tasa son llamados así porque son rociados con un porcentaje del agua proveniente del clarificador secundario, lo que resulta en una mejor eficiencia de depuración, lo biofiltros de baja tasa no hacen esto. Para filtros donde la relación de recirculación es de 0.5, significará que la mitad de agua que sale del clarificador secundario regresará nuevamente al biofiltro.

Los criterios para diseño de filtros percoladores se exponen en la siguiente tabla.

Tabla III-18. Criterios de diseño para filtros percoladores

Elemento	Unidad	Carga baja	Carga alta	Carga alta
Medio filtrante		Piedra	Piedra	Plástico
Tamaño	cm	2.5-13	2.5-13	Varía
Superficie específica	m ² /m ³	60-70	60-70	80-200
Cte. "n" del material	--	1.5-3.5	1.5-3.5	0.4-0.6***
Cte. de tratabilidad "K"	--	*ARDS 2.21 **ARI 0.25-2.51		
Espacio vacío	%	40-60	40-60	94-97
Peso específico	kg/m ³	800-1450	800-1450	30-100
Carga hidráulica	m ³ /m ² -h	0.05-0.15	0.4-1.6	0.4-3.0
C. Orgánica	kg DBO ₅ /m ³ -d	0.1-0.4	0.5-0.6	0.3-1.8
C. Orgánica nitrificación	kg DBO ₅ /m ³ -d	0.1-0.16	0.1-0.25	0.16-0.4
Profundidad	m	2.0-2.5	2.0-2.5	3-10
Relación recirculación	--	0	0.5-2.0	0.5-4.0
Arrastre de sólidos	--	Intermitente	Continuo	Continuo
Efic. remoción DBO ₅	%	80-85	50-70	50-85
Moscas en el filtro	--	Muchas	Pocas	Muy pocas

*Agua Residual Doméstica Sedimentada (ARDS)

**Agua Residual Industrial (ARI)

***Según fabricante

Nota: Adoptado de (Lozano Rivas, 2012, págs. 114, UNAD)

El siguiente paso es definir el método de cálculo para dimensionar el filtro percolador, para lo cual se utilizará un biofiltro con medio plástico, en la tabla anterior se tiene la eficiencia de un filtro percolador está entre 50 a 85%, se asumirá 85% de eficiencia y será un biofiltro de alta carga, es decir con un valor de recirculación de 0.5, una altura de 4.5 m y un DBO₅ efluente o de salida del 34 mg/l.

Una de las más comunes ecuaciones para el cálculo de los coeficientes cinéticos para medios filtrantes plásticos, es la desarrollada por (Eckenfelder, 1961).

$$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{1 + C \left(\frac{D^{0.67}}{Q_L^{0.5}} \right)} \quad (\text{III-24})$$

Donde:

S_t DBO₅ efluente sin recirculación, DBO₅ mg/l

S_o DBO₅ afluente salida, DBO₅ mg/l

C Constante empírica, unidades S.I., 5.358

C Profundidad del filtro, m

Q_L Carga hidráulica, $m^3/m^2\text{-día}$

Se considerará un biofiltro de simple etapa, el que recibirá agua recirculada desde la salida o descarga del mismo, es decir, un filtro percolador de alta carga, para este tipo de filtros la recirculación no debe ser superior a tres veces la DBO₅ del efluente, la recirculación R será de 0.5.

La DBO₅ del afluente incluyendo la recirculación " S_a " puede ser estimada con la siguiente ecuación (Lozano Rivas, 2012).

$$S_a = \frac{S_o + RS_t}{1 + R} \quad (\text{III-25})$$

Donde:

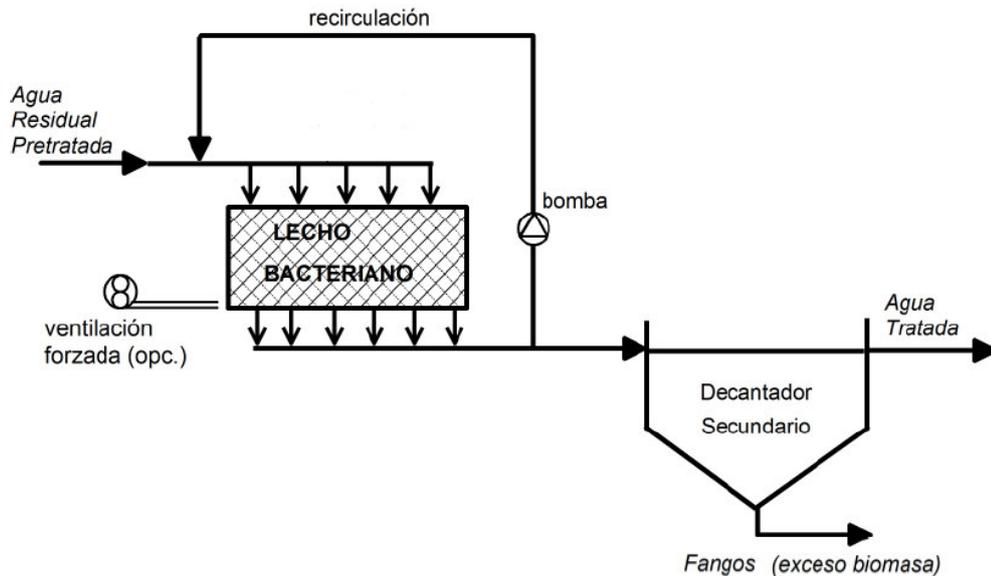
S_a DBO₅ afluente incluyendo recirculación, DBO₅ mg/l

S_o DBO₅ afluente salida, DBO₅ mg/l

R Relación de recirculación, -- adimensional

La siguiente figura muestra la configuración de trabajo para un filtro percolador de etapa simple con recirculación.

Ilustración III.5 Esquema de proceso de filtro de etapa simple



Nota. Recuperado de ["https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biológico-aerobio/filtros-percoladores"](https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biológico-aerobio/filtros-percoladores)

Al filtro percolador llegará el agua del tanque de sedimentación primario que ya eliminó una parte de la carga orgánica, se dimensionará el biofiltro para el caudal medio asumido Q_{medt} de 38 l/s que se proyectó para el año 2045, sin embargo, se debe recordar que el caudal que llega descontando el caudal de lodo primarios es de 37.83 l/s. Para el sedimentador primario se tiene.

Tabla III-19. Carga contaminante para el caudal medio año 2045

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
		l/s	37.83
Caudal medio diario	Q_{medt}	m^3/h	136.19
		$m^3/día$	3,268.55
Concentración de DBO ₅ del agua bruta	$C.O.$	mg/l	350.00
		kg/día	1,143.99
Porcentaje de remoción decantador 1º	--	%	36.84
Concentración DBO ₅ a la salida decantador 1	S_o	mg/l	222.04
		kg/día	725.76

Una vez que el sedimentador primario ha retirado parte de la carga orgánica (36.84%), el agua sedimentada ingresa al filtro percolador y se calculan los parámetros sin considerar la recirculación, el resumen en la siguiente tabla.

Tabla III-20. Parámetros filtro percolador sin recirculación año 2045

Parámetros Filtro Percolador sin recirculación	Símbolo	Unidad	Valor
Concentración DBO ₅ entrada del filtro	S_o	mg/l	222.04
		$kg/día$	725.76
Concentración DBO ₅ salida del filtro	S_t	mg/l	45.00
Profundidad del filtro	D	m	4.50
Constante empírica	C	--	5.358
Carga hidráulica rango aceptable	Q_L	$m^3/m^2-día$	*13.92
		m^3/m^2-h	0.58
Área de filtro	A	m^2	234.84
Volumen del filtro	V	m^3	1,056.80
Diámetro de filtro	d	m	17.29
Carga orgánica del filtro	C_V	$kg\ DBO_5/m^3-día$	**1.46

Nota: *Valor de Q_L aceptable [10;30] $m^3/m^2-día$

**Valor de aceptable $C_V \leq 1.8\ kg\ DBO_5/m^3-día$

Ahora, se calcula el valor de la concentración de DBO₅ considerando una recirculación R de 0.5 con la ecuación III-21 y se arregla la ecuación de (Eckenfelder, 1961) como.

$$\frac{S_r}{S_a} = \frac{1}{1 + C \left(\frac{D^{0.67}}{Q_L^{0.5}} \right)} \quad (\text{III-26})$$

Donde:

S_r DBO₅ efluente del filtro con recirculación, $DBO_5\ mg/l$

S_a DBO₅ del afluente incluyendo recirculación, $DBO_5\ mg/l$

El resto de los parámetros están ya definidos, con lo que se tiene a la salida del filtro percolador una concentración que se da como.

$$S_a = \frac{222.04 \text{ DBO}_5 \text{ mg/l} + 0.5 \times 45.00 \text{ DBO}_5 \text{ mg/l}}{1 + 0.5} = 163.03 \text{ DBO}_5 \text{ mg/l}$$

El valor de DBO₅ efluente del filtro con recirculación S_r se da como.

$$\frac{S_r}{163.03 \text{ DBO}_5 \text{ mg/l}} = \frac{1}{1 + 5.358 \left(\frac{4.5^{0.67}}{13.92^{0.5}} \right)}$$

$$S_r = 33.04 \text{ DBO}_5 \text{ mg/l}$$

El valor de 33.04 DBO₅ mg/l, es la concentración final del efluente del agua residual tratada por el sistema de filtro percolador de alta carga de simple etapa, se asumirá por seguridad el valor de 35 DBO₅ mg/l para el efluente de descarga al final del proceso. El resumen de los parámetros utilizados para el cálculo de efluente final de salida para el año 2045 se da en la siguiente tabla.

Tabla III-21. Parámetros filtro percolador con recirculación año 2045

Parámetros Filtro Percolador con recirculación	Símbolo	Unidad	Valor
DBO ₅ del afluente incluyendo recirculación	S_a	DBO ₅ mg/l	163.03
Factor de recirculación	R	--	0.50
Conc. DBO ₅ salida del filtro con recirculación	S_r	DBO ₅ mg/l	33.04
Carga hidráulica con recirculación	Q_L	m ³ /m ² -día	*13.92
Caudal de recirculación	$Q+RQ$	m ³ /día	4902.82
concentración DBO ₅ a la entrada del filtro	S_r	kg/día	799.30
Carga orgánica del filtro	C_V	kg DBO ₅ /m ³ -día	**1.32

Nota: *Valor de Q_L aceptable [10;30] m³/m²-día

**Valor de aceptable $C_V \leq 1.8$ kg DBO₅/m³-día

Se debe conocer ahora la cantidad de SST que saldrán al final del tanque

sedimentador secundario (no objeto del proyecto), los filtros percoladores no se diseñan para remover SST y los valores de remoción son muy pobres, por lo que se considerará que se tiene el mismo valor de carga de STT de la salida del tanque sedimentador primario para el año 2045, es decir 144.47 TSS mg/l. Además, debido a que la carga contaminante que llegará al sedimentador secundario es inferior, su volumen de trabajo será menor y el tiempo de retención inferior, sin embargo, se considerará que tanto el sedimentador primario como secundario son iguales, por lo para TSS se tiene.

$$TSS_{remoción} = 472.22 \frac{TSS \text{ Kg}}{\text{día}} \times 0.5760 = 272.02 \frac{TSS \text{ Kg}}{\text{día}}$$

El resumen se presenta en la siguiente tabla.

Tabla III-22. Carga contaminante de SST a la salida año 2045

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
*Concentración SST desde el biofiltro	DBO_5	<i>mg SST/l</i>	144.47
		<i>Kg SST/día</i>	472.22
% de remoción SST clarificador secundario	%	&	57.60
Caudal de salida	Q	<i>m³/día</i>	3,262.66
Total, SST removido	<i>C.O.SST remov.</i>	<i>kg/día</i>	272.02
SST de salida del clarificador secundario	<i>C.O.SST</i>	<i>kg/día</i>	200.20
Concentración de salida de SST		<i>mg/l</i>	61.36

Fuente: (El Autor, 2017)

Con el cálculo de estos parámetros se justifican los valores de DBO_5 y SST dados en la tabla III-8, de las concentraciones de carga del efluente y se procede al cálculo de lodos producidos.

3.3.9.2 Digestor de Lodos

Los lodos tratados excedentes del sistema serán enviados a un digestor biológico de lodos, que realizará el mezclado y la transferencia de oxígeno requerido en esta

etapa del proceso. Para esta parte sólo se realizarán los cálculos para el año 2045, para el año 2029 los cálculos son similares.

El digestor permite confinar los lodos semi-estabilizados provenientes de los procesos de remoción de materia orgánica, para que seguir la fase de biodigestión hasta convertirse en lodos estabilizados.

Su diseño guarda una relación directa al volumen y la carga proyectada. “La digestión aerobia es un proceso en el cual se produce una aireación, por un periodo significativo de tiempo” (Ramalho, 1996, pág. 533).

Los datos de entrada para el dimensionado de un digestor de lodos son.

Tabla III-23. Datos de entrada digestor de lodos año 2045

Concepto	Valor	Unidad
	3283.20	m ³ /día
Caudal afluente (Q)	136.80	m ³ /h
	38.00	l/s
Concentración de sustrato afluente DBO ₅ (S ₀)	350.00	mg DBO ₅ /l
Concentración sustrato efluente DBO ₅ (S)	**33.04	mg DBO ₅ /l
Concentración sustrato afluente SST	350.00	mg TSS/l
Concentración sustrato efluente SST	*61.36	mg TSS/l
Temperatura del agua	20	°C

*Nota: *Tomado de tabla III-21*

***Tomado de tabla III-20*

Además de los valores de entrada, se debe definir para el digestor de lodos los parámetros operacionales y los coeficientes cinéticos a continuación.

Tabla III-24. Parámetros operacionales coeficientes cinéticos digestor

Parámetros operacionales y coeficientes cinéticos	Valor	Unidad
¹ MLVSS	2400.00	mg/l
² VSS/ ³ TSS	0.80	--
Concentración de TSS en ⁴ RAS	9300.00	mg/l
Factor de rendimiento (Y) VSS/TSS	0.60	mgVSS/mgDBO ₅
Constante de reacción de los microorganismos (K _d)	0.06	1/día
Tiempo de retención de lodos (Θ _c)	10.00	día
DBO ₅ /DBO _U última	0.67	
% de remoción de DBO ₅ del clarificador primario	36.84	%
% remoción de TSS del clarificador primario	58.91	%
Gravedad específica del lodo	1.05	
Contenido de sólidos del lodo	4.40	%
Densidad del agua	1000.00	kg/m ³

Nota: ¹MLVSS, Sólidos suspendidos volátiles en licor mezcla

²VSS, Sólidos suspendido volátiles

³TSS, Sólidos suspendidos totales

⁴RAS, Lodo activado de retorno

Fuente: (Lin, 2007)

Los pasos para obtener la cantidad de lodo de rechazo se detallan a continuación. El valor de la producción de lodos se la obtiene mediante la siguiente fórmula (Lin, 2007, pág. 630).

$$P_x = \frac{YQ_o(S_o - S)}{1000(1 + K_d\theta_c)} \quad (\text{III-27})$$

Donde:

P_x Producción de lodos, kg SSV/día

Y Factor de rendimiento, valor típico 0.60 kg SSV/kgDBO₅

Q_o Caudal afluente, 3,683.20 m³/día (38.00 l/s)

S_o DBO₅ del sustrato afluente, 350.00 mg/l

S Concentración de DBO₅ sustrato efluente, 33.04 mg/l

k_d Constante de reacción de los microorganismos, 0,06 1/día

θ_c Tiempo de retención de lodos, 10 día.

Los valores recomendados de algunos coeficientes se tomaron a base de la siguiente tabla.

Tabla III-25. Coeficientes cinéticos típicos en agua residual doméstica

Coeficiente	Rango	Valor Típico
k , por día	11-20	5
k_d , por día	0.025-0.075	0.06
K_s , DBO ₅ mg/día	25-100	60
COD mg/l	15-70	40
Y , mg SSV/kg DBO ₅	0.4-0.8	0.6

Fuente: Adaptado de "Water and Wastewater Calculations Manual" (Lin, 2007, págs. 631, Mc Graw Hill)

Lo que resulta como.

$$P_x = \frac{0.60 \text{ kg VSS} / \text{kg DBO}_5 \times 3683.20 \text{ m}^3 / \text{día} (350 - 33.04) \text{ mg} / \text{l}}{1000(1 + 0.06 \text{ día}^{-1} \times 10 \text{ día})} = 390.24 \text{ kg VSS} / \text{día}$$

Aplicando la ecuación descrita, se obtiene así una producción diaria de lodos no estabilizados de la planta de 390.24 kg VSS/día.

Para conocer el caudal promedio de lodos que se generará de la planta, se utiliza la siguiente ecuación (Lin, 2007).

$$Q_i = \frac{P_{X_v}}{0.04 \gamma_{\text{agua}} \rho_{\text{lodo}}} \quad (\text{III-28})$$

Donde:

- Q_i Caudal promedio de lodos, m³/día
- P_{X_v} Producción de lodos, 390.24 kg VSS/día
- γ_{agua} Peso específico del agua, 1.000 kg/m³
- ρ_{lodo} Gravedad específica del lodo, 1.01
- 0.04 Porcentaje de contenido de sólidos del lodo 4%

$$Q_i = \frac{390.24 \text{ kg VSS/día}}{0.04 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1.01} = 9.66 \text{ m}^3/\text{día}$$

Empleando la ecuación descrita arriba se obtiene una caudal de lodos de 9,66 m³/día.

Para determinar el volumen de lodos se utiliza la fórmula de la referencia Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Utilización, (Lin, 2007, págs. 822, McGraw-Hill).

$$V_d = \frac{Q_i(X_i + YS_i)}{X \left(K_d P_v + \frac{1}{\theta_c} \right)} \quad (\text{III-29})$$

Donde:

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen del digestor de lodos	V_d	m^3	124.48
Tiempo de retención de lodos en el tanque	θ_c	día	*20.00
Caudal promedio que ingresa al digestor	Q_i	$m^3/\text{día}$	9.66
Fracción DBO ₅ afluente de lodos primarios	Y	--	1.00
DBO ₅ en el efluente desde el clarificador primario	S_i	mg/l	**206.17
Concentración de SST en afluente al digestor	X_i	mg/l	40,000.00
Concentración TSS en digestor lodos 75% $X_i = X$	X	mg/l	30,000.00
Fracción VSS/TSS en digestor	P_v		
Constante de reacción de los microorganismos	k_d	$día^{-1}$	0.06

Nota: *Para lodos primario y secundario el tiempo de retención de sólidos es 20-25 día (US EPA, 1991)

** Valor de la tabla III-16

$$V_d = \frac{9.66 \text{ m}^3/\text{día} \left(40,000 \text{ mg/día} + 1 \times 206.17 \text{ mg/día} \right)}{30,000 \text{ mg/l} \left(0.06 \text{ día}^{-1} \times 0.90 + \frac{1}{20 \text{ día}} \right)} = 124.48 \text{ m}^3/\text{día}$$

Aplicando la ecuación se tiene un volumen de digestor de lodos 124.48 m^3 , este lodo deberá ser digerido o estabilizado a través de aireación forzada mediante difusores de burbuja fina. Este tratamiento de lodos no es parte del presente proyecto pues el objetivo es la cantidad de lodos producidos.

3.3.9.3 Masa de sólidos secos

Para determinar la masa de sólidos secos, se debe determinar su gravedad específica, para esto asume que el 85% de los sólidos contenidos en el lodo son VSS, y que la concentración de sólidos es del 4%, por lo que se tiene:

$$4\% \text{ de lodo} = 40,000.00 \text{ mg/l sólidos} = 40 \text{ g/l}$$

$$VSS = 40 \text{ g/l} \times 0.85 = 34.00 \text{ g/l}$$

$$FSS = 40 \text{ g/l} \times 0.15 = 6.00 \text{ g/l}$$

Si la masa de lodo m_s es 1,000.00 g, entonces la masa de agua m_w será

$$m_w = 1,000.00 \text{ g} - m_v - m_f \quad (\text{III-30})$$

$$m_w = (1,000.00 - 34.00 - 6.00) \text{ g} = 960.00 \text{ g}$$

Según (Lin, 2007, pág. 800), la gravedad específica del VSS y del agua es de 1.00, la gravedad específica de lodos activados es 1.01 y la gravedad específica de los sólidos fijos suspendidos (FSS) es de 2.5.

La ecuación para calcular la gravedad específica del lodo será (Lin, 2007, pág. 800).

$$\frac{m_s}{S_s} = \frac{m_w}{S_w} + \frac{m_v}{S_v} + \frac{m_f}{S_f} \quad (\text{III-31})$$

Donde:

m_s Masa de lodo

m_w Masa de agua

m_v Masa de sólido volátil

m_f Masa de sólido fijo

S_s Gravedad específica del lodo

S_w Gravedad específica del agua

S_v Gravedad específica de sólido volátil

S_f Gravedad específica de sólido fijo

Aplicando los datos de cada parámetro se obtiene.

$$\frac{1000}{S_s} = \frac{960}{1} + \frac{34}{1.01} + \frac{6}{2.5}$$

Se obtiene una gravedad específica de lodo S_s de 1.0039, entonces el volumen por kilogramo de lodo será.

$$V_s = \frac{1000g}{1.039 \text{ g/cm}^3 \times 1000 \text{ cm}^3/\text{l}} = 0.996 \text{ l}$$

La relación de producción de VSS/TSS varía entre 0.70 a 0.85, para sistemas de lodos activados (Von Sperling, 2007, pág. 28. IWA), por lo que para la calcular la masa de sólidos suspendidos se tiene la ecuación.

$$M_{TSS} = \frac{P_x}{0.85} \quad (\text{III-32})$$

$$M_{TSS} = \frac{390.24}{0.85} = 459.11 \text{ kg TSS/día}$$

Por lo tanto, la cantidad de sólidos producidos del lodo es 459.11 kg TSS/día

3.3.9.4 Volumen de lodos efluente

Para el cálculo del volumen diario del lodo efluente, se tiene que, si el 4% está

compuesto por materia seca, se tiene la siguiente relación de regla de tres para la masa total de lodo.

$$\begin{array}{ccc} 459.11 \text{ kg TSS/día} & \xrightarrow{\text{es}} & 0.04 \\ T_s & \xrightarrow{\text{a}} & 1.00 \end{array}$$

Con lo que se tiene una masa T_s de lodo, compuesta por materia seca más agua de.

$$T_s = \frac{433.60}{0.04} = 11,477.68 \text{ kg lodo/día}$$

El volumen del lodo se calcula con la siguiente ecuación.

$$V_s = \frac{T_s}{S_s} \quad \text{(III-33)}$$

Donde:

V_s Volumen diario de lodo, $m^3/día$

T_s Masa de lodo + agua, $11,477.68 \text{ kg lodo/día}$

S_s Gravedad específica del lodo, 1.0039

Es decir.

$$V_s = \frac{11,477.68 \text{ kg lodo/día}}{1.0039 \text{ Kg/l}} = 11,432.50 \text{ lodos l/día}$$

Se obtiene un volumen de lodos de 11,432.50 lodo l/día, es decir 11.432 lodo $m^3/día$.

La remoción del lodo se ha considerado cada 20 días, debido a que es el tiempo de retención recomendado para la digestión lodos mixtos (US EPA,1991). La expresión para la determinación del volumen del lodo efluente generado por ciclo,

se emplea la ecuación siguiente:

$$V_{ciclo} = V_s d \quad (\text{III-34})$$

Donde:

V_{ciclo} Volumen de lodo en el ciclo, m^3

V_s Volumen diario de lodo, $m^3/día$

d Ciclo de operación, 20 días

$$V_{ciclo} = 11.432 \text{ lodos } m^3/día \times 20 \text{ día}$$

Se obtiene un volumen de lodos para retirar cada 20 días de $228.65 m^3$

3.3.9.5 Área superficial del deshidratador

Una vez obtenida la cantidad esperada de lodos a producirse, estos deben deshidratarse, para lo que utilizará un deshidratador de lodos a gravedad, que es una opción que no posee necesidades de uso de energía. Se dimensiona el deshidratador con la siguiente ecuación.

$$A_{sd} = \frac{V_{ciclo}}{h_{capa}} \quad (\text{III-35})$$

Donde:

A_{sd} Área superficial del deshidratador, m^2

V_{ciclo} Masa de sólidos secos: $228,65 m^3$

h_{capa} Profundidad del medio filtrante, $0.30 m$

El área obtenida para deshidratar los lodos es de $762,17 m^2$.

3.4 Compostaje de desechos por pilas dinámicas

Una vez definida la cantidad de lodos producida por la PTAR, se debe escoger la técnica de compostaje adecuada para este tipo de lodos, en la tabla II.3 se realizó

un resumen de tecnologías de compostaje, según el tipo de material a compostar. El método escogido es el de pilas estáticas aireadas (ASP), debido a su facilidad y capacidad de operación y por ser recomendada para el tratamiento de biosólidos como los lodos residuales.

En este método se utiliza aireación forzada, en el que se proporciona aire a través de sistemas de tuberías perforadas o fondos falsos apoyados sobre el suelo para de esta forma mantener los niveles óptimos de oxígeno y humedad, sin embargo, se debe cuidar que la cantidad de aire no sea en exceso, pues se corre el riesgo de perder humedad y temperatura, con la aireación se logra proveer el oxígeno que los microorganismos utilizan para oxidar las moléculas orgánicas.

El aire suministrado durante el compostaje aeróbico cumple tres propósitos

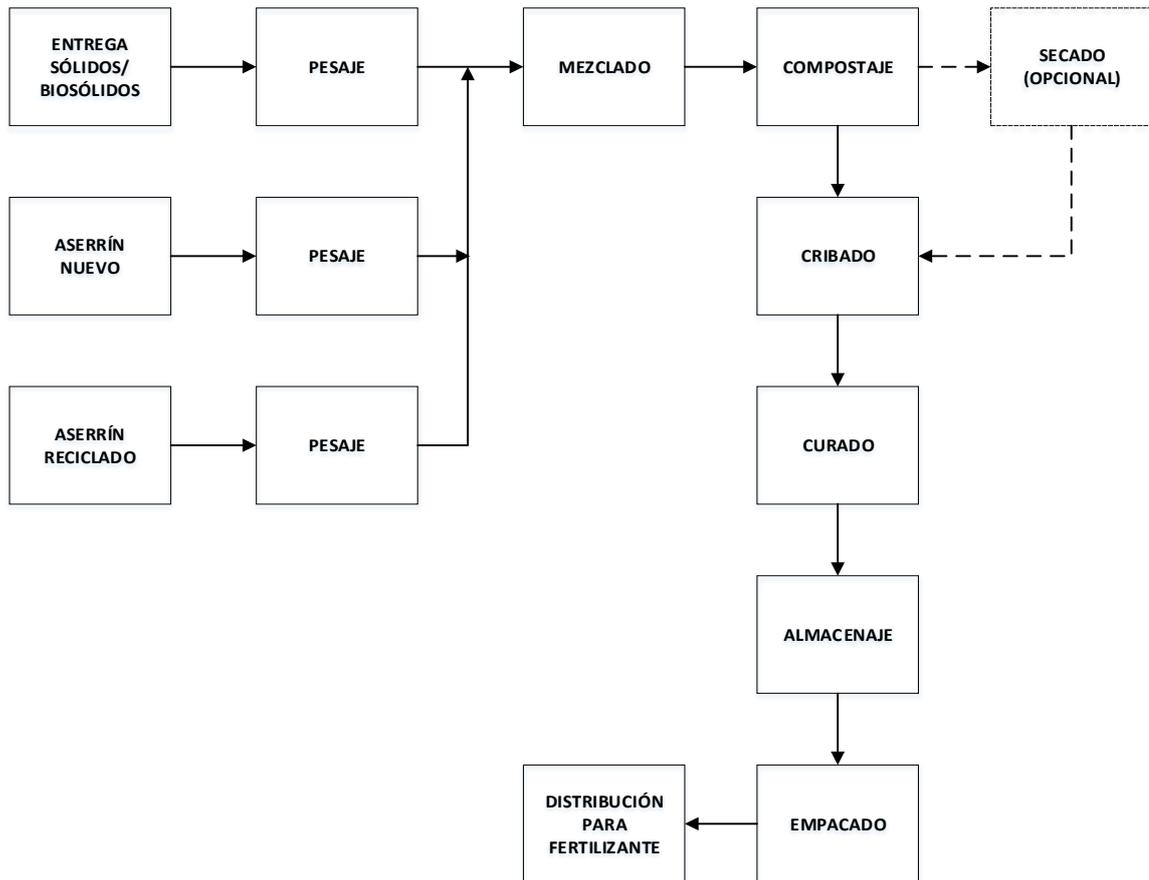
- 1) Suplir oxígeno para la descomposición biológica (demanda estequiométrica)
- 2) Remover la humedad del material en compostaje (demanda de secado)
- 3) Remover el calor para controlar temperatura (demanda de remoción de calor)

La demanda estequiométrica depende de la composición química del material de composta, según (Haug, 1994, pág. 285), los rangos de valores varían desde 1.2 a 2.0 O₂/g de Biodegradable Volatile Solids (BVS).

3.5 Flujograma de proceso de compostaje de lodos

Aunque se puede decir que el compostaje de pilas aireadas estáticas es una técnica muy bien conocida, se presenta a continuación el flujograma del compostaje de lodos realizado con esta técnica, para una buena comprensión del proceso seleccionado.

Ilustración III.6 Diagrama de proceso de compostaje de lodos



Adaptado de (Epstein, 2011)

La primera etapa comienza con la recepción de la materia prima, para esta primera etapa es necesaria la utilización de maquinaria de transporte como camiones o palas mecánicas, como ya se ha calculado la cantidad de lodo generado es de 228.65 m³ los que llegarán cada 20 días a las eras de secado de la PTAR, la etapa de secado es importante ya que el objetivo es eliminar la mayor cantidad de agua del lodo para obtener un buen manejo, en este punto los lodos pueden llegar a secarse hasta un 40% de contenido de humedad.

Para facilidad de cálculo, se considerará una cantidad de lodo + agua que llegue a las eras de secado de 250 m³ de lodo al mes, este lodo posee un contenido inicial de materia seca del 4% (10 m³ de materia seca), el lodo aún debe secarse el resto es asumido como agua, lo que conlleva a un volumen de materia compostar calculado de la siguiente forma. Si la materia seca no se pierde por la evaporación

o filtrado en los lechos de secado y al final representará el 60% de sólidos en el lodo se tiene la siguiente regla de tres.

$$\begin{array}{l} 10 \text{ m}^3 \text{ de materia seca} \xrightarrow{\text{es } a} 0.60 \times 100 \\ \text{Contenido de agua} \xrightarrow{\text{es } a} 0.40 \times 100 \end{array}$$

$$\text{Contenido de agua} = \frac{10 \times 40}{60} = 6.66 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

Lo que da un contenido de agua de 6.66 m³, más los 10 m³ de materia seca, resulta en 16.66 m³ de lodo con un contenido de humedad del 40%. Para esta etapa inicial es muy importante conocer la proporción de carbono/nitrógeno C/N que contiene el lodo.

Para que la materia prima se pueda compostar de forma adecuada la proporción ideal de C/N está en el rango de 30 partes de carbón disponible para 1 parte de nitrógeno disponible para poder realizar el compostaje de forma óptima (Haug, 1994), sin embargo, esta proporción puede variar dependiendo de la biodisponibilidad del carbono y nitrógeno; durante el proceso de compostaje parte del carbono se convierte en dióxido de carbono CO₂ (asumiendo pérdidas mínimas de nitrógeno), y la razón C/N va decreciendo durante el proceso de compostaje, llegando a valores finales típicos de C/N de 10/1.

Si la cantidad de nitrógeno es muy baja, la pila no calentará de forma adecuada, si el contenido de nitrógeno es muy elevado la pila calentará en exceso matando a los microorganismos que ayudan al proceso de compostaje y puede resultar en un proceso anaeróbico con generación de malos olores debido a que el nitrógeno presente se transformará en forma amoniacal (Junta de Andalucía, 2016).

3.6 Caracterización del material a compostar

Una de las tareas importantes a la hora de realizar el compostaje es conocer las proporciones de contenido de carbono, nitrógeno y humedad de los materiales a

utilizar, esto es necesario para poder calcular las cantidades óptimas de mezcla para obtener la relación C/N meta.

Tabla III-26. Porcentaje de N, C y % humedad de ciertos materiales

Orden según C/N	Material para compostaje	% Humedad	% Carbono	% Nitrógeno	Densidad aparente
C (<C/N=30)	Alpeorujo	65.00	57.20	1.30	0.89
C (>C/N=30)	Caña maíz	12.00	46.55	0.07	0.02
C (>C/N=30)	Cascarilla arroz	14.00	36.30	0.30	0.12
C (>C/N=30)	Desmotado de algodón	35.00	39.50	1.50	0.20
C (>C/N=30)	Hojín	40.00	50.50	1.40	0.30
C (>C/N=30)	Orujo de uva	31.00	42.60	1.40	0.50
C (>C/N=30)	Paja	12.00	56.00	0.70	0.10
C (>C/N=30)	Poda de olivar triturada	54.30	46.00	1.20	0.50
C (>C/N=30)	Recortes de arbustos	15.00	43.00	1.00	0.25
C (>C/N=30)	Serrín	39.00	106.10	0.20	0.20
N (<C/N=30)	Césped segado compacto	82.00	57.80	3.40	0.39
N (<C/N=30)	Césped segado suelto	82.00	57.80	3.40	0.21
N (<C/N=30)	Estiércol de caballo	72.00	48.00	1.60	0.82
N (<C/N=30)	Estiércol de ovino	38.50	22.60	1.70	0.40
N (<C/N=30)	Estiércol de pavo	26.00	41.60	2.60	0.46
N (<C/N=30)	Estiércol de vacuno 1	45.00	28.10	2.30	0.70
N (<C/N=30)	Gallinaza	20.10	40.00	3.20	0.40
N (<C/N=30)	Productos hortícolas	87.00	51.30	2.70	0.70
N (<C/N=30)	Rumen	82.50	45.00	1.80	0.87

Fuente: Adaptado (Junta de Andalucía, 2016)

En la tabla anterior se enlistan algunos de los contenidos de C, N y porcentaje de humedad de ciertos materiales. Para el caso de lodos residuales municipales como los lodos de plantas depuradoras, se tomará como base un porcentaje de nitrógeno de entre 2.0 - 6.0 %, para la relación C/N 5 -16 (Tchobanoglous G. , 2002) y para la humedad como la misma que ya se habrá reducido en las eras de secado se considerará un valor de 40% de humedad.

Para realizar el compostaje es necesario obtener la cantidad adecuada de cada material para lograr la mezcla optima que resulte en la relación C/N y contenido de humedad neta, en el siguiente acápite se definirá el método a utilizarse para lograr esto.

3.7 Contenido de humedad y razón C/N

Para la determinación de contenido de humedad y razón C/N, se utiliza la metodología detallada en la página web de la Universidad de Cornell, (Trautmann & Richard, s.f.), a continuación, se tiene un resumen la metodología referida.

3.7.1 Cálculo de contenido de Humedad

Conocer cuáles son las proporciones adecuadas de los diversos materiales mezclar para hacer compost y el contenido de humedad de la mezcla final es son algunos de los factores críticos a considerar durante el compostaje.

La siguiente metodología describe cómo diseñar la mezcla inicial para que tenga un nivel de humedad adecuado para un compostaje óptimo. Para el método de compostaje, la convención es definir el contenido de humedad sobre una base húmeda (o peso total), como lo indican el siguiente método desarrollado por (Trautmann & Richard, s.f.) de la Universidad de Cornell, para una mejor comprensión del método a utilizarse que permite alcanzar los parámetros requeridos para un correcto compostaje.

1. Calcular el porcentaje de humedad para cada uno de los materiales que se pretenden compostar.

- a) Pesar un recipiente pequeño.
- b) Pese 10 g del material en el contenedor.
- c) Seque la muestra durante 24 horas en un horno de 105-110 grados C.
- d) Vuelva a pesar la muestra, reste el peso del contenedor y determine el contenido de humedad usando la siguiente ecuación:

$$M_n = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (\text{III-36})$$

Donde:

M_n : Contenido de humedad del material, $n\%$

W_w : Peso húmedo de la muestra, g

W_d : Peso de la muestra después del secado, g

Por ejemplo; se pesan 10 g de recortes de hierba (W_w) en un recipiente de 4 g y que después de secar el recipiente más los recortes pesa 6.3 g. Restando 4 g. que es el peso del contenedor quedan 2,3 g como el peso seco (W_d) de la muestra. El porcentaje de humedad sería:

$$M_n = \frac{10 - 2.3}{10} \times 100$$

Lo que resulta en un porcentaje de humedad del 77%

2. Elegir un objetivo de humedad para su mezcla de compost.

La mayoría de la literatura recomienda un contenido de humedad del 50% - 60% en peso para condiciones óptimas de compostaje.

3. Calcular las cantidades relativas de materiales a combinar para lograr el % de humedad objetivo.

La fórmula general para el porcentaje de humedad es:

$$G = \frac{(Q_1 \times M_1) + (Q_2 \times M_2) + (Q_3 \times M_3) + \dots}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots} \times 100 \quad (\text{III-37})$$

Donde:

Q_n : Masa del material n ("tal cual" o "peso húmedo")

G : Humedad meta, %

M_n : Contenido de humedad del material n

Esta fórmula se utiliza de forma directa para calcular el contenido de humedad de una mezcla de materiales, y se deben probar diferentes combinaciones hasta obtener resultados en un rango razonable. Se puede utilizar esta fórmula de forma sencilla para hasta 3 materiales, después es mejor utilizar hojas de cálculo.

Se usa prueba y error para determinar qué proporciones determinar la mezcla que funcionará, sin embargo, una manera más rápida para dos materiales, la ecuación general puede simplificarse y resolverse para la masa de un segundo material (Q_2) requerido para equilibrar una masa dada del primer material (Q_1). El objetivo de humedad debe estar entre los contenidos de humedad de los dos materiales que se mezclan.

$$Q_2 = \frac{(Q_1 \times G) - (Q_1 \times M_1)}{M_2 - G}$$

Por ejemplo, se desea compostar 10 kg de recortes de hierba (contenido de humedad 77%). Con el fin de alcanzar su objetivo de humedad del 60% para la mezcla de compost, se calcula la masa de hojas necesarias (contenido de humedad 35%):

$$Q_2 = \frac{(10 \times 60) - (10 \times 77)}{35 - 60}$$

Lo que resulta que se debe agregar 6.8 Kg de hojas para alcanzar el porcentaje de humedad objetivo del 60%.

Las mezclas de 3 o más materiales también se pueden resolver de forma similar, para una solución exacta se deben especificar las cantidades de todos los materiales menos uno. Para encontrar la masa del tercer material (Q_3) dadas las masas de los primeros dos (Q_1 y Q_2) más los tres contenidos de humedad (M_1 , M_2 y M_3) y un objetivo (G), se debe resolver:

$$Q_3 = \frac{(Q_1 \times G) + (Q_2 \times G) - (Q_1 \times M_1) - (Q_2 \times M_2)}{M_3 - G}$$

3.7.2 Razón C / N

Una vez calculado el contenido de humedad de la mezcla de compost, otro cálculo importante es la relación carbono-nitrógeno (C / N).

Los recortes de hierba y otra vegetación verde tienden a tener una mayor proporción de nitrógeno (por lo tanto, una relación C / N más baja) que la vegetación marrón, como hojas secas o astillas de madera. Si la mezcla de compost es demasiado baja en nitrógeno, no se calentará. Si la proporción de nitrógeno es demasiado alta, el compost puede calentarse demasiado, lo que mata los microorganismos del compost, o puede volverse anaeróbico, dando como resultado generación de mal olor.

El rango recomendado habitual para las relaciones C / N al inicio del proceso de compostaje es de aproximadamente 30/1, pero este valor ideal puede variar según la biodisponibilidad del carbono y el nitrógeno. A medida que el carbono se convierte en CO₂ (y suponiendo mínimas pérdidas de nitrógeno), la relación C / N disminuye durante el proceso de compostaje, y la proporción de compost terminado generalmente es cercana a 10/1.

Las relaciones C / N típicas y los valores de nitrógeno para muchos tipos de materiales que se pueden compostar, se detallan en tablas publicadas en literatura técnica. Para calcular el contenido de carbono dado C / N y porcentaje de nitrógeno, se debe resolver:

$$\%C = \%N \times C/N \quad (\text{III-38})$$

Donde:

- $\%C$: Porcentaje de carbono, %
 $\%N$: Porcentaje de nitrógeno, %
 C/N : Razón C/N, -- adimensional

Se puede medir el contenido de carbono y nitrógeno de los materiales y luego calcular la proporción directamente. En laboratorios de análisis de nutrientes del suelo o laboratorios de pruebas pueden realizar la prueba de nitrógeno, y carbono también. Una vez que se tiene las proporciones C / N para los materiales a compostar, se puede utilizar la siguiente fórmula para calcular la proporción de la mezcla como un todo:

$$R = \frac{Q_1 \times C_1(100 - M_1) + Q_2 \times C_2(100 - M_2) + Q_3 \times C_3(100 - M_3) + \dots}{Q_1 \times N_1(100 - M_1) + Q_2 \times N_2(100 - M_2) + Q_3 \times N_3(100 - M_3) + \dots} \quad (\text{III-39})$$

Donde:

- R : Razón C / N de la mezcla a compostar
 Q_n : Masa del material n ("tal cual" o "peso húmedo")
 C_n : Contenido de carbono en % del material n
 N_n : Contenido de nitrógeno en % del material n
 M_n : Contenido de humedad en % del material n

Esta ecuación también se puede resolver exactamente para una mezcla de dos materiales, conociendo sus contenidos de carbono, nitrógeno y humedad, el objetivo de relación C / N y especificando la masa de un ingrediente. Al simplificar

y reorganizar la ecuación general, la masa del segundo material requerido sería:

$$Q_2 = \frac{Q_1 \times N_1 \times \left(R - \frac{C_1}{N_1}\right) \times (100 - M_1)}{N_2 \times \left(\frac{C_2}{N_2} - R\right) \times (100 - M_2)} \quad (\text{III-40})$$

Tomando al ejemplo anterior de hierba y hojas, ahora se supone que el contenido de nitrógeno del pasto es 2.4%, mientras que el de las hojas es 0.75%, y el contenido de carbono es 45% y 50% respectivamente. La división simple nos muestra que la relación C / N de la hierba es 18.75% y el contenido C / N de las hojas es 66.67%. Para los mismos 10 kg de hierba que se tenía antes, y si la meta es una relación C / N de 30: 1, la solución es:

$$Q_2 = \frac{10 \times 2.4 \times \left(30 - \frac{45}{2.4}\right) \times (100 - 77)}{0.75 \times \left(\frac{50}{0.75} - 30\right) \times (100 - 35)} = 3.5 \text{ kg}$$

Lo que resulta que son necesarios 3.5 kg de hojas para alcanzar la razón óptima C / N de 30:1.

Tomar en cuenta que solo se necesita 3.5 kg de hojas para equilibrar la relación C / N, en comparación con las hojas de 6.8 kg necesarias para alcanzar el objetivo de humedad del 60% de acuerdo con nuestro cálculo de humedad anterior. Si las hojas fueran más húmedas o tuvieran una relación C / N más alta, la diferencia sería aún mayor, entonces, ¿cuántas hojas se debe agregar?

Si se resuelve la forma general de la ecuación C / N para los 10 kg de hierba y los 6,8 kg de hojas (determinados a partir del cálculo de la humedad), y usamos los mismos valores para el porcentaje de humedad, C y N, la C / N resultante ratio es un poco menos de 37: 1. Por el contrario, si se resuelve la forma general de la ecuación de humedad para 10 kg de hierba y solo 3.5 kg de hojas, obtenemos un contenido de humedad superior al 66%.

En el ejemplo expuesto, se puede notar, que la humedad es la variable más crítica.

Esto es especialmente cierto hacia el extremo húmedo del óptimo (> 60%), donde es probable que se presenten condiciones anaeróbicas. Por lo tanto, lo mejor es tener una alta relación C / N, lo que puede desacelerar el proceso compostaje un poco, pero es más probable que se presenten problemas. Si, por otro lado, la mezcla está seca, entonces se debe optimizar la relación C / N y agregar agua según sea necesario.

Al igual que con los cálculos de humedad, las mezclas de 3 o más materiales se pueden resolver para la masa del tercer material si se especifican las dos primeras (una ecuación y una desconocida). Dado el contenido de carbono, nitrógeno y humedad de cada ingrediente, las masas de los dos primeros y el objetivo de la relación C / N, la solución para la masa del tercer material es:

$$Q_3 = \frac{RQ_1N_1(100 - M_1) + RQ_2N_2(100 - M_2) - Q_1C_1(100 - M_1) - Q_2C_2(100 - M_2)}{C_3(100 - M_3) - RN_3(100 - N_3)} \quad (\text{III-41})$$

La metodología redactada anteriormente, es la base fundamental para determinar las cantidades y proporciones requeridas para el proceso de compostaje.

Para facilidad de cálculo se hace uso de una hoja de cálculo en Excel (Junta de Andalucía, 2016), en la que se ingresan los datos.

Se ha seleccionado ingredientes que se encuentran localmente donde estará ubicada la planta de compostaje como serrín, recorte de arbustos, cascarilla de arroz, productos hortícolas, estiércol de vacuno y gallinaza. Para los 16.66 m³ se asumirá el mismo valor en peso húmedo debido a la poca diferencia de densidad respecto al agua. Para tratar el lodo se debe obtener un volumen total de residuos sólidos mezclados de 623.65 m³, compuesto de los materiales listados en la siguiente tabla.

Tabla III-27. Detalle de mezcla requerida para compostaje lodo residual

Ingredientes	Peso Tm	Peso %	Humedad %	Relación C/N	Volumen m³
Aserrín	64.30	31.89	39.00	252.86	321.50
Recortes de arbustos	12.00	5.95	15.00	19.71	48.00
Cascarilla arroz	12.00	5.95	14.00	252.86	100.00
Productos hortícolas	43.00	21.32	87.00	13.71	61.43
Estiércol de ganado	4.00	1.98	45.00	47.14	5.71
Gallinaza	4.00	1.98	20.10	12.50	7.99
Lodo residual	16.66	8.26	40.00	8.57	33.32
Agua	45.70	22.6	--	--	45.7
Totales	201.66	100.00			623.65

Fuente: (El Autor, 2017)

Tabla III-28. Resumen mezcla requerida según calculadora de compostaje

	Peso húmedo Tm	Ingredientes	Humedad %	Carbono %	Nitrógeno %	Densidad aparente Tm/m ³	Peso seco Tm	Peso agua Tm	Peso carbono Tm	Peso nitrógeno Tm	C/N --	Volumen m ³
Ingredientes predefinidos ricos en carbono	64.30	Aserrín	39.0	50.94	0.20	0.20	39.22	25.08	19.98	0.08	252.86	321.50
	12.00	Recortes de arbustos	15.0	46.00	2.33	0.25	10.20	1.80	4.69	0.24	19.71	48.00
	12.00	Cascarilla de arroz	14.0	50.94	0.20	0.12	10.32	1.68	5.26	0.02	252.86	100.00
Ingredientes predefinidos ricos en nitrógeno	43.00	Productos hortícolas	87.0	53.19	3.88	0.70	5.59	37.41	2.97	0.22	13.71	61.43
	4.00	Estiércol de ganado	45.0	55.00	1.17	0.70	2.20	1.80	1.21	0.03	47.14	5.71
	4.00	Gallinaza	20.1	40.00	3.20	0.40	3.20	0.80	1.28	0.10	12.50	7.99
Lodo a tratar	16.66	Lodo residual	40.0	59.70	6.97	0.50	10.00	6.66	5.97	0.70	8.57	33.32
Humectante	45.70	Agua	100.0	0.0	0.0	1.0	0.0	45.70	0.0	0.0	0.0	45.70
Peso total	201.66						49.4	74.1	25.7	0.9	30.2	623.65

Fuente: (El Autor, 2017; Junta de Andalucía, 2016)

3.8 Requerimientos de aire

El suministro de aire para el compostaje es necesario para tres propósitos básicos.

Primero, el aire debe satisfacer la demanda biológica de oxígeno para la descomposición orgánica (demanda estequiométrica).

Segundo, el flujo de aire es necesario para remover el agua del sustrato húmedo (demanda de secado).

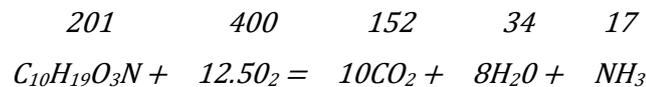
Tercero, el aire debe remover el calor generado durante la descomposición orgánica para controlar la temperatura (demanda de remoción de calor), si no se controla la temperatura este puede alcanzar niveles muy altos que inhiben la actividad biológica.

La tasa de aireación (caudal de aire) puede ser utilizado para controlar los niveles de temperatura en un sistema de compostaje. *“Valores de oxígeno desde 1.2 a 2.0 gO₂/g BVS son comunes en las aplicaciones de compostaje, para sustratos saturados de materia orgánica los valores de oxígeno pueden llegar a 2.0 gO₂/g BVS”* (Haug, 1994). Otros autores refieren que *“la cantidad de aire necesario para el compostaje es de aproximadamente 20 m³/h por cada tonelada métrica de material orgánico”* (CRC Press, 1998).

Los sistemas de aireación son importantes en los sistemas modernos de compostaje, la clave es tener el control en la aireación para poder suministrar el aire necesario según el sustrato para compostaje. En la práctica, se conoce que la demanda de aire para secado y control de temperatura para mantenerla por debajo de los 70° C es mucho más grande que lo requerido para oxidación biológica. Los niveles de dióxido de carbono no deben superar el 8% y el oxígeno se debe encontrar dentro del rango del 5 al 15% (Haug, 1994).

3.8.1 Requerimiento de aire por estequiometría

La demanda estequiométrica de aire puede ser determinada a través de la composición orgánica de los sólidos y la degradación microbiana durante el compostaje. La representación química de varios compuestos orgánicos se puede caracterizar a través de análisis químico de las mezclas de sustrato. Para el caso de lodo residual municipal se puede representar su composición como $C_{10}H_{19}O_3N$ (CRC Press, 1998). La demanda de oxígeno para la oxidación completa del sustrato se puede determinar a través de la siguiente ecuación.



Donde los números ubicados sobre cada componente de la ecuación es el peso molar en gramos de cada mol de la respectiva sustancia. El método de cálculo para calcular la masa molar, consiste en multiplicar la masa atómica de los elementos contenidos en el sustrato por su respectivo coeficiente, es decir.

Primero se deben conocer la masa atómica de los elementos contenidos en el sustrato, que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla III-29. Masa atómica de los elementos del sustrato

Elemento	Símbolo	Masa Atómica
Carbono	C	12
Hidrógeno	H	1
Oxígeno	O	16
Nitrógeno	N	14

Para el sustrato lodo residual $C_{10}H_{19}O_3N$, el cálculo se da como.

$$\begin{array}{r}
 C_{10} \quad 12 \times 10 = \quad 120 \\
 H_{19} \quad 1 \times 19 = \quad 19 \\
 O_3 \quad 16 \times 3 = \quad 48 \\
 N \quad 14 \times 1 = \quad 14 \\
 \hline
 \text{Suma} \quad 201 \quad g/mol \text{ de sustrato}
 \end{array}$$

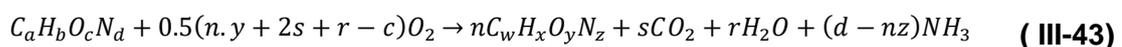
De igual forma, se calcula la masa molar para los compuestos que se agregan como $12.5O_2$ o que se forman después de la reacción como $10CO_2$, $8H_2O$ y NH_3

Para la composición típica de lodo se puede notar que el requerimiento ideal de oxígeno es de 1.99 gr O_2 por cada gramo de sustrato BVS (biodegradable volatile solids), esto resulta del cálculo siguiente.

$$\text{Demanda de Oxígeno} = \frac{g \text{ de } O_2 \text{ requerido}}{\text{Peso mol del sustrato}} \quad (\text{III-42})$$

$$\text{Demanda de Oxígeno} = \frac{400 \text{ g } O_s}{201 \text{ g sustrato}} = 1.99 \text{ g } O_2 / \text{g sustrato}$$

En el mundo real la materia orgánica no se oxida de forma completa, sin embargo, se puede representar la composición elemental de una sustancia orgánica con la forma $C_aH_bO_cN_d$, cuando recién ingresa el proceso de compostaje y después de todo el proceso de transformación como $C_wH_xO_yN_z$, por lo que la cantidad de oxígeno necesaria en base molar para degradar aeróbicamente un porcentaje de desecho orgánico sólido se puede estimar con la siguiente ecuación (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993).



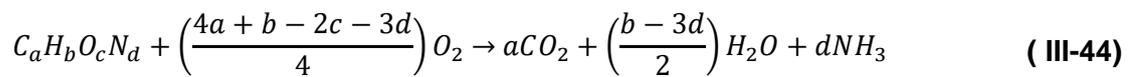
Donde:

$$r = 0.5[b - s.z - 3(d - n.z)]$$

$$s = a - n.w,$$

$$n = \frac{\# \text{ de moles de materia orgánica a la salida}}{\# \text{ de moles de materia orgánica a la entrada}}$$

Si se lleva a cabo una conversión completa de la materia orgánica, es decir toda la materia es degradada y convertida en CO_2 , H_2O y NH_3 , la ecuación correspondiente se resuelve como.



La ecuación anterior permite conocer los elementos resultantes en el caso de una completa oxidación del sustrato a compostar, una vez conocida la composición elemental se puede determinar la demanda estequiométrica de oxígeno O_2 de los sustratos para compostaje. Los diferentes resultados aplicando la ecuación anterior se dan en la tabla III-27.

Tabla III-30. Cantidades de O₂ y CO₂ por reacción de sustrato

Tipo de sustrato	Composición Química Típica	Moles CO ₂ resultante	Moles O ₂ requerido	CO ₂ /O ₂ Ratio
Carbohidratos	C ₆ H ₁₂ O ₆	6	6.00	1.00
Proteínas	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	16	16.50	0.97
Grasas y aceites	C ₅₀ H ₉₀ O ₆	50	69.50	0.72
Lodo Primario	C ₂₂ H ₃₉ O ₁₀ N	22	26.00	0.85
Lodo combinado	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	10	12.50	0.80
Rechazo-Total orgánico	C ₆₄ H ₁₀₄ O ₃₇ N	64	70.75	0.90
Fracción*	C ₉₉ H ₁₄₈ O ₅₉ N	99	105.75	0.94
Madera	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	295	306.25	0.96
Pasto verde/hojas	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	23	23.25	0.99
Basura común	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	16	18.00	0.89
Bacterias	C ₅ H ₇ O ₂ N	5	5.00	1.00
Hongos	C ₁₀ H ₁₇ O ₆ N	10	10.50	0.95

*Dos valores dados por Haug (1980)

Fuente: Adaptado de (Notton, 2005)

Para algunos de los sustratos seleccionados se asumirá la composición química típica de la tabla anterior. Para los sustratos estiércol de vacuno 1 y gallinaza se asumirá los valores de composición de la siguiente tabla.

Tabla III-31. Composición en porcentaje para Gallinaza y Estiércol

Sustrato	C %	H %	O %	N %	S %	Otros
*Gallinaza	32.45	4.45	26.83	5.74	0.29	30.24
**Estiércol de ganado	39.09	4.61	26.68	0.83	0.25	28.54

Fuente: (Energy Research Center of Netherlands (ECN), 2018)

*Nombre clave del sustrato ECN: chicken manure (#1747)

***Nombre clave del sustrato ECN: cattle manure, fresh (#1882)

De la composición en porcentaje se obtiene la fórmula elemental del sustrato de la siguiente forma. Para determinar la fórmula empírica debemos conocer el

porcentaje en peso de cada elemento en el compuesto y las masas atómicas de cada uno de ellos. Para el sustrato gallinaza posee 32.45% de C, 4.45% de H, 28.83% de O y 5.74% de N; no se tomará en cuenta los valores de porcentaje para el azufre S y otros. Las masas atómicas son C=12, H=1, O=16 y N=14.

Se Considera 100 g de compuesto: el porcentaje de cada uno serán los gramos de cada elemento que hay en 100 g de compuesto. Siguiendo el ejemplo, tendremos 32.45 g de C, 4.45 g de H, 28.83 g de O y 5.74 g de N.

Se Divide cada masa por la masa atómica del elemento correspondiente.

$$C: 32.45/12 = 2.70$$

$$H: 4.45/1 = 4.45$$

$$O: 28.83/16 = 1.80$$

$$N: 5.74/14 = 0.41$$

Se divide cada uno de los resultados anteriores por el más pequeño de ellos, en este caso por 0,41.

$$C: 2.70/0.41 = 6.60$$

$$H: 4.45/0.41 = 10.85$$

$$O: 28.83/0.41 = 4.09$$

$$N: 0.41/0.41 = 1.00$$

Los resultados son los coeficientes y la fórmula empírica será C_{6.60}H_{10.85}O_{4.09}N o C₇H₁₁O₄N de forma redondeada. Los resultados son lo que se muestran a continuación.

Tabla III-32. Composición química elemental de Gallinaza y Estiércol

Sustrato	C %
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N
Estiércol de ganado	C ₅₅ H ₇₈ O ₂₈ N

Una vez obtenida la composición elemental de los sustratos gallinaza y estiércol de ganado, se tienen definidos todos los sustratos a mezclarse con su demanda de oxígeno para realizar el proceso de compostaje, los que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla III-33. Requerimiento molar de O₂ y CO₂ para mezcla de sustrato

Sustrato por Utilizarse	Sustrato asumido	Composición Química asumida	Moles O ₂ requerido
Aserrín	Madera	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	306.25
Recortes de arbustos	Pasto/hojas verdes	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	23.25
Cascarilla arroz	Madera	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	306.25
Productos hortícolas	Basura común	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	18.00
Estiércol de vacuno 1	Estiércol de ganado	C ₅₅ H ₇₈ O ₂₈ N	59.75
Gallinaza	Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	7.00
Lodo residual	Lodo combinado	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	12.50

Fuente: (El Autor, 2017)

Para conocer la masa de oxígeno requerida por masa de sustrato a compostar se utiliza la siguiente fórmula. La masa molecular, resulta de multiplicar los pesos molares de cada mol respectiva por el peso atómico del elemento respectivo, para el Oxígeno el peso atómico es 16.

$$\text{Razón de } O_2 \text{ requerido} = \frac{\text{Masa molecular del } O_2}{\text{Masa molecular del sustrto}} \quad (\text{III-45})$$

Tabla III-34. Requerimiento en g de O₂ para oxidación total del sustrato

Sustrato por Utilizarse	Composición Química sustrato	g Mol O ₂ requerido	g Mol del sustrato	$\frac{g O_2}{gr_{sustrato}}$
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	9,800.00	6,950.00	1.41
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	744.00	600.00	1.24
Cascarilla arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	9,800.00	6,950.00	1.41
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	576.00	361.00	1.60
Estiércol de vacuno 1	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	1912.00	1200.00	1.59
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	224.00	173.00	1.29
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	400.00	201.00	1.99

Fuente: (El Autor, 2017)

Ahora se conoce la demanda de O₂ por masa mol necesaria para oxidación completa del total de los materiales a compostar, el siguiente paso es calcular la cantidad O₂ necesario para la cantidad de la mezcla, de la tabla III-25 se resume las cantidades de mezcla necesarias para compostaje.

Tabla III-35. Requerimiento kg de O₂ para componentes del sustrato

Sustrato a compostar	Composición Elemental	Sustrato g O ₂ /g sustrato	Masa a compostar g	O ₂ requerido g
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.41	64,300.00	90,667.63
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	1.24	12,000.00	14,880.00
Cascarilla de arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.41	12,000.00	16,920.86
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	1.60	43,000.00	68,609.42
Estiércol de vacuno	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	1.25	4,000.00	6,373.33
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	1.29	4,000.00	5,179.19
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	1.99	16,660.00	33,154.23
		Total	155,960.00	235,784.66

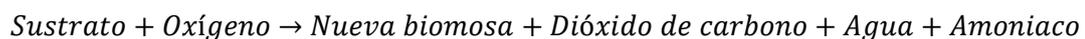
La cantidad de O_2 por gramos de mezcla a compostar se obtiene de la siguiente forma.

$$O_2 \text{ requerido} = \frac{235,784.66 \text{ g } O_2}{155,960.00 \text{ g mezcla}} = 1.51 \text{ g } O_2 / \text{kg mezcla}$$

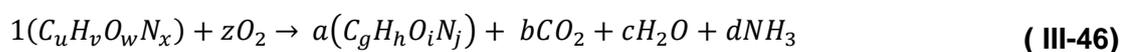
Por lo tanto, son necesario 1.51 kg O_2 por kg de sustrato mezcla, conociendo que la composición porcentual de oxígeno contenido en el aire es de 23,3%, la cantidad de aire necesario será.

$$\text{Aire requerido} = \frac{1.51 \text{ kg } O_2}{\text{kg de mezcla}} \times \frac{1}{0.232} = 6.51 \text{ kg aire} / \text{kg mezcla}$$

Ahora se conoce que son necesarios 6.51 kg aire por cada kilogramo de mezcla de sustrato. Sin embargo, esto se da para una completa oxidación del sustrato. En una reacción real, el sustrato en compostaje se da como:



(Notton, 2005), define la formulación de este proceso de oxidación de la siguiente forma.



La nueva biomasa formada tendrá un peso determinado por el coeficiente de rendimiento Y , que es el resultado de dividir el peso de la nueva biomasa para el peso del sustrato utilizado, con este valor se puede calcular el coeficiente a . El valor de Y dependerá de las condiciones del sistema biológico, algunos investigadores (Haug, 1994) recomiendan valores entre 0.1 y 0.2 para un apropiado proceso de compostaje.

El valor del coeficiente a se puede calcular como:

$$a = \frac{Y \times (12_u + 1_v + 16_w + 14_x)}{(12_g + 1_h + 16_i + 14_j)} \quad (\text{III-47})$$

En la ecuación anterior los valores numéricos son los pesos atómicos de cada elemento, comparando los coeficientes de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se pueden desarrollar las siguientes relaciones (Notton, 2005).

$$b = u - ag \quad (\text{III-48})$$

$$c = \frac{v - ah - 3d}{2} \quad (\text{III-49})$$

$$d = x - aj \quad (\text{III-50})$$

$$z = \frac{ai + 2b + c - w}{2} \quad (\text{III-51})$$

Con las ecuaciones anteriores se puede calcular las cantidades estequiométricas de O_2 , H_2O , CO_2 y NH_3 para diferentes coeficientes de rendimiento, (Notton, 2005). Para los coeficientes u , v , w y x se utilizan los diferentes valores de los sustratos seleccionados mostrados en la tabla III-27. Para los valores g , h , i y j se deben utilizar los valores para hongos y bacterias dados en la tabla III-26.

El ejemplo de cálculo se resume para el sustrato madera con la reacción de oxidación parcial de hongo y un factor de rendimiento de 0.5.

Tabla III-36. Datos de sustrato a compostar madera

Sustrato a compostar	Masa atómica			
	C	H	O	N
Madera	12	1	16	14
$C_{295}H_{420}O_{186}N$	C	H	O	N
Peso molar $C_uH_vO_wN_x$	Coeficientes elementales			
	u	v	w	x
	6950.00	295	420	186

Tabla III-37. Datos de sustrato degradante hongo

Sustrato degradante	Masa atómica			
	C	H	O	N
Hongo	12	1	16	14
$C_{10}H_{17}O_6N$	C	H	O	N
Peso molar $C_gH_hO_iN_j$	Coeficientes elementales			
	g	h	i	j
	247.00	10	17	6

Los coeficientes resultan de la siguiente forma.

$$a = \frac{0.5(12 \times 295 + 1 \times 420 + 16 \times 186 + 14 \times 1)}{(12 \times 10 + 1 \times 17 + 16 \times 6 + 14 \times 1)} = 0.5 \frac{6,950.00}{247.00} = 14.13$$

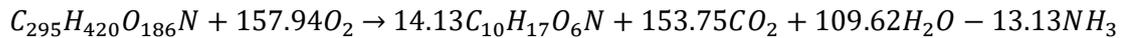
$$b = 295 - 14.13 \times 10 = 153.75$$

$$c = \frac{420 - 14.13 \times 17 - 3 \times (-13.13)}{2} = 109.62$$

$$d = 1 - 14.13 \times 1 = -13.13$$

$$z = \frac{14.13 \times 6 + 2 \times 153.75 + 109.62 - 186}{2} = 157.94$$

La reacción de oxidación parcial y ordenada químicamente es entonces.



En la siguiente tabla se muestra el resumen de los coeficientes para cada factor de rendimiento Y .

Tabla III-38. Coeficientes de oxidación de compuestos resultantes

Moles de Madera $C_uH_vO_wN_x$	Moles de O_2 requerido	Moles de hongo $C_gH_hO_iN_j$	Moles de CO_2 generadas	Moles de H_2O generadas	Moles de NH_3 generadas	Factor de rendimiento
--	z	a	b	c	d	Y
1.00	157.94	14.13	153.75	109.62	-13.13	0.50
1.00	179.21	12.10	174.01	123.81	-11.10	0.43
1.00	195.16	10.58	189.20	134.44	-9.58	0.38
1.00	213.48	8.84	206.65	146.65	-7.84	0.31
1.00	232.09	7.06	224.37	159.06	-6.06	0.25
1.00	250.71	5.29	242.10	171.47	-4.29	0.19
1.00	269.32	3.52	259.83	183.88	-2.52	0.13
1.00	287.64	1.77	277.27	196.09	-0.77	0.06

Se debe calcular ahora la cantidad de gramos de O_2 necesarios por gramo de sustrato, lo que se determina de la siguiente forma.

$$\text{Razón de } O_2 \text{ requerido} = \frac{2 \times 16 \times 157.94}{6,959.00} = \frac{5,053.97}{6,950.00} = 0.73 \text{ g } O_2 / \text{sustrato}$$

El resumen de requerimiento de oxígeno en gramos por gramo de sustrato se da en la siguiente tabla.

Tabla III-39. Requerimiento g O₂/ g sustrato oxidación madera-hongo

g mol de Madera C₂₉₅H₄₂₀O₁₈₆N	g mol de O₂ requerido	Factor de rendimiento	g O₂/g sustrato
6950.00	5053.97	0.50	0.73
6950.00	5734.67	0.43	0.83
6950.00	6245.20	0.38	0.90
6950.00	6831.37	0.31	0.98
6950.00	7426.98	0.25	1.07
6950.00	8022.60	0.19	1.15
6950.00	8618.22	0.13	1.24
6950.00	9204.38	0.06	1.32
Promedio			1.03

Se puede notar que, para una oxidación completa de la madera son necesarios 1.41 g O₂, mientras que para una oxidación parcial el promedio de oxígeno es 1.03 g O₂, es decir, existe una reducción del 27% del requerimiento de aire ideal, con esto se justifica que es necesario calcular los valores estequiométricos con los factores de rendimiento que se tienen que tomar de ensayos experimentales de compostaje.

Los valores promedios de demanda de oxígeno en gramos para cada compuesto se resumen en la siguiente tabla.

Tabla III-40. g O₂/ g sustrato promedio para oxidación madera-hongo

Sustrato por Utilizarse	Composición Química sustrato	$\frac{g O_2}{gr_{sustrato}}$
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.03
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	0.74
Cascarilla arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.03
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	1.21
Estiércol de vacuno 1	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	0.87
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	0.91
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	1.61

Se procede de igual forma como se hizo para oxidación completa para el cálculo de requerimiento de O₂.

Tabla III-41. Requerimiento de g O₂ para compostaje

Sustrato a compostar	Composición Elemental	Promedio g O ₂ /g sustrato	Masa a compostar g	O ₂ requerido g
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.03	64,300.00	66,077.95
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	0.74	12,000.00	8,916.03
Cascarilla de arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	1.03	12,000.00	12,331.81
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	1.21	43,000.00	52,165.31
Estiércol de vacuno	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	0.87	4,000.00	3,481.50
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	0.91	4,000.00	3,649.51
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	1.61	16,660.00	26,783.09
Total			155,960.00	173,405.21

El análisis arroja que para una oxidación parcial la cantidad de oxígeno necesario es de 1.11 kg O₂ por kilogramo de sustrato, mientras que para una oxidación

completa son necesarios 1.51 kg O₂, es decir una reducción el requerimiento de oxígeno del 26.5 % para oxidación parcial. Por lo tanto, la cantidad de O₂ por kilogramo de sustrato para oxidación parcial de la mezcla es.

$$Demanda O_2 = 1.11 \text{ kg O}_2 / \text{kg mezcla} \times 155,960.00 \text{ kg mezcla} = 173,405.21 \text{ kg O}_2$$

La demanda de aire será.

$$Demanda de aire = \frac{173,405.21 \text{ kg O}_2}{0.232} = 747,436.25 \text{ kg Aire}$$

Si se considera las condiciones del aire con una temperatura de 25 °C, a una presión de 1 atm y una densidad del aire S_A de 1.2 kg/m³, el volumen de aire será.

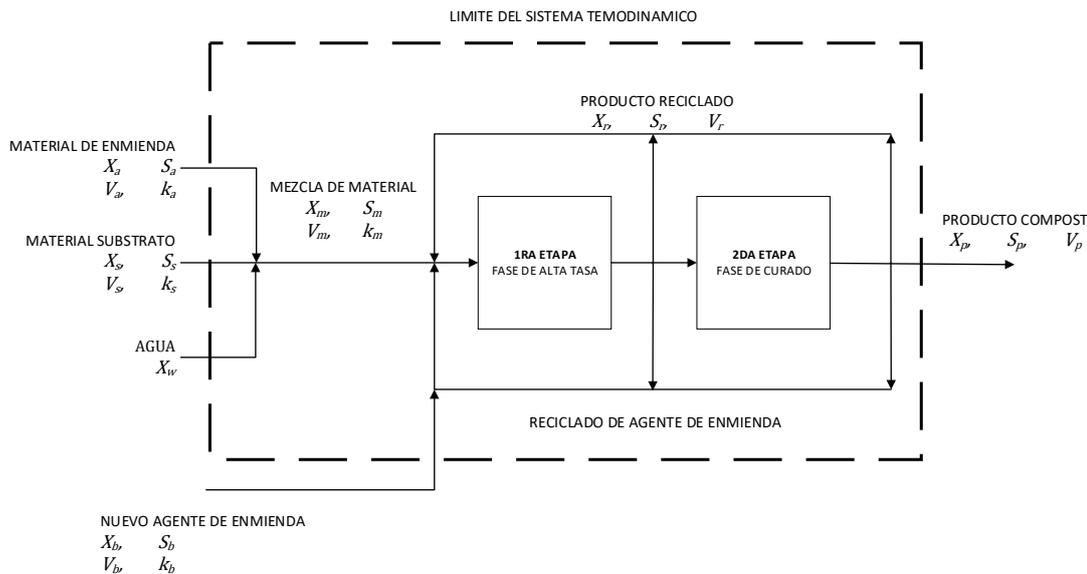
$$Volumen de aire = \frac{747,436.25 \text{ kg Aire}}{1.2 \text{ kg Aire} / \text{m}^3} = 622,863.54 \text{ m}^3 \text{ Aire}$$

Con lo que se ha determinado la demanda de aire estequiométrico para compostaje de la mezcla en 622,863.54 m³ de aire.

3.8.2 Requerimiento de aire por remoción de agua

La determinación de la cantidad de aire necesario para la remoción de agua, requiere el análisis del proceso de compostaje. Para lo que es necesario un balance de masas que se muestra en la figura (Haug, 1994).

Ilustración III.7 Diagrama general balance de masas para compostaje



Nota. Adaptado de “ (Haug, 1994, pág. 216)

Para la figura anterior la nomenclatura utilizada es.

- X_s Peso húmedo del sustrato principal producido por día
- X_p Peso húmedo del compost producido por día
- X_a Peso húmedo del material reciclado por día
- X_b Peso húmedo del agente de enmienda añadido a la mezcla por día
- X_w Peso del agua añadida a la mezcla por día
- X_m Peso húmedo de mezcla de materiales entrando al proceso de compostaje por día
- S_s Fracción de sólidos contenidos en el sustrato
- S_p Fracción de sólidos contenidos en el compost
- S_r Fracción de sólidos contenidos en material de reciclado
- S_a Fracción de sólidos contenidos en el material de enmienda
- S_b Fracción de sólidos contenidos en el agente de enmienda
- S_m Fracción de sólidos contenidos en la mezcla de ingreso
- V_s Sólidos volátiles contenidos en el sustrato, fracción sólido seco
- V_p Sólidos volátiles contenidos en el compost, fracción de los sólidos seco
- V_r Sólidos volátiles contenidos en el material reciclado, fracción sólido seco
- V_a Sólidos volátiles contenidos en material de enmienda, fracción sólido seco
- V_b Sólidos volátiles contenidos en agente de enmienda, fracción sólido seco
- V_m Sólidos volátiles contenidos en la mezcla, fracción de los sólidos seco
- k_s Fracción degradable de sólidos volátiles en sustrato durante compostaje
- k_a Fracción degradable de sólidos volátiles en enmienda durante compostaje

k_b Fracción degradable sólidos volátiles de agente enmienda en compostaje
 k_m Fracción degradable de sólidos volátiles en la mezcla durante compostaje

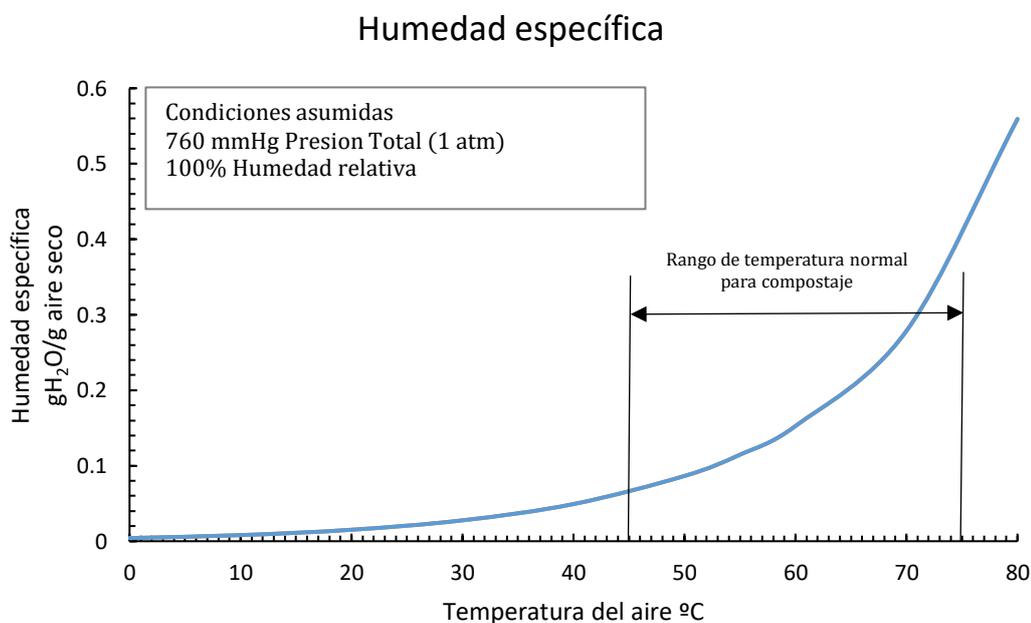
La cantidad de agua que se evapora diariamente se puede deducir de la figura anterior como (Haug, 1994).

$$W = \left(\frac{1 - S_s}{S_s} \right) - \left(\frac{1 - V_s}{1 - V_p} \right) \left(\frac{1 - S_p}{S_p} \right) \quad (\text{III-52})$$

La nomenclatura ya fue definida anteriormente.

La humedad específica, es la cantidad máxima de vapor de agua que puede transportar el aire a una presión y temperatura dada (Gupta, 2006, pág. 189), el gráfico siguiente muestra la humedad específica del aire versus la temperatura, en condiciones de 100% de humedad relativa y una presión de 60 mm Hg (1 atm). Cuando el aire transporta la máxima cantidad de aire permitido por la presión y temperatura a la que se encuentra se la llama aire saturado.

Ilustración III.8 Humedad específica en función de la temperatura



La ecuación para calcular la humedad específica cierta condición de presión y temperatura dadas, será.

$$w = \frac{18,015}{28,96} \left[\frac{RH_{air} \times 10^{\frac{a}{T_a}+b}}{P_{air} - 10^{\frac{a}{T_a}+b}} \right] \quad (\text{III-53})$$

Donde:

w : Humedad específica del aire, $g H_2O/g$ aire seco

RH_{air} : Humedad relativa del aire, %

P_{air} : Presión del aire dada, $mm Hg$

T_a : Temperatura del aire, en grados Kelvin $^{\circ}K$

18.015: Peso molecular del agua, g/mol

28.96: Peso molecular del aire seco, g/mol

a : -2,238 constante para agua

b : 8.896 constante para agua

Para los valores porcentuales de sólidos totales (S) y sólidos volátiles (V), se han definido a través de consulta bibliográfica de (Haug, 1994) y otros autores. La tabla siguiente muestra los valores definidos.

Tabla III-42. Valores para sólidos totales (S) y sólidos volátiles (V)

Sustrato	Composición elemental	Masa a Compostar kg	% S _s	% V _s	% S _p	% V _p
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	64,300.00	65	95	65	45
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	12,000.00	63	85	65	45
Cascarilla de arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	12,000.00	65	95	65	45
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	43,000.00	37	63	65	45
Estiércol de vacuno	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	4,000.00	14	85	65	45
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	4,000.00	35	65	65	45
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	16,660.00	25	75	65	45

El requerimiento de agua W por evaporación para aserrín será.

$$W = \left(\frac{1 - 0.65}{0.65} \right) - \left(\frac{1 - 0.95}{1 - .045} \right) \left(\frac{1 - .045}{0.45} \right) = 0.49 \text{ g } H_2O / g_{\text{sustrato seco}}$$

La humedad específica que contiene del aire que entra al proceso de compostaje a una temperatura de 20 °C, una presión de 760 mm Hg y 75% de humedad relativa será.

$$w = \frac{18.015}{28.96} \left(\frac{0.75 \times 10^{\frac{-2238}{(20+273)}+8896}}{760 - 10^{\frac{-2238}{(20+273)}+8896}} \right) = 0.01138 \text{ g } H_2O / \text{aire}_{\text{entra}}$$

La humedad específica que contiene el aire que sale del proceso de compostaje a una temperatura de 55 °C, una presión de 760 mm Hg y 100% de humedad relativa será.

$$w = \frac{18.015}{28.96} \left(\frac{1.00 \times 10^{\frac{-2238}{(55+273)}+8896}}{760 - 10^{\frac{-2238}{(55+273)}+8896}} \right) = 0.11463 \text{ g } H_2O / \text{aire}_{\text{sale}}$$

La humedad específica removida de la mezcla de compostaje será.

$$\text{Humedad removida} = 0.11463 - 0.01138 = 0.10325 \text{ g } H_2O \text{ removida} / \text{aire}_{\text{sale}}$$

La masa de aire requerido para remover la humedad removida será.

$$\text{Masa}_{\text{aire requerido}} = \frac{0.49 \text{ g } H_2O / g_{\text{sustrato seco}}}{0.10325 \text{ g } H_2O / \text{aire}_{\text{sale}}} = 4.74 \text{ g aire entran} / g_{\text{sustrato seco}}$$

Tomando la densidad el aire en condiciones estándar el valor de 1.20 g/l, el volumen de aire será.

$$Volumen_{aire\ entra} = \frac{4.74\ g\ aire\ entran / g_{sustrato\ seco}}{1.2\ g\ aire / l\ aire} = 3.95\ l\ aire / g_{sustrato\ seco}$$

Esta es la cantidad necesaria de aire por gramos de sustrato seco para lodo residual. Para el resto de sustratos el cálculo es similar, a continuación, la tabla resumen.

Tabla III-43. Volumen de aire necesario por sustrato a compostar

Agua por evaporación	w entra 20°C @75% HR	w sale 55°C @100% HR	w removida	Peso aire requerido	Volumen aire entra
$gH_2O/g_{sustrato\ seco}$	$gH_2O/g_{aire\ entra}$	$gH_2O/g_{aire\ sale}$	$gH_2O/g_{aire\ sale}$	$g_{aire\ entra}/g_{sustrato\ seco}$	$l_{aire}/g_{sustrato\ seco}$
0.49	0.01138	0.11463	0.10325	4.74	3.95
0.44	0.01138	0.11463	0.10325	4.27	3.55
0.49	0.01138	0.11463	0.10325	4.74	3.95
1.34	0.01138	0.11463	0.10325	12.98	10.82
6.00	0.01138	0.11463	0.10325	58.07	48.40
1.51	0.01138	0.11463	0.10325	14.67	12.22
2.76	0.01138	0.11463	0.10325	26.69	22.24

La cantidad da aire necesario en metros cúbicos para cada sustrato y su respectivo total es.

Tabla III-44. Aire requerido total por remoción de humedad

Sustrato	Composición elemental	Masa a Compostar Kg	Volumen aire entra laire/g _{sustrato} oseco	Aire requerido m ³
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	64,300	3.95	254,047.88
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	12,000	3.55	42,659.81
Cascarilla de arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	12,000	3.95	47,411.73
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	43,000	10.82	465,228.71
Estiércol de vacuno	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	4,000	48.40	193,581.79
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	4,000	12.22	48,895.37
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	16,660	22.24	370,491.10
Total				1,422,316.39

Para la mezcla de sustrato a compostar se puede concluir que el requerimiento de aire por remoción de humedad es de 1,422,316.39 m³ de aire, siendo mucho mayor a la cantidad de aire por demanda estequiométrica de 622,863.54 m³.

De las cantidades de sustrato a compostar, se determinó a través de la calculadora de compostaje que es necesario añadir humedad en una cantidad de 45.7 Tm de agua, esta agua también debe ser removida. La humedad específica removida en el aire de salida es de 0.10325 g H₂O/g_{aire sale}, por lo que la cantidad de aire se puede determinar cómo.

$$Masa_{aire\ requerido} = \frac{47,700,000\ g\ H_2O}{0.10325\ g\ H_2O / aire_{sale}} = 462,000,262.38\ aire$$

Para una densidad de aire en condiciones estándar el valor de 1.20 g/l, el volumen de aire es.

$$Volumen_{aire\ entra} = \frac{462,000,262.38\ g\ aire}{1.2\ g\ aire/l\ aire} = 385,000,218.65\ l\ aire/g\ H_2O$$

El volumen de aire para remover el agua es de 385,000.22 m³ de aire para remover el agua que se adiciona. Por lo que el volumen total de aire es.

$$Demanda_{aire} = (1,422,316.39 + 385,000,22)m^3\ aire = 1,807,361.61\ m^3\ aire$$

La demanda de aire por remoción de humedad es de 1,807,361.61 m³ de aire.

3.8.3 Demanda de aire por remoción de calor

Las tasas de reacciones bioquímicas generalmente aumentan de forma exponencial con la temperatura (Haug, 1994). Sin embargo, los aumentos elevados de temperatura pueden inactivar la población de bacterias, por lo que la temperatura es también un factor limitante. De esta manera, el aire debe ser suministrado para remover el calor y para controlar la temperatura para una óptima actividad bacteriana.

Según (Haug, 1994), el calor de combustión por electrones transferido en la formación en un enlace tipo metano es relativamente constante a aproximadamente 26.05 kcal por electrón, como el O₂ posee cuatro electrones el valor, se obtiene un valor de calor de 104.2 kcal/mol O₂ por oxidación, esto es 3256.25 cal/g O₂, se asume 3260 cal/g O₂.

Por lo tanto, la cantidad de calor generado para el sustrato aserrín será.

$$Calor\ generado\ por\ aserrín = 1.03\ g\ O_2 / g\ sustrato \times 3,260.00\ cal / g\ O_2$$

$$Calor\ generado\ por\ aserrín = 3,350.14\ cal / g\ sustrato$$

La demanda de aire necesario por gramo de sustrato se puede calcular de la siguiente forma.

Calor necesario para evaporar el agua que contiene el aire húmedo a 20 °C.

$$\text{Calor a } 20^{\circ}\text{C} = X \times \text{Humedad contenida} \times \text{calor vaporización } H_2O \text{ a } 20^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Calor a } 20^{\circ}\text{C} = X \times \left(0.10325 \frac{g H_2O_{removida}}{g \text{aire}_{sale}}\right) \times \left(586.12 \frac{\text{Cal}}{g H_2O_{vapor}}\right)$$

$$\text{Calor a } 20^{\circ}\text{C} = X * 60.51 \frac{\text{cal}}{g \text{aire}_{sale}}$$

Calor necesario para evaporar el agua que está con el aire que sale a 55 °C.

$$\text{Calor a } 55^{\circ}\text{C} = X \times \text{Humedad contenida} \times \text{Calor específico } H_2O \times \Delta T$$

$$\text{Calor a } 55^{\circ}\text{C} = X \times 0.11463 \frac{g H_2O}{g \text{aire}_{sale}} \times 0.45 \frac{\text{cal}}{g H_2O^{\circ}\text{C}} \times (55 - 20)^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Calor a } 55^{\circ}\text{C} = X * 1.79 \frac{\text{cal}}{g \text{aire}_{sale}}$$

Calor necesario para aire seco a 55°C.

$$\text{Calor aire seco a } 55^{\circ}\text{C} = X \times \text{Calor específico aire} \times \Delta T$$

$$\text{Calor aire seco a } 55^{\circ}\text{C} = X \times 0.24 \frac{\text{cal}}{g \text{aire}^{\circ}\text{C}} \times (55 - 20)$$

$$\text{Calor aire seco a } 55^{\circ}\text{C} = X * 8.41 \frac{\text{cal}}{g \text{aire}_{sale}}$$

Realizando un balance de masas, el valor total de calor requerido sería igual a.

$$\text{Calor a } 20^{\circ}\text{C} + \text{Calor a } 55^{\circ}\text{C} + \text{Calor aire seco} = 3,350.14 \frac{\text{cal}}{g \text{sustrato}}$$

$$X * (60.51 + 1.79 + 8.41) \frac{\text{cal}}{g \text{aire}_{sale}} = 3,350.14 \frac{\text{cal}}{g \text{sustrato}}$$

$$X = \frac{3,350.14 \text{ cal/g sustrato}}{70.72 \text{ cal/g aire}_{sale}} = 47.37 \text{ g aire}_{sale} / \text{g sustrato seco}$$

Los cálculos se realizan de la misma manera para el resto de sustratos, a continuación, el resumen para la demanda de aire para remoción de calor.

Tabla III-45. Aire requerido total para remoción de calor

Sustrato	Composición elemental	Masa Kg	Calor Generado cal/g _{sustrato}	Demanda De aire g _{aire} /g _{sustrato seco}	Aire requerido m ³
Aserrín	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	64,300	3,350.14	47.37	2,538,432.46
Recortes de arbustos	C ₂₃ H ₃₈ O ₁₇ N	12,000	2,422.19	34.25	342,515.84
Cascarilla de arroz	C ₂₉₅ H ₄₂₀ O ₁₈₆ N	12,000	3,350.14	47.37	473,735.45
Productos hortícolas	C ₁₆ H ₂₇ O ₈ N	43,000	3,954.86	55.92	2,003,968.33
Estiércol de vacuno	C ₁₈ H ₂₅ O ₁₂ N	4,000	2,837.42	40.12	133,744.40
Gallinaza	C ₇ H ₁₁ O ₄ N	4,000	2,974.35	42.06	140,198.44
Lodo residual	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	16,660	5,240.87	74.11	1,028,891.98
Total					6,661,486.91

Con la metodología anterior, se ha calculado la demanda total de aire requerido para las demandas de oxígeno estequiométrica, humedad y calor, se puede notar que, el mayor valor es para la demanda por remoción de calor, el resumen se presenta a continuación.

Tabla III-46. Aire requerido total para remoción de calor

Tipo de demanda de aire	m ³ aire	Porcentaje
Estequiométrica	622,863.54	6.85%
Por remoción de humedad	1,807,316.61	19.88%
Por remoción calor	6,661,486.91	73.27%
Total	9,091,667.07	100.00%

El valor total de aire se puede redondear a 9,100,000.00 m³ de aire para asegurar la completa aireación de sustrato mezcla.

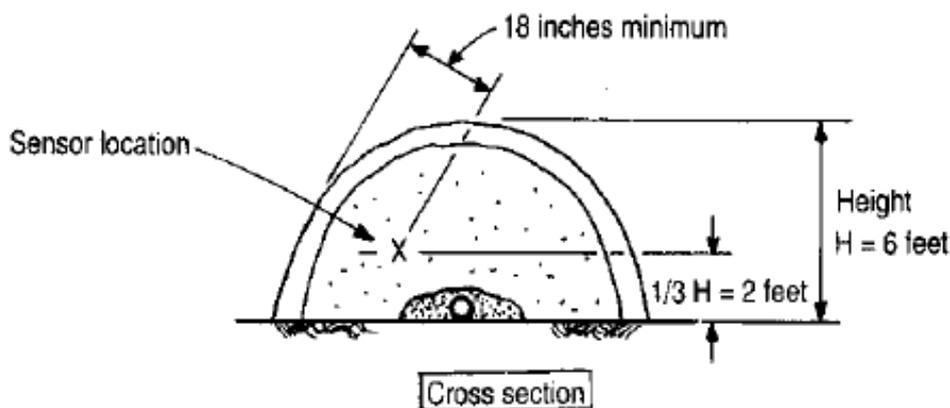
3.8.4 Tasa de aireación

Para conocer la tasa o caudal de aireación se debe conocer el tiempo de compostaje promedio. Este tiempo depende del tipo de sustrato mezcla y de las condiciones estables de operación como añadir humedad, medir Ph, controlar temperatura, humedad, etc. Para este proyecto se tomará un tiempo promedio de fermentación de 60 días (Román, Martínez, & Pantoja, 2013) y un tiempo de curado de 90 días. Por lo que la tasa de aireación en m³/h será.

$$\text{Tasa de airacion} = \frac{9,100,000 \text{ m}^3 \text{ aire}}{60 \times 24 \text{ h}} = 6,319.44 \text{ m}^3 \text{ aire/hora}$$

Para la construcción de la pila se tomó las dimensiones recomendadas según (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992, págs. 32, NRAES), la altura recomendada para sistemas ASP es de 6 pies o de 1.83 m, se asumirá 1.80 m. la longitud de la pilas será de 30 m, con una ancho de base de 3 m.

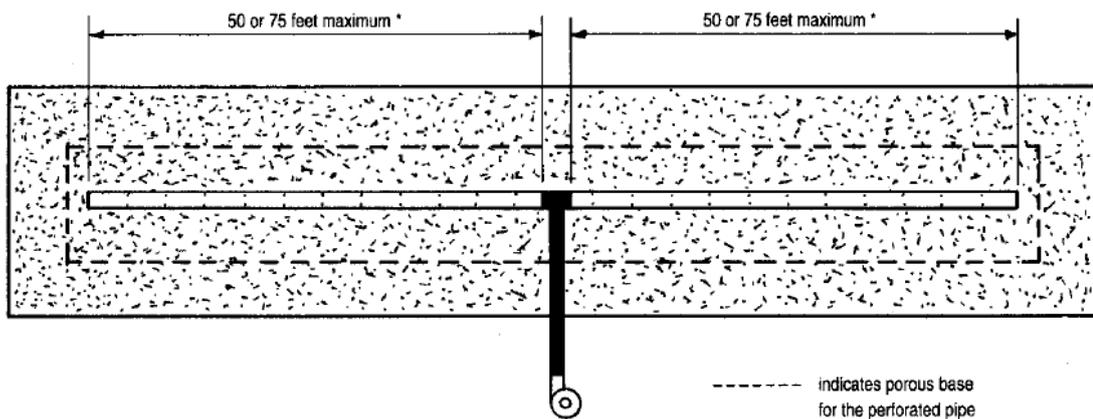
Ilustración III.9 Sección típica de filtro de pila para método ASP



Nota. Recuperado de “ (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

Debido a que el caudal de aire no se distribuye de forma homogénea a todo lo largo de la tubería de aireación, la longitud máxima de la pila es de 50 a 75 pies o 15,24 a 22.86 m (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992). El arreglo para maximizar la distribución de aire se presenta a continuación.

Ilustración III.10 Arreglo de tubería para método ASP



Nota. Recuperado de “ (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

Para la pila se tendrá la longitud máxima de 30 m en total, es decir 15 m por cada lado de tubería.

El diámetro de la tubería de la tubería se determina por las velocidades permitidas para flujo de aire en sistemas de compostaje, según Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES) la velocidad recomendada es de 2000 pies/min o 10.16 m/s, la tasa de aireación se dividirá para 6 pilas compostaje, a continuación, se resume el arreglo del sistema de aireación.

Tabla III-47. Parámetros para el arreglo de tuberías

Arreglo de tubería partida		
Longitud máxima de pila	22.86	m
Longitud máxima	45.72	m
Por razones de uniformidad se asume	30	m
Aire requerido	9,091,667.07	m ³
Aire asumido	9,100,000.00	m ³
Tiempo de fermentación	60.00	día
Caudal de aire para la fermentación	6,319.44	m ³ /día
Numero de pilas	6.00	unidades
Caudal requerido por pila	1,053.24	m ³ /h
Velocidad mínima en el tubo	10.00	m/s
Radio del tubo	0.097	m
Diámetro de tubería calculado	0.193	m
Diámetro asumido	0.20	m

Fuente: (El Autor, 2017)

3.9 Pérdida de carga en el sistema de compostaje

La pérdida de carga en el sistema de compostaje es la diferencia de presión que se debe aplicar para vencer el rozamiento por el aire que circula a través de las tuberías, el sustrato a compostar y el filtro para control de olores, para poder hacer circular el aire a través de todo el sistema.

3.9.1 Pérdida de carga o energía en sistema de tuberías

El aire al ser un flujo compresible no tiene un comportamiento estable con los cambios de presión, lo que dificulta la estimación de las pérdidas de carga, sin embargo, para sistemas de aireación las presiones son muy bajas y se miden en Kilo pascales Kpa, 1 Kpa es equivalente a una presión de 0,10 metros de

columna de agua (m.c.a.), por lo que se considerará por facilidad de cálculo que aire es un flujo incompresible para presiones bajas.

Perdida de carga en una tubería

En dinámica de fluidos, la pérdida de carga asociada a una tubería recta se estima según la ecuación de Darcy como (Mott, 2006, pág. 233).

$$h_L = f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III-54})$$

Donde:

- h_L Pérdida de energía debido a la fricción en tubería, *m.c.a.*
- L Longitud de la tubería, *m*
- D Diámetro de la tubería, *m*
- v Velocidad promedio del fluido dentro de la tubería, *m/s*
- f Factor de fricción de Darcy, adimensional

La ecuación de Darcy se utiliza para calcular la pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas y largas de tubos redondos (Mott, 2006).

El factor f , se calcula según el número de Reynolds, este es un valor adimensional que indica si el flujo estará en régimen laminar o turbulento. Si la velocidad de transporte de un fluido dentro de un conducto es elevada, el flujo será turbulento.

Para la conducción de aire en el sistema de compostaje la velocidad será del orden de 10 m/s, por lo normalmente se presentará un flujo turbulento, el número de Reynolds se define como.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (\text{III-55})$$

Donde:

- Re Es el número de Reynolds, adimensional
- v Velocidad promedio del fluido, m/s
- D Diámetro interno del conducto, m
- ν Viscosidad cinemática, m^2/s

El cálculo de f , se puede determinar con la siguiente ecuación desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain,

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{III-56})$$

Donde:

- f Es factor de fricción de Darcy, adimensional
- ϵ Es la rugosidad absoluta del material, m

Los otros parámetros ya fueron definidos.

El otro tipo de pérdida de energía en un sistema de tuberías que conduce un fluido, es el que se debe a los cambios de dirección como codos, té, válvulas, etc., que existen en todo arreglo de conductos, este tipo de pérdidas de carga se les denomina pérdidas menores y se calcula como.

$$h_m = \frac{v^2}{2g} k \quad (\text{III-57})$$

Donde:

- h_m Pérdida de energía menor debido a accesorios, $m.c.a.$
- k Factor de fricción según tipo de accesorio, *adimensional*
- v Velocidad promedio del fluido dentro de la tubería, m/s
- g Valor de la gravedad, m/s^2

Los valores típicos del factor k , se dan en la siguiente tabla.

Tabla III-48. Factores de fricción para accesorios

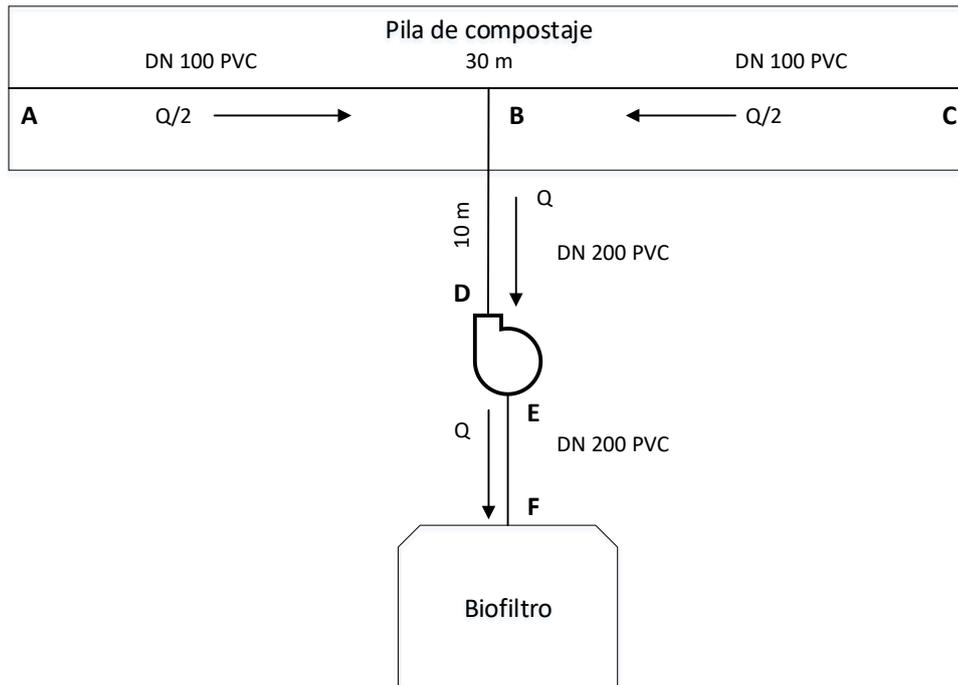
Accesorios	k
Válvula de purga	1.00
Ventosa	1.00
Válvula de compuerta	0.20
Válvula de retención	2.50
Codo 90	0.90
Codo 45	0.90
Codo 22 ½	0.10
Codo 11 ¼	0.10
Te Paso Directo	0.30
Te Paso Lateral	1.80
Ye Paso directo	0.30
Ye Paso Lateral	0.80
Salida tubería	1.00
Contracción	0.08
Ampliación	0.25
Uniones	0.06

Por lo que la pérdida de energía o de carga en un sistema de tuberías se puede escribir como.

$$H = (h_L + h_m)_{impulsión} - (h_L + h_m)_{succión} + \text{Altura por vencer} \quad (\text{III-58})$$

El arreglo de tuberías y sus dimensiones se muestran en la siguiente figura.

Ilustración III.11 Esquema de pila de compostaje



Fuente: (El Autor, 2017)

Los datos de la tubería de succión son.

Caudal tramo A-B-C	526.62 m ³ /h
Velocidad en el tubo	8.27 m/s
Longitud de tubería	30.00 m
Diámetro asumido	150.00 mm
Temperatura del aire	20.00 °C
Viscosidad cinemática	1.51 E ⁻⁵ ms ²
Rugosidad absoluta "ε"	0.0015 mm

El número de Reynolds es.

$$Re = \frac{8.27 \text{ m/s} \times 0.15 \text{ m}}{1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}} = 8.22 \times 10^4$$

El valor del coeficiente de fricción f será.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{0.0015 \text{ mm}/150 \text{ mm}}{3.7} + \frac{5.74}{(8.22 \times 10^4)^{0.9}} \right) \right]^2} = 1.867 \times 10^{-2}$$

El valor de la pérdida de energía será para los 30 m del tramo A-B-C de tubería DN 150 mm es.

$$h_L = 1.867 \times 10^{-2} \times \frac{30 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} \times \frac{(8.27 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 13.044 \text{ m}$$

Esta pérdida de carga está expresada en metros de columna del fluido, para este caso aire, se va a convertir en metros de columna de agua m.c.a.

$$h_L = 13.044 \text{ m} \times \frac{1.2047}{998} = 0.016 \text{ m. c. a.}$$

Donde 1.2047 kg/m³ y 998 kg/m³ son las densidades del aire y del agua a la misma temperatura respectivamente.

Las pérdidas de carga por accesorios en el tramo de succión serán

$$h_m = \frac{(8.27 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \times 0.30 \times \frac{1.2047}{998} = 0.001 \text{ m. c. a.}$$

Donde 0.30 es el valor del coeficiente k para el accesorio tee, por lo tanto, la pérdida de carga en el tramo A-B-C de succión de longitud 30 m y DN 150 mm es de 0.017 m.c.a.

La pérdida de carga para el tramo B-D de succión de tubería de longitud 10 m y DN 200 mm será.

Caudal tramo B-D	1053.24	m ³ /h
Velocidad en el tubo	9.31	m/s
Longitud de tubería	10.00	m
Diámetro asumido	200.00	mm
Temperatura del aire	20.00	°C
Viscosidad cinemática	1.51 E ⁻⁵	ms ²
Rugosidad absoluta "ε"	0.0015	mm

El número de Reynolds es

$$Re = \frac{9.31 \text{ m/s} \times 0.20 \text{ m}}{1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}} = 1.23 \times 10^5$$

El valor del coeficiente de fricción f será.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{0.0015 \text{ mm}/200 \text{ mm}}{3.7} + \frac{5.74}{(1.23 \times 10^5)^{0.9}} \right) \right]^2} = 1.716 \times 10^{-2}$$

El valor de la pérdida de energía será para los 10 m de tubería DN 200 mm es.

$$h_L = 1.716 \times 10^{-2} \times \frac{10 \text{ m}}{0.20 \text{ m}} \times \frac{(9.31 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 3.792 \text{ m}$$

Esta pérdida de carga está expresada en metros de columna del fluido, para este caso aire, se va a convertir en metros de columna de agua m.c.a.

$$h_L = 3.792 \text{ m} \times \frac{1.2047}{998} = 0.0046 \text{ m. c. a.}$$

Donde 1.2047 kg/m³ y 998 kg/m³ son las densidades del aire y del agua a la misma temperatura respectivamente.

Las pérdidas de carga por accesorios en el tramo de succión serán

$$h_m = \frac{(9.31 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \times 0.90 \times \frac{1.2047}{998} = 0.0048 \text{ m. c. a.}$$

Donde 0.90 es el valor del coeficiente k para un codo de 45° ubicado en la succión del ventilador, por lo tanto, la pérdida de carga en el tramo B-D de succión de longitud 10 m y DN 200 mm es de 0.0094 m.c.a.

La pérdida de carga en el tramo E-F de tubería de impulsión de tubería de longitud 10 m y DN 200 mm será.

Caudal tramo E-F	1053.24	m ³ /h
Velocidad en el tubo	9.31	m/s
Longitud de tubería	10.00	m
Diámetro asumido	200.00	mm
Temperatura del aire	20.00	°C
Viscosidad cinemática	1.51 E ⁻⁵	ms ²
Rugosidad absoluta "ε"	0.0015	mm

Como las condiciones son iguales al tramo B-D, la pérdida de carga será igual, entonces, la pérdida de carga en el tramo E-F es 0.0094 m.c.a.

Por lo tanto, la pérdida de carga en el sistema de tuberías para una pila es.

$$H_T = 0.017 + 0.0094 + 0.0094 = 0.0355 \text{ m. c. a.}$$

3.9.2 Pérdida de carga en el sustrato

Entre los métodos utilizados para el sistema de compostaje en pilas estáticas aireadas, es recomendable para sistemas de gran escala, el tamaño adecuado del sistema de aireación necesario con el fin de obtener eficiencia del proceso y bajo consumo de energía.

Para sistemas de compostaje se denomina gradiente de presión estática, al cambio producido en la presión por unidad de profundidad versus la tasa de

aireación, generalmente expresado en kPa/m. Según (Texeira & Matos, 2014), el gradiente de presión estática del flujo de aire a través de las capas de material orgánico para compostaje puede ser representada por los modelos utilizados para granos, como.

La ecuación potencial de Shedd.

$$\Delta P = A_1 Q^{B_1} \quad (\text{III-59})$$

Donde:

ΔP Cambio de presión por altura de capa de sustrato, Pa

Q Es la rugosidad absoluta del material, m

A_1, B_1 Son coeficientes ajustados experimentalmente

La ecuación logarítmica de Hukill y Ives

$$\Delta P = \frac{A_2 Q^2}{\ln(1 + B^2 Q)} \quad (\text{III-60})$$

Donde:

A_2, B_2 Son coeficientes ajustados experimentalmente

La ecuación cuadrática de Ergun, debido a que es una ecuación derivada de forma teórica depende de parámetros del sustrato que se deben conocer cómo, espacio de poro, diámetro de partícula, viscosidad y densidad del aire, sin embargo, estos parámetros se pueden determinar para cada material y obtener la forma cuadrática simplificada que se muestra a continuación (Amanlou & Zomorodian, 2011).

$$\Delta P = A_3 Q + B_3 Q^2 \quad (\text{III-61})$$

Donde:

A_3, B_3 Son coeficientes ajustados experimentalmente

Estos modelos han sido desarrollados para la estimación de gradiente de presión de aire que circula a través de capas de granos (ASABE Standards, 2007), es así que, existen pocos estudios en lo que respecta a materia orgánica o composta. Para (Texeira & Matos, 2014) en pruebas realizadas en laboratorio, el modelo de Shedd es el que mejor se ajustó a los sustratos utilizados para la determinación del gradiente de presión.

Los experimentos de (Texeira & Matos, 2014) con mezcla de sustrato de bagazo de caña + estiércol de ave y concho de café + estiércol de ave, se obtuvieron las siguientes ecuaciones modeladas.

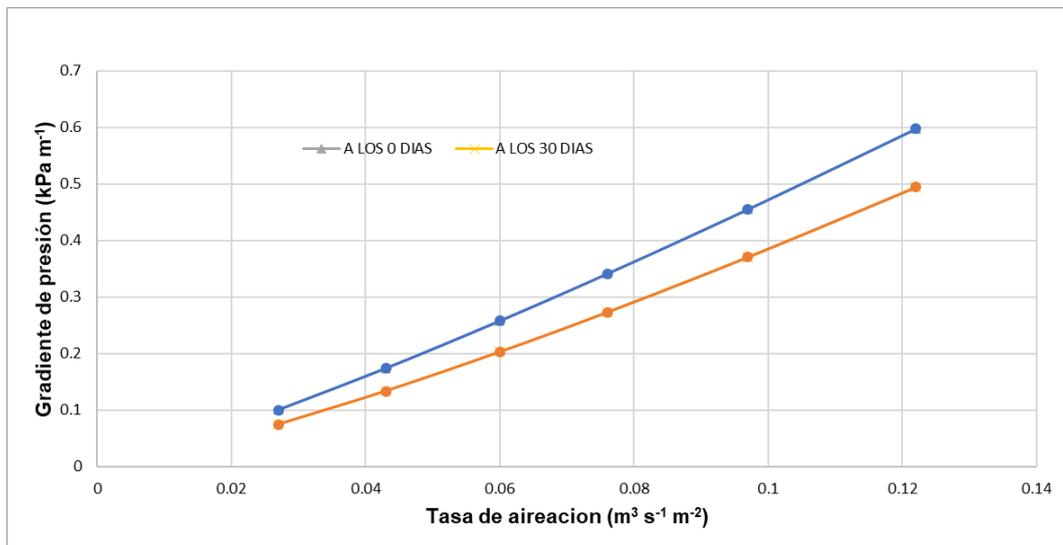
Tabla III-49. Modelos resultantes según ecuación de Shedd

Ecuación	Tiempo	Sustrato	Modelo
$\Delta P = 7.24Q^{1.186}$	0 días	bagazo de caña + estiércol de ave	Shedd
$\Delta P = 6.93Q^{1.255}$	30 días		
$\Delta P = 4.43Q^{1.324}$	0 días	concho de café + estiércol de ave	
$\Delta P = 3.47Q^{1.316}$	30 días		

Nota. Adaptado de “ (Texeira & Matos, 2014)

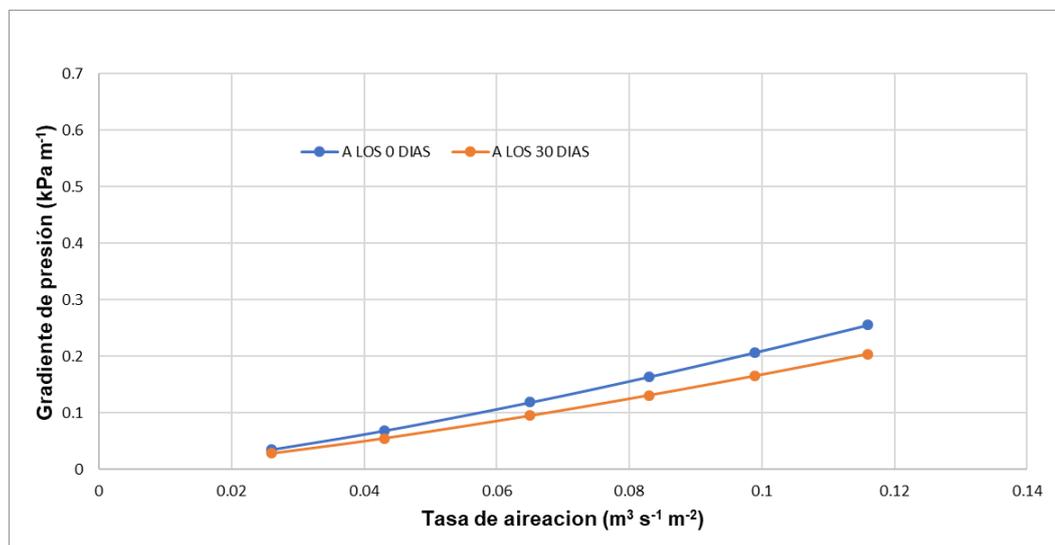
Las curvas de cada uno de los modelos adoptados de la tabla anterior se presentan a continuación:

Ilustración III.12 Gradiente de presión bagazo caña+ estiércol ave



Nota. Adaptado de “ (Texeira & Matos, 2014)

Ilustración III.13 Gradiente de presión cáscara de café + estiércol ave



Nota. Adaptado de “ (Texeira & Matos, 2014)

Se puede notar que en el experimento de (Texeira & Matos, 2014), que el sustrato que más gradiente de presión posee es el que contiene bagazo de caña en relación al que contiene cáscara de café, también se puede apreciar que el gradiente de presión aumenta con el tiempo de fermentación que para este caso fue de 30 días, esto se debe a que el sustrato se compacta y la porosidad disminuye.

Para el diseño del proyecto se adoptará el modelo a los 30 días para bagazo de caña + estiércol de ave, por ser muy parecido a la mezcla propuesta para el proyecto, sin embargo, se aclara que se debe realizar el procedimiento redactado por (Texeira & Matos, 2014) para determinar la curva de gradiente de presión del sustrato a compostar.

Para el caudal de 1,053.24 m³/h (0.2926 m³/s) correspondiente a una pila de sustrato de 1.80 m de altura se tiene que el gradiente de presión estática es.

$$\Delta P = 6.93(0.2926)^{1.255} \text{ kPa}/\text{m} = 1.482 \text{ kPa}/\text{m}$$

Como la pila posee 1.80 m de altura, la presión necesaria para atravesar la capa de sustrato será.

$$P = 1.8 \text{ m} \times 1.482 \text{ kPa}/\text{m} = 2.66 \text{ kPa}$$

Que transformada a m.c.a será.

$$P = 0.1 \text{ m.c.a.}/\text{kPa} \times 2.66 \text{ kPa} = 0.266 \text{ m.c.a.}$$

Se considerará que la presión necesaria para el biofiltro es un 50 % del valor de la presión necesaria para el sustrato. Por lo tanto la presión necesaria que debe suministrar el ventilador es de.

$$P = (0.0355 + 0.267 \times 1.5) \text{ m.c.a.} = 4.356 \text{ m.c.a.}$$

Potencia del ventilador

Como las unidades de presión se han convertido en m.c.a., la potencia del ventilador se estima según la ecuación.

$$Pot = \frac{\rho_w \times g \times Q \times H}{\eta} \quad (\text{III-62})$$

Donde:

- Pot* Es la potencia del ventilador, *W*
ρ_w Es el peso específico del agua, *kg/l*
g Es el valor de la gravedad, *m/s²*
Q Es el caudal necesario, *l/s*
H Es la presión necesaria a vencer, m.c.a.
η Es la eficiencia del ventilador, %

La potencia necesaria del ventilador es.

$$Pot = \frac{0.998 \text{ kg/l} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 292.57 \text{ l/s} \times 0.4356 \text{ m}}{0.70}$$

$$Pot = 1,782.545 \text{ w}$$

Finalmente, la potencia requerida por el ventilador es de 1.79 kW.

De la página del fabricante de ventiladores New York Blower, se selecciona el modelo 2006A CW TH de ventilador. Los datos generales se muestran en la tabla a continuación, mayores detalles en los anexos:

Ilustración III.14 Imagen del ventilador seleccionado



Fuente: The New York Blower Company, <https://www.nyb.com/>

Tabla III-50. Modelo de ventilador seleccionado

Fan Design		Calculation Mode: Find Speed	
Product:	Pressure Blower	Drive Type:	Direct
Type:	Radial	Arrangement:	4
Size:	2006	Outlet Velocity:	964.1 mt/min
Fan Class:	N/A	Static Efficiency:	69.01%
Wheel Type:	Radial (shrouded) - ALM	Total Efficiency:	71.5%
Wheel Material:	Aluminum	Operating Temp:	21.11° C
Wheel Weight:	5.6 kg	Maximum Temp:	21.11° C
Wheel WR ² :	0.18 kg-m ²	Maximum Speed:	3900 RPM
Percent Width:	100%	Velocity Pressure:	15.86 mm wg
Percent Diameter:	100.00%	Fan Static Pressure:	440 mm wg
Outlet Area:	.0182 sq. m	Fan Total Pressure:	455.9 mm wg
Options:	None	Altitude:	0 m
Axial thrust load:	is 10.33 kgf.		

Fuente: The New York Blower Company, <https://www.nyb.com/>

3.10 Diseño de la pila

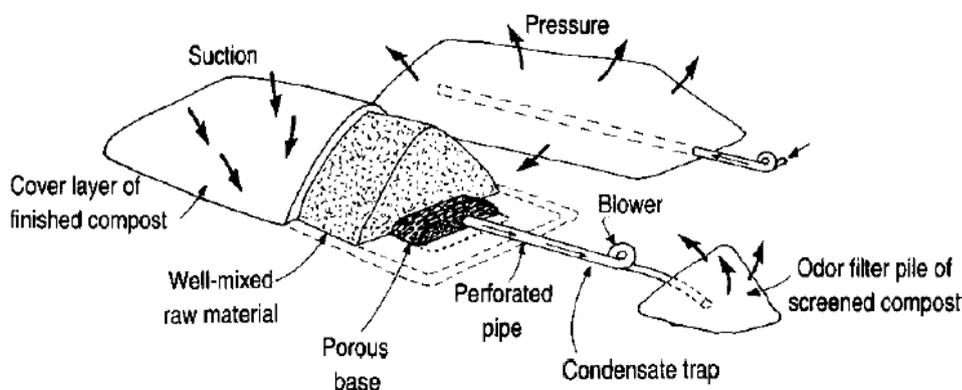
Se considerará los diseños recomendados para pilas de compostaje de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992) On Farm Composting Handbook NRAES-54.

3.9.3 Tamaño y número de pilas

El tamaño de la pila, debe ser el correcto para no afectar los requerimientos de oxígeno, temperatura y humedad. La altura es importante, pilas con geometría de altura muy baja y base ancha permiten que el calor que se genera por la actividad de los microorganismos se pierda fácilmente, pilas muy altas pueden hacer que el material se compacte demasiado en la base y el proceso resulte en zonas anaerobias con el consecuente problema de olores.

Las dimensiones recomendadas se encuentran en altura entre 1.5 a 2 m y ancho de base de 3 m, sin embargo, el tamaño de la pila también dependerá del tipo de equipo volteador, para usar la técnica de ASP, no es necesario el volteo.

Ilustración III.15 Arreglo de pila para método ASP

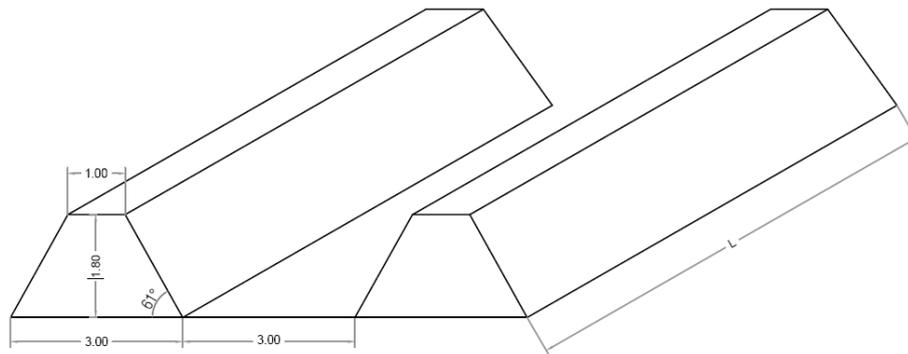


Fuente: Recuperado de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

Otras consideraciones para la elección del tamaño de la pila, es el tamaño de partícula, la porosidad y densidad absoluta del material. Para el presente

proyecto se ha determinado pilas de base mayor de 3.00 m, base menor de 1.00 m, altura de 1.80 m y separación entre pilas de 3 m. Una vez conformada la pila, esta no se tocará hasta haber terminado el proceso de compostaje.

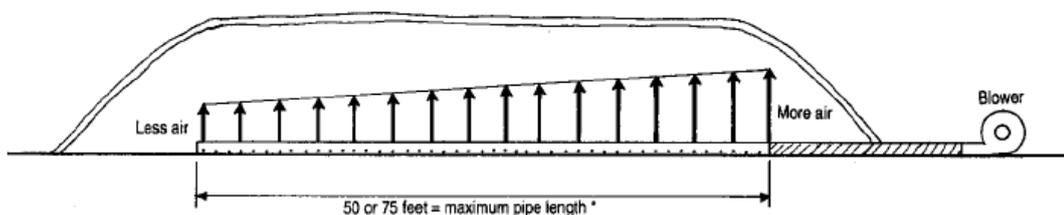
Ilustración III.16 Dimensión de pila seleccionada



Fuente (El Autor, 2017)

La longitud de la pila es también importante, si la pila es demasiado larga el aire no se distribuirá de forma uniforme, la longitud recomendada está entre 15 y 22 m, esto aplica tanto si a la pila se le insufla o extrae aire.

Ilustración III.17 Distribución de aire en pila para método ASP



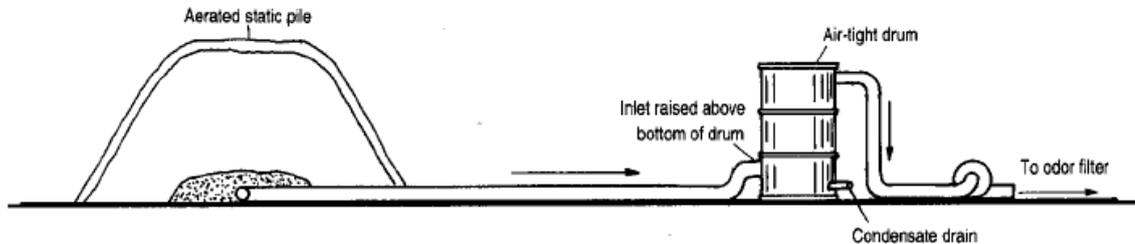
Fuente: Recuperado de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

Para la pila del proyecto, se escogió el sistema de tubería bifurcada como se mostró en la figura III-10, lo que resulta en una longitud por rama de 15 m.

El aire que sale de la pila estará saturado de humedad, por lo que, la mayor parte de contenido de humedad del aire debe ser retirada para evitar averiar el ventilador o blower, para esto se utiliza un recipiente metálico o plástico de

capacidad de 55 galones, que posea un drenaje para retirar la humedad.

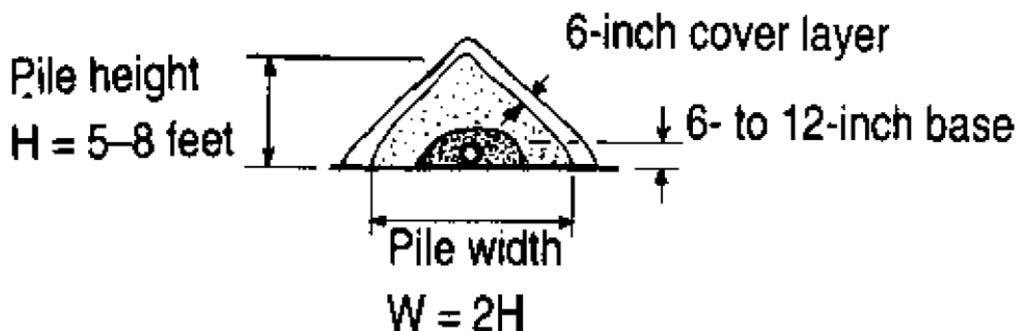
Ilustración III.18 Forma de condensar la humedad del aire en pila ASP



Fuente: Recuperado de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

La pila de sustrato, debe ser cubierta con una capa de compost maduro o aserrín para evitar el escape de humedad, olores y alejar vectores, una práctica es cubrir la pila con una capa de 15 cm de espesor para este fin.

Ilustración III.19 Espesor de cubierta en pila por método ASP

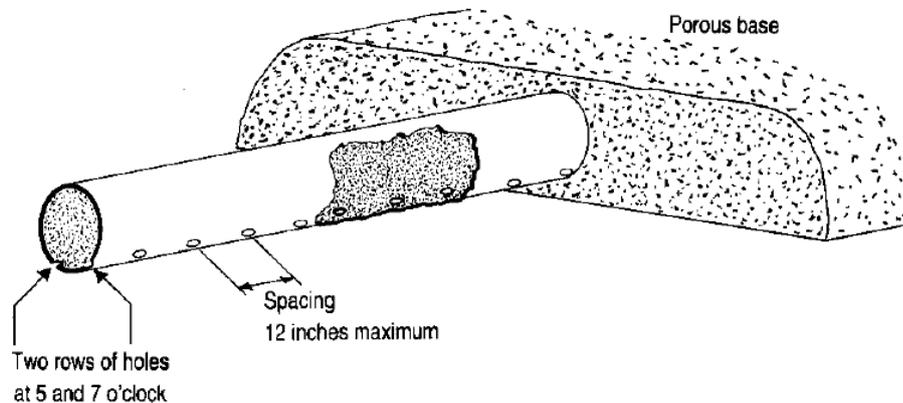


Fuente: Recuperado de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

La tubería perforada debe ser cubierta con material poroso como aserrín para evitar que los agujeros se tapen. Y las perforaciones de deben realizar cada 0.30 m. como máximo, en dos filas ubicadas a las 5 y 7 de las manecillas del reloj. Según (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992), para un diámetro de succión de DN 150 mm en PVC y una longitud máxima de 20 m, se recomienda 0.15 m.

de espacio entre agujeros y diámetro de agujero de 23.81 mm (15/16 pulgadas).

Ilustración III.20 Detalle de la tubería en pila por método ASP



Fuente: Recuperado de (Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten, 1992)

Tomando en cuenta todas las recomendaciones citadas, se puede diseñar la pila definitiva. El número de pilas necesario es de 6 pilas con una longitud de 30 m, base mayor de 3, base menor de 1 m y altura de 1.80 m.

3.11 Infraestructura y equipos necesarios

La obra civil y maquinaria dependerán del sistema de compostaje seleccionado, para el sistema ASP lo requerimientos son sencillos versus otras técnicas más complejas como compostaje en túnel o compostaje en tambores rotativos.

3.11.1 Zona de recepción

Es el lugar donde se recibirán los diferentes sustratos de compostaje en la Planta, esta área debe poseer un piso de hormigón impermeabilizado para impedir el escurrimiento de la humedad de los ingredientes de la mezcla. Debe tener capacidad de soportar el tráfico pesado de un tractor, además tiene que implementar un sistema de drenaje para recolectar la humedad de los ingredientes y aguas lluvias que se acumulen. Esta área debe poseer cubierta con paredes laterales.

Ilustración III.21 Zona de recepción y mezclado técnica ASP



Nota. Recuperado de (Veolia)

<https://www.veolia.co.uk/westberkshire/waste-services/waste-services/composting>

3.11.2 Área de compostaje o fermentación

La mezcla de ingredientes se realiza durante el formado de la pila, se puede utilizar una pala mecánica para el mezclado de los ingredientes, en esta sección se ubicará el sistema de aireación para cada pila, el tanque separador de condensado de humedad y biofiltro para control de olores, la separación entre las pilas formadas debe ser lo suficientemente amplia para que las maniobras de la pala mecánica se realicen con facilidad. Esta área debe poseer cubierta sin paredes de protección.

Ilustración III.22 Zona de fermentación técnica ASP



Nota. Recuperado de (Green Mountain Technologies Commercial Composting Solutions)

<http://compostingtechnology.com/aerated-static-pile-systems/aerated-static-pile/>

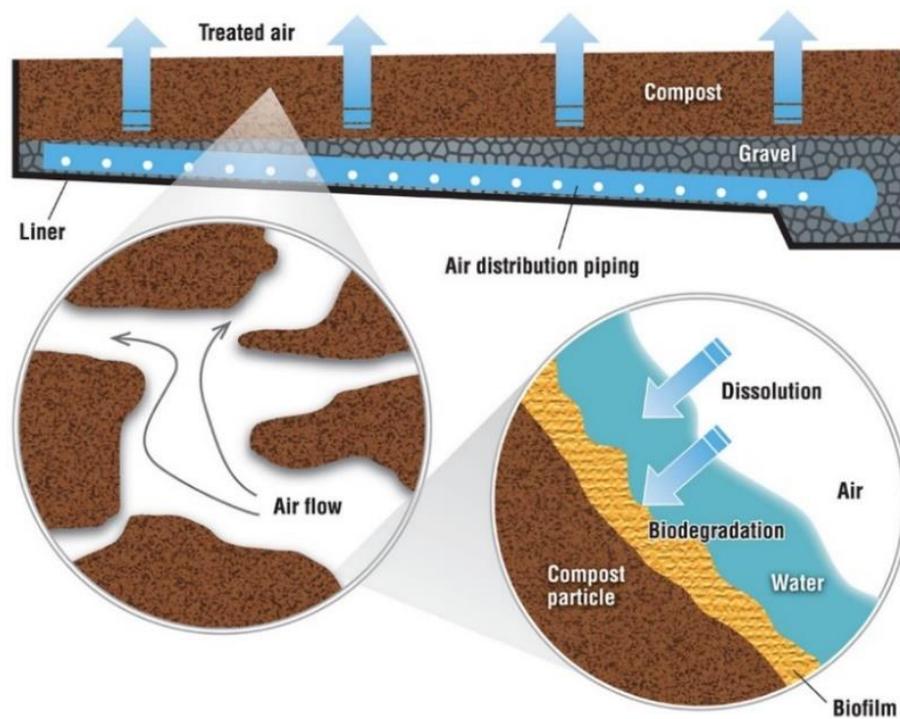
3.11.3 Área de Control de olores

Las plantas de compostaje tienen el problema de generación de olores debido a la fermentación del sustrato orgánico. Las principales fuentes de olores desagradables son la generación de lixiviados, el área de recepción y mezcla, el área de fermentación. Para minimizar los problemas de generación de olores, la solución más empleada es la instalación de biofiltros que necesitan de sistemas de humectación.

Los biofiltros están compuestos en su parte inferior de capas de piedra en diferente granulometría y encima de capas de material poroso como madera picada, un sistema de tuberías de aireación distribuya el aire de escape de manera uniforme en toda el área del biofiltro, que elimina un amplio rango de

compuestos olorosos La ventaja de la biofiltración, es que el sistema biológico puede eliminar compuestos a un bajo costo. La principal desventaja de los biofiltros es que requieren un área relativamente grande.

Ilustración III.23 Esquema de funcionamiento de un biofiltro



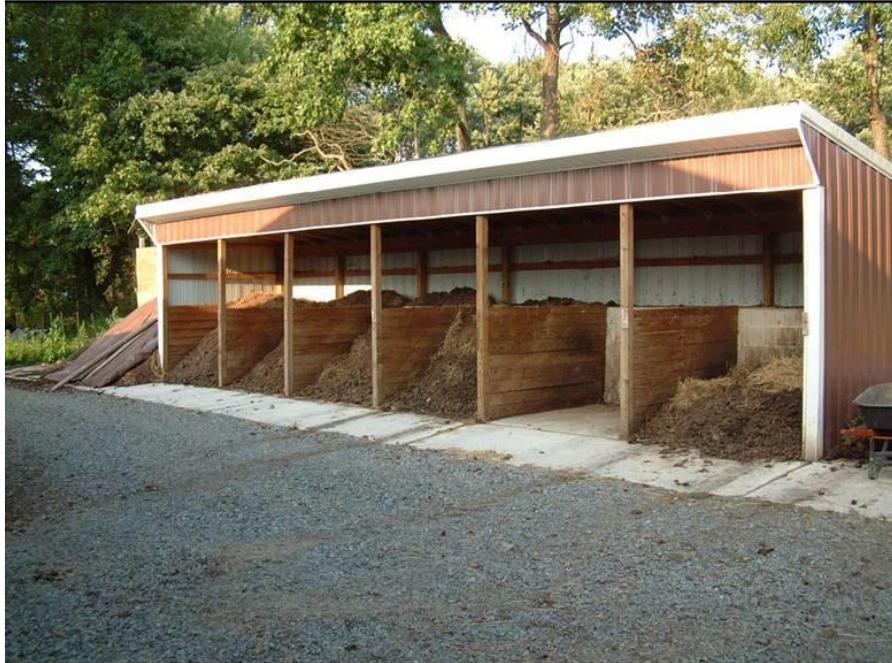
Nota. Recuperado de (BioCycle, 2012)

<https://www.biocycle.net/2012/08/15/odor-treatment-at-composting-facilities/>

3.11.4 Área de maduración

Después de la fase de compostaje o fermentación, las pilas deben ser transportadas hacia la sección donde se completará la maduración y preparación del compost, el tiempo promedio de fermentación será de 4 meses. Los sustratos de maduración serán separados por paredes laterales para poder identificar su tiempo y fecha de compostaje. Esta área debe poseer cubierta sin paredes de protección.

Ilustración III.24 Área de maduración para técnica ASP



*Nota. Recuperado de (Rutgers New Jersey Agricultural Experiment Station)
<https://esc.rutgers.edu/research/ryders-lane-farm/manure-management/>*

3.11.5 Balsa de lixiviados

Se debe controlar en lo posible que la generación de lixiviados se vaya llevando al depósito o balsa que los retendrá para su tratamiento. La cota del depósito de lixiviados debe ser más baja que el de la zona de recepción, área de compostaje y maduración para minimizar los costos de canalización de este tipo de efluente y se permita su transporte a través de canaletas o tuberías a gravedad.

Debe tener un recubrimiento o material impermeable para impedir filtraciones al suelo, las dimensiones recomendadas en altura del depósito son preferentemente < 2,5 m de altura). Esta área no posee cubierta, ni paredes de protección.

Ilustración III.25 Balsa de lixiviados para técnica ASP



Nota. Fuente internet

3.11.6 Sistema de riego

La humedad del material que se pierde durante el proceso de fermentación puede disminuir por debajo del 60 %, durante esta situación, será preciso humedecer las pilas mediante un sistema de riego.

La práctica común, es utilizar los lixiviados concentrados en el depósito, por lo que será necesario el uso de equipos de bombeo y sistemas de aspersion para distribuir el efluente en las pilas. Este sistema puede ser fijo sobre la pila o portátil montado en tractor o pala mecánica.

Ilustración III.26 Técnica de riego para sistema ASP



Nota. Fuente internet

3.11.7 Área de almacenaje y distribución

El producto final obtenido puede ser destinado para su utilización agrícola como abonado de bosques, recuperación de suelos, cultivos o su comercialización, en este lugar se necesita una fase de afino, almacenamiento y ensacado.

El galpón o área de almacenaje protegerá de las inclemencias meteorológicas al producto terminado. Para el afino, es necesario el cribado o tamizado final para separar partículas de sustrato grandes que pueden ser reutilizadas y ser enviadas nuevamente a la etapa de fermentación.

Ilustración III.27 Área de maduración para técnica ASP

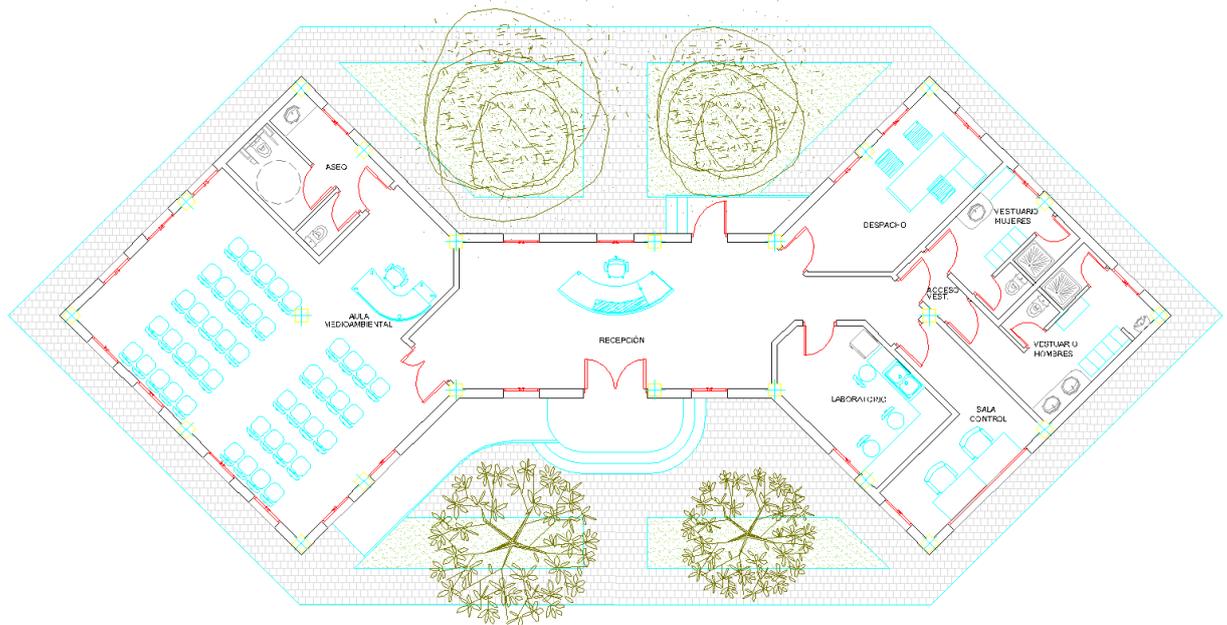


*Nota. Recuperado de (UCONN University of Connecticut)
<https://ecohusky.uconn.edu/composting-at-uconn/#>*

3.11.8 Área administrativa

El área administrativa se considera para la correcta operación entre departamentos de la planta como gerencia, laboratorio, mantenimiento y operación. Se ha considerado un edificio de control, baños, etc, detallados en el layout general de la planta.

Ilustración III.28 Área administrativa propuesta



Fuente. (El Autor, 2017)

3.11.9 Equipos y maquinaria

Trituradora: El material voluminizante que se agrega a la mezcla, debe ser triturado previamente para obtener un tamaño de partícula pequeño y su función sea óptima, para el caso de ramas voluminosas, se utilizan trituradoras de campo que pueden recoger los restos de poda, desde el suelo o bien ser alimentadas a máquina o de forma manual. Otra opción es tener las trituradoras en el área de recepción. La utilización de este tipo de equipos es imprescindible en una planta de compostaje, debido a la necesidad de reducir a un tamaño adecuado las partículas del material de enmienda como es madera, restos de poda, hojas, etc., que son necesarios por su alto contenido de carbono y mayor porosidad.

Ilustración III.29 Equipo triturador



Fuente. <https://www.stumpcutters.com/wood-chippers/20122512-series-12-disk-chippers/>

Tractor con pala: La técnica de compostaje ASP, un proceso muy versátil y con escasas complicaciones. Se logran buenos resultados con una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantengan las condiciones aerobias y el contenido de humedad (Valverde Orozco, 2015). La práctica común es la operación con palas cargadoras para mezclar el sustrato.

El volteo debe hacerse evitando que los equipos aplasten la pila y la compacten, los lados de las pilas pueden ser tan verticales como lo permita el material acumulado, que normalmente conduce a pilas unas dos veces más anchas que altas (Esteve, 2012). La opción de pala mecánica, representa como principal ventaja su bajo coste de inversión, pues esta clase de maquinaria agrícola es común en el conjunto de la mayoría de las empresas agrícolas.

Ilustración III.30 Equipo pala mecánica



Fuente. <http://www.directindustry.es/prod/komatsu-construction-and-mining-equipment/product-20180-1136171.html>

Criba: Una vez completado el proceso de compostaje es necesario retirar los elementos que no tengan una estructura y granulometría adecuada, para obtener mejor calidad en el compost. Las cribas tienen la función de refinar el compost una vez madurado otorgándole una forma esponjosa, homogénea y de granulometría apropiada para la aplicación a la que se destine (Aloe de Sorbas, 2014).

Las partículas que poseen mayor tamaño que son rechazadas durante el proceso de cribado, están constituidas básicamente por materiales leñosos que son más resistentes a la descomposición, este material se vuelve a utilizar reincorporándolo como material voluminizante, con la ventaja de llevar microorganismos que inician la colonización en la etapa de fermentación. El cribado del compost se puede llevar a cabo básicamente mediante dos mecanismos, con criba de estrella/disco o bien con criba de trómel.

Ilustración III.31 Equipo criba de tambor rotatorio



Fuente: <https://www.petersoncorp.com/products/t30-trommel-screen/>

Los equipos mínimos requeridos para una planta de compostaje, dependerán del tipo de técnica utilizada, del capital disponible de inversión, la disponibilidad de mano de obra, etc.

CAPÍTULO IV

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Cantidades de lodos generados

Como se determinó en el capítulo III, las cantidades de lodos residuales generados dependen principalmente del número de habitantes del área de estudio, las costumbres locales, el estado de los sistemas de alcantarillado y el tipo de tratamiento final aplicado al agua. Para la parroquia de Tenguel con un área de 130 Ha y con una población al año 2018 de 8,498 habitantes, se proyectó un caudal de agua residual de 2,160.00 m³/día para el año 2029, se estimó la producción de lodos espesados y deshidratados de 16.66 m³ con un contenido de humedad del 40 %.

4.1.2 Sustratos a mezclar

Los sustratos escogidos se escogieron bajo el criterio de fácil obtención en el lugar y por la relación contenido C/N carbono-nitrógeno, por esta razón los sustratos de mezcla escogidos y sus características C/N se listan a continuación.

Ingredientes	Peso Tm	Peso %	Humedad %	Relación C/N	Volumen m ³
Aserrín	64.30	31.89	39.00	252.86	321.50
Recortes de arbustos	12.00	5.95	15.00	19.71	48.00
Cascarilla arroz	12.00	5.95	14.00	252.86	100.00
Productos hortícolas	43.00	21.32	87.00	13.71	61.43
Estiércol de ganado	4.00	1.98	45.00	47.14	5.71
Gallinaza	4.00	1.98	20.10	12.50	7.99
Lodo residual	16.66	8.26	40.00	8.57	33.32
Agua	45.70	22.6	--	--	45.7
Totales	201.66	100.00			623.65

La mezcla resultante de los sustratos mezclados debe aproximarse al valor óptimo de C/N 30, y poseer una humedad del 60 %, sin embargo, se estima que debe agregarse agua para ajustar el valor de la humedad. El uso de aserrín como material voluminizante o agente de carga, es utilizado en la gran mayoría de los sistemas de compostaje, debido a su buena porosidad y contenido de carbono, contribuye a una mayor área de contacto y mejor aireación del sustrato mezcla resultante. Se puede utilizar otros materiales de enmienda como estopa de coco, cascarilla de arroz, rastrojo de maíz, bagazo de caña, etc.

Como se puede notar el aserrín como material voluminizante, tiene el mayor porcentaje (31.89%) de aporte en peso, esto refleja la importancia de este ingrediente en los sistemas de compostaje, ya que mejora el aporte de carbono y la porosidad lo que a su vez resulta en una mejor aireación.

Los ingredientes cascarilla de arroz (5.95%) y recorte de arbustos (5.95%), también poseen aporte de carbono, lo que también les da características de material voluminizante, nuevamente la proporción total de ingredientes ricos en carbono es de 43.79%.

Los ingredientes ricos en nitrógeno, productos hortícolas (21.32%), estiércol de ganado (1.98%) y gallinaza (1.98%), son los que ayudan a la generación de calor durante la oxidación orgánica.

Finalmente, el biosólido objetivo a tratar lodo residual (22.66%), se puede decir, que conforma la quinta parte del peso de la pila. El resto de peso lo compone agua (22.66%) que es necesaria para ajustar la humedad.

Aunque se utilizaron siete ingredientes, se puede destacar que la herramienta "Calculadora de Compostaje" de la Junta de Andalucía, permite el cálculo para menos ingredientes, además de poder ingresar sustratos que no se encuentren en la hoja de cálculo. Se hace énfasis, que los ingredientes seleccionados no son fijos, lo que significa que se pueden cambiar, según las necesidades o existencias de materiales disponibles en el lugar.

4.1.3 Energía y cantidad de aire

Se demostró a base de estimaciones por estequiometría y calor específico, que la necesidad de aire más crítica es el requerimiento de aireación para remoción de calor, debido a que el compostaje es una reacción exotérmica que desprende energía por la oxidación química del sustrato. El aire total requerido calculado es de 9,100,000.00 m³ de aire para asegurar la completa aireación de sustrato mezcla. La tasa de aireación para un tiempo de fermentación de 60 día es de 6,319.44 m³ aire/hora y la tasa de aireación por pila de compostaje es de 1.053.24 m³/h, suponiendo 6 pilas en el área de fermentación.

El requerimiento de aire es fundamental para al dimensionado de los sistemas de aireación, debido a que el caudal requerido de aire será constante o bien intermitente, lo que significará un consumo de energía eléctrica a considerar. Los sistemas de aireación normalmente son gobernados por sensores de temperatura que encienden o apagan el ventilador para disminuir la temperatura; para sistemas modernos se utilizan variadores de velocidad.

La potencia consumida en el sistema de aireación es de alrededor de 1.78 kW por pila, por 6 pilas que se generen por mes, resultan en 10.68 kW. Como la fase de fermentación posee una duración de 60 días, son necesarias 12 pilas para atender el compostaje de la mezcla de forma alternada, es decir, cuando llegue al tercer mes las seis pilas nuevas, saldrán del área de compostaje 6 pilas que ya cumplieron dos meses de fermentación. Lo que resulta en una potencia total de 21.36 kW requerida para el área de compostaje.

No se estima el requerimiento de energía para operar equipos como el triturador, el equipo de mezclado, la criba y tractor, pero se aclara que estos equipos pueden trabajar a combustión interna. Para las oficinas administrativas el requerimiento de energía es básicamente por iluminación y aire acondicionado.

4.1.4 Equipamiento y diseño de la instalación

La parte más crítica en la instalación es el área de compostaje intensivo o fermentación, es aquí donde el sustrato permanecerá durante un máximo de 60 días, este tiempo se toma debido a que es una mezcla de algunos sustratos, sin embargo, según la experiencia en operación de sistemas ASP el tiempo puede ser de 30 días. Por lo tanto, la duración definitiva dependerá del tipo de sustrato final resultante, temperatura, Ph, tamaño de partícula humedad, relación C/N, etc., por lo que se recomienda hacer pruebas piloto a escala con pilas de prueba. Generalmente, el descenso de la temperatura es el parámetro que indicará el fin de la fermentación.

Como se detalló en el capítulo anterior, los equipos necesarios son mínimos, para el uso de la técnica de compostaje de pilas estáticas ASP, no son necesarios equipos complejos, algunas desventajas son que la mayoría del trabajo depende un operador, para lo que es crítico el entrenamiento y conocimiento del proceso; se traduce en mayor horas hombre de trabajo y mayor número de personas a cargo; el proceso no es mayormente automatizado.

4.1.5 Costos

Los costos de operación para la técnica ASP son bajos en comparación con otros métodos como el compostaje en tambor rotatorio, que requieren equipos mecánicos de mayor complejidad. El costo inicial en el compostaje de pilas estáticas (ASP) es mayor, como la obra civil que corresponde a los sistemas de drenaje de lixiviados, base de hormigón para las áreas de recepción, fermentación, almacenamiento, galpones, cubiertas y oficinas de operación, sin embargo, debido a su fácil operación los costos disminuyen durante el funcionamiento, pues las tareas de mayor esfuerzo se reducen a triturar, mezclar y cribar el material en sus diferentes etapas. Otros costos como mantenimiento de equipos, costo de combustible, transporte de sustrato, tratamiento del aire.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Se determinó que los sistemas de compostaje varían desde técnicas muy sencillas como las pilas dinámicas hasta sistemas complejos como compostaje en túnel o en tambor, la selección de una u otra técnica dependerá del tipo de residuo a tratar, de la facilidad de área disponible, el capital de inversión, el clima del lugar a instalarse, etc.

Una de las técnicas recomendadas para el compostaje de lodos residuales, es el de Pilas Aireadas Estáticas (ASP) por sus siglas en inglés, es un método sencillo que requiere en mayor necesidad para su operación equipos de traslado para los materiales, una de sus ventajas es que el sustrato mezcla no necesita voltearse, lo que representa un ahorro operativo. Sin embargo, el éxito del ASP dependerá del buen diseño de pila, de un óptimo sistema de aireación, recolección de lixiviados, porosidad del material voluminizante, tamaño de partícula, relación C/N, etc.

Se determinó que las necesidades de aireación son en mayor parte para la remoción de calor, que se genera producto de la descomposición de la materia orgánica, esto ha sido documentado en todas las investigaciones acerca de compostaje. Los factores claves para el inicio del proceso de compostaje y el aumento de temperatura, es la relación C/N, que se ha determinado como valor óptimo de 30 y el contenido de humedad del sustrato mezcla en un porcentaje de 60%.

La generación de olores y lixiviados como desechos principales del proceso de compostaje, son los principales operativos que se deben minimizar en toda planta de tratamiento biosólidos, las experiencias a nivel mundial se orientan al uso de biofiltros para el tratamiento de malos olores y balsas o lagunas de

lixiviados en las instalaciones de compostaje. La ventaja de los biofiltros es su bajo costo operativo, mientras que para la implementación de balsas de lixiviado es necesario tratamiento biológico tipo agua residual.

Se determinó el origen de los lodos a partir del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas, con el diseño de un tratamiento biológico con filtro percolador, si se utiliza otra técnica de tratamiento de agua la cantidad de lodos generados será diferente tanto en cantidad como en características físicas y químicas, por esta razón es importante conocer el origen del lodo.

La búsqueda de experiencia e información a nivel local es prácticamente nula, acerca de estadísticas de producción y sistemas de compostaje de lodos, lo que resultó en una dificultad para dimensionar el sistema con datos reales, sin embargo, los datos recolectados de fuentes externas sirven de mucho para aproximar el diseño a la realidad local, sirviendo como dato de partida para otras investigaciones.

A nivel de legislación local, existe desde el 2015 en el registro oficial N° 316 se puede encontrar referencia en cuanto al aprovechamiento de energía y de residuos no peligrosos.

Para concluir el sistema de compostaje propuesto es válido para la comuna de Tenguel, debido a que es una zona de mayor proporción rural, con buena fuente de residuos orgánicos no peligrosos, que está próxima a tener una PTAR y sería una excelente alternativa a la disposición de los desechos sólidos de la comuna que se transportan al relleno sanitario de Guayaquil, lo que disminuiría la huella ecológica. Si es necesario la separación de desechos no orgánicos en el proceso de compostaje, la alternativa de uso de equipos especializados para esta tarea se puede también poner práctica.

5.2 Recomendaciones

El tratamiento biológico de desechos no peligrosos es una tarea que los municipios y gobiernos locales deben atender, en países extranjeros la recuperación de energía, materiales y nutrientes, es una política de eficiencia y conciencia para las próximas generaciones, en el Ecuador lamentablemente existen muchos años de retraso en la ingeniería y ciencia de recuperación y aprovechamiento de los desechos biosólidos.

El desarrollo de este proyecto, pretende ser un punto de partida para los investigadores que deseen profundizar más en el tema de manejo de residuos.

Referencias

Aloe de Sorbas. (27 de Enero de 2014). Aloe de Sorbas Agricultura Sostenible.

Obtenido de El Compost:

<https://aloedesorbas.wordpress.com/2014/01/27/el-compost/>

Amanlou, Y., & Zomorodian, A. (2011). Evaluation of air flow resistance across a green fig bed for selecting an appropriate pressure drop prediction equation. Elsevier, 157-62.

ASABE Standars. (2007). ASAE D272.3 MAR1996 (R2007) Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. MI:American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASABE.

Barnard Health Care. (2017). Composting Plant Open Windrow, Anaerobic Degradation. Obtenido de <https://www.barnardhealth.us/anaerobic-degradation/coo.html>

Beascochea, E., Muñoz, J., & Fernández de la Mora, M. (2005). Manual de Fito Depuración, Filtros de Macrófitas en Flotación. Lorca, España: EDITA.

BioCycle. (28 de agosto de 2012). Odor Treatment At Composting Facilities. Obtenido de Biocycle.net: <https://www.biocycle.net/2012/08/15/odor-treatment-at-composting-facilities/>

Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Mexico: Conagua.

Córtés Martínez, F., & Treviño Cansino, A. (2017). Dimensionamiento de lagunas. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

CRC Press. (1998). Municipal Sewage Sludge Management: A Reference Text of Processing, Utilization and Disposal. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento aguas residuales en

- pequeñas poblaciones. *Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.*
- Das & Keener, 1., & Eklind & Kirchmann, 2. (1997, 2000).*
- Department of Agriculture USA. (1870). Report of the Commissioner of Agriculture. Washington.*
- Díaz, L., & et al, . (2007). Waste and Management Series 8, Compost Science and Technology. Netherlands.*
- Eckenfelder, W. J. (1961). Industrial Water Pollution Control. USA: McGraw-Hill.*
- El Autor, E. (2017).*
- EMAPAG. (1998). Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Guayaquil. Guayaquil: EMAPAG.*
- Energy Research Center of Netherlands (ECN). (2018). ECN. Recuperado el 2018, de ECN Phyllis classification:
//www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#manure*
- Epstein, E. (2011). INDUSTRIAL COMPOSTING Environmental Engineering and Facilities Management. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.*
- Esteve, J. (14 de may de 2012). Reciclaje Verde el blog sobre reciclaje y medio ambiente. Obtenido de
<https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/05/14/compost-fabricacion-de-fertilizantes-naturales-ii/>*
- F. Dilek Sanin, P. W. (2011). Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges. Lancaster, Pennsylvania: DesTech Publications Ins.*
- García Morales, J. L., & al, e. (2015). De Residuo a Recurso, El Camino Hacia la Sostenibilidad. Madrid: Mundi-Prensa.*
- Green Mountain Technologies Commercial Composting Solutions. (28 de Agosto de 2018). Compostingtechnology.com. Obtenido de Aerated Static Pile: <http://compostingtechnology.com/aerated-static-pile-systems/aerated-static-pile/>*

- Gupta, S. (2006). Thermodynamics. India: Pearson Education.*
- Haug, R. T. (1994). The Practical Handbook of Compost Engineering. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.*
- Hernández, A. (2003). La Composta su Elaboración y Beneficio. México.*
- INEC. (1990-2001-2010). ESTADÍSTICAS SOCIODEMOGRÁFICAS. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Obtenido de <http://anda.inec.gob.ec>*
- INTERAGUA. (2015). Ajuste y Revisión del Plan Maestro Agua Potable, Alcantarillado Sanitario y Alcantarillado; Pluvial Tomo II. Guayaquil: INTERAGUA.*
- Interagua. (2015). Estudios de Factibilidad para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Parroquia Tneguel. Guayaquil: Interagua.*
- ISWA's Working Group on Sewage & Waterworks Sludge. (1998). Sludge Treatment and Disposal. Copenhagen K, Denmark: European Environment Agency.*
- Junta de Andalucía. (18 de Noviembre de 2016). Calculadora de compostaje. Recuperado el 2018, de Consejería de agricultura, pesca y desarrollo rural:
<http://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescayderollorural/areas/produccion-ecologica/compostaje-pe/paginas/calculadora-compostaje.html>*
- Kirchmann & Widen, 1. (1994).*
- Lin, S. D. (2007). Water and Wastewater Calculations Manual. New York: Mc Graw Hill.*
- Lozano Rivas, W. A. (2012). Fundamentos de Diseño de Plantas Depuradoras de Aguas Residuales. Bogota: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.*
- MetCalf & Eddie. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Utilización. España: McGraw Hill, USA.*
- Metcalfe & Eddie. (1996). Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y*

Utilización. *España: McGraw Hill, USA.*

Mott, R. (2006). Mecanica de Fluidos. Mexico: Pearson Prentice Hall.

National Research Council (NRC). (2002). Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices. Washington: NAP National Academies Press.

Notton, D. M. (2005). Theoretical and Experimental Determination of Key Operating Parameters for Composting Systems. Cardiff, Wales, United Kingdom: UMI.

Raffo Lateca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Diseño y Tecnología, 71-80.

Ramalho, R. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales. Madrid: Reverté S. A.

Rink, Robert; Van de Kamp, Maarten. (1992). On-Farm Composting Handbook. Ithaca: Northeast Regional Agricultural Engineering Service NRAES.

Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor, Experiencias en América Latina. Santiago de Chile: FAO.

Rugters New Jersey Agricultural Experiment Station. (28 de Agosto de 2018). Manure Managemen. Obtenido de <https://esc.rutgers.edu>: <https://esc.rutgers.edu/research/ryders-lane-farm/manure-management/>

TBF Flygt S.A. (2004). Bombas Sumergibles y Estaciones de Bombeo. Madrid: Adequa Ingeniería S.L.L.

Tchobanoglous, G. (2002). Handbook of Solid Waste Managment. En T. George. Mc Graw-Hill.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). Integrated Solid WasteManagement. New York: McGraw-Hill, Inc.

Texeira, D., & Matos, A. (2014). Resistance to forced airflow through layers of composting organic. Elsevier, 6.

Trauman, N., & et al, . (1996). Compost Microorganisms. (C. University, Ed.) Obtenido de <http://compost.css.cornell.edu/microorg.html>

Trautmann, N., & Richard, T. (s.f.). Moisture Content. Obtenido de Cornell

University: http://compost.css.cornell.edu/calc/moisture_content.html

*UConn University of Connecticut. (28 de agosto de 2018). Composting at UConn. Obtenido de <https://ecohusky.uconn.edu>:
<https://ecohusky.uconn.edu/composting-at-uconn/#>*

United States Environmental Protection Agency. (1999). Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States. Washington: EPA.

Valverde Orozco, V. H. (2015). Diseño y Automatización de un Sistema de Aireación Forzada para el Co-Compostaje de Residuos Hortícolas en la Comunidad de Gatazo Cantón Colta. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química.

Veolia. (28 de Agosto de 2018). Veolia.co.uk. Obtenido de Composting: <https://www.veolia.co.uk/westberkshire/waste-services/waste-services/composting>

Von Sperling, M. (2007). Biología del Tratamiento de Aguas Residuales, Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors. Londres: IWA.

Yuang-Song, Y.-B. F.-J.-S. (2000). Composting and Compost application in China. Resources, Conservation and Recycling, Elsevier, 278-300.

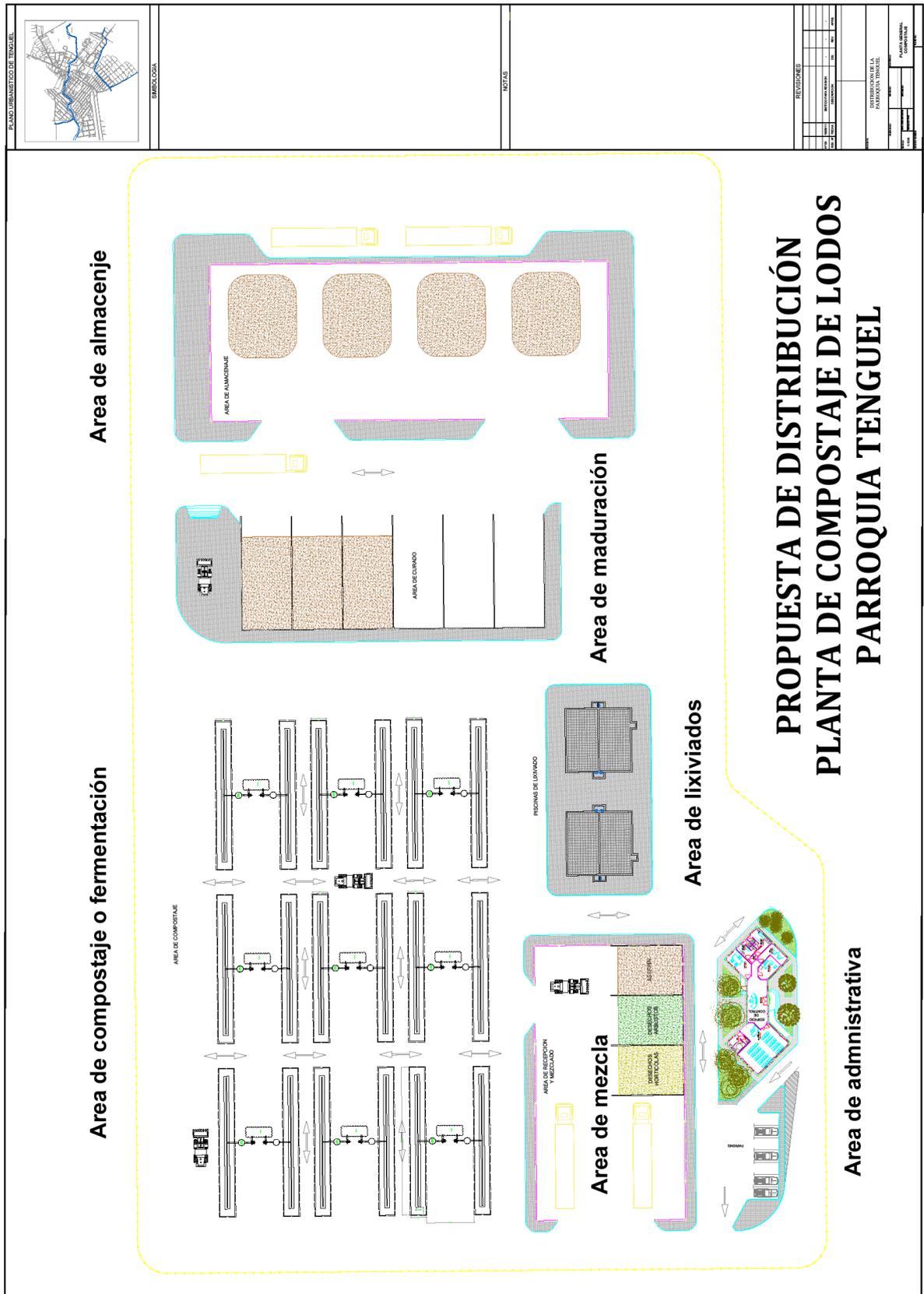
Anexos

Anexo 1. Tabla Calculadora de compostaje Junta de Andalucía

1. CÁLCULO DE LA MEZCLA DE INGREDIENTES												
1.1. Parámetros de control												
Cargar parámetros predeterminados												
Porcentaje de humedad deseado	60.0	%	Tolerancia a la desviación de la humedad							5.0	%	
Relación C/N deseada	30.0		Tolerancia a la desviación de la relac. C/N							2.5		
Densidad aparente máxima	0.65	tm/m ³	Tolerancia a la desviación de la densidad							0.05	tm/m ³	
Reducción de volumen por mezcla de ingredientes	20.0	%										
1.2. Ingredientes												
	Peso húmedo tm	Ingredientes	Humedad %	Carbono %	Nitrógeno %	Densidad aparente tm/m ³	Peso seco tm	Peso agua tm	Peso carbono tm	Peso nitrógeno tm	C/N	Volumen m ³
Ingredientes predefinidos ricos en carbono	64.30	A serrín	39.00	50.94	0.20	0.20	39.22	25.08	19.98	0.08	252.86	321.50
	12.00	Recortes de arbustos	15.00	46.00	2.33	0.25	10.20	1.80	4.69	0.24	19.71	48.00
	12.00	Cascara de arroz	14.00	50.94	0.20	0.12	10.32	1.68	5.26	0.02	252.86	100.00
Ingredientes predefinidos ricos en nitrógeno	43.00	Productos hortícolas	87.00	53.19	3.88	0.70	5.59	37.41	2.97	0.22	13.71	61.43
	4.00	Estiércol de ganado	45.00	55.00	1.17	0.70	2.20	1.80	1.21	0.03	47.14	5.71
	4.00	Gallinaza	20.10	40.00	3.20	0.40	3.20	0.80	1.28	0.10	12.50	7.99
Ingredientes no predefinidos	16.66	Lodo residual	40.00	59.70	6.97	0.50	10.00	6.66	5.97	0.70	8.57	33.32
Humectante	45.70	Agua										45.7
Peso total	201.66						80.73	120.94	41.36	1.38	30.00	623.65
Referencias de los valores de los ingredientes	[1]	Calculado con formula de composicion elemental C295H420O186N Haug										
	[2]	Calculado con formula de composicion elemental C23H38O17N Haug										
	[3]	Calculado con formula de composicion elemental C295H420O186N Haug										
	[4]	Calculado con formula de composicion elemental C16H27O8N Haug										
	[5]	Calculado con la formula de (Energy Research Center of Netherlands (ECN), 2018), cattle manure, fresh (#1882)										
	[6]	Calculado con la formula de (Energy Research Center of Netherlands (ECN), 2018), chicken manure (#1747)										
		Porcentaje de humedad calculada	60.0	%								
		Variación humedad sobre objetivo		%								
		Relación C/N calculada	30.0									
		Variación relación C/N sobre objetivo										
		Densidad aparente calculada	0.26	tm/m ³								
		Variación sobre densidad aparente máx.	-0.39									

Gráfico peso y volumen

Anexo 3. Plano Planta de distribución.



Anexo 4. Blower Seleccionado.



The New York Blower Company
 Fan-to-Size
 Fan Selection Detail



Fan Design

Product: Pressure Blower
 Type: Radial
 Size: 2008
 Fan Class: N/A
 Wheel Type: Radial (shrouded) - ALM
 Wheel Material: Aluminum
 Wheel Weight: 5.8 kg
 Wheel WR²: 0.18 kg-m²
 Percent Width: 100%
 Percent Diameter: 100.0%
 Outlet Area: .0182 sq. m
 Options: None
 Axial thrust load is 10.33 kgf.

Calculation Mode: Find Speed

Drive Type: Direct
 Arrangement: 4
 Outlet Velocity: 964.1 mt/min
 Static Efficiency: 89.01%
 Total Efficiency: 71.5%
 Operating Temp: 21.11° C
 Maximum Temp: 21.11° C
 Maximum Speed: (1) 3900 RPM
 Velocity Pressure: 15.86 mm wg
 Fan Static Pressure: 440 mm wg
 Fan Total Pressure: 455.9 mm wg
 Altitude: 0 m

Conditions

	Flow	Pressure	Power	Speed	Speed Limit (2)	Density	Altitude	Inlet Temp.
	AM3/S	mm wg (FSP)	kw	rpm	rpm	kg/m ³	m	°C
Operating	0.2928	440	1.83	2821	3900	1.201	0	21.11
Cold	0.2928	440	1.83	2821	3900	1.201	0	21.11
Standard	0.2928	440	1.83	2821	3900	1.201	0	21.11

(1) Speed Limit at Maximum Temperature (2) Speed Limit at indicated Inlet Temperature



The New York Blower Company certifies that the Pressure Blower fan is licensed to bear the AMCA Air Performance Seal. The ratings shown are based on tests and procedures performed in accordance with AMCA Publication 211 and comply with the requirements of the AMCA Certified Ratings program. AMCA Licensed for Air Performance without Appurtenances (Accessories). Power kW (bhp) excludes drives. Performance certified is for installation type: B - free inlet, ducted outlet.

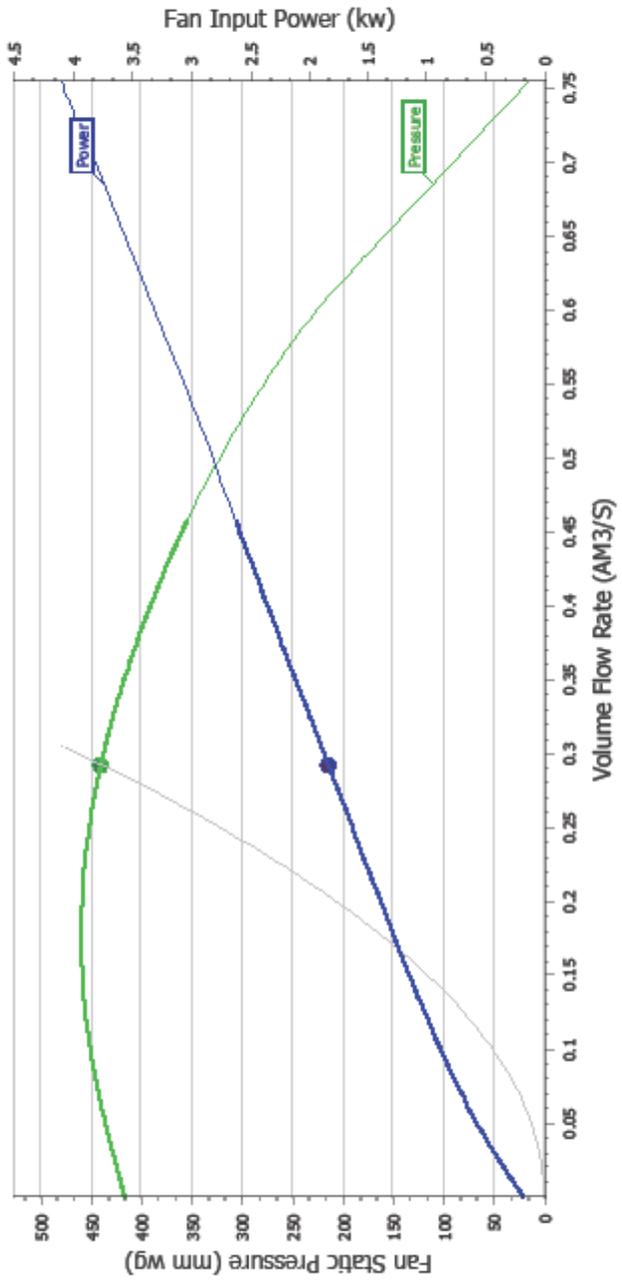


The New York Blower Company
 Fan-to-Size
 Fan Selection Detail

Product: Pressure Blower
 Material: Aluminum
 Fan Size: 2006
 Arrangement: 4
 Wheel Type: Radial (shrouded) - ALM
 Options: None

Volume Flow Rate: 0.2926 AM3/S
 Fan Static Pressure: 440 mm wg
 Speed: 2621 rpm
 Power: 1.83 kw

Inlet Temperature: 21.11 °C
 Altitude: 0 m
 Density: 1.201 kg/m³
 Outlet Velocity: 964.1 m/min



AMCA Licensed for Air Performance without Accessories (Accessories): Power kW (brp) excludes drives. Performance certified is for installation type: B - free inlet, ducted outlet.

Anexo 5. Tabla propiedades del aire

Temperature	Density	Dynamic Viscosity	Kinematic Viscosity	Specific Heat Capacity	Thermal Conductivity	Prandtl Number
(T)	(ρ)	(μ)	(ν)	(cp)	(k)	(Pr)
°C	kg/m ³	$\times 10^{-5}$ kg/m.s	$\times 10^{-5}$ m ² /s	$\times 10^3$ J/kg.K	W/m.K	-
-20	1.3958	1.6222	1.1622	1.0054	0.022507	0.72467
-15	1.3687	1.6478	1.2039	1.0054	0.022903	0.72337
-10	1.3426	1.6731	1.2462	1.0055	0.023296	0.72212
-5	1.3175	1.6982	1.289	1.0055	0.023686	0.72092
0	1.2933	1.7231	1.3324	1.0056	0.024073	0.71977
5	1.2699	1.7478	1.3763	1.0057	0.024458	0.71866
10	1.2474	1.7722	1.4207	1.0058	0.02484	0.71759
15	1.2257	1.7965	1.4657	1.0059	0.025219	0.71657
20	1.2047	1.8205	1.5111	1.0061	0.025596	0.71559
25	1.1845	1.8444	1.5571	1.0063	0.025969	0.71465
30	1.1649	1.868	1.6036	1.0065	0.026341	0.71375
35	1.1459	1.8915	1.6507	1.0067	0.02671	0.71289
40	1.1275	1.9148	1.6982	1.0069	0.027076	0.71207
45	1.1098	1.9379	1.7462	1.0072	0.02744	0.71128
50	1.0925	1.9608	1.7947	1.0074	0.027801	0.71053
55	1.0759	1.9835	1.8437	1.0077	0.02816	0.70982
60	1.0597	2.0061	1.8931	1.0081	0.028517	0.70914
65	1.0439	2.0285	1.9431	1.0084	0.028871	0.70849
70	1.0287	2.0507	1.9935	1.0087	0.029223	0.70787
75	1.0139	2.0728	2.0444	1.0091	0.029573	0.70729
80	0.9995	2.0947	2.0958	1.0095	0.029921	0.70674
85	0.9855	2.1164	2.1476	1.0099	0.030266	0.70622
90	0.9719	2.138	2.1999	1.0104	0.030609	0.70573
95	0.9587	2.1595	2.2526	1.0108	0.03095	0.70527
100	0.9458	2.1808	2.3058	1.0113	0.031289	0.70484
105	0.9332	2.2019	2.3594	1.0118	0.031626	0.70444
110	0.921	2.2229	2.4135	1.0123	0.031961	0.70406
115	0.9091	2.2438	2.4681	1.0128	0.032294	0.70372
120	0.8975	2.2645	2.523	1.0134	0.032625	0.7034
125	0.8862	2.2851	2.5784	1.014	0.032954	0.70311

Fuente: <http://theengineeringmindset.com/properties-of-air-at-atmospheric-pressure/>