



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES
EULA-CHILE

Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

MARÍA CECILIA DIOCARETZ VERGARA

CONCEPCION (Chile), 2010



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES
EULA-CHILE

Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

Alumno: María Cecilia Diocaretz Vergara

Profesor guía: Dra. Gladys Cecilia Vidal Sáez

CONCEPCION (Chile), 2010



“Que nuestros
esfuerzos desafíen las
imposibilidades,
recuerda que las
grandes proezas de la
historia fueron
conquistas de lo que
parecía imposible”

Charles Chaplin



INDICE

AGRADECIMIENTOS	12
RESUMEN	13
1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS Y PRODUCCIÓN DE LODOS.	15
1.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS.....	18
1.3 TRATAMIENTO DE LODOS.....	21
1.3.1 Tipos de tratamientos	21
1.3.2 Tratamiento convencional.....	23
1.4 DESTINO DE LODOS.....	24
1.5 REGLAMENTO MANEJO DE LODOS.....	26
1.6 HIGIENIZACIÓN DE LODOS.....	30
2 HIPÓTESIS.....	36
3 OBJETIVOS.....	36
3.1 Objetivo General	36
3.2 Objetivos Específicos.....	36
4 ANTECEDENTES.....	37
4.1 TRATAMIENTO ALCALINO.....	38
4.2 SECADO TÉRMICO.....	44
4.3 PASTEURIZACIÓN.....	46
4.4 TRATAMIENTO CON CALOR	48
4.5 IRRADIACIÓN.....	49
4.5.1 RAYOS GAMMA.....	51

4.5.2	HACES DE ELECTRONES	55
4.6	DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA	58
4.7	COMPOSTAJE	61
4.8	SECADO SOLAR-BIOLÓGICO.....	64
5	METODOLOGÍA	67
6	RESULTADOS	72
6.1	ASPECTOS TÉCNICOS DE PROCESOS DE HIGIENIZACIÓN	72
6.1.1	TRATAMIENTO ALCALINO	72
6.1.2	SECADO TÉRMICO	75
6.1.3	PASTEURIZACIÓN	78
6.1.4	IRRADIACIÓN CON RAYOS GAMMA	79
6.1.5	IRRADIACIÓN CON HACES DE ELECTRONES.....	81
6.1.6	DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA	83
6.1.7	COMPOSTAJE	85
6.1.8	SECADO SOLAR-BIOLÓGICO	88
6.2	ASPECTOS ECONÓMICOS DE PROCESOS DE HIGIENIZACIÓN	90
6.2.1	TRATAMIENTO ALCALINO	90
6.2.2	SECADO TÉRMICO	91
6.2.3	PASTEURIZACIÓN	92
6.2.4	TRATAMIENTO CON CALOR.....	92
6.2.5	IRRADIACIÓN CON RAYOS GAMMA	93
6.2.6	IRRADIACIÓN CON HACES DE ELECTRONES.....	94
6.2.7	DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA	94
6.2.8	COMPOSTAJE	95

6.2.9	SECADO SOLAR-BIOLÓGICO	96
7	DISCUSIÓN	99
8	CONCLUSIONES	104
9	REFERENCIAS	106
	ANEXOS	117

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del tratamiento de aguas servidas	16
Figura 2. Diagrama de tratamiento de aguas servidas	17
Figura 3. Esquema de procesos en tratamiento de lodos	23
Figura 4. <i>Ascaris lumbricoides</i> : a) Huevo fértil, b) Huevo infértil, c) Larva experimentando muda dentro del intestino y d) Gusano adulto	31
Figura 5. Ciclo de vida <i>Ascaris lumbricoides</i>	32
Figura 6. Esquema del ciclo de vida <i>Ascaris lumbricoides</i>	33
Figura 7. Efecto del pH en la especiación del amonio.....	41
Figura 8. Efecto del pH en la especiación del ácido sulfhídrico	42
Figura 9. Sistema típico de tratamiento de lodos con cal	43
Figura 10. Sistema de tratamiento con cal: (1) Silo y dosificador de cal, (2) Mezclador cal-lodos y (3) Cinta transportadora.....	43
Figura 11. Proceso de secado térmico	46
Figura 12. Sistema de pasteurización de lodos.....	47
Figura 13. Sistema de pasteurización de lodos con recuperación de calor.....	48
Figura 14. Acción de la radiación sobre la cadena de ADN: a) directa y b) indirecta	50
Figura 15. Poder de penetración de partículas beta y rayos gamma en diferentes materiales.....	51
Figura 16. Decaimiento de un núcleo excitado y liberación de radiación gamma .	52
Figura 17. Esquema decaimiento de radioisótopos Co^{60} y Cs^{137}	53
Figura 18. Diagrama de irradiación con radiación gamma	53
Figura 19. Fuentes selladas de Co^{60}	54
Figura 20. Diagrama de irradiación con haces de electrones.....	55
Figura 21. Sistema propuesto para irradiación con haces de electrones	56
Figura 22. Fotografía de un acelerador de electrones.....	57

Figura 23. Componentes principales de un acelerador de electrones: a) Sección aceleradora; b) dispositivo de salida del haz y transportador.....	57
Figura 24. Sistema típico de digestión aeróbica termofílica autotérmica.....	59
Figura 25. Esquema de reactor ATAD	59
Figura 26. Evolución de temperaturas en proceso de compostaje.....	62
Figura 27. Sistema de compostaje en pilas de volteo	62
Figura 28. Sistema típico de compostaje	63
Figura 29. Vistas de galpón de secado climatizado de lodos.....	65
Figura 30. Sistema de secado solar-biológico.....	66
Figura 31. Entradas y salidas de masa en una operación unitaria	69
Figura 32. Entradas de energía en una operación unitaria	69
Figura 33. Módulo de postratamiento con cal Modelo RM 150	73
Figura 34. Sistema de almacenamiento y alimentación de cal Modelo LFS 600... ..	73
Figura 35. Balance mensual de masa tratamiento alcalino	74
Figura 36. Balance mensual de energía tratamiento alcalino.....	75
Figura 37. Diagrama del sistema de secado térmico Fenix™	75
Figura 38. Sistema de secado térmico Fenix™	76
Figura 39. Balance mensual de masa secado térmico.....	76
Figura 40. Balance mensual de energía secado térmico	77
Figura 41. Sistema de prepasteurización	78
Figura 42. Balance mensual de energía para pasteurización	79
Figura 43. Sistema de higienización de lodos con rayos gamma.....	80
Figura 44. Balance mensual de masa para irradiación gamma.....	80
Figura 45. Balance mensual de energía para irradiación gamma	81
Figura 46. Balance mensual de masa para irradiación con haces de electrones..	82
Figura 47. Balance mensual de energía para irradiación con haces de electrones	82
Figura 48. Sistema ATAD típico FUCHS.....	83
Figura 49. Balance mensual de masa para digestión aeróbica termofílica	84
Figura 50. Balance mensual de energía para digestión aeróbica termofílica	84

Figura 51. Materiales estructurantes proceso de compostaje: a) Chip de álamo; b) Aserrín.....	85
Figura 52. Máquina tamizadora Joker	86
Figura 53. Máquina volteadora 14.28.....	86
Figura 54. Balance mensual de masa para compostaje.....	87
Figura 55. Balance mensual de energía para compostaje	88
Figura 56. Extractor de aire S&P Xmh	88
Figura 57. Balance mensual de masa para secado solar-biológico	89
Figura 58. Balance mensual de energía para secado solar-biológico	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de lodos crudos y estabilizados.	19
Tabla 2. Comparación en contenidos típicos de metales pesados en lodos.	19
Tabla 3. Densidad de organismos patógenos e indicadores.	20
Tabla 4. Destino de lodos PTAS Región del Biobío.	24
Tabla 5. Valor estimativo del lodo (50% sólidos secos) como producto final.	24
Tabla 6. Costos de transporte PTAS Región del Biobío.	25
Tabla 7. Requerimientos para diferentes parámetros de tratamiento de lodos.	27
Tabla 8. Condiciones de operación de procesos de higienización de lodos.	28
Tabla 9. Organismos patógenos y sus enfermedades asociadas.	30
Tabla 10. Estresores asociados a efectividad de procesos de higienización.	34
Tabla 11. Factores claves en métodos higienización de lodos.	35
Tabla 12. Propuestas generales para el control de patógenos y atracción de vectores en lodos.	37
Tabla 13. Propuestas generales para el control de patógenos y atracción de vectores en lodos (Continuación).	38
Tabla 14. Aditivos para acondicionamiento con cal de lodos.	39
Tabla 15. Cantidad de cal necesaria para mantener lodos líquidos a pH sobre 12 durante 30 minutos.	40
Tabla 16. Requerimientos energéticos de equipos de secado.	45
Tabla 17. Clasificación de los procesos de higienización.	67
Tabla 18. Costos de variables de operación.	71
Tabla 19. Especificaciones y requerimientos de los equipos Roedinger Pittsburgh.	74
Tabla 20. Consumo de factores energéticos para secado de lodos.	77
Tabla 21. Costos de inversión para tratamiento alcalino.	90
Tabla 22. Costos de operación para tratamiento alcalino.	91
Tabla 23. Costos de operación para secado térmico.	91

Tabla 24. Costos de operación para pasteurización.	92
Tabla 25. Costos de inversión para irradiación con rayos gamma.	93
Tabla 26. Costos de operación para irradiación con rayos gamma.	93
Tabla 27. Costos de operación para irradiación con haces de electrones.	94
Tabla 28. Costos de operación para digestión aeróbica termofílica.	95
Tabla 29. Costos de inversión para compostaje.	95
Tabla 30. Costos de operación para compostaje.	96
Tabla 31. Costos de inversión para secado solar-biológico.	96
Tabla 32. Costos de operación para secado solar-biológico.	97
Tabla 33. Comportamiento anual de variables económicas de procesos de higienización de lodos.	98
Tabla 34. Comparación parámetros técnicos y económicos de procesos de higienización, sobre una base de cálculo de 100 Ton de lodos alimentados al proceso.	100

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quisiera comenzar agradeciendo de todo corazón a mis padres, Marcos y Cecilia, y a mis hermanos, Hernando y Pablo, por ser un pilar fundamental durante esta etapa de mi vida, brindándome siempre su apoyo incondicional, amor y comprensión.

A mis familiares, en especial a mi tía Verónica y mi primo Alejandro por la importante ayuda que me brindaron que no olvidaré nunca. A mis amigas, Belén, Consuelo y Pilar, por haber sabido siempre respetar mis tiempos y nunca olvidar lo importante que son para mí. A mis amigos, Carlos y Juan Pablo, por confiar en mí. A mis compañeras, Camila, Gilda, Jacqueline, Patricia y Sara, por su preocupación y cariño. A César por su constante preocupación, confianza y apoyo.

También agradezco al Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA) del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile por haber sido una ayuda fundamental para el fortalecimiento de mis capacidades y en especial a la Dra. Gladys Vidal, quien lo lidera y está en permanente preocupación por el crecimiento de cada uno de sus integrantes. A Rodrigo y Leonardo por su importante ayuda.

Al mismo tiempo agradecer al Dr. Roberto Urrutia por su cercanía y compromiso constante con cada uno de sus alumnos, destacando su dedicación a resolver cada uno de los problemas que se me presentaron durante toda la duración de mis estudios.

Agradezco también al personal de Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) por la buena disposición a facilitarme toda la información que requería.

Por último, quiero dar las gracias a Don José Rivas por su dedicación a solucionar las dudas que surgieron y a Don Arodys Lepe por permitirme desarrollar este proyecto de tesis en ESSBIO S.A., empresa que financió mi trabajo.

RESUMEN

Los procesos de higienización de lodos permiten reducir o eliminar patógenos. Luego de ser higienizados están aptos para ser dispuestos en suelos como una opción de disposición sustentable, sin riesgos al tener contacto con el hombre. En el presente estudio se hace una comparación técnica y económica de los procesos contenidos en el D.S. 4/2009 “Reglamento para el Manejo de Lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas” y un proceso renovable propuesto por ESSBIO S.A., con el objetivo de identificar la tecnología técnicamente factible y más viable económicamente para la gestión de los lodos.

Para la realización de esta tesis se estudiaron los aspectos técnicos de cada proceso de higienización mediante una intensa revisión bibliográfica. Se realizaron diagramas de flujo con las operaciones unitarias involucradas en los procesos y posteriormente, se cuantificaron sus entradas y salidas en balances de masa y energía para una alimentación de 100 Ton de lodo al mes. Al mismo tiempo, se seleccionaron equipos y máquinas adecuadas para la operación de cada uno de los procesos y a partir de sus costos, se determinaron los costos de inversión. Los costos de operación se calcularon en base a los consumos de insumos y energía entregados en los balances. Finalmente, se determinó el Valor Actual de Costos, indicador que permite comparar alternativas que reportan iguales beneficios, de cada proceso de higienización para seleccionar el más apropiado.

De los resultados se concluye que la higienización de lodos provenientes de aguas servidas mediante procesos biológicos y de energías renovables son técnicamente factibles y más viables económicamente que otros procesos, considerando el bajo manejo de equipamiento y relativamente bajos costos de operación.

Palabras Claves: Uso benéfico de biosólidos, D.S. 4/2009, Higienización de lodos.

1 INTRODUCCIÓN

En Octubre de 2009 se publicó en el Diario Oficial el D.S. 4 “Reglamento para el Manejo de Lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas” del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. En este reglamento se establecen exigencias, restricciones, requisitos y condiciones técnicas mínimas para la aplicación de lodos en suelos con determinadas características físico-químicas, de tal forma de prevenir potenciales impactos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente.

Los lodos sanitarios son sólidos biológicos que pueden ser depositados en rellenos sanitarios o manipulados como mejoradores de suelos. Su aplicación en suelos permite dar mejor solución a la problemática ambiental asociada al destino de estos residuos. Su utilización como fertilizantes reporta beneficios como disminuir los costos en productos químicos y contribuir con materia orgánica y nutrientes. Los nutrientes son necesarios para el crecimiento vegetal y mejorar la biodiversidad del suelo, por lo que se puede aplicar en suelos con déficit de nutrientes o degradados por su continua explotación (Crites and Tchobanoglous, 2000; Toro, 2005).

Sin embargo, es importante considerar que dentro del manejo de los lodos se contempla un tratamiento previo a su aplicación al suelo. El tratamiento tiene la finalidad de reducir el potencial de atracción de vectores (proceso de estabilización) y la presencia de patógenos, precisamente *Salmonella* y huevos de parásitos. Existen patógenos altamente resistentes a agentes estresores como cloro, temperatura moderada y pH extremo, que deben ser sometidos a procesos de higienización para destruir o inactivarlos. Estos procesos de higienización son combinaciones entre algunos de dichos agentes y permiten obtener un lodo apto para ser aplicado en suelos, de manera de promover su reutilización segura en suelos antes que su disposición.

1.1 TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS Y PRODUCCIÓN DE LODOS

En Chile, desde la década de los 90 se comenzaron a construir plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) y este proceso se vio acelerado en el año 2000 con la entrada en vigencia del D.S. 90, que norma la emisión de descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (Barañaño y Tapia, 2004).

En 1990, el país contaba con una cobertura de tratamiento de aguas servidas de 10%, al año 2000 se alcanzó el 20,9% y en el 2007 se incrementó considerablemente a 82,3%. Estos sistemas de tratamientos corresponden principalmente a lagunas aireadas y de estabilización, lodos activados y emisarios submarinos. Sin embargo, considerando que de las plantas más importantes que comenzaron a operar durante 2007, 69,2% cuentan con un sistema de lodos activados, la proyección de la producción de lodos aumenta en forma exponencial dadas las características operacionales de estas plantas. Según la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS, 2007), dicha tendencia durante los próximos años alcanzará una cobertura cercana al 100%, lo que incrementará la cantidad de sistemas de lodos activados y con ello, la producción de lodo biológico. De hecho, se estima que en la Región del Biobío para el año 2013 se alcanzará el 100% de cobertura; mientras que a nivel nacional se pretende alcanzar un 98,7%, tal como se muestra en la Figura 1.

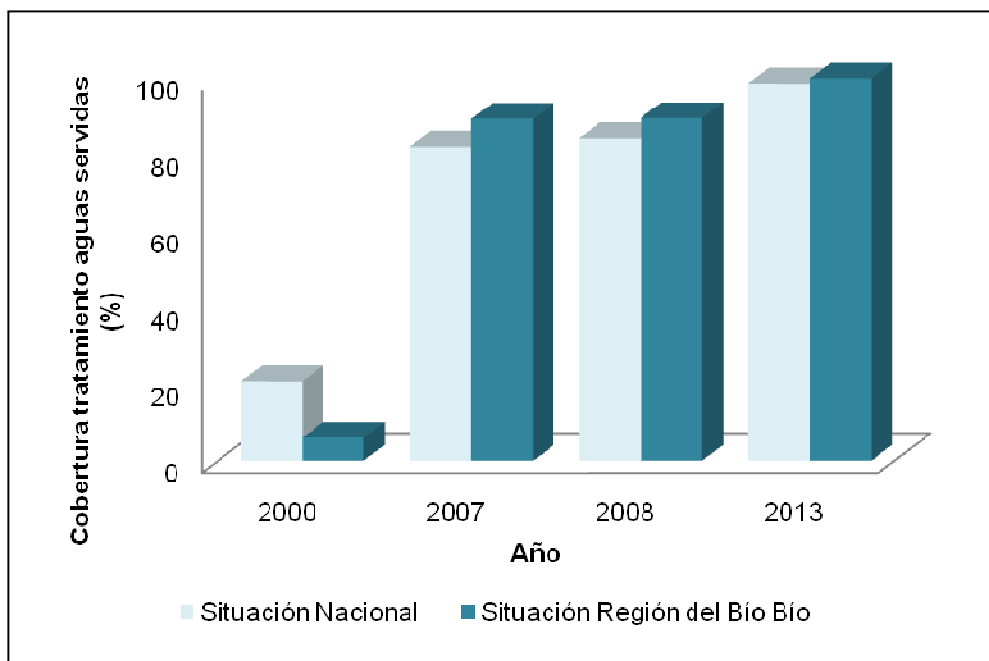


Figura 1. Evolución del tratamiento de aguas servidas (SISS, 2007).

Diariamente, las plantas de tratamiento de aguas servidas son responsables de eliminar materia orgánica de las aguas servidas y gracias a la aplicación de una tecnología, ésta es transformada en lodo biológico o biomasa. Los lodos producidos sin previa higienización son transportarlos a rellenos sanitarios para su disposición final. Al evaluar la producción de lodos biológicos en el año 2008 en tres localidades de la región con sistemas de lodos activados (Chillán, Cañete y Quilleco) con una población total de 198.602 habitantes (181.979, 14.726 y 1.897 habitantes, respectivamente) y en función a una tasa promedio diaria de producción de lodo de 0,135 kg/hab, se generan alrededor de 27 Ton lodo/día y que se traducen a 810 Ton lodo/mes, aproximadamente (ESSBIO S.A., 2008). Estas cifras dejan en evidencia que los costos asociados al transporte y a la disposición de los lodos no son temas irrelevantes para el sector sanitario.

Cabe mencionar que durante el tratamiento de las aguas servidas presentado en la Figura 2, no se logra separar completamente la fase sólida-líquida: por un lado, se obtiene un efluente que conserva ciertos niveles de sólidos en suspensión y sustancias disueltas, y por el otro, lodo que presenta un alto contenido de agua. Además, el lodo está constituido por biomasa excedente de los procesos de tratamiento biológico de lodos activados, materiales orgánicos ricos en nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, trazas de metales pesados y pequeñas cantidades de otros elementos (ESSBIO S.A., 2009). En promedio se generan 35 g/hab·día de lodos en base seca, lo que equivale a 0,7 - 0,8 kg lodo por kg de DBO₅ removida (Cortez, 2003).

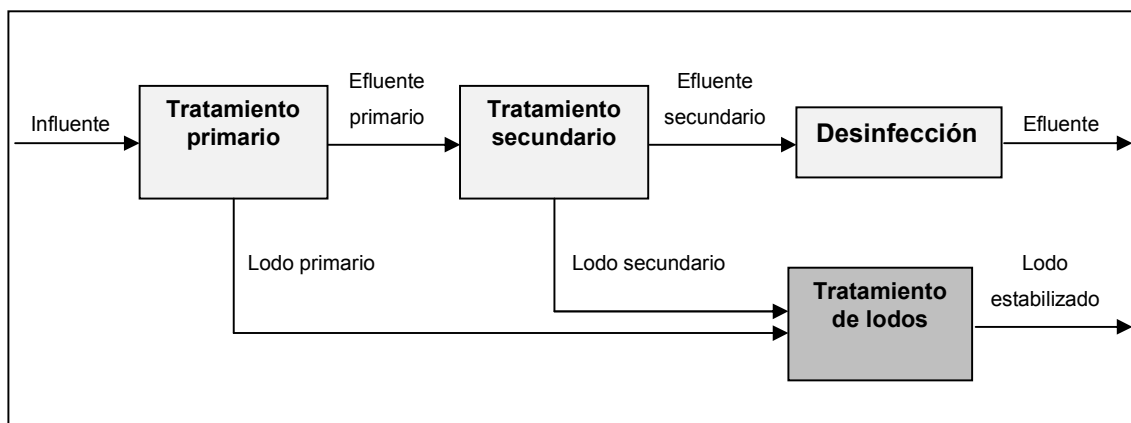


Figura 2. Diagrama de tratamiento de aguas servidas (Barañao y Tapia, 2004).

1.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS

Existen características que permiten diferenciar los lodos primarios de los secundarios. Los primeros proceden de estanques de sedimentación primaria y por lo general, son de color gris y producen olores desagradables, debido a la alta carga orgánica no estabilizada. Los lodos secundarios o biológicos varían según el tratamiento empleado, pero comparten algunas características, en su mayoría son de color más oscuro y prácticamente inodoros. Además, los lodos primarios presentan poder calorífico mayor que los secundarios, sobre todo cuando contienen grandes cantidades de grasas y espumas (Metcalf & Eddy, 1985), por lo cual los primeros resultan más atractivos para fines energéticos.

En general, los lodos secundarios provenientes principalmente de un sistema de lodos activados son flóculos de color café y que en buenas condiciones tienen olor a tierra no molesto, pero que rápidamente tiende a convertirse en material putrefacto y adquiere mal olor. Una tonalidad muy oscura indica que está cercano a transformarse en material putrefacto, en cambio si es más claro de lo normal puede significar que no fue adecuadamente aireado y en este caso, los sólidos son menos sedimentables (Metcalf & Eddy, 1985).

Las características de los lodos se clasifican en tres grupos: físicas, químicas y microbiológicas: Entre las características físicas se reconocen la humedad, densidad, textura, fluidez y la plasticidad, estas dos últimas varían según el contenido de agua, que a su vez les otorga un volumen importante (Cortez, 2003).

Las características químicas de los lodos biológicos están determinadas principalmente por tres constituyentes: contenido orgánico, nutrientes y metales. En cuanto al contenido orgánico, éste corresponde a los sólidos volátiles, importantes para determinar el poder calorífico, potencial olor y su uso como mejorador de suelos. Además, estos lodos contienen tres nutrientes esenciales

para el crecimiento vegetal: nitrógeno, fósforo y potasio (Cortez, 2003; Toro, 2005). La composición típica de diferentes tipos de lodos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de lodos crudos y estabilizados.

Ítem	Unidad	Lodo primario	Lodo primario	Lodo secundario
		sin tratar	digerido	o biosólido
Sólidos secos totales (ST)	%	2,0 – 8,0	6,0 – 12,0	0,83 – 1,16
Sólidos volátiles (SV)	% de ST	60 – 80	30 – 60	59 – 88
Proteínas	% de ST	20 – 30	15 – 20	32 – 41
Nitrógeno (N)	% de ST	1,5 – 4,0	1,6 – 6,0	2,4 – 5,0
Fósforo (P ₂ O ₅)	% de ST	0,8 – 2,8	1,5 – 4,0	2,8 – 11,0
Potasio (K ₂ O)	% de ST	0 – 1	0,0 – 3,0	0,5 – 0,7
Hierro (no como sulfuro)	% de ST	2 – 4	3,0 – 8,0	–
pH	–	5,0 – 8,0	6,5 – 7,5	6,5 – 8,0
Alcalinidad (CaCO ₃)	mg/L	500 – 1.500	2.500 – 3.500	580 – 1.100
Poder calorífico	kJ/kg	23.000 – 29.000	9.000 – 14.000	18.500 – 23.000

Fuente: Cortez, 2003; Metcalf & Eddy, 1996

Finalmente, el contenido de metales pesados varía en base al tratamiento aplicado y sistema de recogida de las aguas servidas. En sistemas de alcantarillado está permitido la emisión de residuos líquidos industriales de la pequeña y mediana empresa, en los cuales se podrían encontrar mayores concentraciones de metales, dependiendo de su rubro industrial. Algunos metales son requeridos por plantas, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para plantas, animales y humanos. En la Tabla 2 se presentan los contenidos típicos según el estudio de Lepe (2002) y otras referencias.

Tabla 2. Comparación en contenidos típicos de metales pesados en lodos.

Metal	Concentración en lodo seco (mg/kg)			
	Promedio (Lepe, 2002)	Promedio (Metcalf & Eddy, 1996)	Valor en D.S. 4	Valor en Norma EPA
Arsénico	2,2	10	20	75

Cadmio	1,2	10	8	85
Cromo	222	500	1.000	3.000
Mercurio	0,34	6	4	57
Molibdeno	4,9	4	10	75
Níquel	14,6	80	80	420
Plomo	16,0	500	300	840
Selenio	0,84	5	50	100
Zinc	633	1.700	2.000	7.500

Fuente: Cortez, 2003; Lepe, 2002; Metcalf & Eddy, 1996.

Por último, Cortez (2003) define que las características microbiológicas tienen relación con la diversidad biológica de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos. Debido a su pequeño tamaño se cuantifican a través de indicadores como los coliformes fecales (principal indicador). En los biosólidos se pueden encontrar algunas de las siguientes bacterias patógenas: *Salmonellas Typhi*, *Eschericha coli*, *Shigella* y *Vibrio Cholerae*. Entre los protozoos se encuentran: *Cryptosporidium* y *Balantidium coli*, y también pueden estar presentes las tenias y lombrices intestinales. Entre los virus se encuentran los causantes de la hepatitis A y poliomielitis. En la Tabla 3 se muestran niveles de algunos patógenos e indicadores presentes en lodos secundarios.

Tabla 3. Densidad de organismos patógenos e indicadores.

Tipo	Organismos	Densidad (NMP/ g masa seca)
Bacterias	Coliformes totales	$10^8 - 10^9$
	Coliformes fecales	$10^7 - 10^9$
	Estreptococos fecales	$10^6 - 10^7$
	<i>Salmonella sp.</i>	$10^2 - 10^3$
Protozoos	<i>Giardia sp.</i>	$10^2 - 10^3$
Virus	Virus entéricos	$10^2 - 10^4$
Parásitos	<i>Ascaris sp.</i>	$10^2 - 10^3$

Fuente: Alcota, 2002.

1.3 TRATAMIENTO DE LODOS

Este tratamiento de los lodos biológicos tiene como objetivo reducir el contenido de humedad, estabilizar la materia orgánica y disminuir el contenido de microorganismos potencialmente patógenos, antes de su disposición final. Esto con la finalidad de reducir el volumen para facilitar el manejo y disminuir los costos en transporte, reducir la generación de olores molestos para no atraer vectores y reducir o eliminar el potencial de putrefacción (Rojas, 1999; Toro, 2005).

1.3.1 Tipos de tratamientos

Los procesos de tratamiento se suelen clasificar en cuatro categorías: físicos, químicos, biológicos y térmicos, los cuales pueden combinarse para obtener un lodo estabilizado apto para su disposición final.

Procesos físicos

En general, los procesos físicos son utilizados para separar y reducir el volumen y peso del lodo, mediante espesamiento (flotación, centrifugación y filtros de banda) o deshidratación (evaporación y medios mecánicos como filtros, canchas de secado y lagunaje) (Cortez, 2003; Toro, 2005).

Procesos químicos

Estos emplean productos químicos para modificar las propiedades de los lodos, entre los cuales se distinguen, el acondicionamiento químico (cloruro férrico, cal, alúmina y polímeros orgánicos) y la estabilización con cal. El primero busca mejorar las propiedades de deshidratación y así facilitar la separación sólido-líquido. Mientras que el segundo, consiste en aumentar y mantener el lodo a pH 12 para restringir la degradación de la materia orgánica y así, no generar olores molestos y reducir los microorganismos patógenos presentes (Cortez, 2003; Toro, 2005).

Procesos biológicos

Los procesos biológicos aprovechan la participación de microorganismos bajo condiciones óptimas para estabilizar los lodos, los más comunes son: digestión anaeróbica, digestión aeróbica y compostaje. La digestión anaeróbica es uno de los más utilizados, en donde la materia orgánica e inorgánica es degradada en ausencia de oxígeno, generando menor cantidad de lodos. Es un proceso atractivo debido a la generación de biogás, pero requiere de un elevado costo inicial. La digestión aeróbica requiere un suministro de aire u oxígeno para poder estabilizar la materia orgánica y genera dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃) y agua. Algunas de sus ventajas son que es un proceso con menor costo inicial y es fácil de operar, además produce un lodo inodoro estable. Sus desventajas se asocian principalmente a los costos energéticos para suministrar oxígeno, es un proceso susceptible a cambios de temperatura y el lodo obtenido no es fácil de deshidratar mecánicamente. Mientras que en el compostaje la materia orgánica se degrada bajo condiciones controladas de temperatura y suministro de oxígeno. Esto permite obtener un lodo estabilizado e higienizado, es decir, exento de olores y de microorganismos patógenos (Cortez, 2003; Toro, 2005).

Procesos térmicos

Los procesos térmicos se basan en someter al lodo a temperaturas extremas para inhibir o eliminar la acción de microorganismos, principalmente. Aquí se identifican algunos de los más importantes: secado térmico y pasteurización. El secado térmico se caracteriza por aplicar calor extremo (150 a 210°C) para obtener un sólido, entre un rango de 5 a 10% de humedad. Sin embargo, este proceso genera problemas de olores y cenizas. La pasteurización consiste en exponer los sólidos a 70°C para inactivar larvas y huevos de parásitos, es decir, higienizarlo (Cortez, 2003; Toro, 2005).

1.3.2 Tratamiento convencional

Barañaño y Tapia (2004), señalan que todos los lodos generados requieren tratamiento. Los lodos tratados mediante lagunas y lombrifiltros no requieren estabilización dado su extenso tiempo de residencia, pero sí deben ser retirados y dispuestos cada cierto tiempo. Al año 2004, el 60% de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de lodos activados convencionales en Chile realizaba tratamiento. Generalmente, la estabilización se realiza a través de un proceso biológico de digestión aeróbica o anaeróbica, siendo la primera la más aceptada ya que la segunda resulta más factible para plantas de mayor tamaño debido a sus costos operacionales y la generación de biogás.

Con la finalidad de deshidratar los lodos, en algunas PTAS se realiza espesamiento gravitacional; en otras, se emplean sistemas mecánicos y/o se disponen en canchas de secado. La deshidratación mecánica se lleva a cabo a través de centrifugas, filtros de banda o filtros de prensa (Barañaño y Tapia, 2004).

En la Figura 3 se resumen los diferentes procesos a los que se pueden someter los lodos para su uso o disposición final.

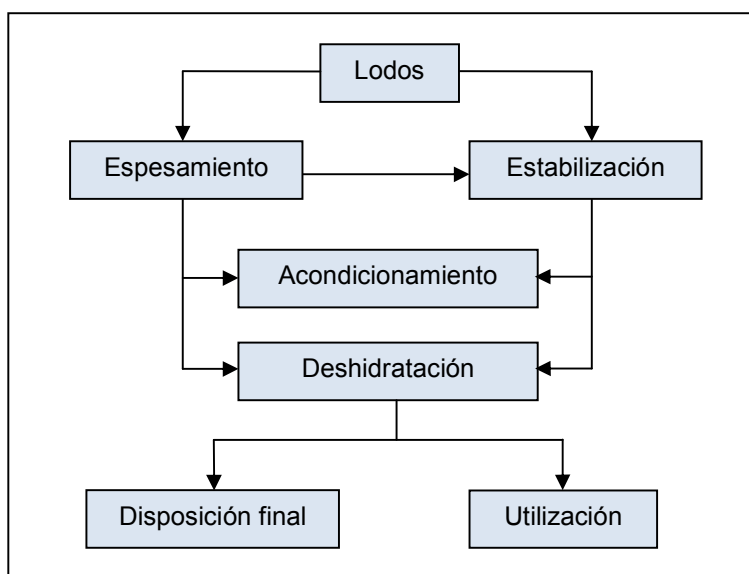


Figura 3. Esquema de procesos en tratamiento de lodos (Mahamud *et al.*, 1996).

1.4 DESTINO DE LODOS

Durante los años 2006 y 2007, la totalidad de los lodos generados en plantas de tratamiento localizadas en la región del Biobío fueron dispuestos en rellenos sanitarios. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 4 ha cambiado el destino de los lodos sanitarios de la región (ESSBIO S.A., 2009).

Tabla 4. Destino de lodos PTAS Región del Biobío.

Destino	Lodos (Ton/año)		
	2006	2007	2008
Relleno Sanitario	38.367	38.895	9.817
Aplicación en suelo forestal	0	0	28.566

Fuente: ESSBIO S.A., 2009.

Cabe mencionar que, el lodo puede tener diferentes aplicaciones como producto final, ya sea en la agricultura o como acondicionador de suelos, y en cada caso se reportan beneficios económicos asociados a su uso, presentados en la Tabla 5. En consecuencia, resulta más atractivo su uso en la agricultura, principalmente como suplemento de comida para ganado, y es por esto que 60% de los lodos producidos por la Comunidad Europea son reutilizados en la actividad agrícola. Además de los beneficios, la reutilización permite reducir los costos de transporte y disposición de lodos y la sobrecarga de los rellenos sanitarios. En la Tabla 6 se muestran los costos de transporte asociados a distintas plantas pertenecientes a la cuenca del río Biobío, que finalmente recaen sobre los usuarios y que su reutilización permitiría reducirlos (Castillo, 2005; Rojas, 1999).

Tabla 5. Valor estimativo del lodo (50% sólidos secos) como producto final.

Uso final	Valor de venta Miles de \$/Ton
1) Uso en agricultura	
a. Suplemento comida para ganado	66
b. Fertilizante	19 – 41

2) Otros usos

- a. Acondicionador de suelos (restringido su uso como fertilizante)

2 – 4

Fuente: Rojas, 1999.

Tabla 6. Costos de transporte PTAS Región del Biobío.

Planta	Producción de lodo (Ton/mes)	Distancia a recorrer (km)	Costo transporte (\$/mes)
Cabrero	53,9	20	566.166
Concepción	1.200	102,09	22.624.000
Hualqui	58,4	107	601.637
Laja - San Rosendo	84,1	60,3	2.038.584
Los Ángeles	560	60	6.787.200
Monte Águila	26,9	30	815.070
Mulchén	59,62	88,55	758.724
Quilleco	8,4	90	169.680
Santa Bárbara	42,1	94	1.233.109
Santa Juana	30,9	145,79	842.643
Yumbel	44,3	42	599.556
Total	2.228	717,07	38.802.140

Fuente: ESSBIO S.A., 2009.

Todo lo antes indicado, básicamente muestra los costos de operación y transporte para finalmente disponer los lodos biológicos en rellenos controlados. Sin embargo, bajo la promulgación del Reglamento para Manejo de Lodos D.S. 4/2009, estos lodos biológicos podrían ser utilizados como nutrientes y/o enmiendas de suelos, considerando acondicionamientos de estabilización e higienización previos.

Por ejemplo, en Estados Unidos la comercialización de los lodos como acondicionador de suelos o su reciclaje en tierras de cultivo deben ser sometidos a procedimientos previos para reducir el contenido de organismos patógenos (Cheremisinoff, 2002).

1.5 REGLAMENTO MANEJO DE LODOS

El D.S. 4/2009 “Reglamento para el Manejo de Lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas” distingue, en base al potencial de atracción de vectores y la presencia de patógenos, dos tipos de lodos: lodos de clase A y clase B. Los lodos de clase A son aquellos que no tienen restricciones sanitarias para su aplicación en suelos; mientras que los de clase B sí tienen restricciones sanitarias según el tipo y localización de los suelos o cultivos.

Por un lado, la reducción del potencial de atracción de vectores permite obtener lodos estabilizados con un contenido de sólidos volátiles mayor o igual al 38%. También se considerarán estabilizados cuando cumplan con los requerimientos diferentes a la atracción de vectores presentados en la Tabla 7.

Por otro lado, además de la reducción de la atracción de vectores, según el Artículo 7 los lodos deben:

1. Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 NMP por gramo de sólidos totales (base materia seca) o tener una densidad de *Salmonella sp.* menor a 3 NMP en 4 g de sólidos totales (base materia seca).
2. Tener un contenido de ova helmíntica (huevos de helmintos) viable menor a 1 en 4 gramos de sólidos totales (base materia seca).

Este último requisito puede ser demostrado a través de diferentes procesos de higienización aprobados por la Autoridad Sanitaria. En la Tabla 8 se muestran las especificaciones técnicas y los procedimientos requeridos para los procesos de higienización contenidos en el cuerpo normativo.

Tabla 7. Requerimientos para diferentes parámetros de tratamiento de lodos.

Parámetro	Tipo de tratamiento	Requerimiento
Reducción del contenido de sólidos volátiles	Digestión anaeróbica	Cuando la reducción de sólidos volátiles es menor a 38% se debe realizar una prueba de digestión adicional a escala de laboratorio. Se demuestra si después de 40 días entre 30 – 37°C, los sólidos volátiles se reducen en menos de 17% del valor al inicio de la prueba.
	Digestión aeróbica	Cuando la reducción de sólidos volátiles es menor a 38%, se debe realizar una prueba de digestión adicional con un porcentaje de sólidos igual o menor a 2% a escala de laboratorio. Se demuestra si después de 30 días a 20°C, los sólidos volátiles se reducen en menos de 15% del valor al inicio de la prueba.
Tasa máxima específica de oxígeno	Digestión aeróbica	Debe ser igual o menor a 1,5 mg de oxígeno por hora por gramo de sólidos totales, base materia seca a 20°C.
Temperatura	Digestión aeróbica	Se deben tratar por 14 días o más a una temperatura mayor a 40°C y temperatura media mayor a 45°C.
Adición material alcalino	-	Se debe elevar el pH de los lodos a 12 o m mediante adición de cal. Sin agregar cal, el pH se deberá mantener en 12 o más por 1 horas y después en 11,5 o más por 22 horas más.
Reducción de humedad	-	Si la mezcla no contiene lodos crudos de tratamiento primario, su porcentaje de sólidos debe ser mayor o igual a 75%, antes de mezclar con otros materiales. Si contienen lodos crudos, el porcentaje de sólidos debe ser igual o mayor a 90%, antes de mezclar con otros materiales.
Tiempo de residencia	-	Debe ser igual o mayor a 25 días cuando la estabilización de lodos se realice en la misma unidad donde ocurre la oxidación biológica de la materia orgánica.

Fuente: CONAMA, 2009.

Tabla 8. Condiciones de operación de procesos de higienización de lodos.

Proceso de higienización	Especificaciones	Procedimiento
Compostaje	Confinado o pilas estáticas aireadas	La temperatura de los lodos se deberá mantener en 55°C o más por 3 días.
	Pilas de volteo	La temperatura de los lodos se deberá mantener en 55°C o más a lo menos por 15 días. Durante ese periodo, las pilas se deben voltear 5 veces como mínimo.
Secado térmico	Contacto directo o indirecto	Secado de lodos con gases a mayor temperatura para reducir contenido de humedad a 10% como máximo. La temperatura de los lodos debe ser superior a 80°C o la temperatura de los gases en contacto con los lodos, justo antes de salir del secador, debe ser mayor a 80°C.
Tratamiento con calor	No tiene	Los lodos líquidos se calientan a 180°C o más por 30 minutos, como mínimo.
Digestión aeróbica termofílica	Aire u oxígeno	Los lodos líquidos son agitados para mantener condiciones aeróbicas por un tiempo medio de 10 días entre 55 - 60°C.
Irradiación	Haces de electrones	Los lodos deben ser irradiados con haces de electrones de alta energía provenientes de un acelerador de electrones, con una dosis mínima de 10 kGy (1 megarad) a 20°C.
	Rayos Gamma	Los lodos ser irradiados con rayos Gamma de Cobalto 60 o Cesio 137, con una dosis mínima de 10 kGy (1 megarad) a 20°C.
Pasteurización	No tiene	Los lodos se deben mantener a más de 70°C por más de 30 minutos.

Fuente: CONAMA, 2009.

Tabla 8. Condiciones de operación de procesos de higienización de lodos (Continuación).

Proceso de higienización	Especificaciones	Procedimiento
Tratamiento alcalino	Cal	Se debe agregar cal para elevar el pH sobre 12 por más de 72 horas. Durante ese periodo, el lodo debe estar a más de 52°C por más de 12 horas. Después de las 72 horas, el lodo se deberá secar al aire hasta obtener 50% o más de sólidos totales.
Tratamientos térmicos según combinaciones tiempo y temperatura	No tiene	<ul style="list-style-type: none">• Contenido de sólidos sea mayor o igual a 7%, temperatura de lodos superior a 50C y un tiempo de contacto mínimo 20 minutos.• Contenido de sólidos sea mayor o igual a 7%, temperatura de sea mayor a 50°C y los lodos estén constituidos por partículas pequeñas que se calientan por medio de gases o líquidos inmiscibles con un tiempo de contacto mínimo de 15 segundos.• Contenido de sólidos sea menor a 7% y el tiempo de contacto sea entre 15 segundos a 30 minutos.• Contenido de sólidos sea menor a 7%, la temperatura sea mayor a 50°C y el tiempo de contacto en el proceso sea mayor o igual a 30 minutos.

Fuente: CONAMA, 2009.

1.6 HIGIENIZACIÓN DE LODOS

Los lodos contienen los mismos microorganismos que las aguas servidas pero en concentraciones mayores. Cabe mencionar que a través de la estabilización del lodo se reduce considerablemente la cantidad de patógenos. Sin embargo, existen organismos que son capaces de sobrevivir a este proceso, incluso no son posibles de remover a través de métodos convencionales de tratamiento como la cloración, y que constituyen un riesgo cuando los lodos son usados como fertilizantes o acondicionador de suelos en agricultura. Además, la combinación con cloro puede formar compuestos cancerígenos (ASCE, 1992; El-Motaium, 2006; Schrader *et al.*, 1996; Torres *et al.*, 2005).

Los patógenos son capaces de afectar la salud pública y al medio ambiente, causando enfermedades a seres humanos, animales y plantas. Tanto bacterias, virus y parásitos son capaces de inducir una variedad de enfermedades al ser humano (El-Motaium, 2006; Torres *et al.*, 2005). Algunos organismos patógenos que sobreviven en suelos y/o en cultivos y representan estos riesgos se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Organismos patógenos y sus enfermedades asociadas.

Tipo	Organismo patógeno	Enfermedad
Bacterias	<i>Salmonella</i>	Salmonelosis
	<i>Shigella</i>	Shigellosis
	<i>Escherichia coli</i>	Diarrea
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Parásitos	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
	<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
Virus	Hepatitis A	Hepatitis
	Rotavirus	Gastroenteritis y poliomielitis
	Adenovirus	Infecciones respiratoria y ocular

Fuente: El-Motaium, 2006.

La higienización de lodos tiene el propósito de destruir o inactivar los microorganismos patógenos presentes en estos. La destrucción es la ruptura física o desintegración de los patógenos, mientras que la inactivación es la eliminación de su capacidad infecciosa (Cheremisinoff and Cheremisinoff, 1995; Schrader et al., 1996).

El *Ascaris lumbricoides* también conocido como lombriz intestinal (Figura 4) es un parásito o helminto que cuando se encuentra distribuido en suelos, éste se considera contaminado y no apto para el desarrollo agrícola. Un organismo adulto mide entre 20 a 36 cm de largo y se pueden encontrar en mayor concentración que otros parásitos, alcanzando un promedio de 3.000 huevos de *Ascaris lumbricoides* por gramo de lodo seco, tanto en lodos biológicos como digeridos. Los huevos son altamente resistentes a estresores ambientales y pueden permanecer viables durante 6 años, por lo cual son utilizados en muchos estudios como criterio para evaluar tecnologías de higienización (Cheremisinoff and Cheremisinoff, 1995; McClatchey, 2002; Melmed and Comninos, 1979; Shamma y Al-Adawi, 2002).

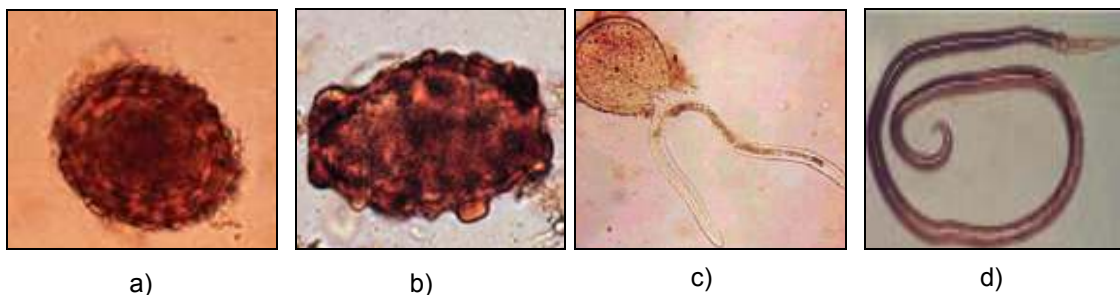


Figura 4. *Ascaris lumbricoides*: a) Huevo fértil, b) Huevo infértil, c) Larva experimentando muda dentro del intestino y d) Gusano adulto (Greenberg, 2005; Peters, 2007; Vincent, 2005).

Su ciclo biológico (Figura 5) comienza con la liberación de huevos inmaduros en las heces y su dispersión en el suelo. En los huevos fértiles se desarrolla un embrión y se vuelven infecciosos entre 18 días a varias semanas, según las condiciones de temperatura, humedad, calidad de suelo y sombra. Después que estos huevos son ingeridos, llegan al intestino donde eclosionan y las larvas penetran por vía venosa hasta llegar a los pulmones. Posteriormente, las larvas maduras ascienden por vía respiratoria hasta la garganta donde son ingeridos y vuelven al intestino delgado, se convierten en gusanos adultos (CDC, 1999; Montoya, 2008).

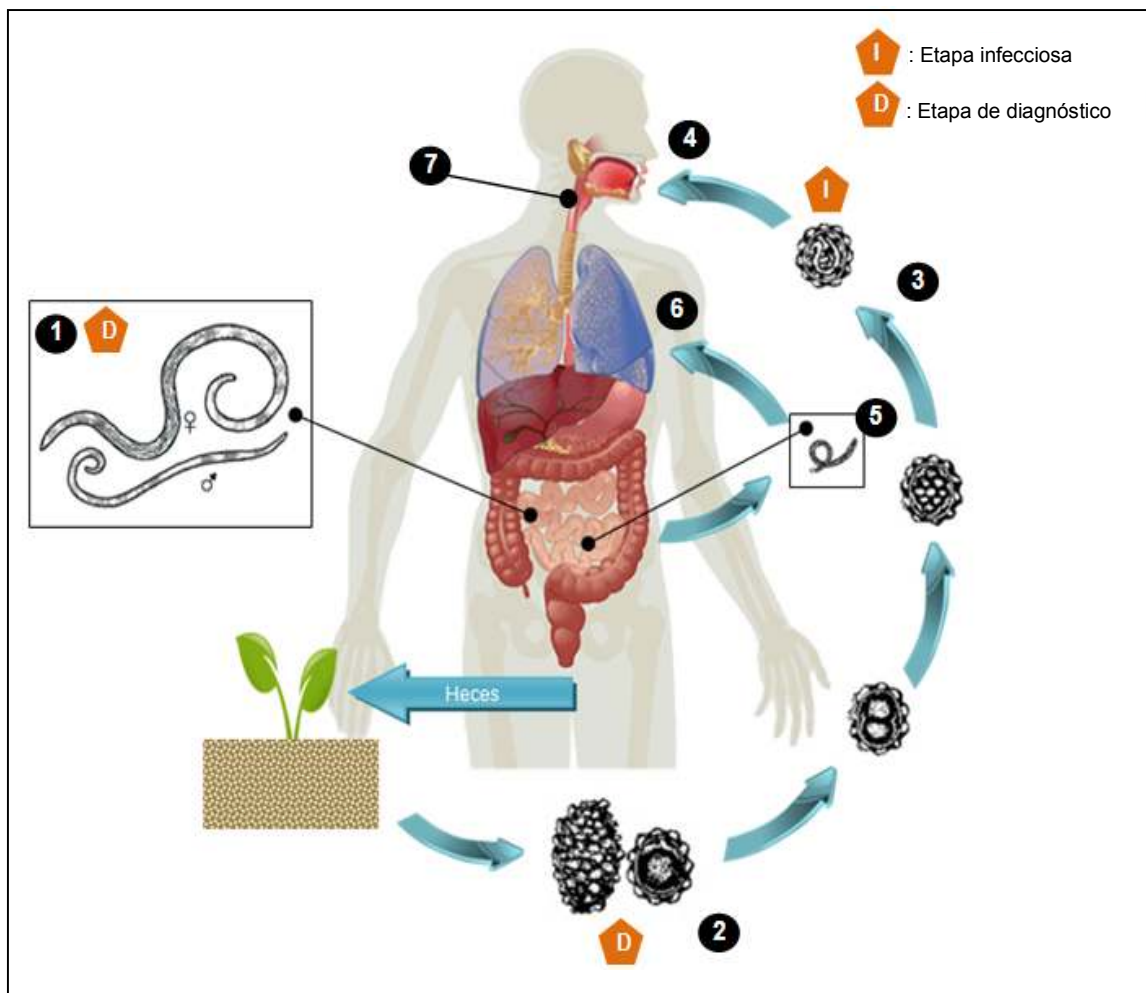


Figura 5. Ciclo de vida *Ascaris lumbricoides* (CDC, 1999).

En la Figura 6, se resumen las diferencias del parásito durante su ciclo de vida.

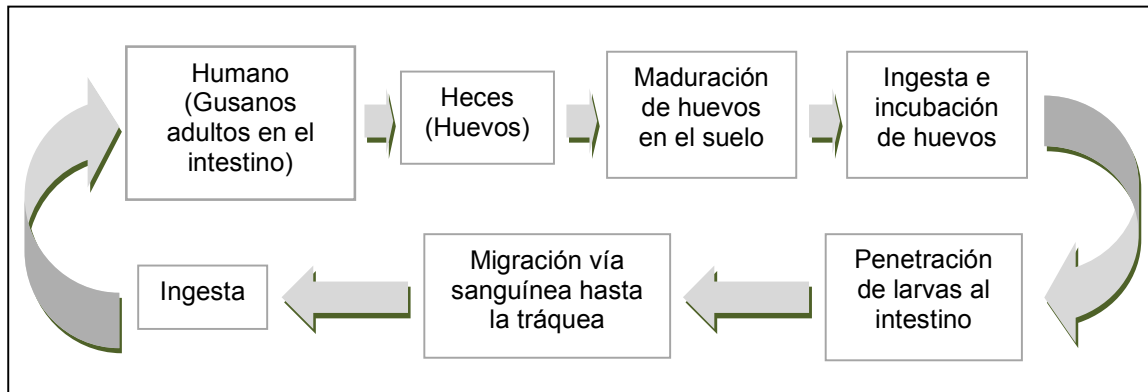


Figura 6. Esquema del ciclo de vida *Ascaris lumbricoides* (Shore, 1999).

Debido a su alta resistencia al cloro, pH extremo y temperaturas moderadas, es necesario considerar un proceso que combine estos factores para higienizar los lodos (Cheremisinoff and Cheremisinoff, 1995; Shamma y Al-Adawi, 2002).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) establece que los principales factores determinantes en la destrucción de patógenos son: temperatura, radiación y pH (US EPA, 2003). Según Rojas (1999), los procesos de higienización de lodos se clasifican en dos grupos:

PSRP (Process to Significantly Reduce Pathogens): Procesos de higienización para una significativa reducción de patógenos:

- Digestión anaeróbica
- Digestión aeróbica
- Secado al aire
- Tratamiento alcalino

PFRP (Process to Further Reduce Pathogens): Procesos de higienización para una fuerte reducción de patógenos:

- Compostaje
- Secado con calor
- Tratamiento térmico
- Digestión aeróbica termofílica
- Pasteurización
- Irradiación con haces de electrones
- Irradiación con rayos gamma

Según Smith *et al.* (2008), para un adecuado desarrollo de las tecnologías de higienización existen múltiples estresores permiten destruir microorganismos como bacterias, virus, gusanos y protozoos. Algunos estresores son: tiempo (t), temperatura (T), pH, desecación (S), emisiones de amonio (NH₃), concentración de sólidos ([S]), productos orgánicos como ácidos volátiles (AV) e irradiación (I).

En la Tabla 10 y en la Tabla 11 se resumen algunos estresores relacionados a diferentes tecnologías de higienización. Siendo el tratamiento alcalino, la irradiación y el compostaje, los procesos que relacionan mayor número de estresores, como se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Estresores asociados a efectividad de procesos de higienización.

Proceso	Nº de estresores	t	pH	I	T	[S]	NH ₃	AV	S
Compostaje	6	+	-	-	+	+	+	+	+
Digestión aeróbica	4	+	-	-	+	+	-	-	-
Secado térmico	5	+	-	+	+	+	-	-	+
Tratamiento alcalino	7	+	+	-	+	+	+	+	+
Irradiación	6	+	-	+	+	-	+	+	-

Fuente: Smith *et al.*, 2008.

Por su parte, en la Tabla 11 se incluyen los factores claves a optimizar en cada tecnología, desde la cual se aprecia que en el tratamiento alcalino es necesario considerar la temperatura, pH, secado y químicos. Mientras que en los procesos físicos sólo se necesita controlar la dosis de radiación.

Tabla 11. Factores claves en métodos higienización de lodos.

Tipo	Método de estabilización e higienización	Temperatura	pH	Irradiación	Secado	Presión	Químicos
Físico	Irradiación rayos gamma			•			
	Irradiación haces de electrones			•			
Térmico	Secado térmico	•			•		
	Pasteurización	•					
	Tratamiento con calor	•				•	
	Tratamiento térmico	•					
Biológico	Compostaje	•			•		•
	Digestión aeróbica termofílica	•					•
Químico	Tratamiento alcalino	•	•		•		•

Fuente: Acquisto *et al.*, 2006.

2 HIPÓTESIS

La higienización a través de procesos biológicos y de energías renovables resulta técnicamente factible y más viable económicamente que los procesos físicos, químicos y térmicos para el tratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Analizar aspectos técnicos y económicos de los procesos de higienización de lodos.

3.2 Objetivos Específicos

- i. Estudiar aspectos técnicos relacionados con las operaciones unitarias y desarrollar diagramas de flujo de los procesos de higienización de lodos.
- ii. Identificar y cuantificar entradas y salidas de los procesos de higienización de lodos.
- iii. Analizar algunos aspectos económicos de los procesos de higienización de lodos en estudio.

4 ANTECEDENTES

Como se mencionó con anterioridad, el propósito de los procesos de higienización de lodos es la destrucción de los microorganismos patógenos o la inactivación de su potencial infeccioso. En las Tabla 12 y Tabla 13 se presentan las acciones que se pueden realizar para controlar la presencia de patógenos y la atracción de vectores en los lodos.

Tabla 12. Propuestas generales para el control de patógenos y atracción de vectores en lodos.

Acción	Efectividad	Proceso
Aplicación de temperaturas altas (temperaturas pueden ser generadas a partir de procesos físicos, químicos o biológicos)	Depende del tiempo y la temperatura. Temperaturas adecuadas mantenidas por largos periodos de tiempo pueden reducir huevos de helmintos (resistentes a temperaturas elevadas) bajo los niveles detectables.	<ul style="list-style-type: none"> • Compostaje • Secado y tratamiento con calor • Pasteurización • Digestión aeróbica
Aplicación de radiación	Depende de la dosis. Dosis adecuadas pueden reducir bacterias, virus (más resistentes a radiación), huevos de helmintos bajo niveles detectables.	<ul style="list-style-type: none"> • Radiación gamma • Radiación con haces de electrones de alta energía
Aplicación de desinfectantes químicos	Reduce parcialmente bacterias, virus y atracción de vectores. No es efectivo para reducir los huevos de helmintos, a menos que se combine con calor.	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento alcalino
Reducción de sólidos volátiles (fuente de alimento microbiano)	Reduce la atracción de vectores.	<ul style="list-style-type: none"> • Digestión aeróbica • Compostaje

Fuente: US EPA, 2003.

Tabla 13. Propuestas generales para el control de patógenos y atracción de vectores en lodos (Continuación).

Acción	Efectividad	Proceso
Reducción de humedad	Reduce la atracción de vectores siempre y cuando el lodo permanezca seco. Se debe combinar con otros factores como temperaturas elevadas para reducir los huevos de helmintos.	<ul style="list-style-type: none"> • Secado con calor • Secado con aire

Fuente: US EPA, 2003.

4.1 TRATAMIENTO ALCALINO

El tratamiento alcalino es un proceso de estabilización de lodos que permite reducir significativamente el contenido de microorganismos, resultando más eficiente que otros tratamientos de lodos, como la digestión anaeróbica (US EPA, 1987).

Este proceso se puede lograr mediante el acondicionamiento del lodo biológico con cal. La cal (CaO, óxido de calcio/cal viva o Ca(OH)₂, hidróxido de calcio/cal apagada) genera un ambiente alcalino que permite inhibir la degradación biológica de la materia orgánica contenida en lodos, evitando así la producción de malos olores y con ello, la proliferación de vectores. Más aún, a valores de pH sobre 12 no se favorece la supervivencia de los microorganismos, siendo el pH el factor determinante en la reducción de los patógenos y la restricción de la degradación de la materia orgánica. Muchas investigaciones han demostrado que la cal permite reducir la mayoría de las bacterias, virus y parásitos resistentes, como los huevos de *Ascaris lumbricoides*. Además, se reducen la solubilidad y movilidad de la mayor parte de los metales pesados presentes en el lodo y así se favorece su

precipitación (Bioaqua, 2006; Cortez, 2003; Czechowski and Marcinkowski, 2006; European Lime Association, 2004; Méndez *et al.*, 2002; Rojas, 1999).

La cal se puede agregar antes (pretratamiento) o después (postratamiento) del secado del lodo. Se recomienda el postratamiento debido a que requiere menos reactivo y se obtienen mejores resultados (Torres *et al.*, 2005).

El tratamiento se puede realizar con diferentes compuestos, algunos de los cuales se presentan en la Tabla 14, siendo el óxido de cal el más usado debido a su alto calor de hidrólisis y por favorecer considerablemente la destrucción de patógenos (Williford *et al.*, 2007).

Tabla 14. Aditivos para acondicionamiento con cal de lodos.

Compuesto	Nombre	Descripción
Óxido de calcio, CaO	Cal viva	Compuesto alcalino que produce una reacción exotérmica al mezclarse con lodos, debido al alto contenido de agua en estos. Así, se elevan la temperatura sobre 50°C y el pH.
Hidróxido de calcio, Ca(OH) ₂	Cal apagada	Compuesto alcalino que otorga pH sobre 12, causando la ruptura de membranas celulares de microorganismos. Permite crear una barrera ante vectores, impidiendo que algunos depositen sus huevos en el lodo.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996.

El proceso se basa en la reacción exotérmica entre el óxido de calcio y agua, donde la descomposición de la materia orgánica ocurre principalmente por la hidrólisis de grasas y proteínas, resultando un material de fácil deshidratación (Czechowski and Marcinkowski, 2006; European Lime Association, 2004; Metcalf & Eddy, 1996):



Es importante mencionar que el óxido de calcio reacciona con un 32% de agua contenida en el lodo, en relación a su propio peso (European Lime Association, 2004).

En la Tabla 15 se muestran las dosis típicas de hidróxido de calcio para diferentes tipos de lodos a tratar.

Tabla 15. Cantidad de cal necesaria para mantener lodos líquidos a pH sobre 12 durante 30 minutos.

Tipo de sólido	Dosis de cal	
	(kg de Ca(OH) ₂ /Ton sólidos secos)	
	Rango	Promedio
Primarios	60 - 170	120
Lodos biológicos	210 - 430	300
Digeridos aeróbicamente	140 - 250	190
Sépticos	90 - 510	200

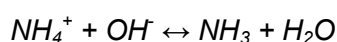
Fuente: Metcalf & Eddy, 1996.

Sin embargo, con la finalidad de que no exista un nuevo crecimiento bacteriano en el lodo ya estabilizado, se debe tratar con exceso de cal. Por lo tanto, se puede alimentar una dosis 1,5 veces mayor a la cantidad requerida para mantener el pH en nivel 12. También, se debe tomar en consideración que una dosis alta de cal, afecta las características físico-químicas de los lodos. Algunos autores indican que para mantener el nivel de pH en 12 o más se necesita aplicar 20% de cal viva en peso seco. Sin embargo, se necesita una dosis de 0,4 kg/kg lodos base seca, para mantener un pH>12 y T>52°C por un periodo mayor a 72 horas (BAPA S.A., 2004; Gowda *et al.*, 2008; Méndez *et al.*, 2002; Rojas, 1999; Williford *et al.*, 2007; Ødegaard *et al.*, 2001).

Durante la descomposición anaeróbica de la materia orgánica se producen gases nitrogenados y sulfurados, principales responsables de malos olores en los lodos (Williford *et al.*, 2007).

Amoníaco

La cantidad de amoníaco liberado depende del contenido de nitrógeno en los lodos, del pH y de la temperatura alcanzada en el proceso. De acuerdo a la Ecuación 2, en función de las condiciones alcalinas en que ocurre el proceso, el ion amonio (NH_4^+) se convierte a gas amoníaco (NH_3) (Méndez *et al.*, 2002; Williford *et al.*, 2007) de acuerdo a la siguiente reacción, tal como se presenta en la Figura 7.



Ecuación 2

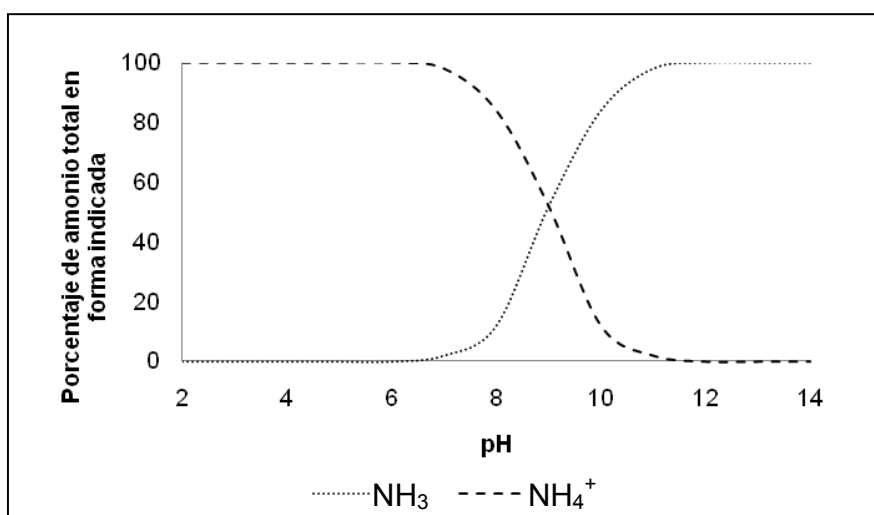


Figura 7. Efecto del pH en la especiación del amonio (Girovich, 1996).

Muchos autores han reportado que la presencia de NH_3 en lodos reduce la viabilidad de los huevos de helmintos de *Ascaris lumbricoides*. Además se ha determinado que el NH_4OH tiene un efecto bactericida puesto que a pH 13 se transforma en un 99,98% a su forma no ionizada. Por lo tanto, es recomendable que el proceso ocurra en un sistema cerrado para incrementar la eficiencia de la estabilización mediante la retención del NH_3 producido (Méndez *et al.*, 2002).

Ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un gas con olor a huevo podrido que proviene de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica con contenido sulfuroso (respiración endógena) y cuya presencia en lodos depende del pH alcanzado. Según la Ecuación 3, existen tres formas de encontrar el azufre (Figura 8) (Nina, 2008; Weiner, 2008; Williford *et al.*, 2007).



Ecuación 3

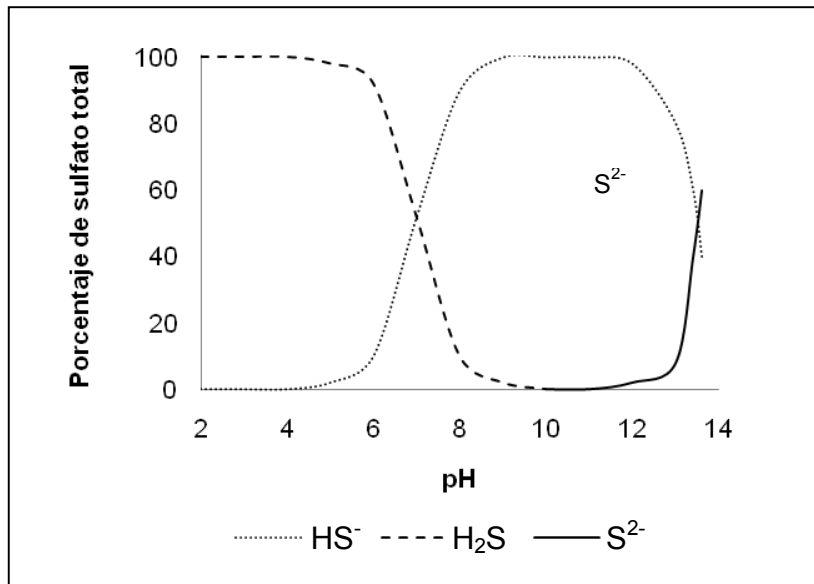


Figura 8. Efecto del pH en la especiación del ácido sulfhídrico (Girovich, 1996; Wang and Hung, 2007).

Tanto el S^{2-} como el HS^- son aniones solubles y no volátiles que no producen olor, mientras que el H_2S es poco soluble, pero se volatiliza fácilmente (Nina, 2008; Weiner, 2008).

Un sistema típico se compone de un mezclador de cal-lodos, una cinta transportadora, un dosificador de cal y un silo de cal, el cual se muestra en la Figura 9. Un sistema de postratamiento con cal se presenta en la Figura 10.

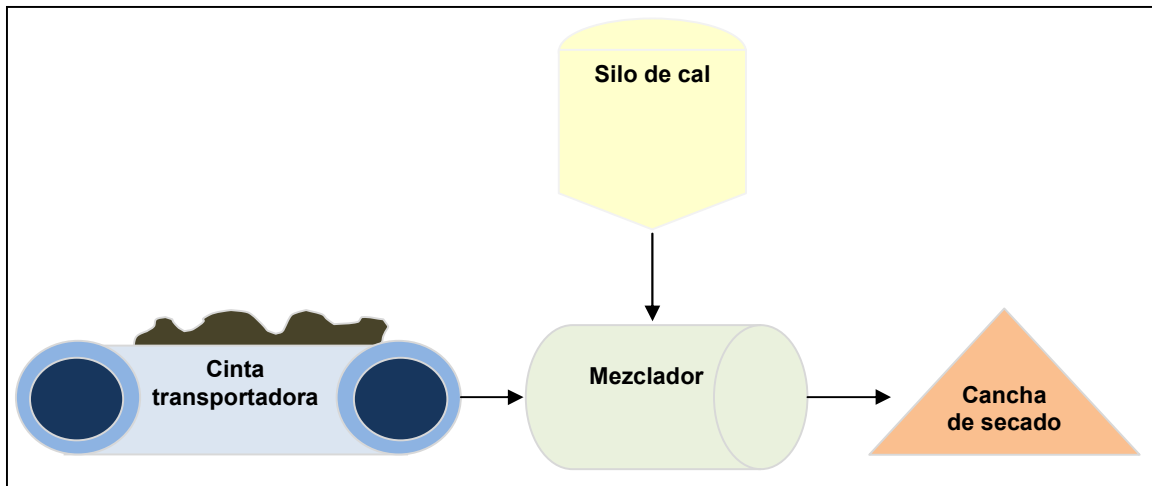


Figura 9. Sistema típico de tratamiento de lodos con cal (CONAMA, 2009; European Lime Association, 2004; Turovskiy and Mathai, 2006; Williford *et al.*, 2007).



Figura 10. Sistema de tratamiento con cal: (1) Silo y dosificador de cal, (2) Mezclador cal-lodos y (3) Cinta transportadora (European Lime Association, 2004).

4.2 SECADO TÉRMICO

El secado térmico es un proceso altamente flexible, fácilmente adaptable para obtener productos tanto para su reuso agrícola como para su disposición en rellenos sanitarios. Está basado en la aplicación de calor externo para evaporar el agua contenida en el lodo. El producto obtenido presenta una concentración de sólidos que varía entre 65 - 95% y por ende, el contenido de humedad es del orden del 5 - 35% (Andreoli *et al.*, 2007; Cortez, 2003).

Este proceso se puede llevar a cabo a través de dos sistemas: secado directo y secado indirecto. En el secado directo existe un contacto directo entre el medio de transporte de calor (aire o vapor) y el lodo; mientras que en el indirecto hay una barrera física entre este medio de transporte de calor y los lodos (Cortez, 2003).

En el secado indirecto, el producto obtenido tiene una concentración de sólidos de 85%. Para contenidos de sólidos mayores que 90% y la posibilidad de producción de fertilizantes, se recomiendan los procesos de secado directo. Cabe mencionar que los secadores indirectos son más complejos que los directos porque necesitan un circuito de calor y un sistema de limpieza para remover el lodo de la superficie caliente. Además, en estos se alcanzan temperaturas inferiores que en los secadores directos, por lo cual hay menos liberación de sólidos volátiles (Andreoli *et al.*, 2007; Cortez, 2003).

Sin embargo, tanto los secadores directos como indirectos pueden generar olores y cenizas, por lo que se debe contar con un sistema de control. Se recomienda que la unidad de secado esté aislada, preferentemente bajo un ambiente de presión negativo para minimizar la generación de riesgos y que los gases liberados sean calentados a temperaturas mayores a 730°C (Andreoli *et al.*, 2007; Cortez, 2003).

Las alternativas de secado más utilizados son: sistema de secado instantáneo, secador rotatorio y secador múltiple (Cortez, 2003; Rojas, 1999).

- **Secador instantáneo:** El lodo se pulveriza en presencia de gases calientes. Los lodos pueden ingresar hasta con un 50% de humedad y el contacto estos con los gases turbulentos a altas temperaturas permite que ocurra la transferencia de masa, reduciéndose la humedad hasta un 10% (Rojas, 1999; US EPA, 2003).
- **Secador rotatorio:** Consiste en un tambor horizontal que rota y puede tener paletas para mezclar mecánicamente el lodo. Hay dos tipos de sistemas: secado directo e indirecto. En el primero existe contacto directo con gases calientes; en el indirecto, la transferencia de calor ocurre a través de una pared metálica, como el secador de tornillo (Rojas, 1999; US EPA, 2003).
- **Secador múltiple:** Generalmente cumple la función de un incinerador de lodos, en el cual se tratan lodos previamente deshidratados mecánicamente. Primero, el lodo es dispersado en partículas y se pone en contacto con gases calientes de combustión a contracorriente (Rojas, 1999).

En la Tabla 16 se presenta una comparación entre los requerimientos energéticos de dos tipos de secadores.

Tabla 16. Requerimientos energéticos de equipos de secado.

Equipo	Consumo estimado kW-h/Ton agua evaporada
Secador instantáneo	1.447 – 1.744
Secador rotatorio	1.550 – 1.808

Fuente: Hyde, 1985.

En la Figura 11 se presenta la operación de un proceso de secado térmico.

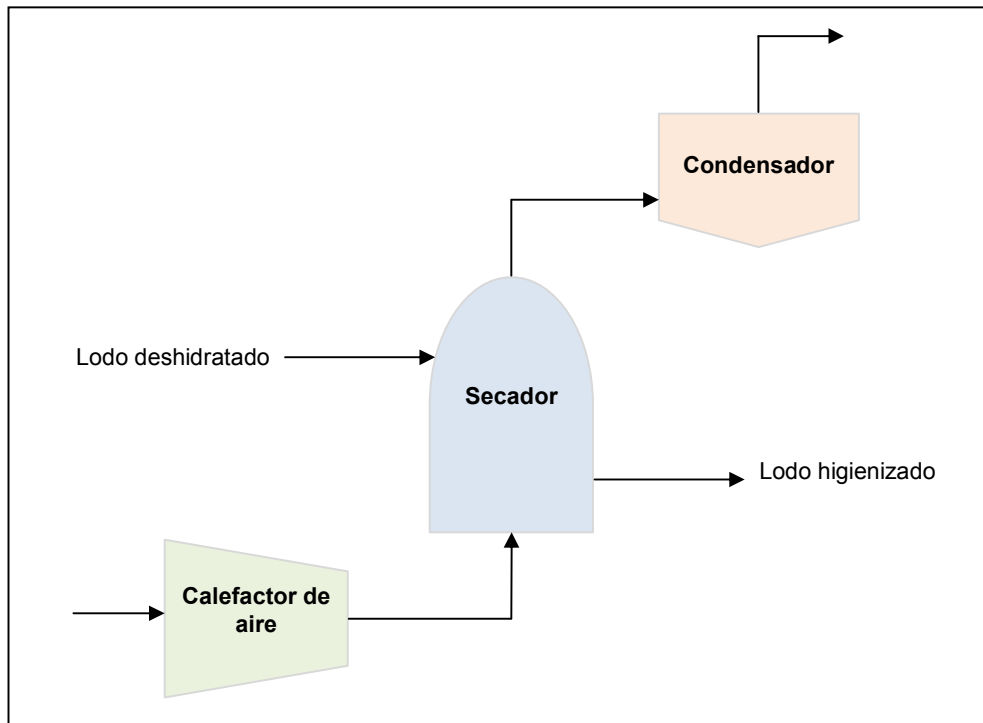


Figura 11. Proceso de secado térmico (Andreoli *et al.*, 2007).

4.3 PASTEURIZACIÓN

La pasteurización es un proceso que consiste en elevar y posteriormente disminuir la temperatura de lodo por un tiempo suficiente para destruir los patógenos. Tim (1993) reporta que los patógenos presentes en los lodos se destruyen a 70°C por 30 minutos.

No es muy usado en Estados Unidos, pero en países europeos como Suiza y Alemania es obligatorio antes de que los biosólidos sean aplicados al suelo (Cheremisinoff, 2002; Cortez, 2003; McFarland, 2001; von Sperling and de Lemos, 2005).

Las potenciales desventajas de esta tecnología incluyen los problemas de olores y la necesidad de contar con sistemas de almacenamiento cuando la aplicación de los biosólidos no es posible, como en el invierno (McFarland, 2001).

El lodo puede ser calentado a través de intercambiadores de calor o por inyección de vapor. Se prefiere el método de inyección de vapor porque es más efectivo en el mantenimiento de las temperaturas del lodo (US EPA, 2003).

Los lodos son pasteurizados en discontinuo para evitar la recontaminación que pudiera ocurrir en un proceso continuo. Posteriormente, el lodo debe ser almacenado de forma adecuada porque la materia orgánica no se ha estabilizado y por lo tanto, se pueden producir olores y crecimiento de microorganismos patógenos si los lodos se vuelven a inocular. Por esto la pasteurización debe ser complementada con un proceso para reducir la atracción de vectores, como la digestión, a menos que estas condiciones ya hayan sido satisfechas (ajuste de pH) (McFarland, 2001; US EPA, 2003).

Según McFarland (2001), los principales componentes son: caldera de vapor, calefactores, reactor, estanques sopladores y de almacenamiento de lodos. Un sistema simple se representa en la Figura 12, con más detalles en la Figura 13

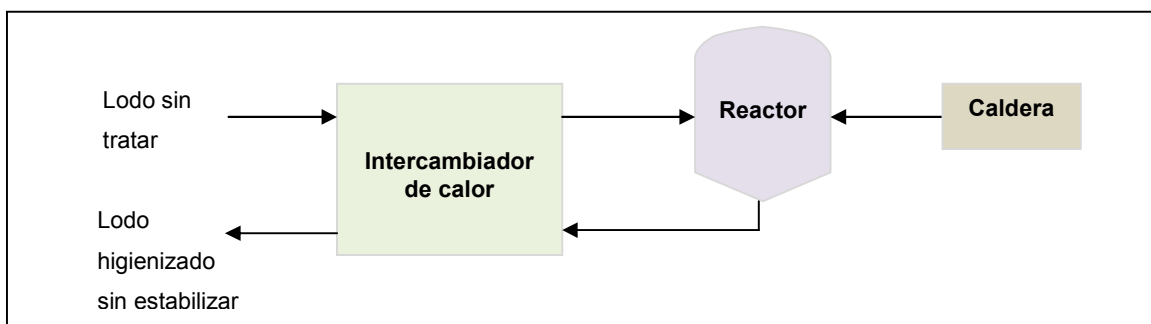


Figura 12. Sistema de pasteurización de lodos (US EPA, 1979).

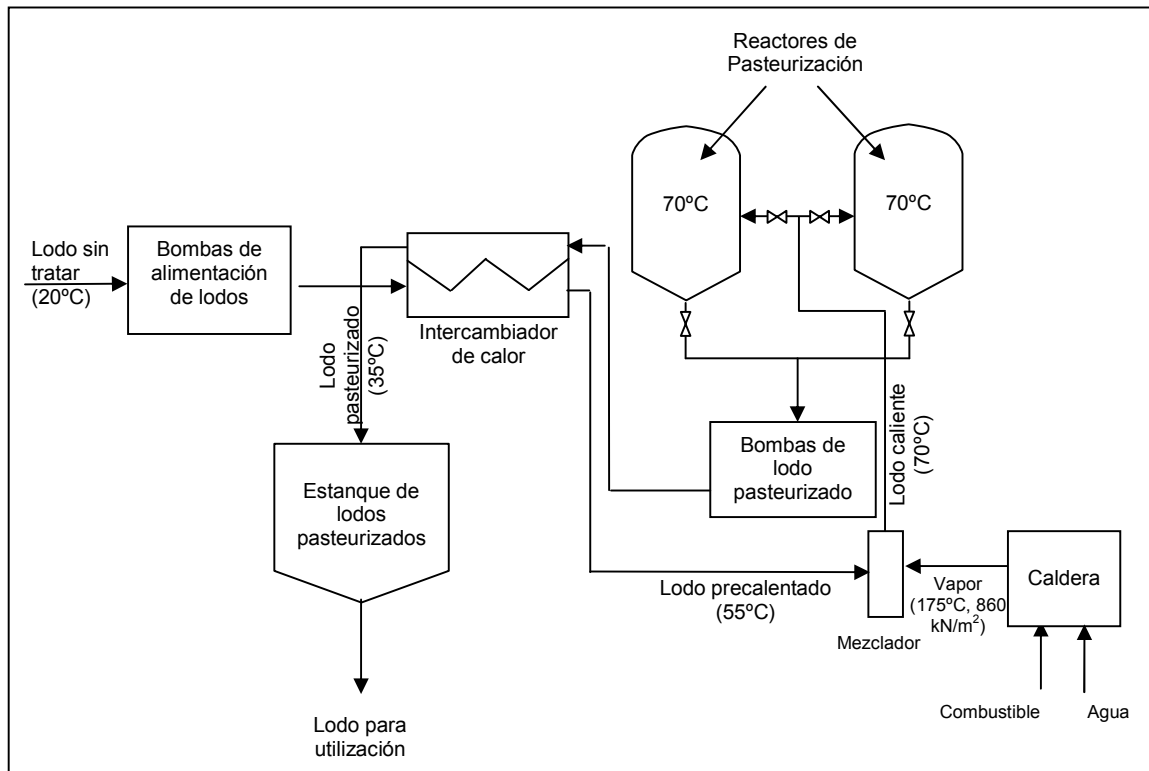


Figura 13. Sistema de pasteurización de lodos con recuperación de calor (McFarland, 2001; US EPA, 1979).

4.4 TRATAMIENTO CON CALOR

El proceso consiste en calentar el lodo bajo presión durante un corto periodo de tiempo. Este tratamiento coagula los sólidos, rompe la estructura de gel y reduce la afinidad del agua con los sólidos de los lodos. Se obtiene un lodo higienizado de fácil deshidratación (Metcalf & Eddy, 2004; US EPA, 2003).

El lodo obtenido debe ser almacenado adecuadamente porque la materia orgánica no ha sido reducida y por ende, se puede producir crecimiento bacteriano. En la mayoría de los casos, el tratamiento con calor debe ser seguido por un proceso de estabilización para reducir la atracción de vectores (US EPA, 2003).

Existen dos procesos usados principalmente para el tratamiento con calor, conocidos como Porteus y Zimpro. En el proceso Porteus el lodo es precalentado y luego el vapor es inyectado a un reactor bajo presión. El lodo se mantiene en el reactor por aproximadamente 30 minutos, luego del cual es descargado a un estanque decantador. El proceso Zimpro es parecido al anterior, sin embargo el aire es inyectado antes de que el lodo entre al reactor. En ambos casos se opera con temperaturas y presiones similares (US EPA, 2003).

4.5 IRRADIACIÓN

La irradiación es el proceso de someter un material a radiación. La radiación es energía en forma de partículas altamente energéticas u ondas electromagnéticas, proveniente de fuentes radiactivas o aceleradores de partículas (ASCE, 1992; Schrader, 1996).

La radiación permite destruir o reducir considerablemente la población de microorganismos presentes en el lodo, ya que la energía generada ioniza los átomos dejándolos inestables y favoreciendo la formación de radicales libres. Las reacciones originadas por ellos producen cambios a nivel biológico, pudiendo destruir completamente las células o provocar alteraciones en su ADN (Schrader, 1996).

La radiación puede afectar directa o indirectamente a los microorganismos (Figura 14). El efecto directo se produce por el choque del fotón o partícula con el microorganismo inhibiendo su reproducción. Mientras que el indirecto, tiene incidencia sobre el medio donde se encuentran los microorganismos, promueve la difusión de radicales libres que destruyen el microorganismo (Schrader, 1996).

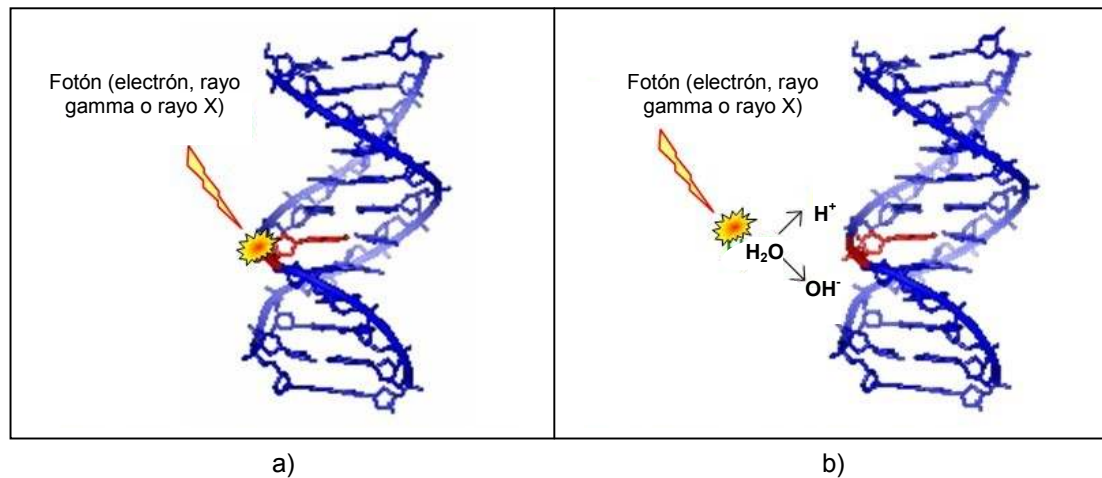


Figura 14. Acción de la radiación sobre la cadena de ADN: a) directa y b) indirecta (Álvarez, 2007).

La dosis de radiación es una medida de la energía absorbida en el material expuesto al campo de radiación. La unidad de la dosis absorbida es el gray (Gy), definido como 1 J/kg. Esta dosis varía entre los organismos según su radiosensibilidad. El-Motaium (2000) reportó que una dosis de 6 kGy es suficiente para la desinfección de lodos mediante radiación. Según la EPA, se requiere una dosis de 10 kGy para la eliminación de ova de *Ascaris* del lodo. Otros autores han señalado que dicha dosis es efectiva para la destrucción de bacterias y parásitos patógenos en lodos deshidratados (ASCE, 1992; El-Motaium, 2000; Schrader, 1996).

Para la higienización de lodos se requiere la absorción de una dosis uniforme de radiación, lo que se puede realizar a través de rayos gamma de fuentes de radioisótopos y partículas beta de alta energía provenientes de aceleradores de electrones. Cabe mencionar que el poder de penetración difiere entre ambas formas de energía, tal como se muestra en la Figura 15. Por un lado, las partículas beta pueden viajar unos 5 metros a través del aire y un centímetro en tejidos, pero son detenidas por una capa de ropa o unos pocos milímetros de aluminio; mientras que los rayos gamma pueden penetrar largas distancias en aire y tejidos,

pero son detenidos por varios metros de concreto o centímetros de plomo (ASCE, 1992).

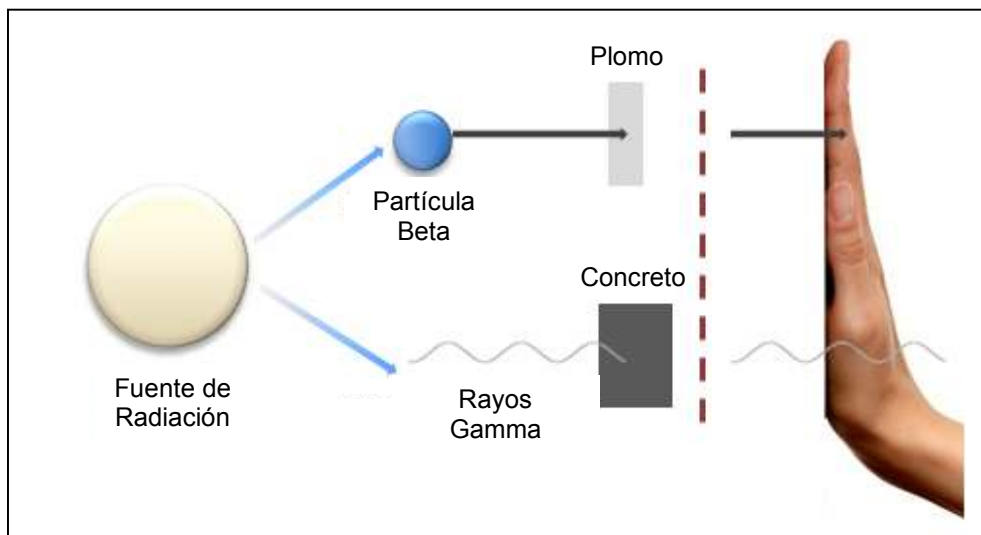


Figura 15. Poder de penetración de partículas beta y rayos gamma en diferentes materiales (Departamento de Salud Dakota del Norte, 2005).

4.5.1 RAYOS GAMMA

Los rayos gamma son emitidos durante el decaimiento de algunos átomos radioactivos como un proceso de liberación del exceso de energía de un núcleo excitado, como se indica en la Figura 16. Los rayos gamma tienen buen poder de penetración y alta probabilidad de interactuar con átomos del material por el cual pasan (ASCE, 1992).

Los radioisótopos utilizados con mayor frecuencia son Cobalto-60 (Co^{60}) y Cesio-137 (Cs^{137}). El Co^{60} se obtiene de la irradiación de Cobalto-59 elemental con neutrones en un reactor nuclear durante uno o dos años; mientras que el Cs^{137} es subproducto de la fisión del combustible Uranio-235 (ASCE, 1992).

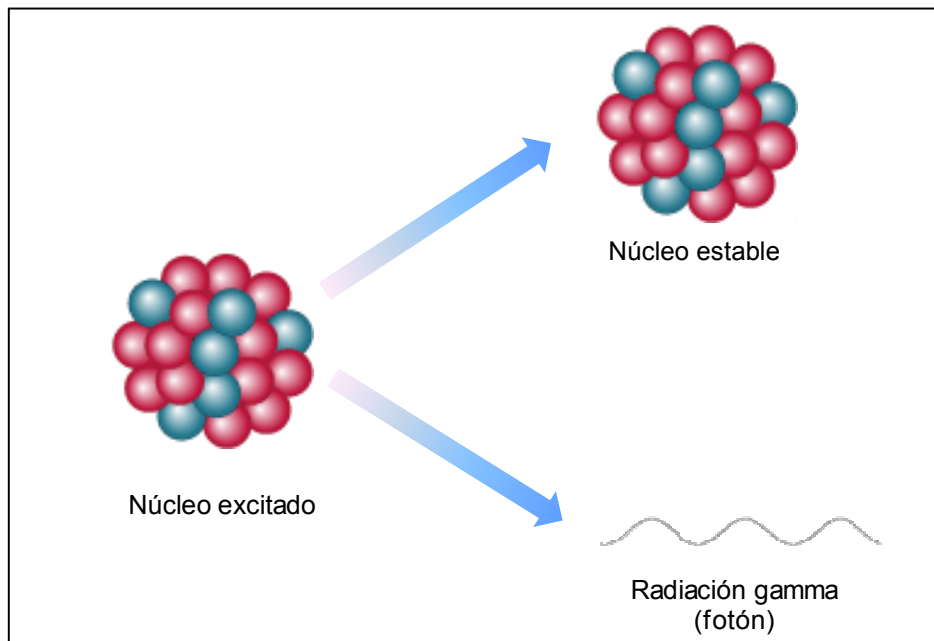


Figura 16. Decaimiento de un núcleo excitado y liberación de radiación gamma (Koelzer, 2001).

Los átomos de Co^{60} se desintegran con la emisión de dos rayos gamma con energía de 1,17 y 1,33 MeV (mega-electron volt). Mientras que los de Cs^{137} emiten un rayo gamma de 0,66 MeV por cada desintegración. Las fuentes de Co^{60} y Cs^{137} tienen una vida media de 5,26 y 30 años, respectivamente. Cabe destacar que las fuentes de Co^{60} necesitan ser reemplazadas con mayor frecuencia que las de Cs^{137} . En la Figura 17 se presentan los esquemas de decaimiento para ambos radioisótopos (Lue-Hing, 1998).

Sin embargo, en 1992 en una publicación de la ASCE se indica que el suministro de Cs^{137} a futuro es incierto a diferencia de Co^{60} . El-Motaium (2000) reportó que a nivel mundial existen experiencias de irradiación de lodos con Co^{60} , como en el caso de Alemania, India, Argentina y Canadá.

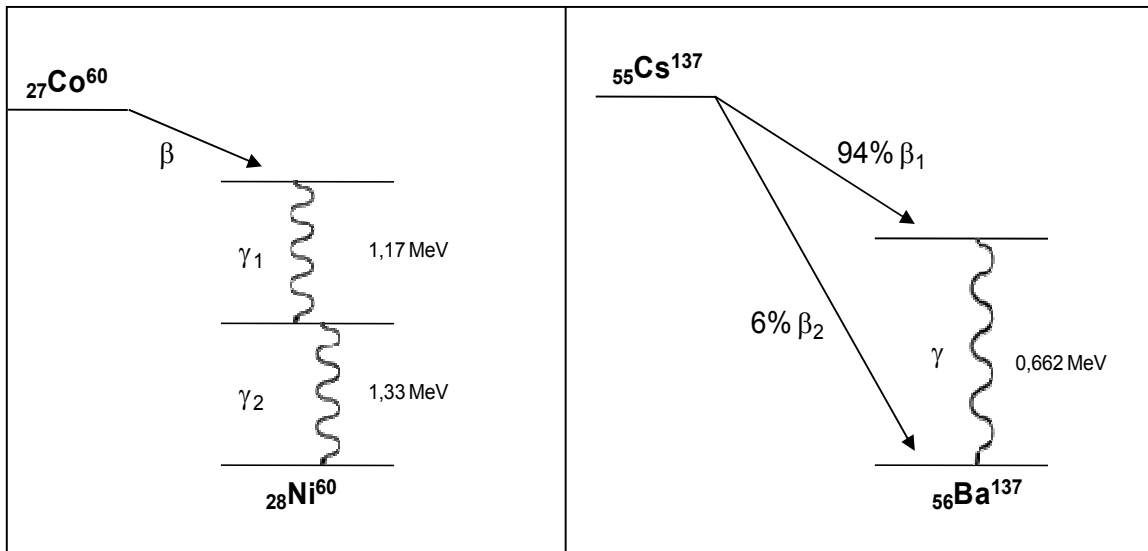


Figura 17. Esquema decaimiento de radioisótopos Co^{60} y Cs^{137} (Podgoršak, 2010).

El proceso se desarrolla al interior de una cámara de irradiación (Figura 18), la cual está constituida por tres partes principales (Rojas, 1999):

- Fuente radioactiva
- Blindaje para protección biológica
- Sistema de transporte del lodo hacia el interior y exterior de la cámara de irradiación.

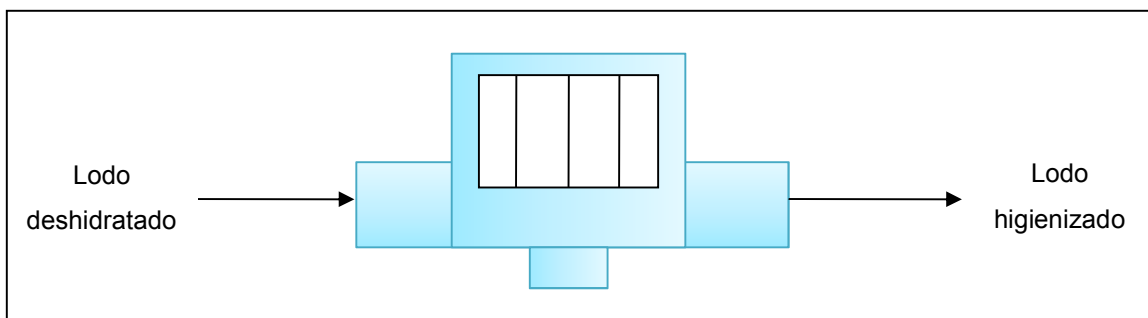


Figura 18. Diagrama de irradiación con radiación gamma (Rojas, 1999).

Otra parte fundamental que forma parte del proceso, es el irradiador. En este equipo ocurre el proceso de radiación con la energía proveniente de la fuente radiactiva Co^{60} . Los lápices de Co^{60} son manejados como se muestra en la Figura 19, donde se encuentran contenidos en recipientes herméticos de acero inoxidable de doble pared para que no entre en contacto con el lodo, sino que solamente estos reciban la energía emitida. Estos lápices son insertados en un porta fuente anular de 50 cm de diámetro con doble pared, entre las cuales circula agua desmineralizada para enfriamiento (Rojas, 1999; Vázquez, 2006).

Por otra parte, el blindaje es una estructura de hormigón para evitar que se superen los niveles permitidos de radiación al exterior de la cámara. Por lo general, las paredes tienen un grosor mayor a 1 m. Además, bajo la cámara debe existir una piscina de almacenamiento de la fuente que a su vez también sirve de blindaje (Rojas, 1999).

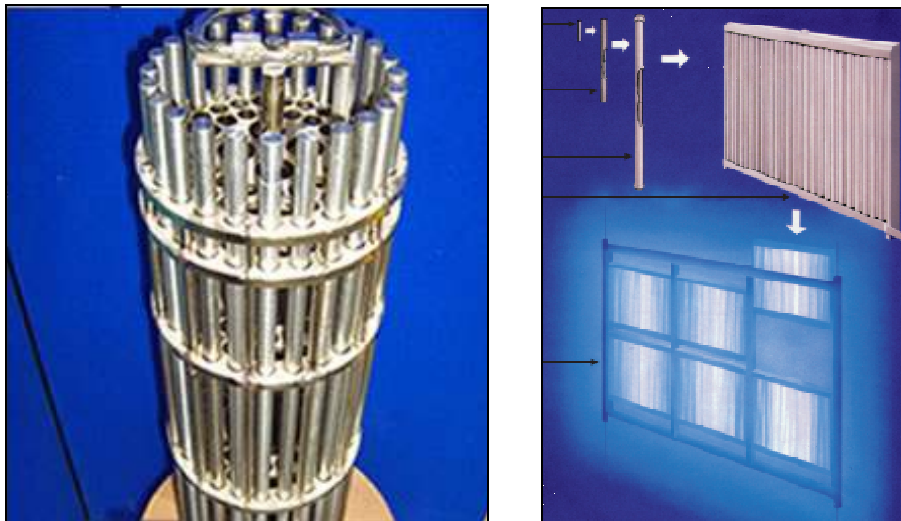


Figura 19. Fuentes selladas de Co^{60} (Rangel, 2008).

4.5.2 HACES DE ELECTRONES

Los electrones de alta energía están disponibles como radiación beta de átomos radioactivos o a través de su producción en aceleradores de alto voltaje. Los aceleradores de electrones producen “electrones energizados” con energía a un límite práctico de 10 MeV aproximadamente. Los electrones inciden en un haz y acelerados a través de un campo eléctrico de alto voltaje para proporcionar el flujo energético deseado (ASCE, 1992).

Los haces de electrones tienen diferentes geometrías de interacción comparadas con la radiación gamma. La radiación gamma es emitida unidireccionalmente y por esto, se requiere un eficiente uso de las fuentes gamma. En cambio, los electrones pueden ser enfocados direccionalmente como un haz y puede escanear horizontal y verticalmente. La limitada capacidad de penetración del haz de electrones limita el grosor del material a irradiar (ASCE, 1992).

En la Figura 20 se muestra un diagrama del proceso de irradiación de lodo por un solo lado.

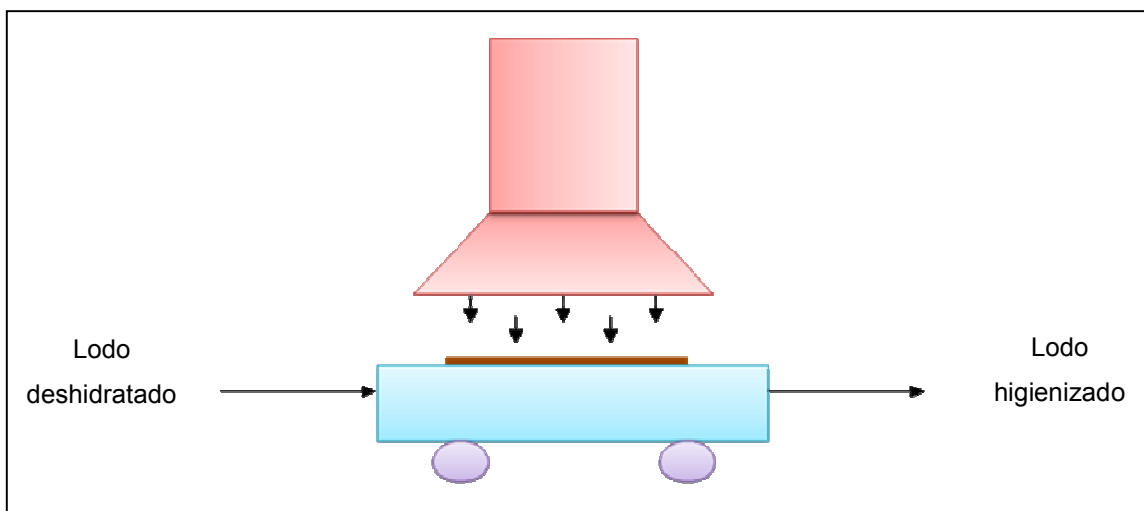


Figura 20. Diagrama de irradiación con haces de electrones (Rojas, 1999).

Existen dos tipos de aceleradores de alto voltaje usados comúnmente: electrostático (como el acelerador Van de Graaf) y oscilatorio (acelerador lineal). Los aceleradores electrostáticos tienen portadores de carga que proporcionan el alto voltaje deseado. Los aceleradores lineales tienen oscilaciones de poder que permiten lograr voltajes de muy alta frecuencia. Generalmente, un acelerador de electrones consiste en (ASCE, 1992):

- una fuente de electrones (usualmente un filamento incandescente);
- una zona de aceleración (campo eléctrico estático o de alta frecuencia) y
- un área de salida que da forma al haz.

El haz de electrones se hace oscilar (escaneado a través del producto) para proporcionar una dosis uniforme de irradiación (ASCE, 1992). En la Figura 21, se observa un sistema de irradiación de lodos propuesto por la EPA en 1979.

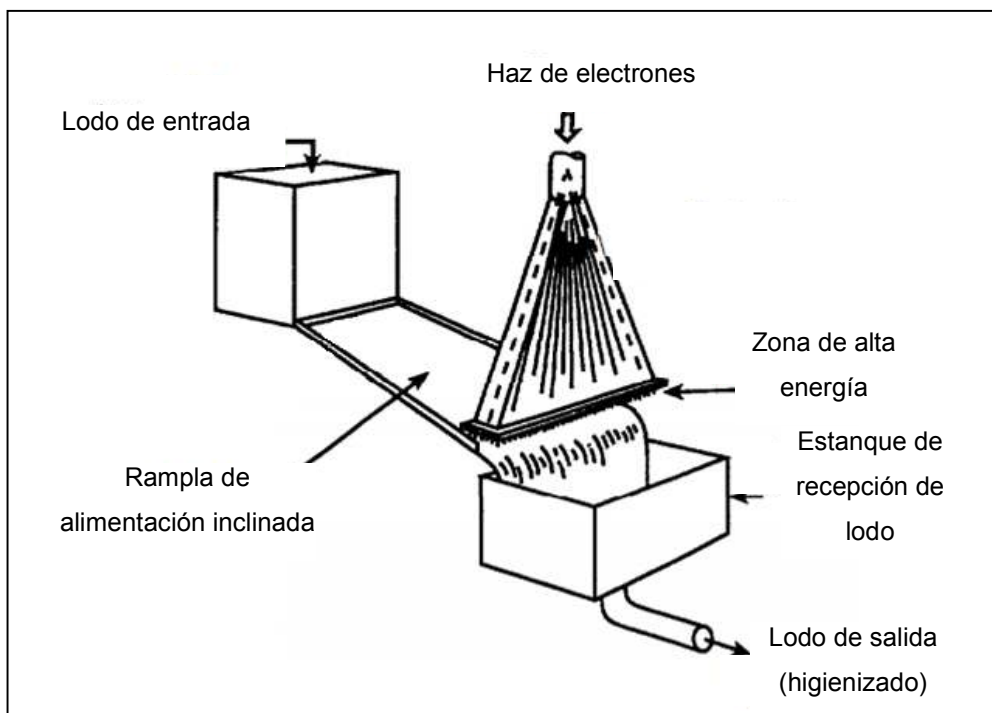


Figura 21. Sistema propuesto para irradiación con haces de electrones (US EPA, 2003).

Algunos ejemplos de irradiadores se presentan en las Figura 22 y Figura 23.



Figura 22. Fotografía de un acelerador de electrones (Rangel, 2008).



a)



b)

Figura 23. Componentes principales de un acelerador de electrones: a) Sección aceleradora; b) dispositivo de salida del haz y transportador (Rangel, 2008).

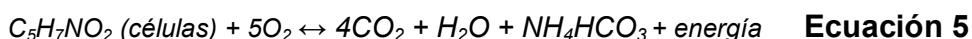
4.6 DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA

La digestión aeróbica de lodos provenientes de sistemas de lodos activados es un proceso endógeno de oxidación biológica que permite su estabilización, tal como se ilustra en la Ecuación 4 (Girovich, 1996; Polo, 2008).



Cuando se opera bajo ciertas condiciones (aislamiento térmico del digestor, aireación y mezcla adecuadas) se pueden alcanzar temperaturas dentro de un rango termofílico (45 - 65°C), en cuyo caso se trata de una digestión aeróbica termofílica (Polo, 2008).

Esta tecnología también se conoce como digestión aeróbica termofílica autotérmica o ATAD (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion) puesto que existe liberación energía durante la descomposición orgánica (Ecuación 5), por lo cual es capaz de autosatisfacer sus necesidades y no requiere una fuente externa de calor. Se liberan aproximadamente 15 kJ/kg DQO degradado, suficiente para higienizar los lodos y evitar el riesgo de reactivación de patógenos en condiciones de operación apropiadas (Girovich, 1996; Polo, 2008; Roberts, 2000; Turovskiy and Mathai, 2006).



En este caso, el amonio producido reacciona con el dióxido de carbono y agua para formar bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3) (Turovskiy and Mathai, 2006).

Durante la década de los 70s, se implementó este proceso en Europa y más tarde en Norteamérica, donde al año 2000 ya se encontraban operando 35 sistemas ATAD (25 en Estados Unidos y 10 en Canadá). Su éxito y aceptación se puede deber a que responde favorablemente ante cambios en las condiciones ambientales (Metcalf & Eddy, 2004; Roberts, 2000; Turovskiy and Mathai, 2006).

Un sistema ATAD típico cuenta con 2 reactores, tal como se muestra en la Figura 24. Los sistemas de un reactor pueden proporcionar una digestión del lodo similar a la obtenida con el sistema propuesto, pero no tiene el mismo efecto sobre los patógenos. Ambos reactores operan a diferentes temperaturas: 35 - 50°C en el primero y 50 - 65°C en el segundo. En la Figura 25 se presenta un reactor, generalmente cónico con fondo plano (Girovich, 1996).

Cabe mencionar que para reducir el contenido de patógenos hasta valores no detectables, el lodo debe permanecer entre 55 - 60°C durante 10 días (Metcalf & Eddy, 2004; von Sperling and Lemos, 2005).

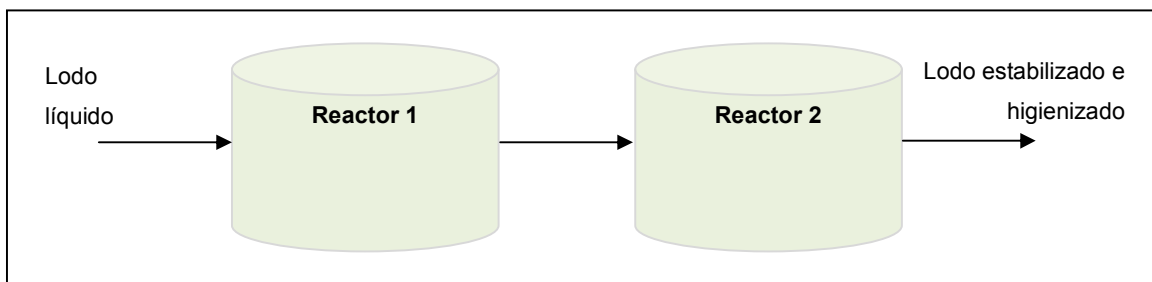


Figura 24. Sistema típico de digestión aeróbica termofílica autotérmica (Metcalf & Eddy, 2004).

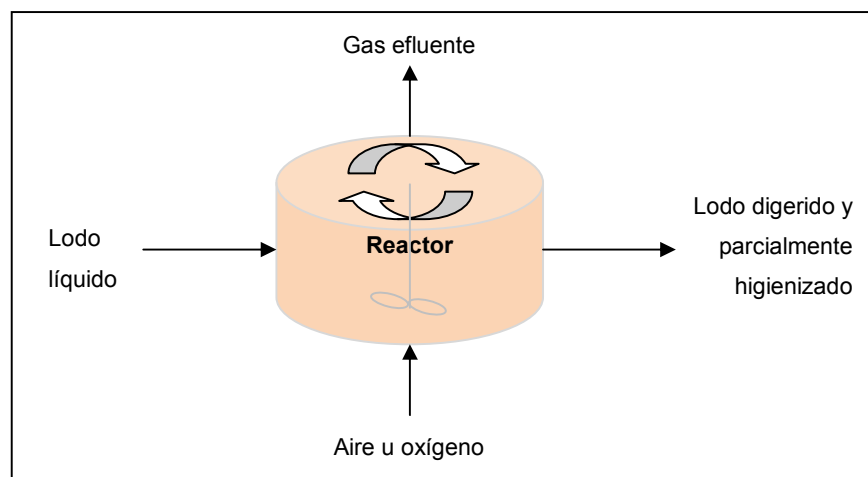


Figura 25. Esquema de reactor ATAD (Metcalf & Eddy, 2004; Turovskiy and Mathai, 2006).

Los lodos se deben alimentar en discontinuo una vez al día de la siguiente manera (Girovich, 1996):

- Detener la aireación y el mezclado y retirar los lodos del segundo reactor.
- Transferir los lodos desde el primer al segundo reactor.
- Alimentar los lodos al primer reactor y comenzar la aireación y mezclado.

Los factores de operación más importantes para el éxito del sistema son el mezclado y la aireación. Otro factor determinante es el aislamiento del reactor, puesto que se deben reducir al máximo las pérdidas de calor (Girovich, 1996; Roberts, 2000; von Sperling and Lemos, 2005).

Para la operación del sistema, la clave está en alimentar lodos con un contenido entre 6 - 4% y un mínimo de 2,5% de sólidos suspendidos volátiles. Cuando el contenido es menor a 4%, no se genera el calor suficiente para alcanzar las condiciones termofílicas. En cambio, si es mayor a 6%, no existe un mezclado o transferencia de oxígeno adecuado (Girovich, 1996).

El requerimiento teórico de oxígeno del proceso según la Ecuación 5 es de 1,42 kg O₂/kg de sólidos volátiles suspendidos (Girovich, 1996; Roš and Zupančič, 2002). Con respecto a la energía necesaria para la agitación, Metcalf & Eddy (2004) reportan que está en un rango entre 130 - 170 W/m³ de influente. Mientras que el calor producido se encuentra en un rango de 14.200 - 14.600 kJ/kg de O₂ (Girovich, 1996).

Adicionalmente a los equipos e insumos indicados, el sistema requiere de equipos para el control de espuma y olores (Girovich, 1996).

4.7 COMPOSTAJE

El compostaje es la descomposición aeróbica de la materia orgánica, donde los microorganismos la convierten en compuestos orgánicos más simples, agua, dióxido de carbono, nitrato y sulfato. Tales productos son resultado de las reacciones exotérmicas que permiten destruir la mayoría de los patógenos (Roberts, 2000).

Los lodos tienen un bajo contenido de nutrientes, principalmente carbono, por lo tanto requieren la adición de materiales carbonosos estructurantes como residuos de madera y jardín. Además, estos le aportan porosidad a la mezcla para permitir la circulación de aire (Roberts, 2000).

Los lodos activados tienen una relación carbono/nitrógeno (C:N) igual a 6:1. Para un compostaje eficiente dicha relación debe ser preferentemente igual a 30. Cuando esta relación es inferior a 20, se generan olores por la pérdida de nitrógeno como amoníaco; mientras que si es mayor a 40, el proceso es lento y existe una escasa generación de calor. Para un proceso eficiente, se requieren materiales cuya relación puede variar entre 50 - 500 (Forster, 2003; Girovich, 1996; Roberts, 2000).

Durante el proceso, se distinguen cuatro fases según las temperaturas alcanzadas (Figura 26): fase de adaptación de los microorganismos con temperaturas mesofílicas (20 - 45°C), fase termofílica (45 - 70°C) en la cual se alcanza la mayor temperatura, fase de enfriamiento y finalmente una fase de maduración, en las cuales las temperaturas descienden al rango mesofílico cuando la biodegradación se hace más lenta (ESSBIO S.A., 2008; Roberts, 2000).

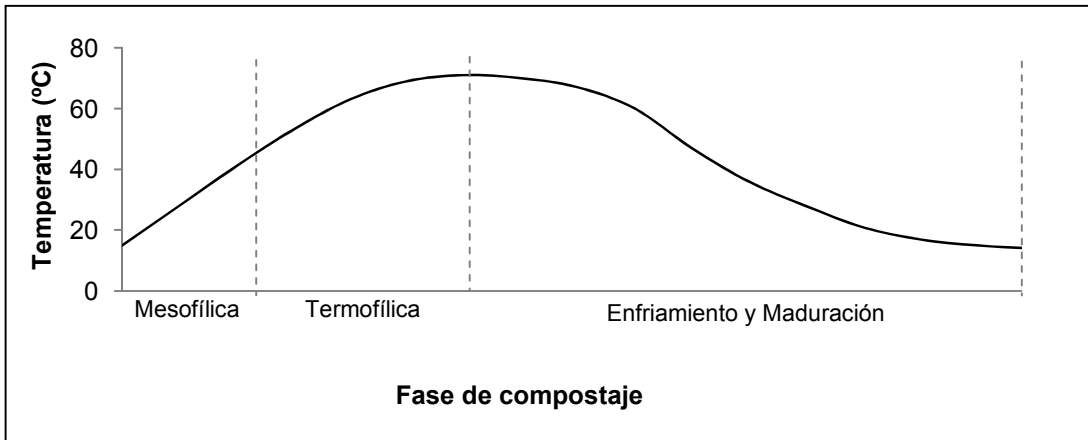


Figura 26. Evolución de temperaturas en proceso de compostaje (ESSBIO S.A., 2008).

Una forma de realizar el proceso es a través de pilas (Figura 27), a las cuales se les aporta aire mediante volteo mecánico. Además, permite que toda la mezcla permanezca un tiempo en el centro, donde predominan temperaturas mayores (ESSBIO S.A., 2008; Field *et al.*, 2004; Forster, 2003; Roberts, 2000).

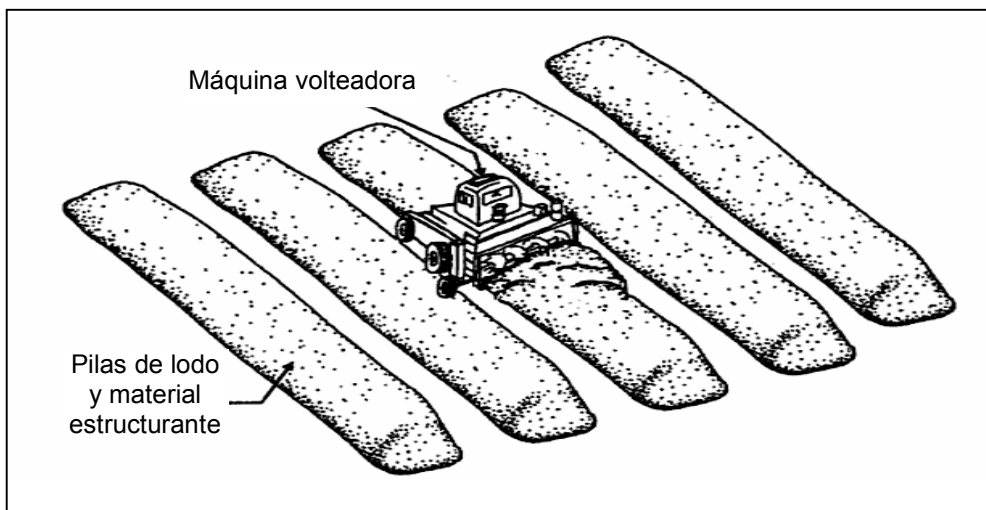


Figura 27. Sistema de compostaje en pilas de volteo (McFarland, 2001).

De acuerdo a von Sperling and de Lemos (2005), el proceso puede durar entre 50 y 90 días. Este tiempo de retención se puede reducir entre 21 a 28 días, siempre que se realice volteo al menos cinco veces cuando la temperatura de la pila sea mayor a 55°C (Metcalf & Eddy, 2004; Roberts, 2000).

Epstein (2002) señala que después de 14 días entre 55 - 60°C y humedad de 40 - 60%, el lodo ya no contiene patógenos. Sin embargo, no se trata de un proceso muy desarrollado en el Reino Unido (Forster, 2003).

El proceso se lleva a cabo en pilas de volteo, cuyos flujos típicos se muestran en la Figura 28.

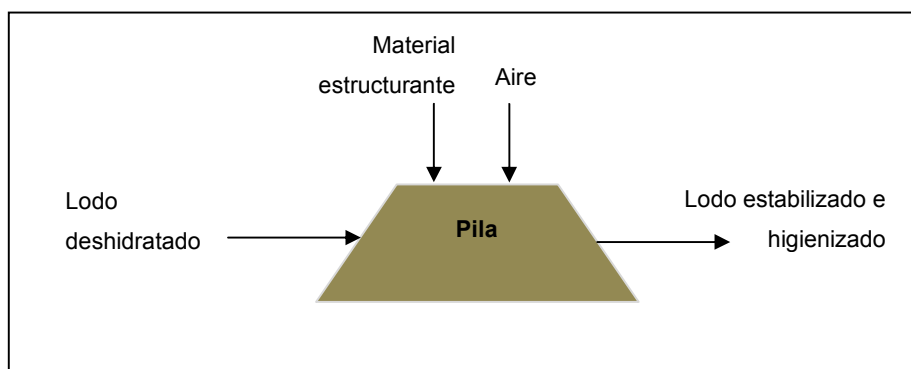


Figura 28. Sistema típico de compostaje (von Sperling and de Lemos, 2005).

4.8 SECADO SOLAR-BIOLÓGICO

El proceso está basado en aprovechar energías renovables, solar y biológica, con la finalidad de disminuir el volumen de los lodos y reducir su cantidad de microorganismos patógenos (Salihoglu *et al.*, 2006).

Los lodos absorben dos formas de calor; una proveniente del sol y la otra generada durante las etapas mesofílica y termofílica del crecimiento microbiano, en las cuales se alcanza una temperatura máxima de 60°. Cabe mencionar que en un sistema hermético se pueden mantener las temperaturas y por ende, no se requiere el suministro de calor adicional (ESSBIO S.A., 2008).

La acción de los microorganismos está determinada por condiciones adecuadas de humedad, relación carbono/nitrógeno y aireación. La aireación adquiere importancia debido a la tendencia a la compactación y baja porosidad del lodo. Por esto, las pilas de lodos deben ser volteadas con frecuencia para garantizar el ingreso de oxígeno e incorporar materiales de soporte para mejorar su porosidad (ESSBIO S.A., 2008).

Según Ghassemi (2009), la operación del sistema comienza cuando la radiación solar ingresa al galpón o reactor (Figura 29), donde la mayor parte de esa energía es absorbida por el lodo. Las características del reactor, determinados por los materiales de construcción y la hermeticidad, provocan el aumento de la temperatura del sistema lodo-aire. De esta forma, se genera la difusión del agua desde la superficie del lodo hacia el aire contenido en el reactor, según las diferencias de presiones de vapor. Si el contenido de agua en el aire aumenta, la presión de vapor también aumenta. Por lo tanto, para reducir la humedad del sistema y permitir que el lodo se continúe secando, se debe remover el aire hidratado (saturado) a través de un sistema de ventilación, como extractores.



Figura 29. Vistas de galpón de secado climatizado de lodos (ESSBIO S.A.).

Se ha reportado que se trata de una tecnología económica, ya que presenta bajos costos de operación para higienizar lodos con alto contenido de patógenos. Sin embargo, su dependencia de la radiación solar la convierte en una tecnología no aplicable a todas las zonas del país y además, su efectividad se reduce durante la noche (Cota y Ponce, 2008; ESSBIO S.A., 2008).

El secado solar-biológico se desarrolla de igual forma que el proceso de compostaje, así como se muestra en la Figura 30. Consiste en pilas de volteo a las cuales se les añade material estructurante y aire.

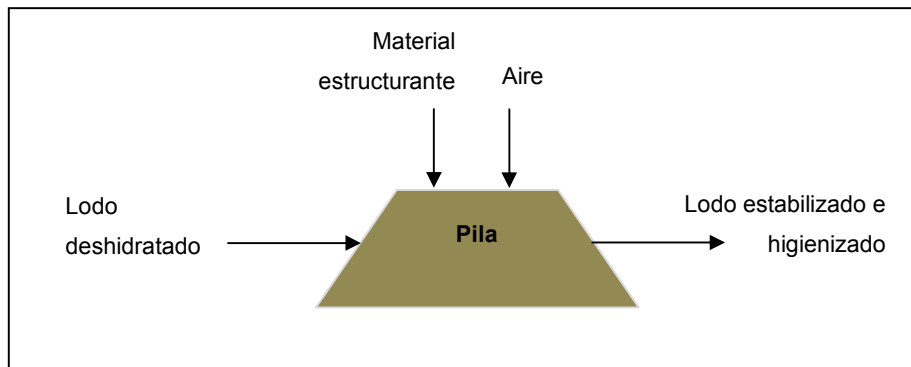


Figura 30. Sistema de secado solar-biológico (von Sperling and de Lemos, 2005).

5 METODOLOGÍA

En esta sección se describe la metodología aplicada durante el desarrollo de este trabajo, la cual se llevó a cabo como se indica a continuación, según los objetivos específicos perseguidos.

5.1 *Estudio de aspectos técnicos relacionados con las operaciones unitarias y desarrollo de diagramas de flujo de los procesos de higienización de lodos*

Los procesos de higienización de lodos estudiados fueron: tratamiento alcalino, secado térmico, pasteurización, tratamiento con calor, irradiación con rayos gamma, irradiación con haces de electrones, digestión aeróbica termofílica, compostaje y secado solar biológico.

Para simplificar las comparaciones, los procesos fueron clasificados según la naturaleza del factor responsable de la higienización, de la forma que se indica en la Tabla 17.

Tabla 17. Clasificación de los procesos de higienización.

Tipo	Proceso
Químico	Tratamiento alcalino
Térmico	Secado térmico
	Pasteurización
	Tratamiento con calor
Físico	Irradiación rayos gamma
	Irradiación haces de electrones
Biológico	Digestión aeróbica termofílica
	Compostaje
Renovable	Secado solar-biológico

Fuente: Elaboración propia.

A partir del estudio de los aspectos técnicos relacionados con el desarrollo de cada uno de los procesos, se establecieron las diferencias en la implementación y condiciones de operación de cada uno de los procesos. Los procesos están conformados por una o varias operaciones unitarias. Una operación unitaria se puede realizar en varias etapas (CTPS, 2005). De este modo, se desarrollaron diagramas en base a propuestas o sistemas que ya se encuentran operando para mostrar las operaciones unitarias que componen el proceso y sus interrelaciones. Los resultados de esta etapa están contemplados en el Capítulo 4.

5.2 Identificación y cuantificación de entradas y salidas de los procesos de higienización de lodos

Considerando que todo proceso industrial y en esta tesis, toda operación unitaria, está caracterizado por el uso de insumos (materias primas, agua, energía, entre otros) (CTPS, 2005). Además, para la operación de los procesos se emplearon equipamiento y maquinaria especializada.

Todos los insumos que ingresan a un proceso son transformados a productos o residuos. El balance de masa es una verificación de la igualdad comparativa de masas entre entradas y salidas (CTPS, 2005). En los casos en que no se pudieron identificar todas las salidas, se contempló una diferencia de subproductos.

Por lo tanto, si M es la masa:

$$M_{\text{entrada}} = M_{\text{insumo 1}} + M_{\text{insumo 2}} + \dots + M_{\text{insumo n}}$$

$$M_{\text{salida}} = M_{\text{producto}} + M_{\text{subproducto}}$$

En el balance de masa,

$$M_{\text{entrada}} = M_{\text{salida}}$$

Luego, todos los balances de masa de los procesos de higienización de lodos se elaboraron del modo que se muestra en la Figura 31.

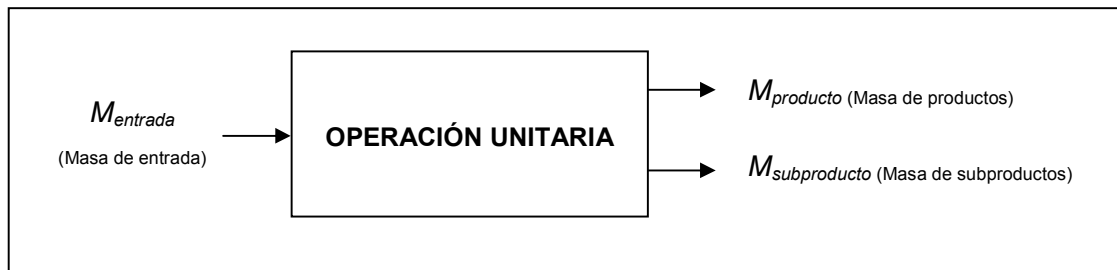


Figura 31. Entradas y salidas de masa en una operación unitaria (CTPS, 2005).

Por otra parte, los balances de energía se determinaron en base a los consumos de combustible, electricidad del equipamiento y maquinaria considerada en el proceso, los cuales se calcularon considerando la potencia de consumo y el tiempo de operación mensual. En muchos casos, esto se realizó en base al mejor escenario, es decir, se asumió un factor de potencia de consumo igual a 1, lo que se traduce en menores costos energéticos (Schneider Electric, 2008). Los balances energéticos se elaboraron de acuerdo a la Figura 32.

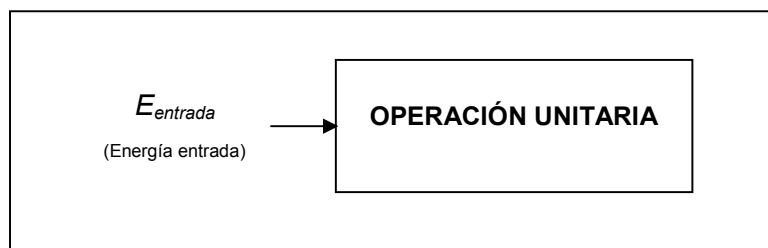


Figura 32. Entradas de energía en una operación unitaria (CTPS, 2005).

En esta etapa se desarrollaron los balances de masa y energía a partir de una base de cálculo de **1 Tonelada de lodo al mes**.

5.3 *Análisis de algunos aspectos económicos de los procesos de higienización de lodos en estudio*

Una vez conocidos los costos de los equipos y máquinas requeridas, provenientes de catálogos y cotizaciones, y cuantificados los consumos mensuales de cada uno de los procesos, se calcularon los costos de inversión y los costos anuales de operación.

Los costos de inversión se determinaron considerando los costos y cantidad de equipos que forman parte directa del proceso de higienización de lodos, sin considerar la infraestructura para su desarrollo.

Los costos de operación fueron determinados en base a los consumos anuales y los precios unitarios respectivos de cada elemento de entrada al proceso (insumos, combustible y electricidad). Para el caso del combustible, se empleó el precio nudo del petróleo diesel para VIII Región reportado por la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2006). Mientras que, para el agua y las fuentes de Co^{60} se utilizaron los precios unitarios manejados por Rojas (1999). También se empleó el precio de la electricidad reportado por Rojas (1999), que coincide con el precio nudo del Sistema Interconectado Central (SIC) para Concepción entregado por la CNE (2007). En el caso de los materiales estructurantes (chip de álamo y aserrín) y la cal se utilizaron los precios manejados por ESSBIO S.A. durante el año 2009 y SODIMAC S.A., respectivamente.

Luego, todos precios fueron actualizados hasta marzo de 2010 según la variación del IPC (Índice de Precios al Consumidor), los cuales se muestran en la Tabla 18. Este cálculo se realizó a través de un modelo (calculadora) con que cuenta la página web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) basada en la siguiente expresión:

$$\text{Variación porcentual} = \left[\left(\frac{\text{Índice de marzo de 2010}}{\text{Índice de la fecha reportada}} \right) \times 100 \right] - 100$$

Tabla 18. Costos de variables de operación.

Ítem	Unidad	Fecha (Mes/Año)	Precio unitario (\$)	Precio unitario actualizado (\$)
Agua	m ³	12/1999	150	210
Combustible	L	12/2005	402	472
Electricidad	kW-h	12/1999	32	45
Fuente Co ⁶⁰	Ci	12/1999	889	1.243
Cal (viva)	kg	-	390*	390
Chip de álamo	m ³	-	2.200**	2.200
Aserrín	m ³	-	7.000**	7.000

* Precio indicado en Página web de SODIMAC S.A.

** Precios entregados por ESSBIO S.A. de Proyecto de Secado de lodos con Energías Alternativas
Fuente: CNE, 2006; CNE, 2007; Rojas, 1999.

Finalmente, a partir de los resultados anteriores se calculó el Valor Actual de Costos (VAC) de los procesos de higienización de lodos. Este indicador permite comparar alternativas de proyectos que tienen iguales beneficios. Por ejemplo, para efectos de este estudio, los beneficios son similares al vender *1 Ton de lodo higienizado* cualquiera haya sido su tecnología de eliminación o reducción de patógenos. Por lo tanto, sólo existen diferencias de los costos entre un proceso y otro. La mejor alternativa corresponde a aquella que presenta un menor VAC, es decir, la que consume menos recursos (MIDEPLAN, 2002).

El VAC se calculó mediante la siguiente expresión matemática:

$$VAC = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Donde, “r” es la tasa de descuento, “n” es el número de periodos de tiempo a considerar en el análisis y C_i son los costos del periodo “i”. En este estudio se emplearon una tasa de descuento de 10% y un horizonte de evaluación de 10 años.

6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de los aspectos técnicos, para complementar los antecedentes entregados en el Capítulo 4, y económicos de cada uno de los procesos de higienización descritos en la Tabla 8 y una tecnología adicional propuesta por la empresa ESSBIO S.A., el secado solar-biológico de los lodos.

6.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE PROCESOS DE HIGIENIZACIÓN

6.1.1 TRATAMIENTO ALCALINO

Según las condiciones deseadas y a las propiedades del lodo deshidratado que ingresa al proceso, principalmente por su tendencia a adherirse a las paredes de los equipos, se recomienda el uso de mezcladores de alta velocidad (Wurtz, 1981).

Para este trabajo, se consideró el uso de dos unidades de la compañía Roediger Pittsburgh:

- Módulo de postratamiento con cal: Sistema para transportar el lodo y mezclarlo con la cal (Figura 33).
- Sistema de almacenamiento y alimentación de cal (Figura 34).

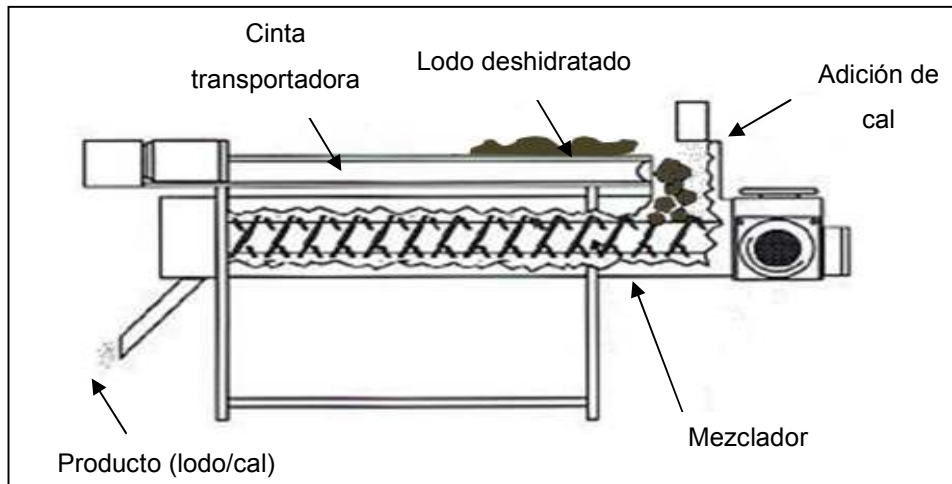


Figura 33. Módulo de postratamiento con cal Modelo RM 150 (Compañía Roediger Pittsburgh).



Figura 34. Sistema de almacenamiento y alimentación de cal Modelo LFS 600 (Compañía Roediger Pittsburgh).

Balance de masa

En base a la dosis de cal requerida y considerando que el volumen del producto obtenido aumenta entre un 15 - 50%, debido a que la adición de cal promueve la

precipitación química por lo que se crean más sólidos (Cheremisinoff y Cheremisinoff, 1995). Finalmente, el lodo debe secarse al aire hasta obtener un contenido de sólidos mínimo de 50%, tal como se muestra en la Figura 35.

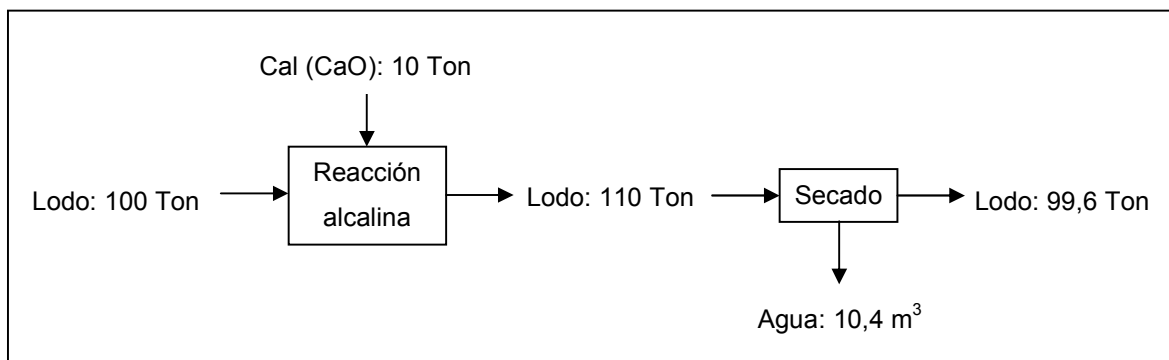


Figura 35. Balance mensual de masa tratamiento alcalino (Elaboración propia).

Balance de energía

Para el balance de energía fueron requeridas las especificaciones y requerimientos energéticos de los equipos incluidos en el proceso, los cuales se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Especificaciones y requerimientos de los equipos Roedinger Pittsburgh.

Equipo	Modelo	Potencia (kW)
Módulo de postratamiento con cal		
• Correa transportadora	RM 150	0,6
• Mezclador		2,3
Sistema de almacenamiento y alimentación de cal		
• Tornillo elevador	LFS 600	0,6
• Husillo horizontal		0,75
• Agitador		0,4

Fuente: Compañía Roedinger Pittsburgh.

De acuerdo a las capacidades de tratamiento de cada equipo, se determinó que el módulo de postratamiento con cal (3,63 Ton/h) debe operarse por 30,3 h y el sistema de almacenamiento y alimentación de cal (0,29 Ton/h) por 35,5 h. Por lo tanto, en la Figura 36 se presenta el balance resultante.

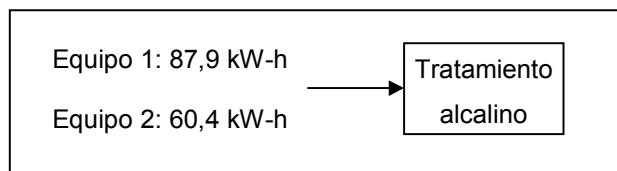


Figura 36. Balance mensual de energía tratamiento alcalino (Elaboración propia).

6.1.2 SECADO TÉRMICO

Se consideró un sistema de secado térmico indirecto que permite obtener lodos de clase A. En él se incluyen una unidad de secado, una tolva de lodo húmedo, una unidad de alimentación de lodo húmedo y una unidad de descarga de lodos secos, señalados en la Figura 37 y presentados en la Figura 38.

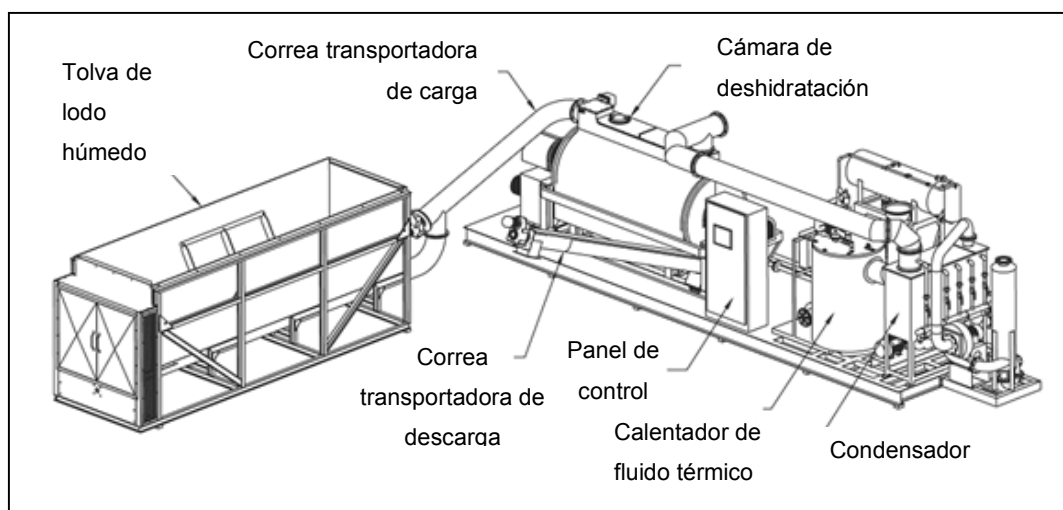


Figura 37. Diagrama del sistema de secado térmico Fenix™ (Compañía Fenton).



Figura 38. Sistema de secado térmico Fenix™ (Compañía Fenton).

Balance de masa

Considerando que el sistema contemplado permite reducir en un 80% el peso de los sólidos, el balance resultante se presenta en la Figura 39.

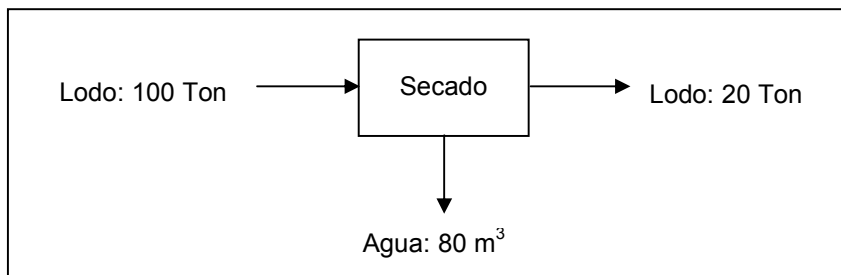


Figura 39. Balance mensual de masa secado térmico (Elaboración propia).

Balance de energía

El consumo de energía en el secado térmico depende directamente del contenido de agua de los lodos. Por lo tanto, se requiere un tratamiento mecánico previo para deshidratar el lodo en un mínimo de 18 - 20% de sólidos seco (Flaga, 2005).

Este proceso requiere grandes cantidades de energía, en la Tabla 20 se muestra los consumos estimados de electricidad y combustible reportados por especialistas franceses para lodo deshidratado (Flaga, 2005).

Tabla 20. Consumo de factores energéticos para secado de lodos.

Tipo de energético	Unidades	Valor
Combustible	L/Ton de MS	300
Electricidad	kW-h/Ton de MS	50

Fuente: Flaga, 2005.

En la Figura 40 se presenta el balance energético resultante.

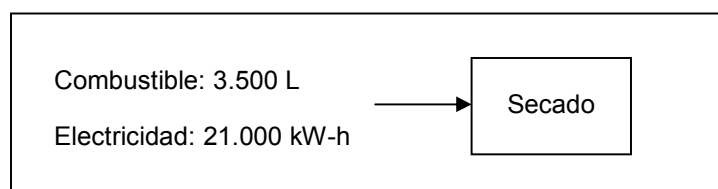


Figura 40. Balance mensual de energía secado térmico (Elaboración propia).

6.1.3 PASTEURIZACIÓN

En este proceso se consideró un sistema similar al implementado en Suiza. Dicha instalación dedicada a la prepasteurización de lodos espesados (sin tratar), permite tratar flujos de 5 - 20 m³ de lodos al día. Este sistema se muestra en la Figura 41, a partir del cual se reportó que para un flujo de 4 m³/día existen los siguientes consumos energéticos: 2,5 m³/m³ de lodo de combustible y 5 kW-h/m³ de lodo de electricidad (Bruce *et al.*, 1983).

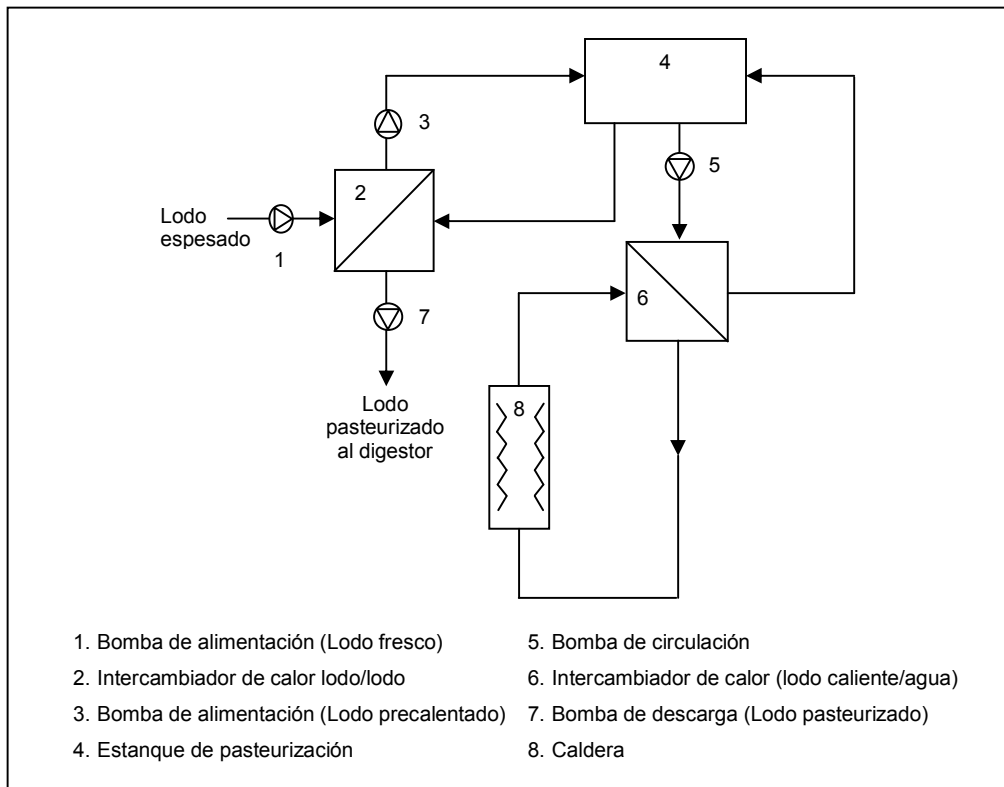


Figura 41. Sistema de prepasteurización (Bruce *et al.*, 1983).

Balance de energía

En la Figura 42 se muestra el balance de energía en base a los datos reportados.

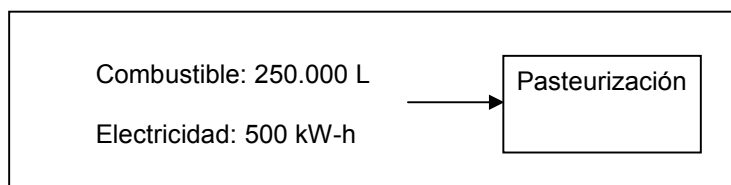


Figura 42. Balance mensual de energía para pasteurización (Elaboración propia).

6.1.4 IRRADIACIÓN CON RAYOS GAMMA

En este caso se consideró un irradiador industrial de MDS Nordion indicado en el trabajo de Rojas (1999). Este sistema funciona con una fuente de geometría plana rectangular formada por lápices de Co^{60} , con una capacidad para contener hasta 3 MCi. Cuando el lodo absorbe 10 kGy, dosis requerida para higienizar lodos deshidratados, su capacidad de procesamiento puede llegar a ser de 134 toneladas diarias (Bruce *et al.*, 1983; Vázquez, 2006).

En la Figura 43 se presenta un esquema del sistema de irradiación.

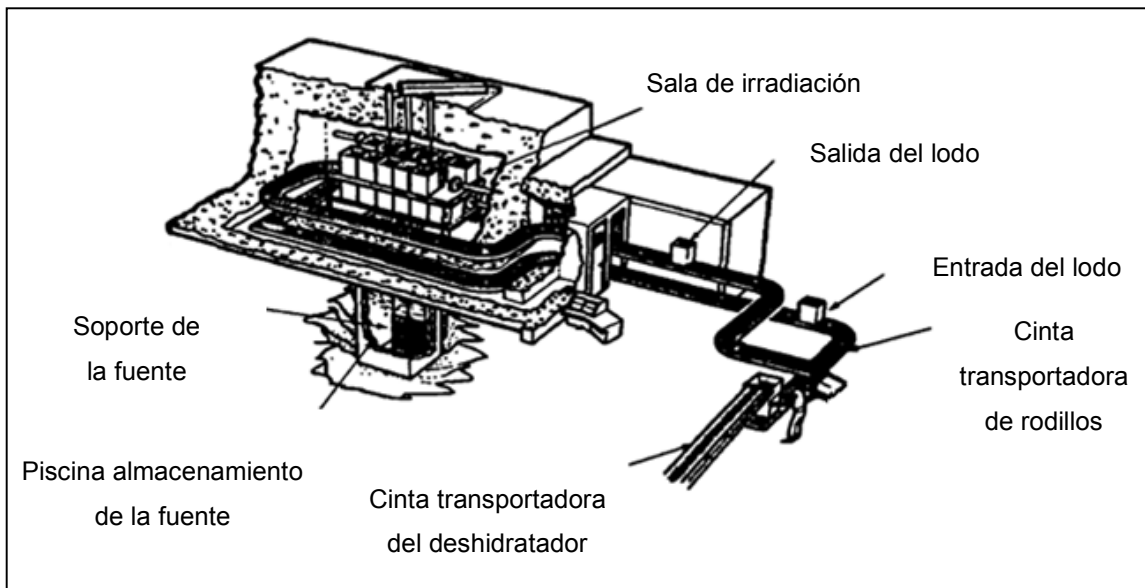


Figura 43. Sistema de higienización de lodos con rayos gamma (Swinwood *et al.*, 1994).

Balace de masa

En la Figura 44 se presenta el balance resultante, en base a los resultados entregados por Rojas (1999), donde se observa que existe un consumo de agua para el enfriamiento del sistema.

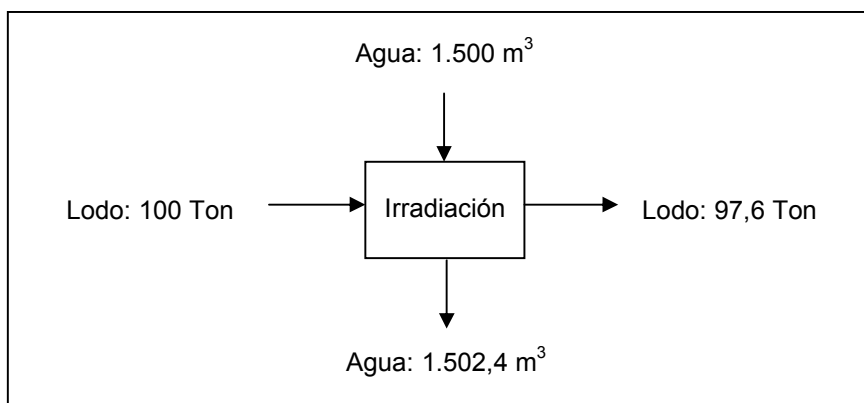


Figura 44. Balance mensual de masa para irradiación gamma (Elaboración propia).

Balance de energía

Parte de la energía del proceso es aportada por la fuente radioactiva, cuya carga inicial es de 3 M Ci y cada cierto tiempo se debe reponer cierta cantidad debido a la inactivación por decaimiento. Se estimó que dicha reposición es de 12,5% anual, equivalente a 375.000 Ci. Además, en el balance presentado en la Figura 45 se contemplan los requerimientos energéticos para el funcionamiento del irradiador, con potencia de 90 kW (incluye equipo extractor y compresor) (Rojas, 1999).

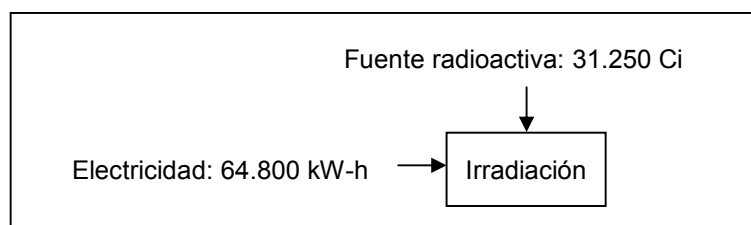


Figura 45. Balance mensual de energía para irradiación gamma (Elaboración propia).

6.1.5 IRRADIACIÓN CON HACES DE ELECTRONES

En este caso, se escogió un acelerador lineal de electrones: marca AECL y modelo IMPELA de 10 MeV y una potencia de 100 kW. Según Rojas (1999), con dicha energía es posible irradiar un espesor máximo de 5 cm de lodo con 80% de humedad, pero se aconseja que sean 4 cm.

Balance de masa

En la Figura 46 se presenta el balance resultante con su respectivo consumo de agua para enfriamiento.

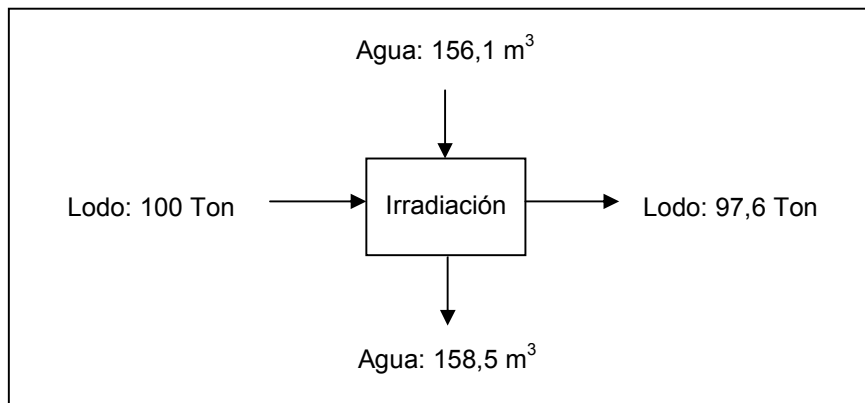


Figura 46. Balance mensual de masa para irradiación con haces de electrones (Elaboración propia).

Balance de energía

El balance se muestra en la Figura 47, considerando que el acelerador tiene una capacidad de tratamiento de 19,8 Ton/h, con lo cual es posible suponer que su operación mensual se restringe a 5,1 horas.

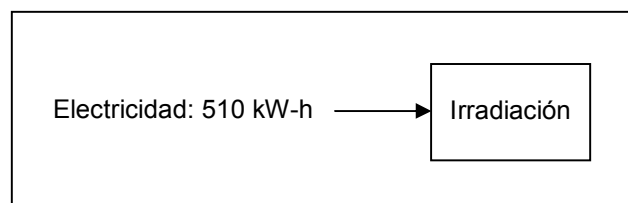


Figura 47. Balance mensual de energía para irradiación con haces de electrones (Elaboración propia).

6.1.6 DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA

En la Figura 48 se muestra un sistema ATAD alemán de dos etapas presentado por Layden (2008).

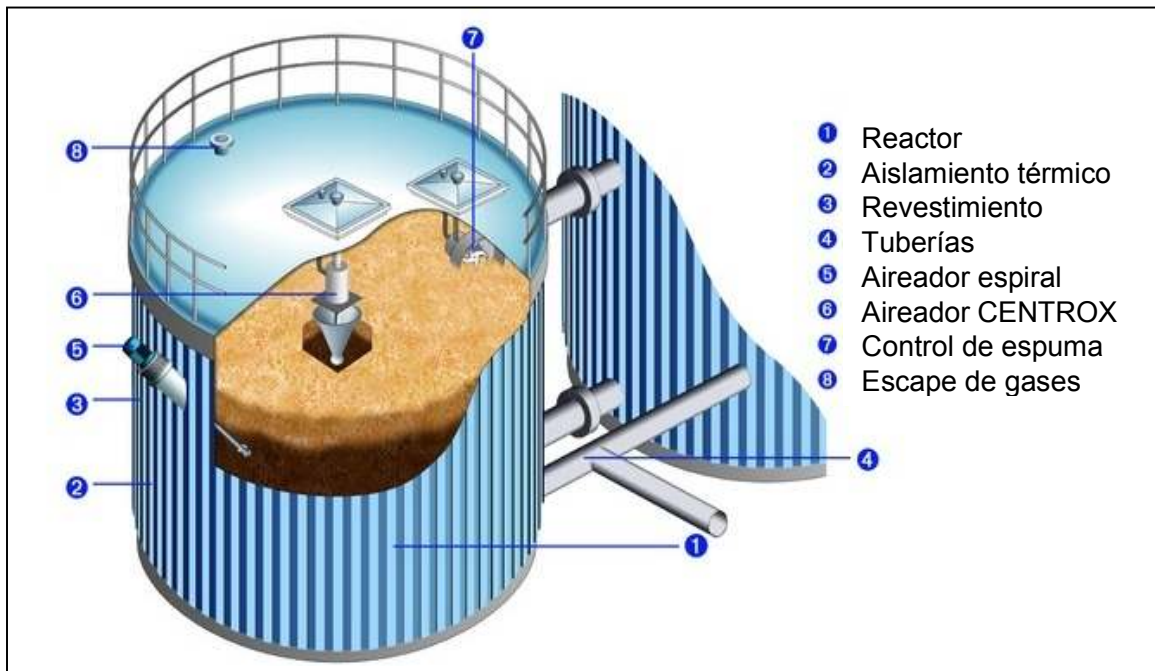


Figura 48. Sistema ATAD típico FUCHS (Layden, 2008).

Balance de masa

En la Figura 49 se presenta una estimación del balance, considerando que los lodos líquidos tienen un contenido de sólidos volátiles de 88% de ST (Tabla 1) y su contenido de humedad es de 97% del peso de la mezcla. De esta forma, se alimentan 2,64 Ton de SV (2,64% de SV) y se requieren teóricamente 3,8 Ton de O₂, lo que equivale a 18,1 Ton de aire. Según experiencias desarrolladas en España, el proceso permite reducir el volumen de los lodos en un 36%.

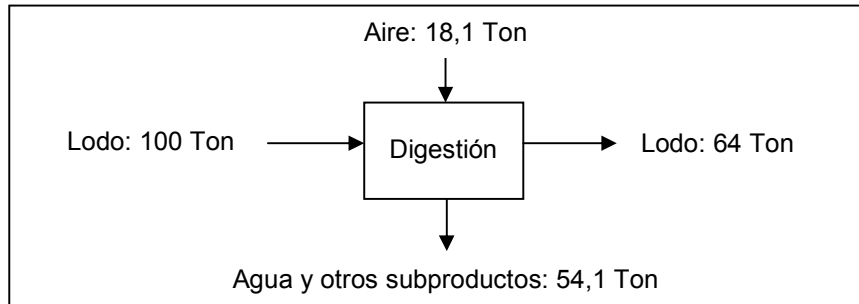


Figura 49. Balance mensual de masa para digestión aeróbica termofílica (Elaboración propia).

Balance de energía

Considerando que se consumen 150 W/m^3 alimentado, el balance del proceso es el presentado en la Figura 50.

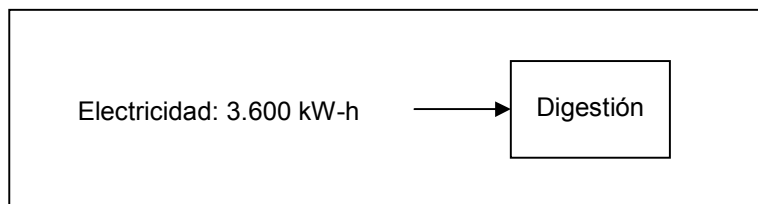


Figura 50. Balance mensual de energía para digestión aeróbica termofílica (Elaboración propia).

6.1.7 COMPOSTAJE

De acuerdo a los insumos y equipamiento con que cuenta ESSBIO S.A., los materiales estructurantes considerados en el proceso son chip de álamo y aserrín, presentados en la Figura 51. Una vez finalizado el proceso, estos materiales deben ser separados de la mezcla, por lo que se consideró el uso de una máquina tamizadora (trómel de cribado) que se muestra en la Figura 52.

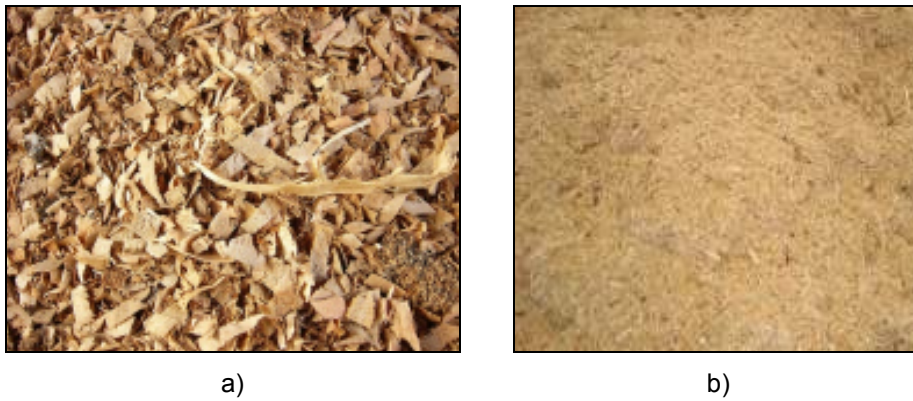


Figura 51. Materiales estructurantes proceso de compostaje: a) Chip de álamo; b) Aserrín.



Figura 52. Máquina tamizadora Joker (Compañía Komptech).

El aire es suministrado al proceso mediante el volteo de las pilas, cuya labor se debe realizar con una máquina volteadora (Figura 53).



Figura 53. Máquina volteadora 14.28 (Compañía Backhus).

Balance de masa

Para la estimación del balance de masa que se muestra en la Figura 54, se considera el desarrollo de 7 pilas de $58,3 \text{ m}^3$ cada una, cuyas dimensiones son 18 m de largo, 2,7 m de ancho y 1,2 m de alto.

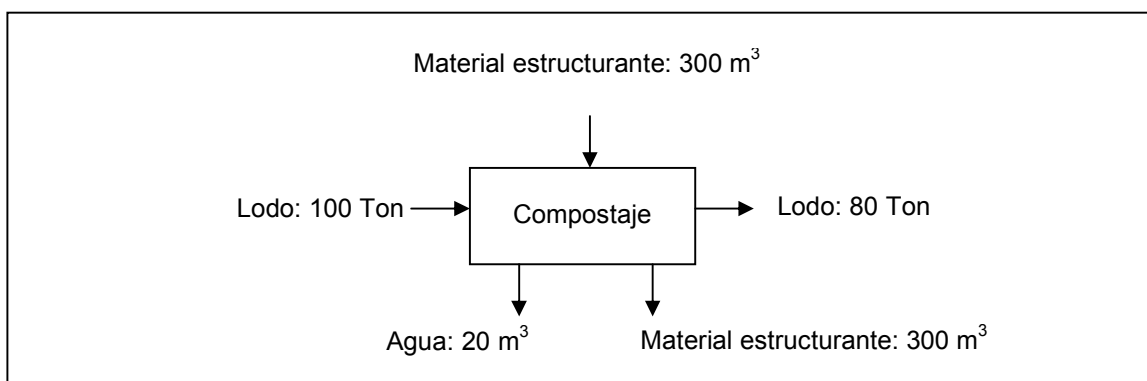


Figura 54. Balance mensual de masa para compostaje (Elaboración propia).

Balance de energía

Los rendimientos de cada una de las máquinas volteadora (Anexo 1) y tamizadora (Anexo 2) son de $500 \text{ m}^3/\text{h}$ y $35 \text{ m}^3/\text{h}$, y sus potencias de 23 kW y 16,5 kW, respectivamente. Según la Tabla 8, la pila se debe voltear a lo menos 5 veces, lo que representa un total de 2.000 m^3 a tratar. En el caso de la tamizadora, se considera su uso una vez al mes para separar los componentes de la mezcla obtenida al final del proceso. En la Figura 55 se presenta una estimación del balance de energía para este proceso.

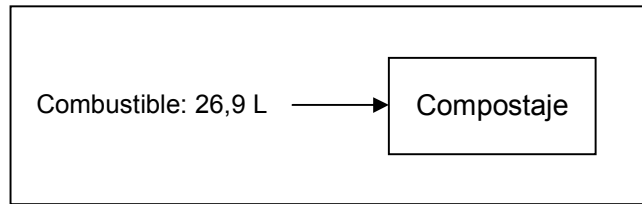


Figura 55. Balance mensual de energía para compostaje (Elaboración propia).

6.1.8 SECADO SOLAR-BIOLÓGICO

Debido a su similitud con el proceso de compostaje, este sistema contempla el uso de los mismos insumos y maquinarias: chip de álamo, aserrín, volteadora y tamizadora. Además, se consideró el uso de extractores de aire (Figura 56).



Figura 56. Extractor de aire S&P Xmh (Easy S.A.).

Balance de masa

Al igual que en el compostaje, en este proceso se requieren formar 7 pilas de 58,3 de 58,3 m³ cada una, cuyas dimensiones son 18 m de largo, 2,7 m de ancho y 1,2 m de alto. Por lo tanto, el balance estimado se presenta en la Figura 57.

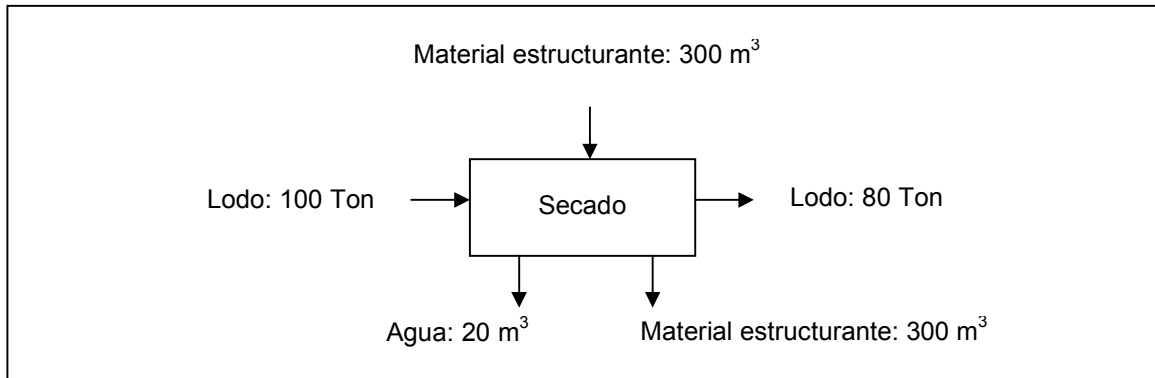


Figura 57. Balance mensual de masa para secado solar-biológico (Elaboración propia).

Balance de energía

En este caso, ESSBIO S.A. (2008) propone que el volteo se realice 2 veces a la semana, lo que se traduce en 9 volteos al mes y 3.600 m³ a tratar. Se establece el uso de 2 extractores de aire, cada uno con un rendimiento de 500 m³/h, una potencia de 65 W y operado durante 3 horas al día. La tamizadora se usa del mismo modo que en el compostaje. La estimación del balance energético del proceso se muestra en la Figura 58.

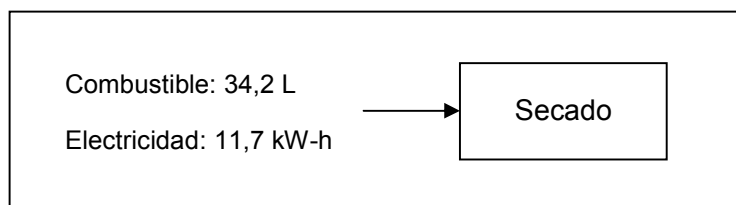


Figura 58. Balance mensual de energía para secado solar-biológico (Elaboración propia).

6.2 ASPECTOS ECONÓMICOS DE PROCESOS DE HIGIENIZACIÓN

A continuación se presentan los costos de inversión y los costos anuales de operación, en el caso que se hayan encontrado, de los procesos de higienización. Además, se entrega el Valor Actual de Costos para algunos procesos como: tratamiento alcalino, secado térmico, pasteurización, irradiación con rayos gamma, irradiación con haces de electrones, digestión aeróbica termofílica, compostaje y secado solar-biológico.

6.2.1 TRATAMIENTO ALCALINO

Costos de inversión

Los costos de inversión asociados al proceso de tratamiento alcalino se estimaron a partir de un estudio tarifario realizado a la PTAS Los Trapenses de Aguas Manquehue S.A. actualizado a noviembre de 2001 y se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Costos de inversión para tratamiento alcalino.

Ítem	Costo total (\$)
Mezclador cal-lodos	16.879.951
Cinta transportadora	4.568.427
Dosificador de cal	5.652.461
Tolva de carguío de cal	3.066.266
Total Inversión	\$ 30.167.105

Fuente: SISS, 2005.

Costos de operación

Mientras que en la Tabla 22 se incluyen los costos anuales de operación, los cuales ascienden a 46,9 millones de pesos (99,8% de cal y 0,2% de electricidad).

Tabla 22. Costos de operación para tratamiento alcalino.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Cal	Ton	120	46.800.000
Electricidad	kW-h	1.779,6	80.082
Total Operación			\$ 46.880.082

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo un VAC de \$334.937.892

6.2.2 SECADO TÉRMICO

Costos de inversión

Se encontró que el secado térmico tiene un costo de inversión de \$5.731.920.

Costos de operación

Los costos de operación corresponden a 31,2 millones de pesos (63,4% de combustible y 36,4% de electricidad), cuyo detalle se indica en la Tabla 23.

Tabla 23. Costos de operación para secado térmico.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Combustible	L	42.000	19.824.000
Electricidad	kW-h	252.000	11.340.000
Total Operación			\$ 31.164.000

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, se obtuvo un VAC de \$222.653.289.

6.2.3 PASTEURIZACIÓN

Costos de inversión

No se encontró información relacionada con el costo de inversión asociado a un proceso de pasteurización de lodos.

Costos de operación

En base a las experiencias desarrolladas en Suiza, se determinaron los costos anuales de operación de combustible y electricidad (99,98 y 0,02%, respectivamente) para el proceso, presentados en la Tabla 24.

Tabla 24. Costos de operación para pasteurización.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Combustible	L	3.000.000	1.416.000.000
Electricidad	kW-h	6.000	270.000
Total Operación			\$ 1.416.270.000

Fuente: Elaboración propia.

A partir de dichos resultados, se obtuvo un VAC equivalente a \$10.118.636.055.

6.2.4 TRATAMIENTO CON CALOR

Costos de inversión

El tratamiento con calor a través de un sistema Porteus tiene un costo de inversión de \$6.949.953.

Costos de operación

No se obtuvieron datos referidos a la operación del proceso, por lo cual no se determinaron los costos anuales ni el VAC.

6.2.5 IRRADIACIÓN CON RAYOS GAMMA

Costos de inversión

De acuerdo a lo reportado por Rojas (1999), los costos de inversión suman un total de \$4.766.809.500, cuyo detalle se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25. Costos de inversión para irradiación con rayos gamma.

Ítem	Costo total (\$)
Irradiador	1.037.809.500
Carga inicial Co ⁶⁰	3.729.000.000
Total Inversión	\$ 4.766.809.500

Fuente: Elaboración propia.

Costos de operación

Por otro lado, los costos de operación se estiman en 504,9 millones de pesos indicados en la Tabla 26. La reposición de Co⁶⁰ corresponde a un 92,3%, el consumo de agua a 0,8% y electricidad a 6,9%.

Tabla 26. Costos de operación para irradiación con rayos gamma.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Reposición de Co ⁶⁰	Ci	375.000	466.125.000
Agua	m ³	18.000	3.780.000
Electricidad	kW-h	777.600	34.992.000
Total Operación			\$ 504.897.000

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo un VAC de \$3.607.270.498.

6.2.6 IRRADIACIÓN CON HACES DE ELECTRONES

Costos de inversión

Los costos de inversión del proceso están determinados sólo por el equipo acelerador de electrones. Según lo señalado por Rojas (1999), tiene un costo de \$2.273.546.835.

Costos de operación

Mientras que los costos de operación presentados en la Tabla 27 corresponden a un total de 668,8 mil pesos al año, de los cuales un 58,8% se deben al consumo de agua y el 41,2% restante a electricidad.

Tabla 27. Costos de operación para irradiación con haces de electrones.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Agua	m ³	1.873	393.372
Electricidad	kW-h	6.120	275.400
Total Operación			\$ 668.772

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados, el VAC es de \$4.778.086.

6.2.7 DIGESTIÓN AERÓBICA TERMOFÍLICA

Costos de inversión

Para este proceso no se cuenta con sus costos de inversión.

Costos de operación

Sin embargo, durante su operación se consideran los costos indicados en la Tabla 28. El proceso permite realizar la aireación del sistema con aire, por lo que los costos anuales sólo están referidos al requerimiento energético.

Tabla 28. Costos de operación para digestión aeróbica termofílica.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Oxígeno	Ton	45,6	ND
Electricidad	kW-h	43.200	1.944.000
Total Operación			\$ 1.944.000

ND: No determinado

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo un VAC de \$13.889.038.

6.2.8 COMPOSTAJE

Costos de inversión

Los costos de inversión están representados por la adquisición de las máquinas volteadora y tamizadora. En la Tabla 29 se presentan los costos de cada una de ellas y cuyo total corresponde a 89,6 millones de pesos.

Tabla 29. Costos de inversión para compostaje.

Ítem	Costo total (\$)
Volteadora	32.000.000
Tamizadora	57.600.000
Total Inversión	\$ 89.600.000

Fuente: Elaboración propia.

Costos de operación

Mientras que los costos de operación se estiman en 13,9 millones de pesos, tal como se muestra en la Tabla 30. El 98,9% de dicho valor corresponde al requerimiento de materiales estructurantes y 1,1% restante a combustible.

Tabla 30. Costos de operación para compostaje.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Chip de álamo	m ³	2.400	5.280.000
Aserrín	m ³	1.200	8.400.000
Combustible	L	323	152.362
Total Operación			\$ 13.832.362

Fuente: Elaboración propia.

De los costos de operación se determinó un VAC de \$98.826.239.

6.2.9 SECADO SOLAR-BIOLÓGICO

Costos de inversión

En el secado solar-biológico además de los costos relativos a la adquisición de maquinaria se suma el de los extractores. Las inversiones se presentan en la Tabla 31, cuyo costo total es alrededor de 89,8 millones de pesos

Tabla 31. Costos de inversión para secado solar-biológico.

Ítem	Costo total (\$)
Volteadora	32.000.000
Tamizadora	57.600.000
Extractores	125.000
Total Inversión	\$ 89.725.000

Fuente: Elaboración propia.

Costos de operación

Por otra parte, se estima que anualmente los costos operacionales ascienden a 13,9 millones de pesos, tal como se muestra en la Tabla 32; donde el 98,56% corresponde a los materiales estructurantes, el 1,4% al combustible y 0,04% a la electricidad.

Tabla 32. Costos de operación para secado solar-biológico.

Ítem	Unidad	Consumo anual	Costo anual (\$)
Chip de álamo	m ³	2.400	5.280.000
Aserrín	m ³	1.200	8.400.000
Combustible	L	410	193.709
Electricidad	kW-h	140	6.318
Total Operación			\$ 13.880.027

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo un VAC de \$99.166.784.

Por último, en la Tabla 33 se presentan los resultados obtenidos anteriormente. En ella, se aprecia que la irradiación con rayos gamma y haces de electrones presentaron los mayores costos de inversión, es decir, que los procesos físicos tienen costos de capital más elevados. Mientras que durante la etapa de operación, se alcanzaron mayores costos (costos de operación y VAC) en la pasteurización y la irradiación con rayos gamma.

Por otro lado, los métodos que presentaron costos de inversión más bajos fueron el secado térmico y el tratamiento con calor, ambos pertenecientes a los procesos térmicos de higienización de lodos. Mientras que, los menores costos de operación fueron reportados en los procesos biológicos (digestión aeróbica termofílica y compostaje) y renovable (secado solar-biológico) e irradiación con haces de electrones.

Tabla 33. Comportamiento anual de variables económicas de procesos de higienización de lodos.

Proceso	Costos inversión (M\$)	Costos operación (M\$)	VAC (M\$)
Tratamiento alcalino	30,2	46,9	335
Secado térmico	5,8	31,2	222,7
Pasteurización	INE	1.417	10.119
Tratamiento con calor	7,0	INE	ND
Irradiación con rayos gamma	4.767	504,9	3.608
Irradiación con haces de electrones	2.274	0,7	4,8
Digestión aeróbica termofílica	INE	1,4	13,9
Compostaje	89,6	13,9	98,9
S. solar-biológico	89,8	13,9	99,2

INE: Información no encontrada; ND: No determinada.

Fuente: Elaboración propia.

7 DISCUSIÓN

En la Tabla 34 se muestra un resumen de los aspectos técnicos y económicos de los procesos de higienización de lodos seleccionados. Los valores indicados en ella tienen como base de cálculo 100 Ton de lodo alimentado al mes en cada proceso.

Desde la perspectiva técnica, es importante destacar que de los procesos seleccionados, la pasteurización, el tratamiento con calor y la digestión aeróbica termofílica permiten alimentar lodos espesados o líquidos, mientras que en el resto de los procesos se requiere que el lodo esté deshidratado. Por lo tanto, en las tecnologías de tratamiento alcalino, secado térmico, irradiación con rayos gamma y haces de electrones, compostaje y secado solar-biológico, seguirá existiendo el costo operacional de la etapa de deshidratado que forma parte del tratamiento convencional de lodos.

Respecto a la necesidad de maquinaria o equipos especializados, la mayoría de los procesos no emplean máquinas. En el compostaje ocurre lo contrario, es un proceso que no requiere de equipamiento especializado, pero sí de maquinaria.

Los insumos necesarios son variables y dependen de la tecnología empleada. Por ejemplo, el tratamiento alcalino requiere 10 Ton de cal / 100 Ton de lodos alimentados al proceso. Por otra parte, en el compostaje y secado solar-biológico se emplean 300 m³ de material estructurante / 100 Ton de lodos tratados. Los procesos que no requieren insumos son el secado térmico y la pasteurización, pero en ellos existe mayor requerimiento de energía externa para operar.

Al comparar las variables energéticas de los procesos en los que se cuenta con información, pareciera ser que la irradiación con rayos gamma tiene mayor consumo de electricidad (64.800 kW-h / 100 Ton de lodos alimentados). Mientras que otros consumen bajos niveles de energía, como es el caso del secado solar-biológico (11,7 kW-h / 100 Ton de lodos alimentados).

Tabla 34. Comparación parámetros técnicos y económicos de procesos de higienización, sobre una base de cálculo de 100 Ton de lodos alimentados al proceso.

Proceso	Tipo lodo	Equipos	Máquinas	Insumos	Energía externa		Subproductos	Producto (Ton)	Costos inversión (M\$)	Costos operación (M\$)
					Combustible (L)	Electricidad (kW-h)				
T. alcalino	D	4	0	10 Ton cal	NC	148,3	Bolsas de cal y material particulado	99,6	30,2	4,0
S. térmico	D	3	0	NC	3.500	21.000	Cenizas	20	5,8	2,6
Pasteuriz.	L	3	0	NC	250.000	500	Cenizas	INE	INE	118,1
T. con calor	L	3	INE	INE	INE	INE	Cenizas	INE	7,0	INE
I. gamma	D	2	0	1.500 m ³ agua 31,3 kCi de Co ⁶⁰	NC	64.800	Lápices de Co ⁶⁰ sin actividad	97,6	4.767	42,1
I. electrones	D	2	0	156,1 m ³ agua	NC	510	NP	97,6	2.274	0,06
D. A. termof.	L	2	0	3,8 Ton de O ₂ o 18,1 Ton de aire	NC	3.600	NP	64	INE	0,2
Compostaje	D	0	2	300 m ³ material estructurante	26,9	NC	Material estructurante	80	89,6	1,2
S. solar-biol.	D	2	2	300 m ³ material estructurante	34,2	11,7	Material estructurante	80	89,8	1,2

D: Deshidratado; L: Líquido o espesado; NC: No consume; INE: Información no encontrada; NT: No produce.

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una evaluación rápida de los subproductos que se generan en los procesos de higienización de lodos, en todos los casos se proyecta una generación de vapor de agua y en el tratamiento alcalino, se prevén la generación de envases debido a los insumos usados. Cabe destacar que durante este proceso también se produce material particulado, principal causa del rechazo por parte de los operadores a la hora de incorporar este método en las plantas. Tampoco se debe dejar de lado, que en algunos procesos como el secado térmico, pasteurización, tratamiento con calor y tratamiento alcalino existe un potencial de generación de olores debido a que la materia orgánica no se encuentra estabilizada. Para evitar que esto ocurra, en algunos casos se debe llevar control de las condiciones de operación (pH y T°) o bien, se puede requerir de un proceso de estabilización. Dentro del análisis de los subproductos generados no fueron evaluados los gases de efecto invernadero, tema importante a considerar para proyectar la huella ecológica relacionada a cada proceso a futuro.

Si se considera la masa de producto obtenida en cada uno de los procesos, se nota que ésta se reduce considerablemente en todos aquellos en los cuales los lodos se someten a condiciones de temperaturas termofílicas, como el secado térmico, digestión aeróbica termofílica, compostaje y secado solar-biológico.

La comparación de los aspectos económicos de los diferentes procesos se dividió en costos de inversión y de operación. Como se puede observar en la Tabla 34, los mayores costos de inversión están asociados a los procesos de irradiación de lodos con rayos gamma (M\$ 4.767) y haces de electrones (M\$ 2.274). Sin embargo, es importante hacer hincapié en que en éste último se encuentran los menores costos de operación (M\$ 0,06 / 100 Ton de lodo). La digestión aeróbica termofílica también presenta costos de operación relativamente bajos (M\$ 0,2 / 100 Ton lodo), seguida por los procesos de compostaje y secado solar-biológico (M\$ 1,2 / 100 Ton lodo) con similares costos de inversión (alrededor de M\$90).

Por otro lado, la pasteurización (M\$ 118,1) y la irradiación con rayos gamma (M\$ 42,1) reportan mayores costos de operación, en este último caso debido a que el equipo permite tratar alrededor de 4.000 Ton de lodo / mes, sin detener su operación. Por lo tanto, al higienizar 100 Ton de lodo al mes se consume la misma cantidad que al operar a su máximo rendimiento. En el caso que fuente radiactiva detuviera su actividad al apagar el equipo, se estima un consumo eléctrico de 72 kW-h / mes (casi 99,99% menor al obtenido en este trabajo), pero aún así los costos de operación se mantienen en el orden de M\$40, ya que estos están fuertemente determinados por la reposición de Co^{60} .

En el tratamiento alcalino resulta interesante mostrar que los costos de inversión inicial no son muy elevados (M\$ 30,2), a diferencia del resto de los procesos, pero de acuerdo a los resultados de este trabajo, los costos de operación resultan ser más mayores que otros procesos (M\$ 4,0 / 100 Ton lodo), puesto que alrededor del 99,9% sus costos se destinan a la alimentación mensual de 10 Ton de cal.

A la luz del D.S. 4/2009, es importante también discutir los requerimientos que debe tener el producto generado por este tipo de procesos. Es así como en el artículo 6 de su Título II “De la clasificación sanitaria de lodos”, se indica que se considerarán lodos estabilizados o con reducción del potencial de vectores sanitarios a lodos que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38% como mínimo, o que la tasa máxima de consumo de oxígeno para lodos tratados mediante procesos biológicos aeróbicos debe ser igual o inferior a 1,5 mg de oxígeno/h por gramo de sólidos totales. Todo esto indica que la operación de los sistemas cualquiera sea su característica, química, térmica, física y/o biológica debe cumplir con otros estándares de calidad para la obtención de un producto que pueda ser aplicable a suelos agrícolas.

Es por esto que, este mismo Reglamento por ejemplo indica que para procesos de compostaje, ya sea confinado o en pilas estáticas aireadas, la temperatura mínima de los lodos deberá ser de 55 °C y mantenerse por 3 días. Mientras que si se realiza a través de pilas de volteo, la temperatura de los lodos deberá ser de 55 °C por un mínimo de 15 días y requerirán de 5 volteos como mínimo.

La relevancia de lo antes señalado, permite poner en contexto la complejidad de la operación de los diferentes procesos de higienización y las consideraciones de capacidades profesionales más o menos especializadas, que contemplan los procesos.

Otras variables, quizás importantes a considerar antes de elegir el proceso de higienización, es el tipo de suelo, la cantidad de lodo producido por la planta de tratamiento de aguas servidas y las características de los lodos generados. Esto cobra especial importancia al momento de formular los planes agronómicos para la aplicación de los lodos. Los lineamientos de esto están dados en el Título IV del D.S. 4/2009, que dice relación con “De la aplicación de lodos al suelo”.

8 CONCLUSIONES

La higienización de lodos biológicos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas a través de procesos biológicos y usando energías renovables resulta técnicamente factible y más viable económicamente que otros procesos, debido al bajo manejo de equipamiento y costos de operación relativamente bajos.

Por una parte, los procesos que pueden utilizar lodo biológico sin previa deshidratación son: pasteurización, tratamiento con calor y digestión aeróbica termofílica.

Bajo las consideraciones del balance de masa, resulta importante el análisis de los insumos requeridos para los diferentes procesos de higienización y su disponibilidad. De esta forma, el volumen de material estructurante en los procesos de compostaje y renovable debe ser evaluado, lo mismo para las fuentes radiactivas de Co_{60} en el proceso de irradiación con rayos gamma.

Los procesos de higienización utilizando cal como elemento higienizante presenta costos de inversión moderados, pero sus costos de operación son relativamente más altos que los procesos de tipo biológico e incluso que la irradiación con haces de electrones.

Además, del análisis técnico y económico de la tecnología de tratamiento de lodo a utilizar, se hace importante la evaluación de la complejidad de ésta. La óptima operación del proceso redundará en la calidad del lodo higienizado obtenido y su posterior correcta disposición.

A futuro, se recomienda hacer un análisis económico usando una base de cálculo mayor a 100 Ton de lodo al mes (posiblemente de 4.000 Ton de lodo / mes) para percibir los efectos de economía de escala y así, poder optar por la mejor decisión.

Sin embargo, al momento de seleccionar una tecnología a implementar en una determinada planta, se deben considerar la cantidad de lodo producido, clima bajo el cual operará la tecnología, características del suelo para el futuro plan de disposición agrícola, características del lodo a higienizar, entre otros.

9 REFERENCIAS

Acquisto, B., Reimers, R., Smith, J., Pillai, S. 2006. Factors affecting disinfection and stabilization of sewage sludge. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 5345-5361(17).

Alcota, C. 2002. Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 175 pp.

Álvarez, I. 2007. Fundamentos biológicos de la conservación de los alimentos por radiaciones ionizantes. Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, Universidad de Zaragoza. 3 pp.

Andreoli, C., von Sperling, M., Fernandes, F. 2007. Sludge treatment and disposal. Volumen 6, Biological wastewater treatment series. IWA Publishing. 241 pp.

ASCE (American Society of Civil Engineers). 1992. Radiation Energy Treatment of Water, Wastewater and Sludge, A State-of-the-Art Report by the Task Committee on Radiation Energy Treatment. New York. 49 pp.

BAPA S.A., 2004. Propuesta Planta de Tratamiento de los Residuos Líquidos Industriales de Faenadora de Cerdo Las Pataguas, Agrícola Santa Lucía Ltda. Planta de Tratamiento Laguna SBR. 15 pp.

Barañao, P., Tapia, L. 2004. Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile. *Ciencia & Trabajo* 6(13): 111-117.

Bioaqua. 2006. Determinación de dosis óptima de CaO para la estabilización de lodos de PTAS. 12 pp.

Bruce, A., Havelaar, A., L'Hermite, P. 1983. Disinfection of sewage sludge: Technical, Economic and Microbiological aspects. *Commission of the European Communities*. Springer. 252 pp.

Castillo, J. 2005. Posición de AIDIS ante nuevo Reglamento para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. *Revista AIDIS-Chile. ACTUALIDAD Y TENDENCIAS*. 6-7.

CDC. 1999. Laboratory Identification of Parasites of Public Health Concern. Centers for Disease Control & Prevention. National Center for Zoonotic, Vector-Borne and Enteric Diseases. Division of Parasitic Diseases.

Cheremisinoff, N., Cheremisinoff, P. 1995. Hazardous materials and waste management: a guide for the professional hazards manager. William Andrew, 1995. 265 pp.

Cheremisinoff, N. 2002. Handbook of water and wastewater treatment technologies. Butterworth-Heinemann, 2002. 636 pp.

CNE. 2006. Evolución del precio a público de petróleo diesel 1994-2005. Adquirido desde: http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/otros_niveles/anuario_estadistico/anuario/hidrocar/php_hidrocar-5.3.php.htm

CNE. 2007. Precios de potencia y energía de principales nudos por sistema eléctrico. Fijación de abril 2007. Adquirido desde: http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/otros_niveles/anuario_estadistico/anuario/electricidad/php_electricidad-4.01.php.htm

CONAMA. 2009. DS N°4: Reglamento para el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 18 pp.

Cortez, E. 2003. Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la Región Metropolitana. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 184 pp.

Cota, A., Ponce, C. 2008. Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 24 (4), 161-170.

Crites, R., Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Colombia, McGraw-Hill. 776 pp.

CTPS. 2005. Método para realizar balance de masa, balance de energía y cálculo de consumos y descargas específicos. Anexo D en *Guía Técnica General de Producción Más Limpia*. 21 pp. Adquirido desde: <http://www.cpts.org/prodlimp/guias/Cueros/ANEXOD.pdf>

Czechowski, F., Marcinkowski, T. 2006. Sewage sludge stabilisation with calcium hydroxide: Effect on physicochemical properties and molecular composition. *Water Research* 40: 1895-1905.

Departamento de Salud de Dakota del Norte. 2005. What is Ionizing Radiation? Adquirida desde: <http://www.ndhealth.gov/aq/RAD/factsheet1.pdf>

El-Motaium, R. 2000. Alleviation of Environmental Pollution Using Nuclear Techniques Recycling of Sewage Water and Sludge in Agriculture: a Case Study. *ICEHM2000*: 323-332.

El-Motaium, R. 2006. Application of Nuclear Techniques in Environmental Studies and Pollution Control. *Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference*, Egypt. 14 pp.

European Lime Association. 2004. Encalado: Un tratamiento avanzado que permite el reciclaje de lodos de depuradoras EDAR en la agricultura. Brussels, Belgium. 4 pp.

ESSBIO S.A. 2008. Desarrollo de Sistema de Secado de Lodos de Plantas de Tratamiento con Energías Alternativas. Proyecto Innova. 59 pp.

ESSBIO S.A. 2009. Plan Regional de Manejo de Residuos Sólidos Orgánicos. Declaración de Impacto Ambiental. 69 pp.

Field, R., Sullivan, D., Tafuri, A. 2004. Management of combined sewer overflows. CRC Press. 238 pp.

Flaga, A. 2005. Sludge drying. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, Poland. 10 pp.

Fontalva, C., Santander, P. 2001. Estudio de gestión del compostaje como alternativa de disposición de lodos de aguas residuales. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Geógrafo, Universidad de Chile, Facultad de Ingeniería. 268 pp.

Forster, C. 2003. Wastewater treatment and technology. Thomas Telford. 322 pp.

Ghassemi, A. 2009. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. CRC Press. 344 pp.

Girovich, M. 1996. Biosolids treatment and management processes for beneficial use. CRC Press. 440 pp.

Gowda, C., Seth, R., Biswas, N. 2008. Beneficial Reuse of Precast Concrete Industry Sludge to Produce Alkaline Stabilized Biosolids. *Water Science and Technology*, 57(2): 217-223.

Greenberg, M. 2005. Greenberg's text atlas of emergency medicine. Lippincott Williams & Wilkins. 1074 pp.

Hashimoto, S. 1986. Disinfection of sewage sludge cake by an electron accelerator. *J. Ferment Technol.* 64(4): 299-304.

Hyde, H. 1985. Technology Assessment of Carver-Greenfield Municipal Sludge Drying Process. 6 pp.

Ingraham, J. 1998. Introducción a la microbiología. Volumen 2. Reverte, 1998. 751 pp.

Koelzer, W. 2001. Glossary of nuclear terms. Forschungszentrum Karlsruhe. 183 pp. Adquirido desde: http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/pdf/Nuclear_Glossary,2010-04.pdf

Layden, N. 2008. Production of Biosolids by Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion from a municipal source. Adquirida desde: http://www.ciwem.org/branches/republic_ire/Sludge_treatment_ATAD_Jan_08__Galway.ppt

Lepe, A. 2002. Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS*. 8 pp.

Lue-Hing, C. 1998. Municipal Sewage Sludge Management: A Reference Text on Processing, Utilization and Disposal, Volumen 4. CRC Press, 790 pp.

Mahamud, M., Gutiérrez, A., Sastre, H. 1996. Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*, 3(2): 47-62.

Manahan, S. 2007. Introducción a la química ambiental. Reverte. 725 pp.

McClatchey, K. 2002. Clinical Laboratory Medicine, 2nd Edition. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 1963 pp.

McFarland, M. 2001. Biosolids Engineering. McGraw-Hill. 800 pp.

Melmed, L., Comninos, D. 1979. Disinfection of sewage sludge with gamma radiation. *Water SA* 5(4): 153–159.

Méndez, J., Jiménez, B., Salgado, G. 2002. Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México. 8 pp.

Metcalf & Eddy. 1985. Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de aguas residuales, 2a. ed. Labor S.A. 969 pp.

Metcalf & Eddy. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. 3ª Edición. Edit. Mc Graw Hill. 1485 pp.

Metcalf & Eddy. 2004. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. International Edition. 1820 pp.

MIDEPLAN. 2002. Metodologías de Preparación y Evaluación de Proyectos de Reemplazo de Equipos. 20 pp. Adquirido desde página web: http://sni.mideplan.cl/documentos/Metodologias/me_reempl_equipos.pdf

Montoya, H. 2008. Microbiología básica para el área de la salud y afines. 2ª Edición. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín. 282 pp.

Nina, M. 2008. Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso: Mina Cerro de Pasco. Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. 105 pp.

Peters, W. 2007. Atlas de medicina tropical y parasitología. 6ª edición. Elsevier, España. 431 pp.

Podgoršak, E. 2010. Radiation Physics for Medical Physicists. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering, 2nd Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 745 pp.

Polo, P. 2008. Digestión aeróbica termófila ¿una nueva alternativa en la gestión de lodos de depuradora? en *Volumen de ponencias de las III Jornadas Técnicas de Gestión de Sistemas de Saneamiento de Aguas Residuales. Tratamiento y valorización de fangos* (Freixes, A.), 79-89.

Rangel, J. 2008. La irradiación como tecnología de control fitosanitario. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. 32a Reunión Annual NAPPO, México.

Roberts, E. 2000. Water quality control handbook. McGraw-Hill. 1008 pp.

Rojas, G. 1999. Estudio de prefactibilidad técnico económica de una planta de desinfección de lodos de aguas servidas mediante irradiación. Proyecto de título de Ingeniero Civil Químico. Universidad Católica de Valparaíso. 208 pp.

Roš, M., Zupančič, G. 2002. Thermophilic aerobic digestion of waste activated sludge. *Acta Chem. Slov.* 49: 931–943.

Sabater, M, Xercanvins, J. 2005. Desarrollo sostenible. Volumen 92 de Aula politécnica. Edicions UPC, 2005. 218 pp.

Salihoglu, N., Pinarli, V., Salihoglu, G. 2007. Solar drying in sludge management in Turkey. *Renewable Energy* 32: 1661–1675.

Schneider Electric. 2008. Mejora del factor de potencia y filtrado de armónicos. Capítulo L en Guía de diseño de instalaciones eléctricas. 26 pp.

Schrader, R., Castillo, G., Raffo, A., Rubio, T. 1996. Desinfección de lodos de aguas servidas mediante radiaciones ionizantes. *AIDIS Consolidación para el desarrollo*, México. 1-7.

Shamma, M., Al-Adawi, M. 2002. The morphological changes of *Ascaris lumbricoides* ova in sewage sludge water treated by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry* 65: 277-279.

Shore, L. 1999. Practical guide to diagnostic parasitology. ASM Press. 349 pp.

SISS. 2005. Sistema de Aguas Servidas. Estudio Tarifario Empresa de Servicios Sanitarios Aguas Manquehue S.A. Informe Final Periodo 2005-2010. 108-118.

SISS. 2007. Informe anual de coberturas urbanas de servicios sanitarios. Santiago, Chile. 19 pp.

Smith, J., Surampalli, R., Reimers, R., Tyagi, R., Lohani, B. 2008. Disinfection processes and stability refinements to biosolids treatment technologies. *Pract. Period. Hazard. Toxicol. Radioact. Waste Manage.*, 12(1): 10-17.

Swinwood, J., Waite, T., Kruger, P., Rao, S. 1994. Radiation technologies for waste treatment: A global perspective. *IAEA BULLETIN* (1). 5 pp.

Tim, R. 1993. The practical handbook of compost engineering. CRC Press. 717 pp.

Toro, F. 2005. Áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales de la VI región de Chile. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 74 pp.

Torres, P., Marmolejo, L., Botina, A. 2005. Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal. *Agronomía Colombiana* 23(2): 310-316.

Turovskiy, I., Mathai, P. 2006. Wastewater sludge processing. Wiley-Interscience. 354 pp.

US EPA. 1979. Process design manual for sludge treatment and disposal. *Center for Environmental Research Information Technology Transfer*. 1152 pp.

US EPA. 1987. Alkaline treatment and utilization of municipal wastewater sludges. *Water Pollution Control Department*. 106 pp.

US EPA. 2003. Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge.

Valverde, T., Cano-Santana, Z. 2007. Ecología y medio ambiente. Pearson Educación, 2007. 230 pp.

Vázquez, R. 2006. La planta de irradiación gamma mejora su desempeño. *Contacto Nuclear*. 25-27.

Vincent, W. 2005. *Ascaris lumbricoides* The Giant Roundworm of Human. *Medical News* 5(12): 28-34.

Von Sperling, M., De Lemos, C. 2005. Biological wastewater treatment in warm climate regions, Vol. 1. IWA Publishing. 1460 pp.

Wang, L., Hung, Y. 2007. Biosolids treatment processes. *Handbook of environmental engineering*, Vol. 6. Human Press. 820 pp.

Weiner, E. 2008. Applications of environmental aquatic chemistry: a practical guide. CRC Press. 436 pp.

Williford, C., Chen, W., Shammas, N., Wang, L. 2007. Lime Stabilization in *Handbook of Environmental Engineering, Volume 6: Biosolids Treatment Processes*. The Human Press Inc. 207-241.

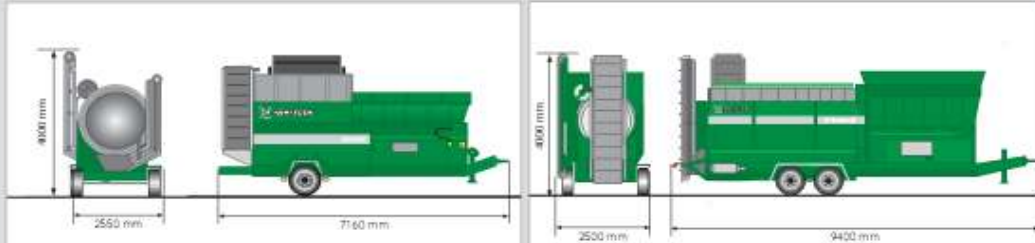
Wurtz, W. 1981. Method for lime stabilization of wastewater treatment plant sludges. Willow Technology, Inc., Paramus, NJ. 7 pp.

Ødegaard, H., Paulsrud, B., Karlsson, I. 2001. Sludge disposal strategies and corresponding treatment technologies aimed at sustainable handling of wastewater sludge. *Water Science and Technology*, 46(10): 295-303.

ANEXOS

Anexo 2. Ficha técnica de máquina tamizadora Joker (Compañía Komptech).

Technical Specifications



	JOKER	PRIMUS
Machine dimensions Transport position L x W x H: Operational position L x W x H:	7160 x 2550 x 4000 mm 7050 x 6175 x 3110 mm	9400 x 2500 x 4000 mm 11660 x 4780 x 2975 mm
Feed hopper Capacity: Filling height: Filling width: Filling depth: Belt width:	> 2 m ³ 2270 mm 2635 mm 1136 mm 730 mm	> 3 m ³ 2640 mm 2900 mm 1340 mm 1000 mm
Screening drum Length: Diameter: Screening area: Material thickness: Hole sizes: Cleaning brush diameter:	2440 mm 1800 mm 10 m ² 6/8/10 mm to 80 mm 500 mm	4000 mm 1450 mm 16 m ² 6/8/10 mm to 80 mm 500 mm
Discharge conveyors Fine fraction Conveyor length: Conveyor width: Discharge height: Oversized fraction Conveyor length: Conveyor width: Discharge height:	4150 mm 1600 mm 2420 mm 3400 mm 550 mm 2125 mm	3400 mm 700 mm 2080 mm 3400 mm 700 mm 2300 mm
Drive unit Engine: Power: Cylinders: Tank capacity: Total permissible weight:	Lombardini diesel engine 16.5 kW 3 40 l 5000 kg	Perkins diesel engine 38 kW 4 80 l 9000 kg
Throughput	to 35 m ³ /h	to 70 m ³ /h
Additional equipment	see page 10	see page 10

KOMPTeCH GmbH
A-8130 Fröttmieden, Kuhau 37
(t) +43 3126 505 - 0
(f) +43 3126 505 - 505
info@komptech.com

KOMPTeCH Anlagenbau GmbH
A-1020 Wien, Wehlstraße 150/ Top II
(t) +43 1 219 91 31 - 0
(f) +43 1 219 91 31 - 10
anlagenbau@komptech.com



www.komptech.com

KOMPTeCH Vertriebsgesellschaft
Deutschland mbH
D-59302 Delde, Beckumer Straße 51
(t) +49 2022 93 45 - 0
(f) +49 2022 93 45 - 45
info@komptech.de

KOMPTeCH UK Ltd.
Forge End, Lodge Farm,
Kneeton, Warwickshire, CV35 0JH
(t) +44 1926 64 29 72
(f) +44 1926 64 29 71
info.uk@komptech.com

LANKO - Material Information is subject to change due to stock and availability.

LANKO