

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**PROPUESTA TÉCNICA DE GESTIÓN AMBIENTAL SOSTENIBLE  
PARA EL APROVECHAMIENTO DE LODOS QUE PROVIENEN DE  
LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS EN CAMPAMENTOS MINEROS DEL PERÚ**

**Trabajo de investigación para optar el grado de magíster en la  
Maestría en Regulación, Gestión y Economía Minera, que presenta:**

**EDWIN FRANCISCO ONOFRE AQUINO**

**Dirigido por**

**Dr. HECTOR ADRIAN CHAVARRY ROJAS**

**Junio, 2018**

## Resumen

El trabajo de investigación que a continuación se presenta, es el resultado de la investigación del estudio analítico del manejo de lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales domésticas de las empresas mineras del Perú, con el propósito de brindar alternativas técnicas que estén en concordancia con el cumplimiento legal, la responsabilidad ambiental, la convivencia armónica con los grupos de interés (stakeholders) y la mejora en la reputación.

En este sentido se analizaron los fundamentos teóricos, técnicos y la experiencia de tratamientos de lodos en otros países; se ha podido evidenciar que en países como EEUU, Chile, Brasil, España y Colombia existen normativas legales que respaldan el manejo y uso de los lodos en las actividades Forestales y Agrícolas que se diferencian en categorías por el nivel de contaminantes y posible afección a la salud humana.

Como resultado del presente estudio se evidenciaron que muchas Empresas Mineras aprovechan los vacíos legales para no implementar las plantas de tratamiento de aguas residuales y muchas de ellas solo llegan a cumplir con el tratamiento primario y muy pocas el tratamiento de nivel secundario; llegando a disponer los lodos en las presas de relaves o como hayan sido aprobados en su Instrumento de Gestión Ambiental; en consecuencia están dirigidas a cubrir los lodos y/o alejarlas del olfato humano.

Finalmente el presente trabajo de investigación, propone alternativas de aprovechamiento de los lodos porque constituyen un insumo primario fundamental para la obtención de sub productos como abono orgánico, fertilizante foliar y biogás. De acuerdo al análisis la no implementación no pasa por la limitación económica sino por el desconocimiento de la parte técnica, falta de experiencia en el tratamiento de lodos en el Perú y porque las entidades fiscalizadoras no generan presión para el cumplimiento del Decreto Legislativo N° 1278 y menos la resolución ministerial N° 128-2017 – Vivienda.

## **DEDICATORIA:**

A mi Madre: Delia Aquino Ramos, que desde el cielo ilumina mi camino.

A mi Abuelo: Mi gran motivo, Moises Aquino Quiñones.

A mi familia: Esposa Hada; a mis hijos: Nataly, Jeanpier y Analy por su apoyo de siempre.

A mis Compañeros de trabajo: Roberto, Manuel, Luis, Victor y Marcela.

## INDICE

Resumen.....	1
DEDICATORIA:.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. LOS LODOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LAS EMPRESAS MINERAS COMO FUENTE ORGÁNICA PARA LA MEJORA DE SUELOS Y ALGO MÁS:.....	12
2.1. Aguas residuales.....	12
2.2. Aguas residuales domésticas.....	13
2.3. Lodos de aguas residuales domésticas.....	13
2.4. Tratamiento de aguas residuales.....	15
2.5. Gestión de aguas residuales.....	15
2.6. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales.....	15
2.6.1. Tratamiento preliminar.....	16
2.6.2. Tratamiento primario.....	17
2.6.3. Tratamiento secundario.....	18
2.6.4. Tratamiento terciario o avanzado.....	23
2.7. Lodos residuales o fangos.....	23
2.8. Tipos de lodos o fangos.....	24
2.9. Clasificación de lodos.....	25
2.10. Alternativas de uso de los lodos provenientes de aguas residuales domésticas.....	27
2.10.1. Categoría A.....	27
2.10.2. Categoría B.....	28
2.11. Tratamiento de lodos.....	28
2.11.1. Criterio de valoración para el tratamiento de lodos.....	30
2.11.2. Espesamiento.....	30
2.11.3. Estabilización.....	31
2.12. Aprovechamiento y disposición de los lodos de las aguas residuales.....	36
2.12.1. Fuente de energía.....	36
2.12.2. Aprovechamiento en la agricultura.....	37
2.13. Disposición de lodos de aguas residuales.....	38
2.13.1. Disposición de lodos en rellenos.....	40

2.13.2.	Incineración de lodos.....	40
2.14.	Estabilización de lodos .....	41
2.14.1.	Compostaje de lodos .....	41
2.14.2.	Vermiestabilización de lodos .....	43
2.14.3.	Biodigestión de lodos .....	43
2.15.	Procesos y participantes en la degradación de lodos .....	44
2.15.1.	Procesos biológicos.....	44
2.15.2.	Digestión anaerobia de lodos .....	44
2.15.3.	Bacterias.....	44
2.15.4.	Hongos .....	45
2.15.5.	Protozoos y rotíferos.....	46
2.15.6.	Algas.....	46
2.16.	Aplicación y/o aprovechamiento de lodos.....	46
2.16.1.	Aplicación de biosólido al suelo como enmienda agrícola .....	46
2.16.2.	Aplicación a cultivos agrícolas.....	47
2.16.3.	Uso en especies forestales.....	47
2.16.4.	Frutales .....	47
2.16.5.	Áreas verdes y esparcimiento, y pastos .....	47
2.16.6.	Recuperación de áreas degradadas y estabilización de taludes .....	48
2.17.	Desarrollo sostenible.....	48
2.18.	Responsabilidad social empresarial .....	50
2.19.	Aplicación de la normativa para el manejo de lodos en el extranjero Estados Unidos y en el Perú.....	52
3.	<b>GESTIÓN DE LOS LODOS EN LAS EMPRESAS MINERAS DEL PERU .....</b>	<b>54</b>
3.1.	Impacto al ambiente .....	56
3.2.	Creando valor a la empresa (reputación) .....	57
3.3.	Conflictos socio ambientales .....	58
3.4.	Desde el enfoque de cumplimiento legal .....	58
3.5.	Enfoque de gestión ambiental minera responsable.....	60
3.6.	Breve descripción de los costos para su implementación .....	60
3.6.1.	Planta de compost .....	60

3.6.2. Implementación de biodigestor para la obtención de biogás con lodos de PTAR:.....	62
3.6.3. Obtención de humus de lombriz a partir de lodos del PTAR .....	63
4. DISCUSIÓN: .....	64
5. REFERENCIAS .....	70

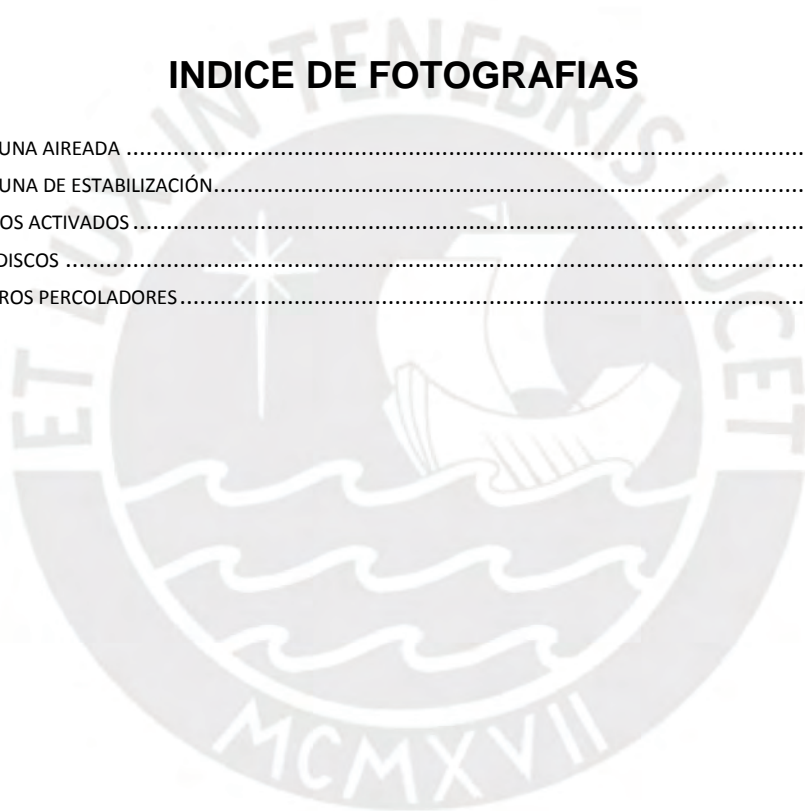


## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS .....	15
TABLA 2: CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. ....	25
TABLA 3: CARACTERIZACIÓN DE LODOS .....	26
TABLA 4: RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO.....	34
TABLA 5: MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y EVACUACIÓN DE LODOS O FANGOS.....	39
TABLA 6: PRESUPUESTO BÁSICO PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOST (CAMPAÑA ANUAL) .....	61
TABLA 7: PRESUPUESTO PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOST (CAMPAÑA ANUAL) .....	62
TABLA 8: IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTOR PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS CON LODOS DE LA PTAR. ....	63
TABLA 9: PRESUPUESTO, INVERSIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE HUMUS DE LOMBRIZ .....	64

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 1. LAGUNA AIREADA .....	19
FOTOGRAFÍA 2: LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN.....	20
FOTOGRAFÍA 3: LODOS ACTIVADOS .....	21
FOTOGRAFÍA 4: BIODISCOS .....	22
FOTOGRAFÍA 5: FILTROS PERCOLADORES.....	22





# 1. INTRODUCCIÓN

La humanidad ha creado y seguirá creando una serie de industrias para satisfacer sus necesidades; sin embargo, la generación de estas ha traído como consecuencia impactos económicos, sociales, ambientales, etc. En la presente investigación, nos ceñiremos a tratar la gestión ambiental, básicamente, los impactos por el manejo inadecuado de las aguas residuales domésticas que se producen en la industria extractiva, específicamente, en el caso de la minería<sup>1</sup>, así como las implicancias generadas por la descomposición de lodos de las aguas residuales domésticas por la no incorporación de tecnologías adecuadas, los vacíos legales que fueron aprovechados por las empresas mineras y la no adecuación a las disposiciones legales vigentes.

En las últimas tres décadas, las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas han constituido una herramienta tecnológica fundamental para el saneamiento básico de las poblaciones. Estas estaciones depuradoras han permitido mejorar la calidad del medio ambiente, reaprovechar el agua y reducir las afecciones a la salud, principalmente, las enfermedades gastrointestinales. Sin embargo, cabe mencionar que si no se trata los lodos hasta que estos se conviertan en materia inocua, no se puede asegurar la inexistencia de riesgos ambientales y de salud<sup>2</sup>.

El informe final mundial del 2017 de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos indica que una adecuada gestión de las aguas residuales implica que la contaminación de la fuente sea reducida, se eliminen contaminantes de los flujos de agua, se reutilicen las aguas y se recuperen productos útiles<sup>3</sup>. Todos estos procesos o actividades coadyuvan en acciones beneficiosas para la sociedad. Por otro lado, la importancia transversal de estos tratamientos de aguas residuales se

---

<sup>1</sup> Esta situación es producto de la no incorporación de tecnologías adecuadas, los vacíos legales que muy bien han sido aprovechados por las empresas mineras y la no adecuación a las disposiciones legales vigentes.

<sup>2</sup> Es oportuno precisar que los microorganismos para desarrollarse requieren de condiciones y factores favorables como energía, carbono, nutrientes, oxígeno disuelto para respirar u oxígeno ligado al nitrito (NO<sub>2</sub>) o nitrato (NO<sub>3</sub>) y que como parte del proceso de degradación, también, se producen gases como el dióxido de carbono y metano en mayor proporción (Nolasco, 2010). En consecuencia, los lodos de las aguas residuales domésticas, en las diversas etapas de degradación, generan impactos en la atmósfera por la emisión de gases. Debido a que no se sabe a ciencia cierta en qué grado sucede esto, es necesario realizar estudios científicos para demostrar el nivel de impacto de los gases de efecto invernadero que se liberan por descomposición de lodos en sus diferentes niveles de tratamiento en las plantas de recuperación de aguas residuales

<sup>3</sup> Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Op.Cit., pp v-3

encuentra incluida en el objetivo 6, meta 6.3. de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible, aquí se menciona que “la meta es reducir en un 50% las aguas residuales sin tratar, así como incrementar la reutilización segura a nivel mundial”<sup>4</sup>. Estos lineamientos deben ser seguidos en la conducción de las empresas mineras en aras de crear espacios de confianza con los grupos de interés.

El Perú se encuentra enmarcado en esta línea de gestión. En el informe de la Comisión multisectorial de los ejes estratégicos de la gestión ambiental del 2012, en el eje estratégico B: Mejora en la calidad de vida con ambiente sano, sección B.1 se indica que para asegurar el cumplimiento del objetivo de garantizar un ambiente sano es necesario revisar y ampliar el alcance de la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos<sup>5</sup>.

Es así que mediante el Decreto Legislativo N° 1278 se aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. De esta manera, queda derogada la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos. Este Decreto Legislativo hace hincapié en el principio de valoración de los residuos, por el cual los desechos sólidos constituyen un potencial para la obtención de recursos económicos. Por tanto, se hace prioritaria su revaloración a través de actividades de reciclaje para la obtención de subproductos que eviten su disposición final.

Sobre el particular el Decreto Legislativo N° 1278, en el artículo 6, en los ítems f y g, sobre la gestión integral de residuos sólidos, se indica que la gestión deberá contribuir a la lucha contra el cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el desarrollo de tecnologías, métodos, prácticas y procesos que favorezcan su minimización y manejo adecuado. En esta misma norma, en la sexta disposición complementaria, se encarga al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento regular el reaprovechamiento de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por este motivo, el 5 de abril mediante Resolución Ministerial N° 128 – 2017 – Vivienda, se aprueban las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final en el marco de cumplimiento del Decreto Legislativo N° 1278.

---

<sup>4</sup> Informe final mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos 2017, Aguas residuales el recurso desaprovechado (2017).

<sup>5</sup> Cabe mencionar que esta ley necesita ser adecuada a los cambios actuales de gestión y cubrir los vacíos legales con el fin de generar mayor dinamismo en la gestión ambiental en materia de residuos sólidos.

Esta resolución, en el Capítulo III, Planes de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos y Declaración Anual de Manejo de Residuos Sólidos, en el artículo número 8, indica que el generador debe presentar el Plan de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos. Este documento forma parte del contenido del Instrumento de Gestión Ambiental (IGA). Por otro lado, en el capítulo VII, sobre el reaprovechamiento de los lodos, se indica que los generadores están facultados a realizar el reaprovechamiento de los lodos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales deben estar estabilizadas para la producción de biosólidos (humus y/o compost).

En efecto, la dinámica de la industria minera para la obtención de subproductos como el concentrado de los minerales y otros está ligada a la generación de varios desechos, entre los que encontramos los residuos peligrosos (hidrocarburo, químicos y biomédicos); los residuos inorgánicos generales; los aceites industriales y de cocina; las chatarras varias; los residuos orgánicos de cocina; y las aguas residuales industriales y domésticas. Todos estos tipos de residuos para llegar a su disposición final dependerán de una correcta gestión y manejo adecuado. En ese sentido, el producto de la generación y tratamiento de aguas residuales domésticas en la industria minera tiene como remanente a los lodos o biosólidos. En las condiciones actuales, estos son tratados parcialmente, lo que ocasiona problemas de afecciones a la salud, contaminación ambiental, conflictos socios ambientales y una reputación negativa de la industria minera.

En la actualidad, las diversas empresas mineras en el Perú se componen por una fuerza laboral diversa, la misma que se ve influenciada, básicamente, por el volumen de producción. Cabe precisar que este tipo de industria por su propia naturaleza debe afincarse fuera de las ciudades, es ahí donde se construyen, entonces, los campamentos mineros que brindan alojamiento, alimentación y otros servicios a los trabajadores. Como producto de ello, entre otros, se generan residuos sólidos y líquidos.

En el marco del cumplimiento legal del Decreto Supremo 1278 que aprueba la ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Perú, las aguas residuales domésticas que se generan en las unidades mineras deben ser tratadas o estabilizadas parcialmente mediante procesos aerobios en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estas aguas producto de este tratamiento son vertidas en los

efluentes una vez cumplida la calidad que exige la ley. Los lodos, a diferencia de estas aguas, tienen que ser dispuestos de acuerdo a lo que indique el Plan de Manejo Ambiental de la empresa u otro instrumento de gestión ambiental. En algunos casos, son las empresas prestadoras de servicios (EPS) las que disponen de estos lodos ya sea como residuos sólidos peligrosos o de acuerdo a lo que se indique en el Plan de Manejo Ambiental.

También se puede señalar que las empresas mineras antiguas, pequeñas y las medianas, que no pasaron por un estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), pero sí por un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA)<sup>6</sup>, continúan utilizando aún procesos antiguos, entre los cuales se encuentra el uso de tanques Imhoff<sup>7</sup> (tratamiento primario) y el uso de pozos sépticos. El primer sistema genera acumulación de lodos que quedan expuestos a la atracción de vectores, lo que produce, al mismo tiempo, malos olores y gases de efecto invernadero que impactan directamente en la atmósfera. Del mismo modo, la utilización de los tanques sépticos genera similares impactos en el ambiente.

Haciendo referencia al reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos 27314, el mismo que ya se encuentra derogado, algunas empresas mineras consideraron oportuno tomar en cuenta el artículo 27: Calificación de residuos peligrosos, numeral 3. En este se indica que los lodos provenientes de los tratamientos de aguas residuales son considerados como residuos sólidos peligrosos, salvo que el generador demuestre lo contrario en cualquiera de las modalidades de tratamiento y disposición final. Ello se debe a su alto contenido de coliformes fecales - totales, salmonella, alta descomposición de materia orgánica, etc. motivo por el cual se tratan parcialmente los lodos que se generan en su operación.

Por otro lado, tomando en cuenta al DL 1278 Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, en las disposiciones complementarias, en el acápite quinto, sobre los lodos provenientes de plantas de tratamiento, se debe mencionar que los lodos son considerados como residuos no dañinos, salvo que el Ministerio de Vivienda,

---

6 Programa de Adecuación y Manejo Ambiental, cuya finalidad es identificar los impactos ambientales, incorporar acciones e inversiones necesarias en las operaciones mineras para reducir o eliminar las emisiones y/o vertimientos.

7 Estructura de concreto para el tratamiento PRIMARIO de aguas residuales, cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos.

Construcción y Saneamiento establezca lo opuesto. Bien ahora, si la Ley 27314 daba una luz abierta para el manejo de los lodos, esta ley no impulsaba el mismo, a diferencia del DL1278, el cual encarga al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento reglamentar al respecto; sin embargo, a la fecha no se está interpretando o cumpliendo como tal, a pesar de que es un tema transversal para todos los sectores.

Consideramos que en virtud a todo lo descrito, se hace necesario desarrollar un trabajo de investigación que involucre, como objetivo principal, la revisión y análisis de las alternativas técnicas, y que también, por otro lado, estudie la implementación de las normas legales y ambientales que armonicen una convivencia sana entre la minería, el ambiente y los grupos de interés de las empresas mineras (*stakeholders*). Ello repercutiría en la mejora de la reputación del sector minero que en la actualidad se encuentra venida a menos.

## **2. LOS LODOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LAS EMPRESAS MINERAS COMO FUENTE ORGÁNICA PARA LA MEJORA DE SUELOS Y ALGO MÁS:**

### **2.1. Aguas residuales**

Sobre el particular, en el informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2017), las aguas residuales no están recibiendo el tratamiento debido como sucede en el caso de los grandes retos planteados en el ciclo del abastecimiento de agua para consumo humano. En este sentido, las aguas residuales siguen siendo un recurso invalorado, no se les brinda la importancia debida y reciben poca atención de la gestión ambiental y, en general, se les ignora y se les ve como una carga por causar molestias. En el mismo informe, se hace referencia a “las aguas residuales como una combinación de uno más de los siguientes efluentes: domésticos (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes

industriales, aguas pluviales y otras escorrentías” agrícolas, hortícolas y acuícolas (Raschid-Sally & Jayakodi, 2009, p.1).

## **2.2. Aguas residuales domésticas**

Se pueden definir como aquellas que se encuentran alteradas en su composición natural por el uso del hombre, en este sentido representan un elevado riesgo para la salud pública y el ambiente. En consecuencia, deben ser sometidas a tratamiento por contener una gran cantidad de materias orgánicas y/o microorganismos (Espigares & Pérez, 2000).

La composición de las aguas residuales domésticas en forma general está representada por la presencia de materia orgánica con un grado variable de descomposición, compuestos nitrogenados de origen orgánico e inorgánico, compuestos fosforados provenientes principalmente de los detergentes y microorganismos como bacterias, virus, protozoarios (saprófitos y patógenos).

El Estado a través de las normas legales inherentes al manejo de aguas residuales domésticas, como en el caso de la Ley General de Ambiente, promueve el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización. Así mismo, en la misma Ley, en el numeral 122.3 del artículo 122, tratamiento de residuos líquidos, se indica que las empresas extractivas y toda aquella que genere aguas residuales deben reducir sus niveles de contaminación hasta obtener cifras compatibles con los con los LMP, los ECAS y otros estándares.

En consecuencia, las empresas tienen la obligación indirectamente de internalizar los costes ambientales que se generan producto de sus actividades hasta cerrar la cadena de reaprovechamiento del uso de los recursos naturales.

## **2.3. Lodos de aguas residuales domésticas**

Como consecuencia del tratamiento (aerobio y/o anaerobio) de las aguas residuales domésticas, los lodos provienen de las etapas de tratamiento primario, secundario y es en la tercera etapa en donde se generan lodos de excedencia (Limón, 2013), En estas circunstancias estos lodos requieren pasar por un proceso de estabilización, quiere decir que aun contienen contaminantes y a la vez son ricos en materia orgánica y fuente de elementos nutritivos para los vegetales (N-P-K).

Pérez (2009) distingue dos tipos de lodos: el *lodo fresco* y el *lodo digerido*. El primero es aquel que no ha recibido tratamiento alguno y exhala malos olores por su alto contenido de patógenos. El segundo es el que ha sido sometido a tratamientos aerobios y/o anaerobios, motivo por el cual es más estable y arroja menor cantidad de olores desagradables. El mismo autor refiere que en la directiva 86/278/EEC de la Unión Europea (Council Directive, 1986) se advierte que estos lodos en su condición sin tratamiento pueden estar contaminados con metales pesados y microorganismos potencialmente patógenos, por ende, pueden implicar riesgos a la funcionalidad del suelo agrícola (citado en Pérez 2009, p. 33).

Por otro lado, según la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (EPA) (Hse y Huang, 2005), los lodos son considerados como residuos sólidos, semisólidos o líquidos los cuales se generan a partir del tratamiento de aguas residuales. Esta misma norma define a los biosólidos como producto orgánico primario los cuales pueden ser reciclados para el uso como enmienda agrícola.

A más abundamiento, la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (EPA) (Hse y Huang, 2005), existen tres clases de biosólidos. Los de clase A no contienen niveles detectables de organismos patógenos y contienen niveles mínimos de metales pesados, bajo estas condiciones estos lodos pueden ser utilizados en todo tipo de cultivo, claro está en proporciones adecuadas. Los de clase B poseen niveles de microorganismos patógenos identificables, por lo que son de libre acceso al público, pueden ser aplicados al suelo en cultivos para consumo, pero con ciertas restricciones. Así mismo, los de clase C son aquellos altamente contaminantes, se usan en áreas donde hay un mínimo contacto con el público como el caso típico de uso forestal (EPA, 2007).

Tabla 1. Aprovechamiento de biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usos urbanos con contacto publico directo durante su aplicación</li> <li>✓ Los establecidos para clase B y C</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usos urbanos sin contacto publico directo durante su aplicación</li> <li>✓ Los establecidos para clase C</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usos forestales</li> <li>✓ Mejoramiento de suelos</li> <li>✓ Usos agrícolas</li> </ul>

Fuente: Norma EPA 40 CFR-503

#### 2.4. Tratamiento de aguas residuales

De la revisión de diferentes fuentes bibliográficas, todas ellas coinciden en considerarlo como el conjunto de procesos y operaciones físicas, químicas, y biológicas diseñado para reducir la concentración de los contaminantes no deseados (Donado, 2013).

#### 2.5. Gestión de aguas residuales

Implica entender desde un enfoque sistémico, partiendo del uso racional del recurso hídrico, la prevención o reducción de la contaminación básicamente en la fuente de generación. En segunda instancia implica el tema de recolección y remoción de contaminantes (tratamiento), y el reaprovechamiento de las aguas y los subproductos que resulten de ello.

#### 2.6. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales domésticas está compuesto por diversos procesos y etapas, las cuales contribuyen a la reducción de contaminantes. Uno



de los procesos para dicho tratamiento es la autodepuración. En esta etapa, son los mismos microorganismos los encargados de descomponer gracias a la metabolización para llegar a transformar las sustancias simples en dióxido de carbono, nitrógeno, entre otras (Metcalf & Eddy, 1996).

La estructura de una planta de tratamiento de aguas residuales debe estar basada en “un diseño eficiente que satisfaga la necesidad de la población específica y en un tiempo específico” (Arce, 2013). Así mismo, es oportuno considerar en el diseño las condiciones climáticas, la ubicación (Costa, Sierra o Selva), entre otros factores a fin de no generar los malos olores, que causen incomodidad o en su defecto hagan peligrar la salud humana.

Es propicio describir los procesos que se desarrollan durante el tratamiento de aguas residuales domésticas; las principales etapas, según Metcalf y Eddy (1996) son las siguientes:

#### **2.6.1. Tratamiento preliminar**

En esta fase se considera el cribado. Bajo este principio de separación existe una serie de mecanismos de condición física como las rejas o rejillas de barra metálica que se encargan de retener sólidos gruesos que se encuentran suspendidos en el agua. Esta fase culmina con la limpieza de los sólidos que no cumplen las características para ser degradadas.

Es oportuno mencionar que para el caso del presente estudio, el tratamiento de aguas residuales domésticas de empresas mineras no se consideran los desarenadores, ya que la red de estas aguas son independientes de las aguas de procesos o industriales.

Como parte del proceso preliminar está considerada la etapa de desaceitado y desengrasador; cuyo objetivo es la eliminación de grasas y aceites. Para lograr este objetivo en particular, normalmente, se da por la insuflación de aire, para desemulsionar las grasas y mejorar la flotabilidad (Arce, 2013).

### 2.6.2. Tratamiento primario

Al respecto es oportuno anotar que Hernández (1996), considera que el tratamiento primario es un simple tratamiento físico que se basa en dos condiciones hidráulicas cuyos parámetros son el tiempo de retención y la velocidad de desplazamiento del agua.

En esta fase, el objetivo es remover los sólidos orgánicos e inorgánicos a fin de reducir y/o eliminar los sólidos flotantes que se encuentran en suspensión.

**Sedimentación.-** En este proceso, en una primera etapa dependerá del peso específico de los sólidos; estará diferenciado por partículas que se sedimentan sin ayuda de floculantes por tener mayor peso específico que el agua y los que no, saldrán a flote. Es importante destacar que en esta fase se produce el efecto de floculación natural, es decir, por la acción de barrido o por turbulencias se aglutinan o se agrupan los sólidos (FONAM, 2010).

**Coagulación y floculación.-** El principal objetivo de esta fase es retirar los sólidos en suspensión y las partículas coloidales; para ello, se recurre a un reactivo químico llamado coagulante.

El tratamiento primario incluye unidades de tratamiento como el caso de los tanques *Imhoff*, cuya principal función es remover los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables a fin de reducir la cantidad de material que pasará al tratamiento secundario. Así mismo, en este proceso de tratamiento primario también se considera a los tanques sedimentadores, tanques sépticos, lagunas de estabilización de fase anaerobia, entre otros.

Es importante anotar que muchas empresas y poblaciones llegan hasta esta etapa de tratamiento donde los lodos quedan expuestos al no continuar con la siguiente fase de tratamiento, bajo estas condiciones estos lodos generan reacciones químicas y biológicas emanando olores de putrefacción.

### 2.6.3. Tratamiento secundario

Sobre el particular, Hernández (1996) sostiene que para el tratamiento secundario hay dos caminos, el tratamiento químico y biológico, ambos con resultados satisfactorios. Para el tratamiento químico, se requiere de personal más capacitado que pueda tener destreza y conocimiento para el tratamiento. Por otro lado, respecto al tratamiento biológico indica que se inicia con la formación de flóculos que eleva el peso específico de los agregados y permite sedimentarse, y remarca que en esta fase son los microorganismos, los encargados de la acción enzimática y metabólica.

Este tipo de proceso de lodos activos en el manejo de aguas residuales tiene como un siglo. Es en los años setenta cuando se desarrolla un diseño sistémico, cuyo principio fundamental es la aireación. Este se debe entender como un proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales en la que intervienen la fase aerobia y anaerobia (Ramalho, 1996).

En este sentido, ante la proporción intencional de aireación, la materia orgánica sirve como nutriente a la población bacteriana. En este caso la materia orgánica, es oxidada dando lugar a la disminución de los contaminantes. Según el Reglamento Nacional de Edificaciones, “un tratamiento secundario incluye procesos biológicos con una eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) soluble mayor a 80%”.

Por otro lado, la eficiencia del crecimiento bacteriano depende de ciertos parámetros como la temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad, etc.

**Laguna aireadas.-** Este tipo de tratamiento son bastantes simples, constituye la implementación de un mecanismo que proporcione oxígeno en la superficie de la laguna y los lodos no recirculen. Por ello, requieren mayor tiempo de retención que los sistemas convencionales, tampoco utiliza sedimentación primaria, puede o no utilizar sedimentación secundaria. Entre las desventajas resalta la posible

generación de olores, requiere de mayor espacio y requiere de aireación artificial (Fundación Chile).



Fotografía 1. Laguna aireada

**Laguna de estabilización.**- Comúnmente se les conoce como lagunas de oxidación. Una de las grandes ventajas es el monto de inversión en construcción y operación, el cual es muy bajo. Las lagunas de oxidación son volúmenes de agua que se disponen en un tanque excavado en el terreno. Este tipo de laguna puede clasificarse en aerobias y anaerobias por la actividad microbiana a las que son sometidas; sin embargo, es oportuno destacar que el tratamiento efectivo en este tipo de tratamiento es un sistema anaerobio seguido por un sistema aerobio – anaerobio (Metcalf & Eddy, 1996).



**Fotografía 2: Laguna de estabilización**

**Lodos activados.**- Es una de las tecnologías más difundidas a nivel mundial. Este sistema se crea en el año 1914 por Ander y Lockett, tiene como objetivo principal la coagulación y eliminación de sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 1996, citado en Arce, 2013), este es un tratamiento biológico de cultivo suspendido en condiciones aeróbicas y esto se logra mediante aireación por medio de difusores a fin de formar agregados de una masa llamada lodos activados.

Uno de los puntos más desfavorables es el uso de energía eléctrica para su operatividad, requiere de mano de obra semi especializada.



**Fotografía 3: Lodos activados**

**Biodiscos.-** En este caso también pasa por un tratamiento aerobio, donde el crecimiento de lamas o películas biológicas se desarrolla adhiriéndose a los discos propiamente dichos. Estos discos giran sobre un eje central y los discos giran lentamente haciendo un efecto de tirabuzón y el área inmersa dentro del agua en tratamiento oscila entre el 35 a 45%. En este caso, los microorganismos consumen la materia orgánica mientras están fuera del agua; los discos giran a muy bajas velocidades entre 1 a 5 rpm a fin que haya el tiempo necesario para la formación de la biopelícula (Hinostroza & Moscoso, 2014).



**Fotografía 4: Biodiscos**

**Filtros percoladores.**- También se le denomina filtro biológico o lecho bacteriano. Este tipo de tratamiento nace de la idea del uso de estanques impermeables el mismo que es relleno con piedra chancada. Es un sistema de tratamiento de agua aerobio que utiliza cultivos fijos no sumergidos.



**Fotografía 5: Filtros percoladores**

**Reactores anaerobios de flujo ascendente.**- Este tipo de tratamiento en el Perú está orientado a la obtención de biogás mediante el tratamiento de aguas residuales no domésticas. En este caso, mediante el uso de mezcla diluida con excretas de animales generalmente.

Esta técnica consiste en procesar el agua residual mediante un reactor de condición anaeróbica, en el cual las bacterias pasan por una serie de procesos como la hidrólisis, el ácido génesis, la acetogénesis y la metanogénesis; como producto final se obtiene el biogás y los biosólidos.

#### **2.6.4. Tratamiento terciario o avanzado**

En esta fase, se consideran los procesos que se utilizan para reducir la concentración de sustancias orgánicas e inorgánicas que provienen del tratamiento secundario. En este caso, se pretende aumentar la calidad del agua y el lodo eliminando los contaminantes previos a la descarga o disposición final. Para ello, se cuenta con métodos como la cloración, la filtración, el intercambio iónico, la coagulación química, la osmosis inversa, la electrodiálisis, etc.

Sobre el particular, Murcia (2013) considera al procedimiento terciario como el más completo para la eliminación de contaminantes. El objetivo es eliminar los constituyentes de las aguas residuales como nutrientes inorgánicas, compuestos tóxicos, excesos de materia orgánica y sólidos en suspensión.

#### **2.7. Lodos residuales o fangos**

Los lodos son el sub producto del tratamiento primario, secundario o terciario de las aguas residuales ya sean industriales o domésticas. El estado puede variar entre sólidos a líquidos, haciendo referencia al lodo de aguas residuales domésticas. Estas están compuestas generalmente por materia orgánica y se pueden usar en terrenos agrícolas, forestales, de bosques naturales y suelos



que hayan sufrido degradación y requieran ser rehabilitados como el caso típico de la zona de influencia minera en el Perú.

El problema de los lodos se genera cuando la población se incrementa. En ese sentido, los residuos generados por las primeras poblaciones eran fácilmente reciclados. Hasta antes de la aparición de los fertilizantes químicos por los años 40, los lodos se incorporaban al suelo agrícola como mejorador de la misma. Es, en estas circunstancias, que se da el efecto de desplazamiento (Hernández, 2004). En las últimas 4 décadas, se ha convertido nuevamente en un método atractivo de disposición de los lodos, básicamente, en países desarrollados como Estados Unidos. La data que refiere el mismo autor es que en 1998 en el país del norte el 67% se aplicaron a suelos agrícolas, el 4% a suelos forestales, el 9% a rehabilitar suelos degradados, el 8% a sitios de contacto público y el 12% se comercializaron de una producción de 6.9 millones de toneladas.

## **2.8. Tipos de lodos o fangos**

Si nos referimos al tipo de lodo de las aguas residuales domésticas, estas dependen del nivel de tratamiento al que haya sido sometido, entre ellos existen lodos de tratamiento primario, secundario y terciario. En efecto estos lodos son muy heterogéneos y sus características físicas, químicas, y biológicas no solo dependen del origen, sino de la tecnología de tratamiento al que fueron sometidos, también de la época del año y otros factores exógenos como el clima (Márquez y Parra, 2009).

Tabla 2: Caracterización de lodos generados en procesos de tratamiento de aguas residuales.

PARAMETROS	LODOS PRIMARIOS (Sin adición de químicos)	LODOS SECUNDARIOS (Licor mezcla de lodos activados)	LODOS DIGERIDOS (Mezcla)
pH	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	6.8 - 7.6
Contenido de agua (%)	92 - 96	97.5 - 98	94 - 97
SSV (% SS)	70 - 80	80 - 90	55 - 65
Grasas (%SS)	12 - 14	3 - 5	4 - 12
Proteínas (%SS)	4 - 14	20 - 30	10 - 20
Carbohidratos (%SS)	8 - 10	6 - 8	5 - 8
Nitrógeno (%SS)	2 - 5	1 - 6	3 - 7
Fosforo (%SS)	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	0.5 - 1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	$10^3 - 10^5$	100 - 1000	10 - 100
Metales pesados (%SS) (Zn, Cu, Pb)	0.2 - 2	0.2 - 2	0.2 - 2
SSV: Sólidos suspendidos volátiles, NMP: Número más probable, SS: Sólidos suspendidos			

Fuente: (García, 2009)

## 2.9. Clasificación de lodos

Para la clasificación de los lodos provenientes de las aguas residuales generalmente se toma en cuenta la norma 503 de la EPA, lo cual es propia de los Estados Unidos quienes han desarrollado la normativa 40CFR. Esta normativa se viene usando por diversos países por su aplicabilidad, lo cual incluye en forma clara la definición, clasificación, manejo, reutilización y eliminación de biosólidos. Por consiguiente, se extrae de la norma EPA la clasificación de los biosólidos en las siguientes clases:

**Biosólido clase A.-** Se les denomina como de calidad excepcional, bajo estos niveles, los biosólidos no tendrán restricciones de uso en el sector agrícola y solo será necesario solicitar permisos para garantizar que la norma se hayan

cumplido (Vélez, 2007). Estos lodos contienen bajos niveles de metales y normalmente no atraen vectores que transmiten enfermedades.

Tabla 3: Caracterización de lodos

PARÁMETROS		CATEGORÍA A	CATEGORÍA B	*LODO SECUNDARIO PTAR EL ROSAL	*LODO SECUNDARIO PTAR LA CALERA	*LODO SECUNDARIO PTAR BOJACA
FÍSICO QUÍMICOS	Contenido de Humedad (%)	≤ 35,0	≤ 70,0	10,15	1,85	1,89
	Contenido de cenizas (%)	≤ 60,0	No regulado	0,13	0,11	0,09
	pH (Unidades)	4,0 < pH < 9,0	4,0 < pH < 9,0	7,13	7,02	7,40
METALES PESADOS mg/kg	Arsénico	41	75	ND	ND	ND
	Cadmio	39	85	0,04	0,10	0,05
	Cromo	1200	3000	1,27	2,53	5,13
	Cobre	1500	4500	24,67	29,67	36
	Mercurio	17	57	ND	ND	ND
	Níquel	420	420	0,51	0,08	0,06
	Plomo	300	840	0,09	0,25	0,37
	Selenio	36	100	ND	ND	ND
MICROBIOLÓGICOS	Salmonella sp	Ausente en 25 gr de muestra	<1,00 E (+3) NMP/g-UFC/g base seca	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
	Coliformes fecales	<1,00 E (+3) NMP/g-UFC/g base seca	<2,00 E (+6) NMP/g-UFC/g base seca	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
	Escherichia coli	Reportar resultado	No regulado	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

Fuente: Norma EPA 40 CFR-503

- **Biosólido clase B.-** Este tipo de lodos se encuentran aptos para mejorar el suelo; sin embargo, por su contenido son de carácter restrictivo para el uso agrícola. En este sentido, deberán recibir tratamiento para reducir aún más la concentración baja de contaminantes y eliminar su condición de atrayente de vectores.

Bajo esta condición, estos lodos serán condicionados a evaluaciones y presentación de informes sobre los cultivos tratados.

## **2.10. Alternativas de uso de los lodos provenientes de aguas residuales domésticas**

La generación de lodos o fangos ha tomado importancia desde cuándo se ha canalizado la evacuación de las aguas residuales domésticas, porque antes se vertían directamente a los cursos de aguas (Metcalf & Eddy, 1996, citado en Hernández, 2004), es así que en Estados Unidos por el año 1989 la EPA (Agencia para la Protección del Medio Ambiente) propone regular el uso y evacuación de los lodos. Esta norma llega a cuantificar los límites para contenidos contaminantes y modos de actuación, básicamente, para aplicación al terreno, vertimiento de fangos, incineración, etc.

Por otro lado, en el país vecino de Chile, se puede evidenciar que los lodos que cumplen con el reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas de ese país, son dispuestos en terrenos de cultivo como mejorador de suelo, los mismos agricultores son los que piden la aplicación en sus campos de cultivo, ya que mediante esta práctica, se incrementa el rendimiento entre 23 – 30 % en la cosecha. Por su parte, Ramila y Rojas (2008) hacen referencia que para su aplicación en Chile, los campos de cultivo deben contar con un plan de aplicación de lodos, en el cual se debe considerar las condiciones geográficas, caracterización física y química, caracterización de los lodos, manejo agronómico y programa de seguimiento del área de cultivo a aplicar.

Por otro lado, de acuerdo a la norma EPA CFR-503, se puede aprovechar el lodo de la siguiente manera:

### **2.10.1. Categoría A**

En la agricultura para la obtención incluso de productos orgánicos, como enmienda orgánica que mejore la calidad de los suelos, en cultivos de pan llevar como las hortalizas, frutales, forraje y para abonamiento en praderas naturales. Así mismo en áreas verdes para recreación, parques, jardines, remediación de suelos, como también en

la fabricación de briquetas y como combustible alternativo (Márquez y Parra 2009).

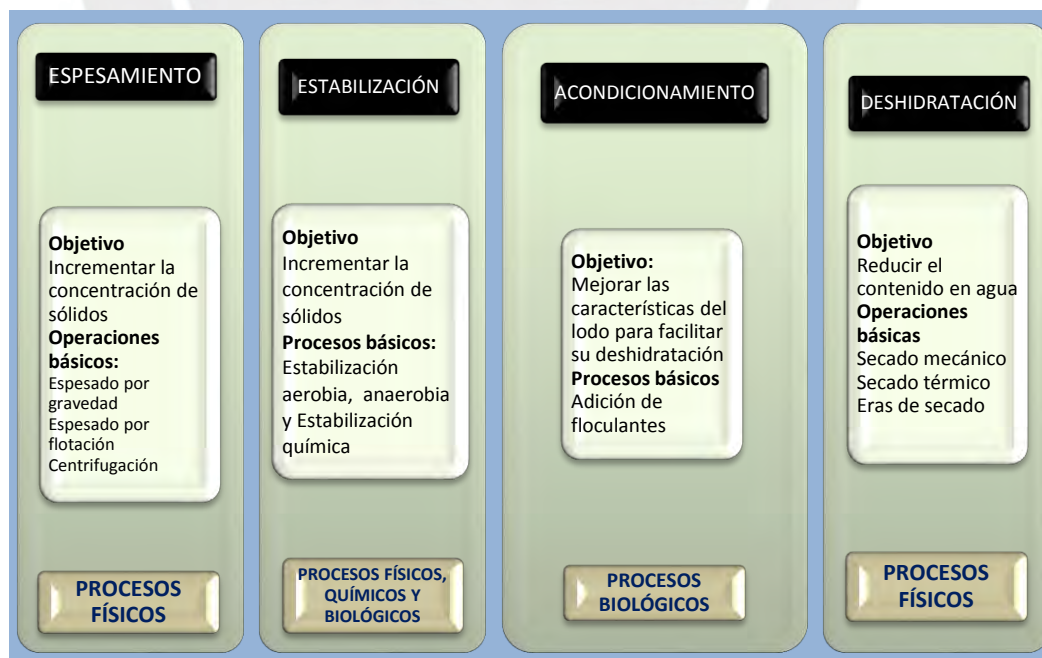
### 2.10.2. Categoría B

En la revegetación de suelos no destinados para la agricultura, en la estabilización física de taludes de proyectos de red vial y otros. En la recuperación de suelos degradados, como material de cobertura en áreas de condición erosionada, en plantaciones forestales, en fabricación de briquetas como uso de combustible alternativo e insumo para la obtención de materiales de construcción.

### 2.11. Tratamiento de lodos

En países como Estados Unidos, México, Chile, Argentina, Colombia, entre otros países de América, se ha reglamentado el manejo de lodos que se generan producto del tratamiento de aguas residuales domésticas, cuyo objetivo principal es proteger la salud de la población, prevenir el deterioro de los recursos naturales y también para que este lodo sea reaprovechado por las bondades que también posee (Ospina, Rodríguez y Gonzales, 2017).

**Figura 1: Tratamientos comprendidos en la línea de obtención de lodos**



Fuente: Manual de depuración de aguas residuales urbanas, Alianza por el agua (ECODES – AECID y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), - España y Centroamérica.

Para entender el tipo de tratamiento de lodos, debemos partir de la caracterización química y microbiológica. Para ello, existen diversos sistemas de análisis como la cromatografía, la espectroscopia, el fluorescente de rayos X, el análisis bacteriológico, entre otros, los cuales nos permitirán determinar el tratamiento que esté de acorde al uso final que se le quiera dar a los lodos. El contenido de metales pesados (Cd, Cr, Ni, Hg, Pb, Zn, y Cu) son parámetros a tener en cuenta, los cuales, sin lugar a dudas en las últimas décadas fueron disminuyendo gracias al reciclaje, la sustitución y a la tecnología que cada vez restringe su uso. Con ello, también se han visto beneficiados los lodos de las aguas residuales.

Por otro lado, en la caracterización, no deja de ser importante conocer el contenido de microorganismos (*salmonella* spp. y *escherichia coli*), así como también los parámetros de relación agronómica como (pH, CE, MO, NT, NH<sub>3</sub>, P, Ca, Mg, K y Fe) y, por último, los contaminantes orgánicos.

Hernández (1996) hace hincapié en la procedencia de los lodos, en relación a la contaminación de las aguas que quedan contenidas en los fangos o lodos, las cuales son extraídas de los decantadores primarios y/o secundarios, generalmente. Así mismo, el autor acota que, para tratar los lodos, las plantas depuradoras deben tener en cuenta algunos aspectos específicos como el volumen de producción; la variación de los contenidos orgánicos e inorgánicos; el tipo de población; el nivel de cultura de usos y costumbres; la época del año; el grado de industrialización; el consumo de la población; el nivel de vida de la población; el uso futuro del lodo orientado como recurso; la normativa vigente donde se deba considerar los aspectos ambientales de manejo, y disposición y responsabilidad ambiental; y los aspectos económicos para implementar el proceso de tratamiento final de estos lodos o biosólidos. Finalmente, el autor concluye que la planificación es el aspecto clave para el tratamiento de los lodos desde el punto de vista que los lodos son un subproducto no deseado que genera muchos problemas. Hernández añade en el texto (1996) que la situación de esa época bajo el contexto ambiental, social actual era la exigencia de la reutilización de los lodos.

### 2.11.1. Criterio de valoración para el tratamiento de lodos

Entendiéndose que los lodos tienen un alto valor agronómico, conforme lo indica Hernández (2001, citado en Cruz, 2015), los lodos de una planta de depuración son orgánicos y se caracterizan por su alto contenido de nitrógeno y fósforo, y poco contenido de potasio y azufre. Por otro lado, los lodos cuentan con organismos patógenos que provienen de los desechos humanos. En este sentido, Hernández (1996) para los criterios de valoración, establece las siguientes condicionantes:

- Restricciones en vertimientos controlados
- Limitaciones en el tratamiento por las condiciones ambientales a las que se exponen
- Restricciones para la estabilización aerobia y anaerobia
- Limitaciones a ser incorporados al suelo de acuerdo a sus características sobre todo físicas
- Limitaciones técnicas, socio ambientales y políticas

### 2.11.2. Espesamiento

Es la primera etapa del tratamiento de lodos. Permite reducir al mínimo el volumen, lo cual facilita el manejo, transporte y almacenamiento, y además reduce los costos de operación. Para desarrollar este proceso, existen dos métodos:

2.11.2.1. **Espesamiento por gravedad:** Este mecanismo funciona con la fuerza de la gravedad. Para ello, el diseño del tanque es de forma cónica en la base a fin de sedimentar los lodos y algunas veces también se requiere de la ayuda de floculantes para elevar el peso específico. En ese sentido, en la base, se ubicará la válvula de salida de lodos. Cabe anotar que el diseño debe considerar el tiempo de salida de los lodos a fin de no generar olores o descomposición anaeróbica.

2.11.2.2. **Espesamiento por flotación:** En este caso el lodo es forzado a flotar mediante el mecanismo de introducción de burbujas finas de aire dentro de la fase líquida. Son las burbujas las que empujan a los lodos a la superficie para ser removidos por acción mecánica, en efecto a diferencia del método anterior la velocidad ascendente es mayor a la velocidad de sedimentación.

### 2.11.3. Estabilización

Debe entenderse que el proceso de estabilización de los lodos permite la reducción del contenido de materia orgánica con el fin de reducir los patógenos, eliminar los olores, y reducir o eliminar la capacidad de fermentación de la misma (Hernández, 2004). Bajo este considerando de inestabilidad, los lodos son aún atracción para los vectores y liberación de olores.

2.11.3.1. **Estabilización biológica.-** La composición física, química y biológica de los lodos, la presencia de microorganismos, la flora y fauna propia de la naturaleza de los lodos, más el factor climático son condiciones favorables para que las transformaciones bioquímicas se sigan dando. En este sentido, la estabilización de lodos consiste en inducir a que estos procesos se den de una manera controlada (Morales, 2009).

2.11.3.2. **Digestión aerobia:** Este proceso está orientado al tratamiento de los lodos mediante la aplicación de aire para eliminar los patógenos de la parte fermentable. Para ello, generalmente, se puede usar turbinas mecánicas sumergidas. Mediante este método, habrá tanta oxidación directa de la materia orgánica como la respiración endógena de la biomasa.



2.11.3.3. **Digestión anaerobia:** El presente trabajo de investigación quiere resaltar este tipo de tratamiento, a razón de la obtención de subproductos como el biogás, el abono orgánico y el biol. Estos tratamientos poseen diversos beneficios ambientales y tienen un bajo costo de implementación, por lo que pueden ser aprovechados en pequeñas poblaciones como el caso de los campamentos mineros del Perú.

Este método de tratamiento en las dos últimas décadas ha tomado mucha fuerza por la obtención del biogás, al que se le ha añadido el componente técnico de diversos diseños, formas y tamaños de biodigestores. Si analizamos el principio de este tipo de tratamiento, está basado en la forma de digestión fisiológica de los animales como el caso de los vacunos, cerdos y del mismo hombre.

La digestión anaerobia está basada en un proceso biológico, donde la materia orgánica constituye un insumo básico para el proceso de biodegradación. De la misma forma, la ausencia de oxígeno es necesaria para activar las bacterias anaeróbicas, entre otros elementos.

El biodigestor en la actualidad constituye una tecnología que se viene usando en todo el mundo, tal es así que en Sudamérica, sobre todo en Bolivia y en el altiplano de Perú, se ha difundido esta tecnología precisamente para aprovechar los desechos de los animales mayores como el caso de vacunos, alpacas, ovinos entre otros. Es propicio destacar que el proceso de digestión en los biodigestores se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre 35 y 65 °C (Trapote, 2011), la pregunta cae de por sí, cómo en el altiplano se logra esta temperatura. Para ello, se viene trabajando con la implementación de invernaderos cuyo propósito es acumular energía solar dentro de un ambiente

que deje pasar los rayos solares, y que impida que estos retornen al ambiente, y que queden, por lo tanto, atrapados en el ambiente del mismo invernadero. Esta tecnología<sup>8</sup> se acentuaría muy bien en los campamentos mineros del Perú considerando que la mayoría de ellos se ubican a partir de los 3 600 msnm.

Los lodos de las aguas residuales domésticas de las empresas mineras, luego de pasar por los tratamientos primarios y/o secundarios constituyen un insumo perfecto para ser sometido a la digestión anaerobia. De acuerdo a Metcalf y Eddy (1996, citado en Hernández, 2004), los lodos se clasifican como lodos primarios, secundarios y terciarios. Estos lodos a su vez, luego de ser tratados en las plantas de tratamiento de aguas residuales se clasifican en A y B, pero la calidad a obtener va depender mucho del tipo de tratamiento. En este sentido, si este lodo es sometido a tratamiento anaerobio se podría obtener lodo residual de clase A. Este tipo de lodo, según la Norma 503 de la EPA, puede ser aplicado directamente al suelo para su aprovechamiento en la agricultura por contener niveles de patógenos no detectables, no atrayentes de vectores y por sus bajos niveles de metales pesados (Metcalf y Eddy, 1996).

Factores químicos que influyen en el proceso anaerobio:

#### **a. Composición del sustrato**

Al respecto el manual de biogás publicado por el Gobierno de Chile – Ministerio de Energía<sup>9</sup>, indica que los sustratos ideales para la digestión son los

---

<sup>8</sup> Esta técnica si bien es cierto no está bien difundida en el Perú, data de hace varios siglos atrás. Corona (2007) indica que en el año 1770 el italiano Volta colecta gas e investiga su comportamiento. El mismo autor menciona que en el año 1997 en Alemania se habían instalado 400 plantas agrícolas para la generación de biogás.

<sup>9</sup> Manual de biogás, MINENERGIA/ PNUD / FAO / GEF. p. 35

componentes orgánicos húmedos, los cuales pueden ser de origen vegetal o animal. La relación carbono nitrógeno (C/N) es básica para lograr una fermentación ideal, las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno. En ese sentido, si se supera este rango los procesos de descomposición se aletargan, y si estuviera por debajo se inhibe el proceso. Por todo lo mencionado, es importante conocer el componente de los sustratos a tratar, el mismo que debe estar balanceado en una combinación con materiales ricos en nitrógeno y carbono. Valores promedio aproximados de la relación carbono / nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

**Tabla 4: Relación Carbono Nitrógeno**

<b>Materiales</b>	<b>% C</b>	<b>% N</b>	<b>C/N</b>
<b>Residuos animales</b>			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
<b>Residuos vegetales</b>			
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: Varnero y Arellano, 1991

## **Fases:**

### *Hidrolisis (licuefacción)*

También se le conoce como etapa hidrolítica. Corona (2007) indica que la materia orgánica es enzimolizada por enzimas extracelulares (celulosa, amilasa, proteasa y lipasa). La National Academy of Sciences (1997) indica que las proteínas son desdobladas a moléculas de peso molecular más bajo. En esta fase, se presenta el proceso fermentativo ácido que origina el acetato, propionato, butirato, etanol y en menor cantidad el hidrógeno (citado en Télles 2008, p. 8).

### *Acetogénesis*

En esta etapa, una serie de microorganismos anaerobios bacterianos llamados acetogénicas convierten las moléculas orgánicas de pequeño tamaño y los ácidos grasos volátiles en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (MINENERGIA, 2011)<sup>10</sup>.

### *Metanogénesis*

En esta última etapa, las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas) son esenciales para este tipo de digestión, por ser los únicos microorganismos que pueden catabolizar anaerobiamente el ácido acético e hidrógeno para dar productos gaseosos en ausencia de energía lumínica y oxígeno (MINENERGIA, 2011)<sup>11</sup>.

Por otro lado, es imperante conocer los factores que aportan valor a la actividad microbiana en condición aerobia:

---

<sup>10</sup> Manual de biogás, MINENERGIA/ PNUD / FAO / GEF. p. 20 - 21

<sup>11</sup> Manual de biogás, MINENERGIA/ PNUD / FAO / GEF. p. 24

Por su parte, Ruiz (2010) señala que el *nivel de pH*, si por alguna razón no hay suficientes bacterias metanogénicas en el digestor para convertir los ácidos en metano, el pH puede caer desde su valor normal de 7-7.5 a menos de 6 a medida que se acumulan los ácidos. El resultado de esta anomalía puede ser el cese de la producción de gas debido al efecto letal de la acidez sobre las bacterias formadoras de metano. Este fenómeno recibe el nombre de acidificación, y es una de las razones por las que se evita agregar cítricos en las cargas de desechos dentro del biodigestor.

*Temperatura*, la digestión es más rápida y completa a temperaturas elevadas. Es muy importante que la temperatura elegida no oscile en un intervalo mayor de 1 o 2 grados, concluye finalmente Ruiz (2010).

Del biodigestor se obtienen dos productos: bioabono y biogás. Sus principales componentes son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

2.11.3.4. **Estabilización con cal:** En este caso se usa la cal viva, la cual es aprovechada para eliminar los microorganismos o patógenos. También es usada antes del proceso de secado.

## **2.12. Aprovechamiento y disposición de los lodos de las aguas residuales**

La generación de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales trae beneficios ambientales y también de ingreso económico, entre los usos que se le puede dar se encuentra la generación de energía y el aprovechamiento en la agricultura, luego de pasar por el proceso de compostaje o vermiestabilización.

### **2.12.1. Fuente de energía**

El lodo, como tal, al ser sometido a condiciones anaeróbicas o llevado a reactores herméticos en ausencia de oxígeno como los biodigestores genera subproductos como el gas metano. En este sentido, es

oportuno indicar que los lodos o desechos orgánicos son fuente de energía.

La obtención de biogás, abono orgánico y fertilizante foliar, llamado biol, inicialmente, era considerada como un imposible. Ahora con las experiencias de Brasil, Taiwán, Colombia y, últimamente, Bolivia en el altiplano, se aprovecha la bondad de las excretas humanas y de animales para este propósito. Es importante anotar los principales beneficios del uso de este tipo de energía:

- Eficiencia en la conversión y uso de energía
- Menor emisiones al ambiente
- Aprovechamiento de combustible alterno

#### **2.12.2. Aprovechamiento en la agricultura**

Países como Estados Unidos, en los últimos 40 años, han triplicado el número de PTAR y han generado volúmenes importantes de lodos, los cuales son tratados e incorporados a los suelos agrícolas para mejorar la calidad de los mismos. Para ello, se han elaborado los instrumentos de gestión legales o normativos, así como las alternativas técnicas necesarias. En el caso del país del norte, este genera cerca de 8 millones de toneladas anuales, de las cuales el 67% se aplican a los suelos agrícolas.

En España, también se han dado las condiciones legales para el aprovechamiento de los lodos de las aguas residuales domésticas. En este caso, se tiene la Directiva 86/278/CEE del consejo de 12 de Junio del 1986; el Real Decreto 1310/1990, del 29 de octubre que regula la utilización; y a la vez el II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales EDAR II (2008-2015), aprobado mediante el Consejo de Ministros el 26 de diciembre del 2008. Es en este país que se han creado empresas que gestionan este tipo de lodos como el caso de SEARSA que trabaja con las aguas urbanas de Madrid mediante la aplicación de lodos en beneficio de la agricultura con la producción anual de 32 000 TM de materia (Pujo, Monferrer & García,

2011). En forma general, España aplica 670,000 toneladas de lodos procesados a los suelos agrícolas.

Asimismo, en Latinoamérica, Chile, Colombia, España y México, se ha alcanzado una amplia cobertura en el sistema de saneamiento y alcantarillado (mayor al 95%) del cual a solo el 10% se le aplica algún tipo de tratamiento de aguas servidas (Reynolds, 2002). Ahora bien, el reaprovechamiento de estos lodos que se incorporan al suelo agrícola genera cambios positivos como la mejora de las propiedades físicas (estructura agregada, capacidad de absorción de agua, regulación de la textura, etc.), químicas (provee de nutrientes esenciales para el desarrollo de cualquier vegetal que incluye los macro y micro elementos) y biológicas (como activador de vida microbiana al interior del suelo agrícola).

Así mismo, Hernández (1996) señala que la incorporación al suelo de los lodos mejora la agregación del mismo e incrementa su porosidad; del mismo modo, por su alto contenido de materia orgánica, el lodo retiene mayor cantidad de humedad y adiciona nutrientes esenciales al suelo, los cuales estarían disponibles para las plantas de manera inmediata. Por último, reactiva la acción microbiana del suelo.

En México, el estudio del INIFAP concluye que en el cultivo de maíz forrajero se reduce el costo de producción entre el 16-27% y aumenta el rendimiento de producción de la cosecha en verde entre el 4 y 88%; así mismo, en la aplicación a plantaciones forestales, en este caso al pino (*pinus douglasiana*) se ha obtenido un 20.9% más de sobrevivencia, así como un incremento en su altura y diámetro de alrededor del 18% (Barrios, 2009). A pesar de todo lo indicado, es oportuno señalar que la aplicación de lodos genera resistencia, básicamente, debido a la desinformación.

### **2.13. Disposición de lodos de aguas residuales**

Una vez que los lodos hayan sido tratados en sus diversas etapas primaria y/o secundaria requieren de una disposición adecuada cumpliendo las condiciones de no afectación al medio ambiente, a la salud o en su defecto sin alterar algún

componente o recurso natural como en este caso el agua, suelo y aire; es en este sentido, que los lodos se convierten en el problema más complejo para los especialistas debido a que los fangos o lodos están compuestos de sustancias que emanan olores desagradables, por materia orgánica que aún falta descomponerse y solo una pequeña parte del fango está compuesta por materia sólida Metcalf y Eddy (1996).

**Tabla 5: Métodos de tratamiento y evacuación de lodos o fangos**

<b>Operación / Método de tratamiento</b>	<b>Función</b>
Pre tratamiento: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dilaceración</li> <li>• Desarenado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de tamaño</li> <li>• Eliminación de arenas</li> </ul>
Espesamiento: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Por gravedad</li> <li>• Por flotación</li> <li>• Por centrifugación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> </ul>
Estabilización: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilización con Cal</li> <li>• Tratamiento térmico</li> <li>• Digestión Anaerobia</li> <li>• Digestión Aerobia</li> <li>• Compostaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilización</li> <li>• Estabilización</li> <li>• Estabilización, Reducción de masa</li> <li>• Estabilización, Reducción de masa</li> <li>• Estabilización, Recuperación de productos</li> </ul>
Acondicionamiento: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Químico</li> <li>• Térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionamiento del Lodo</li> <li>• Acondicionamiento del Lodo</li> </ul>
Deshidratación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro de vacío</li> <li>• Centrífuga</li> <li>• Filtro banda</li> <li>• Filtro Prensa</li> <li>• Eras de secado</li> <li>• Lagunaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Reducción de Volumen</li> <li>• Almacenamiento, reducción de volumen</li> </ul>
Desinfección: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasteurización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desinfección</li> </ul>
Secado: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Por pulverización</li> <li>• En horno rotativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de peso, reducción de volumen</li> <li>• Reducción de peso, reducción de volumen</li> </ul>
Reducción Térmica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hornos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de volumen, recuperación de energía.</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incineración</li> <li>• Oxidación por vía húmeda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de volumen</li> <li>• Estabilización, reducción de volumen</li> </ul>
<p>Evacuación final:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación al terreno</li> <li>• Distribución comercial</li> <li>• Fijación química</li> <li>• A vertedero</li> <li>• Lagunaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evacuación final</li> <li>• Usos beneficiosos</li> <li>• Usos beneficiosos, evacuación final</li> <li>• Evacuación final</li> <li>• Reducción de volumen</li> </ul>

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

En la tabla N° 01, se indica las diferentes técnicas y métodos de tratamiento de los lodos, con la cual es factible estabilizar los lodos, manejar hasta su disposición final y aprovechamiento.

### 2.13.1. Disposición de lodos en rellenos

Para disponer los lodos en este tipo de infraestructura se debe cumplir ciertos factores de seguridad a la salud humana, de impacto al ambiente, de impacto a los acuíferos, entre otros. El monorelleno de Calama Chile es un proyecto que cuenta con aprobación ambiental mediante una resolución de calificación ambiental (RCA). Esta infraestructura es impermeabilizada con geotextil, los taludes de ángulo de reposo de las paredes cuentan con evaluación y aprobación geotécnica, entre otros considerandos, previo a la puesta en funcionamiento (Superintendencia de Servicios Sanitarios de Chile, 2016).

### 2.13.2. Incineración de lodos

En este caso, los lodos son sometidos a una combustión completa de la materia orgánica. Para ello, los lodos deben estar previamente deshidratados con un porcentaje mayor al 26% de materia seca. Como resultado los lodos quedan reducidos a cenizas que representan solo el 10% de su composición inicial, con ello, se logra una destrucción completa de los patógenos. Algunas desventajas o dificultades que se presentan son el alto costo de operación y mantenimiento; la calificación del personal; la necesidad de un tratamiento extra de gases, partículas en suspensión, aguas de

lavado y cenizas; y la oposición social a la incineración, tal característica es resaltado por Palacios (2013). Este proceso cobra mayor expectativa en lugares donde no hay suficiente área de terreno, cuando las normas son muy exigentes o cuando se requiere eliminar materiales tóxicos de los lodos que no pueden ser degradados vía tratamiento biológico.

## **2.14. Estabilización de lodos**

Al respecto, es oportuno anotar que Metcalf y Eddy (1996) consideran que para proyectar el tratamiento de estabilización de los lodos es necesario considerar factores como su procedencia, su cantidad y sus características:

### **2.14.1. Compostaje de lodos**

Es una técnica de tratamiento de residuos orgánicos en condición aerobia muy conocida para la obtención de abono. En estos últimos años, en países como Chile, México, Brasil y Colombia se ha venido desarrollando esta técnica para someter a compostaje a los lodos que provienen de las aguas residuales domésticas. El manejo para este sistema requiere de investigación donde se debe considerar varios factores externos (condición climática), e internos como las características del lodo (físicas, químicas y biológicas) a fin de estabilizar estos. En ese sentido, normalmente requiere ser mezclado con otros tipos de residuos orgánicos como residuos de cocina, aserrín, restos de cosecha, hojarascas, etc. a fin de mejorar la relación carbono nitrógeno C/N (Márquez & Parra, 2009).

Según Soliva, Torrento & Huerta (2008), el compostaje es un proceso biológico en condiciones aeróbicas y termófilas. Para desarrollarse, requiere de materia orgánica, una población inicial de microbios, temperatura, humedad entre otros factores y otras condiciones adecuadas que posibiliten la multiplicidad de funciones y procesos sinérgicos (citado en Pérez 2009, p. 41).

Así mismo, Bueno, Díaz y Cabrera (2008) indican que el proceso de compostaje depende de dos tipos de variables: los parámetros de seguimiento y los parámetros relativos a la naturaleza del sustrato.

Por un lado, se encuentran los *parámetros de seguimiento*. Estos parámetros son vitales en el proceso de desarrollo y hay que adecuarlos a los valores promedio a fin de obtener compost de calidad:

- **Temperatura.**- Para el desarrollo del proceso de compostajes se observan tres fases: la fase inicial mesófila, la fase termófila y la fase mesófila final (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008). Para cada uno, es variable el requerimiento de temperatura ideal, sin embargo, es bueno indicar que no sobrepase los 60°C.

- **Humedad.**- Para manejar la humedad durante el proceso de compostaje es básico considerar que el agua debe ocupar el espacio poroso entre el 50-70% a fin de no impedir la libre circulación de oxígeno (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

- **El pH.**- En la fase mesófila se reduce el pH por la liberación de ácidos orgánicos, durante la etapa termófila se alcaliniza por la pérdida de ácidos grasos y Y por la producción de amoníaco. En la última fase, el pH baja debido a los compuestos húmicos (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008)

- **Aireación.**- El proceso de compostaje se lleva a cabo mediante el proceso aerobio. De faltar el oxígeno se genera el fenómeno anaerobiosis con lo cual aparecen malos olores y el sulfhídrico; y en condiciones de mucha aireación se provoca el enfriamiento de la pila lo cual también es negativo para la actividad microbiana (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

- **El espacio al aire libre.**- La interacción entre la humedad, la densidad aparente, la densidad real y la porosidad resulta muy importante de considerar en el proceso de compostaje (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

Por otro lado, encontramos los *parámetros relativos a la naturaleza del sustrato*. Es importante caracterizar, evaluar y corregir antes de realizar el proceso de compostaje.

- **La relación C/N y C/P.**- En la relación C/N, el óptimo es 25-35, puesto que se consume 30 veces más carbono que nitrógeno, terminado el proceso debe haber una relación de 10; respecto a C/P, debe situarse entre 75 y 150 (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

- **La materia orgánica.**- Durante el proceso de compostaje alrededor del 20% de la materia orgánica se mineraliza y se libera como CO<sub>2</sub> (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

- **La conductividad eléctrica.**- En el proceso de compostaje tiende a elevarse debido a la mineralización de la materia orgánica, en condiciones no habituales puede disminuir por el fenómeno de lixiviación (Bueno, Díaz y Cabrera, 2008).

#### 2.14.2. Vermiestabilización de lodos

Esta técnica aprovecha la bondad de alimentación y degradación de las lombrices de tierra. Para alimentar a las lombrices, se requiere realizar una mezcla de material orgánico que haya pasado por el proceso de compostaje y lodo fresco a una humedad entre el 55 a 60%, y el inóculo de una colonia de lombrices. Cabe indicar que este alimento requiere de mantenimiento como la conservación de humedad, y una cubierta, ya que las lombrices para desarrollarse requieren de oscuridad (Vicencio, Pérez, Medina & Martínez, 2011).

#### 2.14.3. Biodigestión de lodos

Esta técnica reduce significativamente los patógenos de los lodos, Cruz (2015) refiere a dos tipos de digestión:

**Digestión aerobia.**- En este sentido, el lodo es tratado mediante la incorporación forzada de oxígeno mediante agitadores manteniendo en todo momento la condición aerobia por un tiempo determinado y a una temperatura específica. Cruz (2015) refiere que a 20°C el tiempo de

tratamiento es de 40 días, aproximadamente, y a 15°C 60 días, respectivamente.

**Digestión anaerobia**.- El lodo es sometido a tratamiento en ausencia de oxígeno durante un periodo y a una temperatura relativamente estable. Cruz (2015) señala que a temperatura que fluctúa entre 35 y 55°C el tratamiento será de 15 días y a 20 °C será de 60 días.

## **2.15. Procesos y participantes en la degradación de lodos**

### **2.15.1. Procesos biológicos**

El éxito del tratamiento biológico de las aguas residuales domésticas es posible. En la mayoría de los casos depende del análisis y el control adecuado de todos los factores del entorno (Metcalf & Eddy, 1996); por tanto, es necesario conocer el funcionamiento y características de todos los procesos que involucra el tratamiento biológico, conocer la participación de cada uno de los microorganismos responsables, entre otros factores exógenos.

### **2.15.2. Digestión anaerobia de lodos**

Sobre el particular debemos entender que la digestión de los lodos, se fundamenta en un proceso de tratamiento biológico, donde el lodo se convierte en alimento esencial para el metabolismo de los microorganismos. En ese sentido, el lodo se convierte en una fuente de energía, fuente de carbono y fuente de nutrientes.

### **2.15.3. Bacterias**

Para desarrollar esta fase del estudio haremos referencia a la publicación del libro que ha marcado la diferencia en el entendimiento del tratamiento de aguas residuales, nos referimos a (Metcalf y Eddy, 1996), respecto a las bacterias, estas se definen como organismos procariotas<sup>12</sup> unicelulares su modo habitual de reproducción es por

---

<sup>12</sup> Son aquellas células que no poseen un núcleo celular diferenciado, el ADN se halla dispersado por el citoplasma; su metabolismo es ampliamente variado, llegando a resistir condiciones ambientales muy adversas sobre todo a los factores de temperatura y acidez.

escisión binaria<sup>13</sup>, aunque algunas se reproducen sexualmente o por gemación. En el citoplasma, contiene una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos y otros compuestos complejos (Metcalf y Eddy, 1996). En la región citoplasmática, contienen al ARN cuya misión es sintetizar las proteínas, en el citoplasma se halla la región del núcleo rica en ADN, el ADN contiene la información necesaria para la reproducción y se puede considerar como la base de la célula (Metcalf y Eddy, 1996).

Respecto a las necesidades de temperatura y pH, las bacterias pueden sobrevivir bajo condiciones extremas; sin embargo, es propicio conocer el rango óptimo en el que puedan desarrollarse. En este sentido, las psicrófilas (12 -18 °C), las mesófilas (25 – 40 °C) y las termófilas (55 - 65 °C), respecto al pH, no toleran por debajo de los 4 ni superior a los 9.5, en general el pH óptimo está entre 6.5 – 7.5.

#### **2.15.4. Hongos**

Metcalf y Eddy (1996) definen a los hongos como organismos importantes en la ingeniería sanitaria. Estos son protistas<sup>14</sup> y heterótrofos<sup>15</sup>, no fotosintéticos y multicelulares; su reproducción es por escisión, gemación o formación de esporas. La mayoría de los hongos son aerobios estrictos, toleran pH bajo (óptimo 5.6). La característica principal de los hongos en el tratamiento de aguas residuales es la capacidad de sobrevivir a pH bajos y escasa disponibilidad de nitrógeno, por lo que son de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales industriales.

---

13 La escisión o fragmentación es un método de división asexual, por el cual un individuo se divide en dos o más trozos, cada uno es capaz de reconstruir un organismo por completo.

14 Reino al que pertenecen los organismos eucariotas unicelulares o pluricelulares muy sencillos sin tejidos diferenciados

(<https://www.google.com.pe/search?q=protistas&oq=protistas&aqs=chrome..69i57j0l5.5562j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>).

15 Organismos que obtienen energía, nitrógeno y carbono a partir de la alimentación de otros seres vivos como es el caso de los hongos.

### **2.15.5. Protozoos y rotíferos**

Metcalf y Eddy (1996) considera a los protozoos, “son heterótrofos y aerobios, aunque algunos anaerobios suelen ser mayores que las bacterias y suelen alimentarse de ellas para la obtención de energía. El hecho de alimentarse de bacterias y materia orgánica actúan como purificadores de los efluentes de procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales” Metcalf y Eddy (1996).

El rotífero, “es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular. Son muy eficaces en la eliminación de bacterias dispersas y floculadas, así como de pequeñas partículas de materia orgánica; en un proceso aerobio de purificación biológica es muy eficiente” Metcalf y Eddy (1996).

### **2.15.6. Algas**

Haciendo referencia a Metcalf y Eddy (1996), las algas son reconocidas por su capacidad de generar oxígeno vía la actividad fotosintética, lo cual es vital en lagunas de oxidaciones aerobias o facultativas. Las algas suministran oxígeno para las bacterias heterótrofas aerobias.

## **2.16. Aplicación y/o aprovechamiento de lodos**

### **2.16.1. Aplicación de biosólido al suelo como enmienda agrícola**

Al respecto, Cruz (2015) indica en su trabajo de investigación que los biosólidos son una fuente importante de nutrientes, de materia orgánica y de ácidos húmicos a los cultivos en algunos casos. Para los cultivos de sandía y tomate se observó una corrección del pH del suelo e incluso una mejora en la textura de este. El estudio mostró, así mismo, que esas mejoras no se dieron en el caso del cultivo de arroz. Esto se podría deber a que el cultivo de arroz requiere de suelos muy distintos como los anegados y arcillosos. En este sentido, se requiere de mayores estudios.

### **2.16.2. Aplicación a cultivos agrícolas**

Cruz (2015) indica que el lodo aplicado a nivel de macronutrientes, y el aporte de N y P ha sido muy significativo a diferencia del aporte de K que fue el mayor ausente. Así mismo, el mismo autor refiere que entre la aplicación de fertilizantes sintéticos y la aplicación de los biosólidos no hubo diferencias significativas. Finalmente, concluye que la dosis de aplicación en los cultivos debe estar condicionada a análisis previos, ya que no siempre la mayor cantidad está en relación directa al mayor volumen de producción.

### **2.16.3. Uso en especies forestales**

Para tal efecto, en el estudio sobre aplicación de biosólidos en plantaciones de eucalipto en Chile realizado por Donoso, Peña, Galdames, Pacheco, Espinoza y Duran (2016), se indica que, después de cuatro años de evaluación, los biosólidos son una alternativa benéfica para incrementar la condición hídrica en plantación adulta. Así mismo, los autores refieren que en Australia, la aplicación de biosólidos en un rodal de *pinus radiata* generó incrementos en volumen que van de 12 a 42%.

### **2.16.4. Frutales**

Al respecto, Schneider – INIA CHILE (2005), realiza el estudio en el cultivo de frutales, dicho estudio concluye que el lodo es un sustrato que aporta nitrógeno y fósforo sobre todo en la uva de mesa. El estudio indica, así mismo, que la adición del lodo ha determinado la mejora en las propiedades físicas del enraizamiento (específicamente en el área de aplicación), lo cual es muy relevante por permitir mayor cabello radicular, es decir, por mejorar la capacidad de absorción de nutrientes de la planta.

### **2.16.5. Áreas verdes y esparcimiento, y pastos**

Al respecto la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (EPA), refiere que la aplicación de lodo de clase A, no tiene restricción



alguna para el contacto directo con el ser humano a diferencia de la clase B.

#### **2.16.6. Recuperación de áreas degradadas y estabilización de taludes**

Al respecto, Henríquez – INIA CHILE (2005) realiza el estudio de valoración de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas como mejorador de suelos degradados. Dicho estudio concluye que los biosólidos utilizados de clase B presentaron características fisicoquímicas y microbiológicas aceptables y se encontraban dentro del reglamento del CONAMA (2000). Así mismo, indica que los cultivos utilizados en la recuperación de áreas degradadas como el maíz y trigo no presentaron síntomas de toxicidad, plagas o enfermedades, al contrario presentaron un color verde intenso atribuyéndose al nitrógeno aportado por el biosólido.

#### **2.17. Desarrollo sostenible**

Si hacemos un reseña del desarrollo sostenible, pasaríamos por la convención para la preservación de los animales silvestres, pájaros y peces del África realizado en el año 1900; por la convención para la protección de la flora y fauna de África desarrollado en el año 1933; por la conferencia de Estocolmo en el año 1972; por la comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo “Comisión Brundtland”; por la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible conocida como RIO + 5 desarrollada en el año 1997; entre otras, que no dejan de ser importantes para entender que no hay futuro sostenible, sino se hace un aprovechamiento racional de los recursos. Vale decir que la preocupación ya no solo es de los gobernantes, sino de todos quienes habitamos y gozamos de la naturaleza.

El concepto de desarrollo sostenible se gesta a finales de los años 80, acuñándose en la mente de los líderes mundiales que no lo pueden dejar de lado, debido a que la corriente de investigación se encontraba encaminada. Por ello, en la Cumbre para la Tierra +5, se apunta a buscar un futuro sostenible basado en el trabajo de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1983), y a resultados del Informe Brundtland. En esa línea, existe un antes y un después, producto de la Cumbre para la Tierra +5, y se llega a varios

acuerdos entre las que se puede destacar *la Declaración de Río*. En ella, se indica que si bien es derecho de los estados aprovechar sus propios recursos, ello se debe hacer sin dañar el medio ambiente. La declaración también insta a no demorar la adopción de medidas de protección del medio ambiente. Con este acuerdo y los demás puntos tratados, volvemos al principio de desarrollo sin degradación.

Al respecto, también es oportuno anotar que Gallopín (2003) en su informe del proyecto NET/00/063 “Evaluación de la sostenibilidad en América Latina y el Caribe”, en su calidad de Asesor Regional de Política de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL, resume que los conceptos de sostenibilidad y desarrollo sostenible se deben examinar desde una perspectiva sistémica. Es cada vez más incuestionable que el entendimiento de sostenibilidad y desarrollo sostenible requiere de la inclusión de factores económicos, sociales, políticos y ecológicos (CNUMAD, 1992; Gallopín y otros, 2001; Kates & otros, 2011).

Ahora bien, cómo trasladar estos principios básicos a los actores principales, nos referimos a la sociedad en su conjunto, a las empresas que también generan impactos al medio ambiente, acaso debemos seguir leyendo documentos y no pasar a la acción, para entender y enmarcarnos al desarrollo sostenible. Ello nos conlleva también a concebir en toda su amplitud el concepto de Responsabilidad Social Empresarial.

Si pretendemos lograr la sostenibilidad del uso racional de recurso hídrico, es oportuno hacer referencia a la agenda 2030 para el desarrollo sostenible del 25 de setiembre del 2015, donde los 193 estados miembros de la Asamblea General de las Naciones Unidas, adoptan 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Es el ODS número 6 la que resalta y menciona que se debe garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. En el Ítem 6.3 se resalta más aun, que para el 2030 se debe mejorar la calidad de agua con acciones que reduzcan la contaminación, se debe eliminar los vertimientos, y reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar.

## 2.18. Responsabilidad social empresarial

Formas en como las empresas gestionan sus impactos que se derivan del desarrollo de sus actividades basadas en sus políticas internas que al mismo tiempo contribuyen al desarrollo sea o no sostenible. En la medida en que el concepto sostenible, se refleje en los ideales sociales, económicos y ambientales de toda la comunidad, básicamente de los grupos de interés.

Relativamente, hasta hace poco la responsabilidad de las empresas se circunscribían en generar utilidades. Entre tanto el concepto de desarrollo sostenible, los desastres ambientales generados por el hombre, la voz de alerta de los ambientalistas y los movimientos socio ambientales han generado presión para que las empresas reformulen su forma de hacer empresa. En este sentido, para que las operaciones sean sustentables en lo económico, social y ambiental es necesario dar una mirada al interior y al exterior.

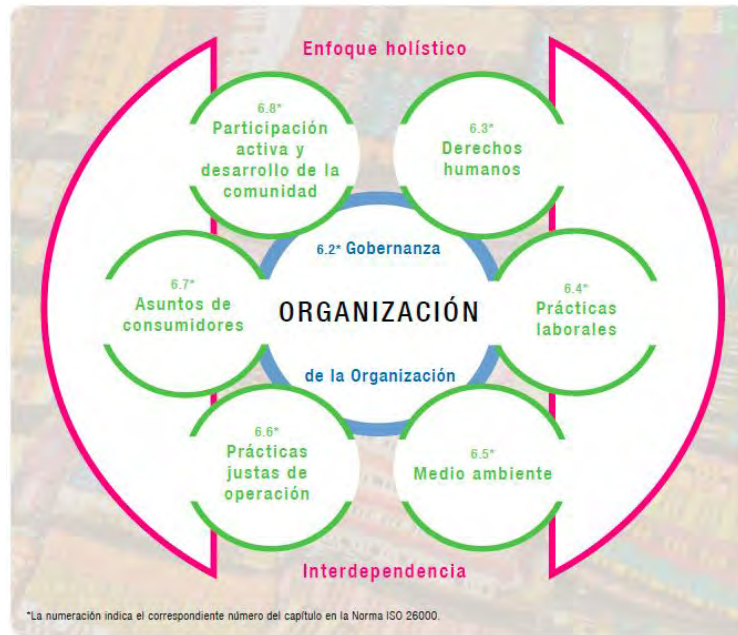
Es oportuno hacer referencia a la norma internacional ISO 26000 – Responsabilidad Social, en la cual se enfatiza que las organizaciones y sus partes interesadas son cada vez más conscientes de un beneficio mutuo a fin de contribuir al desarrollo sostenible. En la práctica, el desempeño de las organizaciones está ligado a la evaluación de la gestión ambiental. En estos tiempos, sobre todo en el sector minero, es la parte más crítica a la cual se someten. Así mismo, esta norma añade que las actividades de las organizaciones dependen de la salud de los ecosistemas. En este sentido, de acuerdo como va transcurriendo el desarrollo de la empresa estas son sometidas a un escrutinio más riguroso cada vez más.

Así mismo, en el mismo artículo, la secretaria central de la Organización Internacional de Estandarización – ISO hace referencia a los beneficios de la implementación de la norma internacional ISO 26000. Entre los beneficios, se destacan los siguientes: tener ventaja competitiva, *reputación*<sup>16</sup>, capacidad para atraer y retener talentos (trabajadores), mantenimiento de la motivación, percepción de los inversionistas, mejora de las relaciones con los *stakeholders*, entre otros.

---

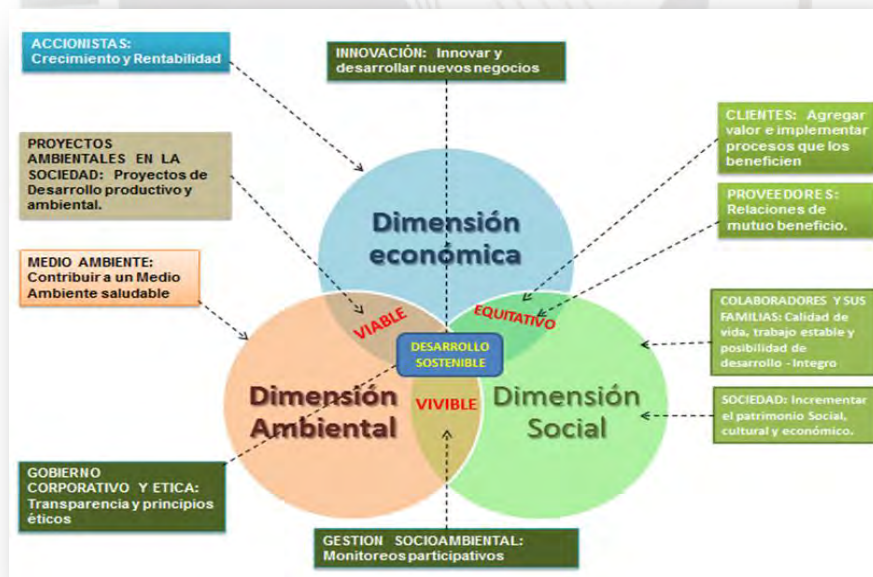
<sup>16</sup> Persigue el logro de una buena opinión, de una consideración positiva, de un prestigio cuanto más alto sea mejor, gestionado por parte de la misma empresa ¿por parte de quién?, de todos aquellos grupos que se relacionan o los denominados stakeholders.

**Figura 2: Responsabilidad social: 7 materias fundamentales**



Fuente: Secretaría Central de la Organización Internacional de Estandarización – ISO 26000

**Figura 3: Dimensión Económica, Ambiental y Social**



Fuente: Elaboración propia

## **2.19. Aplicación de la normativa para el manejo de lodos en el extranjero Estados Unidos y en el Perú.**

Las aguas residuales como en todos los países también se arrojaban al mar y a los ríos. Es en el siglo XIX que se inicia el tratamiento de aguas, motivo por el cual en 1972 se aprueba el “Clean Water Act” conocida como la ley de agua limpia. Dentro de los alcances más importantes se le da a la EPA la autoridad para implementar programas de control ambiental y se obliga a las plantas de tratamiento de agua a tratar al menos el 85 % de las aguas para el año 1977. Este tipo de tratamiento hizo que se genere lodos o biosólidos en grandes cantidades no habiendo lugares de disposición. Entonces, la EPA en la década de los 90 promueve la utilización de los lodos como abono orgánico, por lo cual se adecúa la nueva normativa sobre uso y disposición de los biosólidos “Part 503” Norma 503 de la EPA de los Estados Unidos.

### **Chile**

En el año 2005, el comité de ministros de la CONAMA aprueba el Decreto Supremo 123 sobre el reglamento de lodos en plantas de tratamiento de aguas servidas. Entonces, se da inicio a la utilización normada de los lodos en la agricultura, para tal efecto se establece criterios de evaluación sanitaria, contenido de metales pesados, caracterización de sitios y a la vez se establece requisitos como su aplicación solo en sitios de limitada aptitud frutal, en suelos forestales, suelos degradados, suelos erosionados, tasas máximas de aplicación y concentraciones totales de metales pesados. Ramila y Rojas (2008) sostiene que al 2008 los lodos fueron destinados en su mayoría como fertilizante y se ha demostrado que son muy efectivos por su contenido de nutrientes. Sin embargo, también se ha tenido rechazo por parte de los ambientalistas. En enero del 2009, mediante Decreto Supremo número 004 se da el reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Con ello, se deja sin efecto el Decreto Supremo número 70 del 2005 y el Decreto Supremo número 123 del 2006.

### **Perú**

Sobre el particular, a efectos de poder consolidar el contexto ambiental de gestión ambiental sostenible y su cumplimiento legal, el Decreto Legislativo

1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, artículo 8, sobre la eficiencia en el uso de materiales, resalta el uso eficiente de los insumos y la prevención de la generación de residuos sólidos mediante el aprovechamiento de los materiales o insumos de descarte en la misma o actividad diferente del generador. Esta acepción es acertada para ser incorporada en la correcta gestión de residuos sólidos de las empresas mineras, más aun todavía con los residuos orgánicos, como el caso de los derivados de la cocina para la obtención de abono orgánico, energía como el biogás, y alimento para las lombrices que generan abono orgánico de mayor calidad.

Así mismo, en el artículo 48, entre las formas de valorización de materiales considera la reutilización, reciclado, compostaje, etc. así mismo constituye como operaciones de valorización energéticas a la generación de energía en base a procesos de biodegradación. En este caso, se consideraría al proceso de biodigestión de residuos sólidos orgánicos para la obtención de biogás. A más abundamiento en el artículo 51, la misma norma hace referencia a la valoración de residuos orgánicos municipales, indicando que deben valorar prioritariamente estos residuos para obtener humus, compost y biochar a fin de ser incorporados en la mejora de suelos. Si bien es cierto que este artículo hace referencia a residuos municipales, en la práctica muy bien pueden ser implementados en las empresas mineras.

En efecto es oportuno hacer referencia a la Resolución Ministerial N° 128-2017 – Vivienda, con la cual se aprueban las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final, es así que, en el capítulo III, Artículo 8; indica que todo generador de residuos sólidos debe presentar el plan de minimización y manejo de residuos sólidos en la que deba incluir los procedimientos técnicos y administrativos necesarios para lograr una adecuada gestión de lodos. Por otro lado en el capítulo II, artículo 15, refiere que los lodos deben ser sometidos a estabilización hasta lograr el reaprovechamiento o disposición final.

### **3. GESTIÓN DE LOS LODOS EN LAS EMPRESAS MINERAS DEL PERU**

La dinámica de la industria minera para la obtención de subproductos como la obtención de concentrados está estrechamente ligada a la generación de diversos tipos de residuos. Estos desechos para llegar a su disposición final dependerán de un correcto manejo. En ese sentido, los residuos como los lodos de las aguas residuales domésticas de las empresas mineras sometidos a un manejo inapropiado ocasionan problemas ambientales; daños a la salud; contaminación de efluentes y cuerpos de agua; conflictos sociales; etc.

En la actualidad, las empresas mineras compuestas por una fuerza laboral diversa, que depende generalmente del volumen de producción, brindan alojamiento, alimentación y otros servicios a sus trabajadores, producto de ello se generan residuos sólidos y líquidos. En el marco del cumplimiento legal del Decreto Legislativo 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, las aguas residuales domésticas que se generan en las unidades mineras son vertidas en los efluentes autorizados una vez cumplido con el límite máximo permitido. Para ello, aplica el Decreto Supremo 010 – 2010 – MINAM (Ministerio del Ambiente). A diferencia de los lodos que son parcialmente tratados o estabilizados mediante procesos aerobios en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son dispuestos en las presas de relave o llevados por una EPS a lagunas de estabilización o dispuestos como residuo peligroso en los rellenos de seguridad o como haya sido aprobado el Plan de Manejo Ambiental, lo cual es distinto para cada empresa minera y en la fase que se encuentre ya sea en exploración o explotación. Las razones por lo que se viene optando estas formas de disposición de los lodos es porque hasta hace poco había vacíos legales, lo cual ha motivado incluso que se aprueben por ejemplo la disposición en las presas de relave; por otro lado el desconocimiento técnico del tratamiento de los lodos mediante procesos aeróbicos y anaeróbicos que aún no es bien difundido sobre todo en las empresas mineras; así mismo la falta de responsabilidad y compromiso ambiental de las empresas mineras; en consecuencia quedaría de lado la razón económica por lo que las empresas mineras no las implementan ya que el costo de este tipo de proyecto no es significativo.

De una revisión rápida de los IGAS (EIAS, Plan de Manejo Ambiental, Modificatorias de los EIAS, etc.) podemos indicar que las empresas mineras pequeñas y medianas, llegan hasta la primera fase de tratamiento, y continúan con procesos antiguos como el uso de tanques *Imhoff*, tanque séptico, etc. (tratamiento primario) que generan acumulación de lodos expuestos a la atracción de vectores y procesos de descomposición, y que producen malos olores y gases que impactan en la atmosfera. A diferencia de la gran minería, llegan hasta la segunda fase de tratamiento y los lodos son dispuestos en las presas de relaves o de acuerdo a la aprobación en su IGA (Instrumento de Gestión Ambiental).

El proceso en las PTAR, se inicia con el pretratamiento (separación de elementos que no son orgánicos), sigue con el tratamiento primario (remoción de los residuos orgánicos), luego el secundario (oxidación de la materia orgánica y alimento a la población bacteriana), y el terciario (eliminación de microorganismos que aún quedan de las fases anteriores)

El tratamiento terciario, en este caso, cuando los lodos son sometidos a procesos aerobios y anaerobios (biodigestión, compostaje y lombricultura), podrían ser alternativas para desintegrar o estabilizar los lodos, a fin de ser considerados y dispuestos como residuos NO peligrosos (cumplimiento legal y percepción de las comunidades). Los subproductos obtenidos servirían como materia prima para la obtención de biogás (energía limpia), abono orgánico y biol para abonamiento de los árboles y arbustos de la zona de influencia minera. Considérese que estos lodos en condiciones de tratamiento secundario de acuerdo a la caracterización química, física y biológica poseen bondades interesantes como alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio. Estabilizados serían un complemento ideal a los suelos pobres donde se encuentran ubicadas las empresas mineras que muy bien pueden reaprovechar directa o indirectamente mediante su incorporación como abono orgánico.

Para entender el problema de los lodos que se generan en las aguas residuales domésticas de las operaciones mineras, es imperante verlo desde un enfoque sistémico y de manejo integral:



### 3.1. Impacto al ambiente

Los lodos de las empresas mineras de acuerdo a la situación actual que solo llegan al tratamiento primario y secundario (lodos no estabilizados sin tratamiento terciario) de acuerdo a la caracterización física, química y biológica aún contienen microorganismos y patógenos, los cuales son vertidos en las presas de relave de las empresas mineras. En estas condiciones, los lodos contienen bacterias, protozoarios, huevos de parásitos intestinales, etc.

Si verificamos las presas de relaves de las empresas mineras donde se disponen las aguas residuales y los excedentes de lodos, estas se encuentran expuestas libremente al ambiente. En ese sentido, es casi normal poder avistar la presencia de gaviotas y águilas que vuelan. Ellas están en la capacidad de detectar la materia orgánica en proceso de descomposición. Es así que existe el riesgo de que esta materia orgánica sea consumida y devuelta a la cadena trófica del entorno ambiental.

Por otro lado, las características químicas de estos lodos como la presencia de nitrógeno en elevadas concentraciones puede causar la eutrofización de las aguas. Así mismo, la materia fecal, la orina y urea que aún se encuentra en proceso de degradación se descomponen en amoníaco y amonio generando así malos olores.

Estos lodos al descomponerse descontroladamente generan gases de efecto invernadero como el caso del metano ( $\text{CH}_4$ ) que es un subproducto generado en condiciones anaeróbicas al igual que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Es importante considerar que estos gases favorecen al calentamiento global, y es que cada kilogramo de este, calienta en 100 años el planeta 23 veces más que la misma masa del dióxido de carbono (IPCC, 2014). Así mismo, los lodos en condición no tratada despliegan malos olores, atrae vectores, daños a la salud, emisión de gases de efecto invernadero por el alto contenido de materia orgánica y contenido de microorganismos.

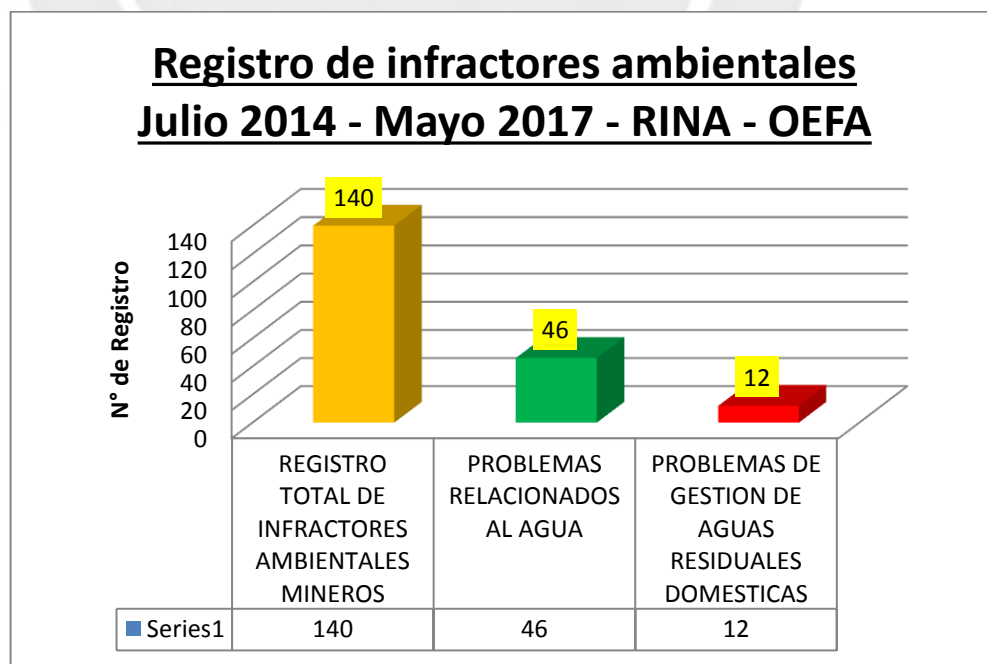
En estos últimos años, las empresas mineras tienen la oportunidad de aprovechar diversos espacios para generar confianza con las comunidades, como en el caso del monitoreo participativo ambiental liderado por el OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental), que creó comités

ambientales, mesas de desarrollo, mecanismos de acceso y entrega de información, etc. En este sentido, queda hacerse la pregunta, como aprovecharían las empresas mineras este espacio si tiene vacíos en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

### 3.2. Creando valor a la empresa (reputación)

En temas de evaluación de proyectos mineros en marcha, la viabilidad social ha cobrado mucha importancia en el Perú en las dos últimas décadas, tal es así que la empresa puede tener la viabilidad legal, técnica, comercial, ambiental, organizacional, financiera y/o económica, pero si no hay la aprobación de los pobladores del entorno minero, el proyecto no va, o en su defecto se paraliza la producción minera. En ese sentido, el cumplir con el ciclo de tratamiento de los lodos generaría valor a las empresas mineras, a diferencia de las condiciones actuales. Para tal efecto, se hace referencia al registro de infractores ambientales de julio 2014 a mayo 2017 del Organismo de Evaluación y Fiscalización ambiental en donde de un total de 140 infractores, 46 están relacionados a problemas del agua y 12 por problemas en la gestión de aguas residuales domésticas.

**Figura 4: Registro de infractores ambientales**



Fuente: Elaboración propia

### **3.3. Conflictos socio ambientales**

Esto se puede corroborar en los reportes mensuales de la Defensoría del Pueblo. Entre los motivos principales de los conflictos socio ambientales, se encuentra en segundo lugar el temor a la contaminación del agua con 23.6%. Ello podría agravarse si se revisa que los efluentes de aguas residuales domésticas de las minas van hacia la presa de relaves.

Las comunidades no confían en los mecanismos que desarrolla la autoridad como el caso de la OEFA que ha implementado el mecanismo de participación en el monitoreo participativo. Esto se puede corroborar en el ausentismo a las reuniones que se convoca desde la fase de planeamiento hasta el día de los trabajos de monitoreo.

### **3.4. Desde el enfoque de cumplimiento legal**

Si revisamos la normativa ambiental en el Perú para el manejo de lodos de aguas residuales, podemos hacer referencia a normas genéricas, como el caso de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y la Resolución Ministerial número 128 -2017 del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Si bien es cierto que esta norma menciona las condiciones mínimas de reaprovechamiento en materiales de construcción, material de cobertura en rellenos sanitarios, material de recuperación de sitios contaminados, aplicación en suelos forestales y en menor grado en suelos de invernaderos, etc. no anexa el cumplimiento de estándares de calidad que menciona en el anexo IV. Por otro lado, tampoco hace referencia a las restricciones técnicas de reaprovechamiento sobre todo en el sector agricultura, donde sí hay la oportunidad para aprovechar en grandes cantidades, como el caso de las empresas mineras, áreas disturbadas. En consecuencia, no vemos que esta norma impulse el manejo responsable de lodos de las aguas residuales menos de las empresas mineras en el Perú; a diferencia de otros países como Estados Unidos, Chile, Argentina y Colombia, quienes han desarrollado un reglamento específico con el objetivo de regular e impulsar el manejo sanitario de los lodos, de tal modo que se pueda proteger la salud de la población y evitar el deterioro de los recursos naturales (Ospina, Rodríguez y Gonzales, 2017).

El Perú cuenta con el Decreto Legislativo N° 1278 que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos publicado en el diario oficial el peruano el 22 de diciembre del 2016. Con esto, quedó derogado la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos. En este decreto supremo, se resalta el principio de valoración de residuos, por cual los residuos sólidos constituyen un potencial de recurso económico. Por tanto, se prioriza su valoración considerando actividades de reciclaje para la obtención de subproductos que eviten su disposición final.

Ahora bien, sobre el particular en el Decreto Legislativo N° 1278 de la ley de gestión integral de residuos sólidos; en el artículo 2, la norma resalta la finalidad de la gestión integral de los residuos sólidos; la primera se circunscribe en la prevención o minimización de la generación, la segunda refiere a la recuperación y la valorización material y energética de los residuos; en este sentido se abre la brecha de la reutilización de los sub productos que se generen a partir de los residuos sólidos; así mismo se orienta a procurar que estos contribuyan a la lucha contra el cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y desarrollar tecnologías, métodos, prácticas y procesos que favorezcan su minimización o valoración y su manejo adecuado. Por otro lado en este mismo decreto supremo N° 1278 en las disposiciones complementarias se le encarga al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento regular el reaprovechamiento de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

En este sentido, el 5 de abril mediante Resolución Ministerial N° 128 – 2017 – Vivienda, se aprueban las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final en el marco de cumplimiento del Decreto Legislativo N° 1278. En efecto, la Resolución Ministerial N° 128, en el capítulo III, Planes de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos y Declaración Anual de Manejo de Residuos Sólidos, en el Artículo N°8, indica que el Generador debe presentar el Plan de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos, el mismo que forma parte del contenido del Instrumento de Gestión Ambiental - IGA que corresponda. Así mismo en el capítulo VII, Reaprovechamiento de los lodos, se indica que los generadores están facultados para realizar reaprovechamiento de los lodos que provienen de las Plantas de Tratamiento

de Aguas residuales, las cuales deben estar estabilizadas para la producción de biosólidos (humus y/o compost).

Lo que queda por analizar es saber si estas últimas normas de aplicación transversal a otros sectores como el caso de minería.

Desde el enfoque de vacíos legales, los IGAS en este caso los EIAS, MEIAS, los Planes de Manejo Ambiental son aprobados en forma general, a fin que los efluentes de tratamientos de aguas residuales domésticas y los lodos sean dispuestos en las presas de relaves. No se interioriza aún las normas legales de mayor rango en el sistema normativo del Perú.

Por otro lado, de la revisión de las declaraciones de impacto ambiental - DIA de los proyectos de exploración minera en el Perú, se puede afirmar que los compromisos de manejo de aguas residuales es cero. En estos expedientes, tampoco se hace referencia al manejo de aguas residuales, lo que sí se pudo evidenciar fue el manejo de residuos sólidos en forma genérica.

### **3.5. Enfoque de gestión ambiental minera responsable**

De acuerdo a la caracterización base general de los lodos de las aguas residuales domésticas, no solo están compuestas de condiciones negativas tanto para el ambiente y la salud humana, también podemos indicar que es un recurso re aprovechable y no peligroso, ya que en su composición posee gran cantidad de materia orgánica, depende del tratamiento de estabilización que se le pueda dar para que sea incorporado a los suelos como materia orgánica.

### **3.6. Breve descripción de los costos para su implementación**

Considerando la realidad de vivencia de las empresas mineras en el Perú, donde existe una población de trabajadores que en forma constante genera residuos orgánicos por el consumo de alimentos y por otro lado la disponibilidad de lodos de las PTAR, estos se convierten en insumos primarios básicos para la producción de abono orgánico y biogás.

#### **3.6.1. Planta de compost**

Si bien es cierto que en la estructura de costos se considera Maquinarias como el caso de la trituradora, cosedora de costales y

mochila fumigadora a motor, estos no son indispensables; por ello se presenta dos presupuestos y respecto a los activos como el caso del terreno también puede ser obviado del costo inicial.

En este sentido el costo básico es de S/. 61,415 aproximadamente, siendo la infraestructura de la sala que eleva el costo, sin embargo puede ser construido de material reciclable como el caso de la madera, de manera que se reduciría más aun el costo.

**Tabla 6: Presupuesto básico para la obtención de compost (Campaña Anual)**

(700 SACOS DE 30 Kg)

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
<b>MAQUINARIA</b>				<b>400.00</b>
Mochila Fumigadora (motor)	Unidad	2	200	400.00
<b>EQUIPOS, HERRAMIENTAS</b>				<b>1,500.00</b>
Carretilla	Unidad	4	250	1,000.00
Palas	Unidad	5	30	150.00
Pico	Unidad	5	30	150.00
Trinche	Unidad	5	30	150.00
Termómetro para COMPOST	Unidad	1	50	50.00
<b>MATERIALES</b>				<b>9,515.00</b>
Equipo de protección personal	Unidad	Global	2000	2,000.00
Microorganismos eficaces	Galones	2	120	240.00
Costales	Unidad	550	0.5	275.00
Bagacillo de caña de azúcar (saco 25 kg)	Saco	350	20	7,000.00
<b>OTROS ACTIVOS FIJOS</b>				<b>120,000.00</b>
Terreno	M2	700	100	70,000.00
Sala de Compostaje	Unidad	1	50000	50,000.00
<b>TOTAL</b>				<b>131,415.00</b>

Sin considerar Terreno S/.	61,415.00
----------------------------	-----------

**Tabla 7: Presupuesto para la obtención de compost (Campaña anual)**

(700 SACOS DE 30 Kg)

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
<b>MAQUINARIA</b>				<b>35,500.00</b>
Trituradora	Unidad	1	33000	33,000.00
Mochila Fumigadora (motor)	Unidad	2	1000	2,000.00
Cosedora de costales	Unidad	1	500	500.00
<b>EQUIPOS, HERRAMIENTAS</b>				<b>1,500.00</b>
Carretilla	Unidad	4	250	1,000.00
Palas	Unidad	5	30	150.00
Pico	Unidad	5	30	150.00
Trinche	Unidad	5	30	150.00
Termómetro para COMPOST	Unidad	1	50	50.00
<b>MATERIALES</b>				<b>9,515.00</b>
Equipo de protección personal	Unidad	Global	2000	2,000.00
Microorganismos eficaces	Galones	2	120	240.00
Costales	Unidad	550	0.5	275.00
Bagacillo de caña de azúcar (saco 25 kg)	Saco	350	20	7,000.00
<b>OTROS ACTIVOS FIJOS</b>				<b>120,000.00</b>
Terreno	M2	700	100	70,000.00
Sala de Compostaje	Unidad	1	50000	50,000.00
<b>TOTAL</b>				<b>166,515.00</b>

Sin considerar Terreno S/.	<b>96,515.00</b>
----------------------------	------------------

### 3.6.2. Implementación de biodigestor para la obtención de biogás con lodos de PTAR:

El tipo de biodigestor que se propone es el de tipo tubular de alimentación semi discontinua, en este caso el lodo diluido debe ser suministrado 1 o 2 veces por semana, cabe señalar que el biogás obtenido deberá ser re utilizado para mantener la temperatura (30° en promedio) nocturna del ambiente donde se ubica el biodigestor, en este sentido el presupuesto asciende a S/. 20,254 sin considerar el activo del terreno.

Tabla 8: Implementación de biodigestor para la obtención de biogás con lodos de la PTAR.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
<b>MAQUINARIA</b>				<b>2,295.00</b>
Calefactores a gas (mantenimiento de la temperatura nocturna en el Invernadero)	Unidad	4	120	480.00
Agitador	Unidad	1	165	165.00
Biodigestor en Geomembrana de PVC	Unidad	1	1650	1,650.00
<b>EQUIPOS, HERRAMIENTAS</b>				<b>1,164.00</b>
Carretilla	Unidad	1	250	250.00
Palas	Unidad	2	30	60.00
Pico	Unidad	2	30	60.00
Gasómetro	Unidad	1	594	594.00
Termómetro de sala	Unidad	1	200	200.00
<b>MATERIALES y OTROS SERVICIOS</b>				<b>7,495.00</b>
Equipo de protección personal	Unidad	Global	2000	2,000.00
Kit de Biogás	Unidad	Global	495	495.00
Instalación del Biodigestor	Unidad	1	5,000.00	5,000.00
<b>OTROS ACTIVOS FIJOS</b>				<b>29,300.00</b>
Terreno	M2	200	100	20,000.00
Infraestructura de invernadero (de materiales térmicos – adobe - madera)	Unidad	1	9300	9,300.00
<b>TOTAL</b>				<b>40,254.00</b>

Sin terreno S/.	20,254.00
-----------------	-----------

### 3.6.3. Obtención de humus de lombriz a partir de lodos del PTAR

Para la obtención del humus se plantea construir un invernadero, ambiente en el cual puedan reproducirse las lombrices de manera adecuada sin restricción de la temperatura, respecto a la alimentación se prevé con guano de corral lavado sin ácido úrico, lodo de la PTAR semi seco y compost, en este sentido el presupuesto asciende a la suma de S/. 34,665 sin considerar el terreno.



Tabla 9: Presupuesto, Inversión para la obtención de humus de lombriz

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
<b>EQUIPOS, HERRAMIENTAS</b>				<b>640.00</b>
Carretilla	Unidad	2	250	500.00
Palas	Unidad	2	30	60.00
Pico	Unidad	1	30	30.00
Termómetro para COMPOST	Unidad	1	50	50.00
<b>MATERIALES</b>				<b>4,025.00</b>
Equipo de protección personal	Unidad	Global	2000	2,000.00
Compost	Saco	50	30	1,500.00
Costales	Unidad	550	0.5	275.00
Guano de corral diluido de ácido úrico	Saco	50	5	250.00
<b>OTROS ACTIVOS FIJOS</b>				<b>60,000.00</b>
Terreno	M2	300	100	30,000.00
Sala de Lombricultura (invernadero)	Unidad	1	30000	30,000.00
<b>TOTAL</b>				<b>64,665.00</b>

Sin considerar terreno S/.

34,665.00

#### 4. DISCUSIÓN:

Los lodos, al ser tratados en forma integral, se convierten en materia prima muy importante para la mejora de las tierras de cultivo, debido a que por un lado, estos son capaces de incorporar N-P-K y micro elementos; así mismo, impulsan la actividad microbiana del mismo suelo; y, también, mejoran la textura y estructura de este. Dadas estas consideraciones, sería interesante que las compañías mineras del Perú obtengan lodos estabilizados de calidad con el fin de que estos sean usados en los cultivos de pan llevar, como el maíz, arvejas, trigo, cebada, etc. La introducción de estos a las comunidades de influencia minera sería en forma paulatina y con parcelas demostrativas para evitar rechazo de la población.

Así mismo, los lodos de calidad B obtenidos pueden ser utilizados sin ninguna restricción en las plantaciones forestales y áreas verdes de las mismas empresas mineras, tomando en cuenta que los pocos patógenos que quedan en este tipo de

lodos, morirán en el campo de aplicación por no encontrar condiciones favorables para completar su desarrollo de vida. Este tipo de lodo puede ser usado considerando el tiempo de aplicación de 3 meses en los pastos cultivados para alimentación de los animales como el vacuno, ovejas, caprinos, etc.

Los lodos de las aguas residuales domésticas de las empresas mineras del Perú tienen ventajas comparativas respecto a los lodos de las poblaciones urbanas o del sector industrial, ya que la red de las aguas servidas de la industria minera, por lo general, no se mezclan con las aguas de proceso. Así mismo, sometido a tratamiento terciario o tratamiento de los fangos, estos lodos mejoran su calidad y pueden dar como resultado un biosólido de clase A, de acuerdo a la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (EPA).

Por la experiencia de gestión ambiental sostenible en el manejo de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en EEUU, México, Europa y América del Sur (Chile, Colombia y Brasil), podemos concluir que si es posible incorporar un manejo de lodos sostenible a la realidad minera del Perú. En ese sentido, sería una ventana interesante para mejorar la relación entre las comunidades vecinas tener empresas mineras responsables ambientalmente. Es necesario mencionar que la industria minera es versátil por su propia naturaleza y que, por lo tanto, puede construir una nueva imagen.

Las empresas mineras por su propia naturaleza de trabajo, en el día a día, están en constante desarrollo y ejecución de diversos proyectos como la apertura de accesos, carreteras y plataformas de perforación; la construcción de presas para la acumulación de aguas; y la instalación de áreas de campamentos y áreas auxiliares. Es, en este constante desarrollo, que se generan zonas de suelos expuestos a erosión hídrica y eólica, generalmente. Estos suelos desprovistos de vegetación impactan aguas abajo al generar turbidez y sedimentos. Con el fin de evitar ello, la aplicación de los lodos estabilizados puede favorecer el equilibrio biológico de estos suelos en menor tiempo, lo que, al mismo tiempo, implicaría reducir los riesgos de multas por parte de la autoridad<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Haciendo referencia a los taludes expuestos a erosión hídrica que generan aguas turbias, es importante resaltar que existe la experiencia del uso de biomantos de coco para la estabilización de taludes, lo cual se complementa con el trabajo de hidrosiembra. Es en este sistema de hidrosiembra (mezcla de agua, semilla e insumos agrícolas), que muy bien puede trabajar el lodo o biosólido

Si queremos mejorar la imagen de las empresas mineras y reducir los conflictos socio ambientales, es necesario trabajar en una gestión ambiental sostenible, de la mano del Estado, creando instrumentos legales, espacios de confianza y espacios de investigación, a fin de que el administrado o titular minero pueda gestionar correctamente los residuos que se generan en esta actividad. Los beneficios se dan en varios niveles desde el social hasta el económico.

En la actualidad, las empresas mineras desarrollan actividades de revegetación y recuperación de áreas degradadas, ya sea por voluntad o por cumplir con un instrumento de gestión ambiental (IGA). Para la labor de revegetación y recuperación de áreas degradadas, es imprescindible la incorporación de abono orgánico con el fin de mejorar los suelos propios de la industria minera del Perú. Por otro lado, las empresas mineras desarrollan, también, actividades para la obtención de compost y humus de lombriz. En este sentido, el lodo de las aguas residuales constituye un insumo interesante para tales procesos, lo cual repercutiría en la obtención de abonos orgánicos de mayor calidad.

En el Perú, las empresas mineras están afincadas mayormente en los Andes, por encima de los 3500 msnm. Por esta ubicación agreste y las condiciones climáticas de la zona, los suelos son superficiales y de pobre contenido de nutrientes para alimentación de los pastos. Por otro lado, es oportuno indicar que la generación de turbidez en los efluentes de las empresas mineras es significativa, y que para controlar o disminuir esta es imperante mejorar los suelos. En este sentido, es el lodo estabilizado una gran alternativa para revegetar estas áreas degradadas. Con ello, estaríamos aportando mejoras en la calidad de los efluentes en los vertimientos y así se evitaría productos químicos como el caso de los floculantes, así como la construcción de infraestructuras de control de erosión y sedimentos.

Considerando el factor climático de las zonas frías donde se ubican las empresas mineras, también será una limitante la obtención de subproductos como el biogás, la vermicultura y compost a base de lodos. Para tal desventaja, existen alternativas probadas en los andes de Puno y en el país vecino de Bolivia, como la construcción de invernaderos para elevar la temperatura, los cuales obtienen en menor tiempo la

---

diluido, pues aporta nutrientes y materia orgánica, lo cual repercutiría en una estabilización biológica exitosa de los taludes.

estabilización de los lodos. En este sentido, no hay razón para no tratar biológicamente los lodos de las aguas residuales domésticas de las empresas mineras.

Por otro lado, tomando en cuenta el DL 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, en las disposiciones complementarias, en el acápite quinto, sobre los lodos provenientes de plantas de tratamiento, estos son manejados como residuos no peligrosos, salvo que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento determine lo contrario. Esta es una gran oportunidad para implementar técnicas de obtención de subproductos estables como los lodos en el área agrícola y forestal, a través de los sistemas de biodigestores, en el compostaje y en la vermicultura. Consideramos que la difusión de estas prácticas en las comunidades vecinas de las empresas mineras, puede generar un mayor acercamiento y confianza entre la minera y la comunidad.

Con la promulgación del Decreto Legislativo N° 1278, se aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. De esta manera, queda derogada la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos<sup>18</sup>. Es propicio destacar que en este decreto se resalta el principio de valoración de residuos, el cual indica que los residuos sólidos constituyen un potencial de recurso económico; por tanto, se prioriza su valoración considerando las actividades de reciclaje para la obtención de subproductos que eviten su disposición final. En este sentido, las empresas mineras tienen una gran oportunidad de cumplimiento legal para tratar a los lodos de las aguas residuales que se generan en los campamentos mineros. Cabe remarcar que este decreto supremo no ha sido incorporado el 100% en la fiscalización de las autoridades que le competen.

Una de las bondades del tratamiento de los lodos de aguas residuales domésticas es la obtención de energía limpia como el caso del biogás. Esta técnica de biodigestión al funcionar con otros tipos de desechos orgánicos como las excretas de animales mayores (vacunos, caballo, cerdos, etc.) y menores (cuy, gallina, etc.), pueden ser difundidos muy bien a nivel de las comunidades vecinas para que puedan aprovecharse en la cocción de alimentos, abono orgánico y fertilizante foliar líquido.

---

<sup>18</sup> La ley N° 27314 (Ley General de Residuos Sólidos), ya derogada, en sus 12 años de existencia no cumplió las expectativas. Los rellenos sanitarios y las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas siguieron generando problemas de contaminación ambiental al igual que la basura, la cual campea en las ciudades.

En este sentido, difundir esta técnica de digestión anaerobia significa una oportunidad en el sector minero para que la empresa genere valor y se relacione positivamente con las comunidades.

Es oportuno indicar que la falta de implementación del tratamiento terciario de lodos de aguas residuales domésticas en las empresas mineras no pasa por una limitación de orden económico, sino porque la normativa tiene vacíos legales y no promueve el reaprovechamiento. En este sentido, esperamos que se implemente la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y la Resolución Ministerial N° 128 – 2017. Cabe indicar que la implementación de la infraestructura para el proceso de compostaje para una producción anual de 21 toneladas por año es de S/. 61,415 soles; para el caso de la lombricultura para 1 tonelada por año S/. 34, 665 soles, aproximadamente; y para el caso de la utilización del biodigestor de tipo discontinuo S/. 20,254 soles aproximadamente. En este sentido, la empresa minera puede optar por el tratamiento integral o cualquiera de estas alternativas, siendo la obtención de compost la de más fácil implementación y manejo, así como la que posee la mayor capacidad de volumen de tratamiento.

A partir de nuestra investigación, podemos concluir que el manejo y tratamiento de las aguas residuales domésticas en el Perú, están dirigidas solo a cubrir las de la vista y alejarlas del olfato humano. Por lo tanto, estas aguas residuales no están siendo tratadas en su ciclo completo, motivo por el cual los lodos siguen siendo dispuestos en forma irresponsable.

También es preciso resaltar que en mi experiencia profesional, con el afán de reducir los impactos ambientales, por efecto, de los lodos primarios, he desarrollado pilotos de investigación. En este caso, la instalación de biodigestores en dos empresas mineras. Para la primera de ellas, se instaló este sistema a 4 700 msnm y, para la segunda empresa, la instalación se llevó a cabo en la costa a nivel del mar. Los resultados fueron más que satisfactorios, teniendo en cuenta las limitaciones sobre todo de altitud donde la degradación de los lodos es baja por el efecto de la temperatura promedio que oscila normalmente en 10°C.

Cabe mencionar que para la instalación del biodigestor en altura, se aprovechó la técnica del efecto invernadero. Esta técnica es perfecta para adecuarla a las condiciones donde operan las empresas mineras, cuyas ubicaciones superan, por lo

general, los 3 500 msnm. En estas zonas, la temperatura se convierte en uno de los mayores limitantes para llevar acabo la síntesis de tipo aerobio y anaerobio de las bacterias. Es necesario comentar que la técnica del efecto invernadero ya es muy difundida en los andes del altiplano, como en el caso de Puno y Bolivia, por ser de fácil implementación, lo que la convierte en una alternativa de uso obligatorio para distintas actividades que requieren de sostenibilidad.



## 5. REFERENCIAS

- Arce, J. (2011). *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del litoral* (Tesis de titulación, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil). Recuperada de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPS-GT000209.pdf>
- Arce, L. (2013). *Urbanizaciones sostenibles: Descentralización del tratamiento de aguas residuales residenciales* (Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú). Recuperada de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/4568>
- Arrieta, W. (2016). *Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado* (Tesis de titulación, Universidad de Piura). Recuperada de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME\\_200.pdf?sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf?sequence=1)
- Averruz, N. & Cruz, R. (2015). Evaluación de la producción de biogás y porcentaje de descontaminación de dos biodigestores tubulares plásticos alimentados con estiércol porcino y bovino en la Hacienda Santa Rosa UNA-Managua (Trabajo de grado, Universidad Nacional Agraria). Recuperado de <http://repositorio.una.edu.ni/3212/>
- Balseca, D. & Cabrera, J. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café* (Proyecto de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano). Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/454/1/IAD-2011-T004.pdf>
- Bueno, P., Díaz M. & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. En Moreno, J. & Moral, R. (Eds.). *Compostaje* (pp. 93-110). Madrid: Ediciones Mundi Prensa.
- Canales, R. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas* (Proyecto de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano).

Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/404/1/IAD-2011-T007.pdf>

Collazos, C. (2008). *Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales* [Presentación de Power Point]. Recuperada de [http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-22\\_01-12-45105733.pdf](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-22_01-12-45105733.pdf)

Compañía Minera Antamina S.A. (2015). *Reporte de Sostenibilidad*. Recuperado de [http://www.antamina.com/wp-content/uploads/2017/01/reporte\\_sostenibilidad\\_2015.pdf](http://www.antamina.com/wp-content/uploads/2017/01/reporte_sostenibilidad_2015.pdf)

Corona, I. (2007). *Biodigestores* (Monografía de titulación, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo). Recuperada de <http://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10722>

Cruz, L. (2015). *Optimización de la aplicación de lodos de depuración de aguas residuales al abonado o mejora de suelos*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid) Recuperada de [http://oa.upm.es/39429/1/LUZ GRACIELA CRUZ QUIJADA.pdf](http://oa.upm.es/39429/1/LUZ_GRACIELA_CRUZ QUIJADA.pdf)

Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR –D de los Municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el Departamento del Meta* (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Recuperada de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1>

Establecimiento Público Ambiental EPA-Cartagena. (2012). *Plan de Acción 2012 -2015*. Bogotá – Colombia. Recuperado de <http://www.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2013/12/plandeaccionepea2012.pdf>

Galvis, J. & Rivera X. (2013). *Caracterización física y química y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira* (Tesis de titulación, Universidad Tecnológica de Pereira). Recuperada de



[http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3898/62839G182.pdf?  
sequence=1](http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3898/62839G182.pdf?sequence=1)

Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes*. Lima: Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.

Guerrero, D. (2005). Sistema de indicadores mineros para la explotación sostenible de los recursos minerales (Resumen de tesis doctoral). *Minería y Geología* 21(2). Recuperado de <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/viewFile/180/178>

Gobierno de Chile, MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). Manual de Biogás. Santiago de Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Hernández, A. (1996). *Depuración de aguas residuales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Hernández, J. (2004). Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León). Recuperado de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020145852.PDF>

Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. (2017). Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>

Inga, D. (2013). *El sistema de gestión ambiental local en el distrito de San Borja* (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú). Recuperada <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5190>

Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* (Trabajo). Recuperado de

[http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_qualberto\\_li\\_mon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_qualberto_li_mon_trabajo_de_ingreso.pdf)

Méndez, J.P. & Marchán, J. (2008). *Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuesta de solución*. Lima: SUNASS/GTZ-PROAGUA. Recuperado de [http://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro\\_ptar\\_gtz\\_sunass.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro_ptar_gtz_sunass.pdf)

Morales, I. (2009). *Aprovechamiento de lodos primarios provenientes del tratamiento de aguas residuales de una industria láctea por medio de la producción de concentrados para animales del sector porcícola y ganadero vacuno*. (Trabajo de grado, Universidad de la Salle). Recuperada de <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14862>

Murcia, F. (2013) *Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola*. (Tesis de para optar el grado de Doctor, Universidad de Murcia, sede Murcia España). Recuperada de [file:///C:/Users/eo6150/Downloads/Tesis\\_deposito\\_Francisco\\_Jose\\_Murcia\\_Navarr\\_o%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/eo6150/Downloads/Tesis_deposito_Francisco_Jose_Murcia_Navarr_o%20(1).pdf)

Nolasco, D. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales* (Nota técnica No. 116, Banco Interamericano de Desarrollo). Recuperado de <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5506/Desarrollo%20de%20proyectos%20MDL%20en%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20.pdf?sequence=1>

Oficina Nacional de Diálogo y Sostenibilidad. (2014). *Balance anual de la conflictividad. Willaqniki. Informe de diferencias, controversias y conflictos sociales*. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/0FF21C29D315251205257CE00078F185/\\$FILE/BalanceAnualConflictividad.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/0FF21C29D315251205257CE00078F185/$FILE/BalanceAnualConflictividad.pdf)

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA. (2014). *Fiscalización de aguas residuales*. Recuperado de [http://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)

Ospina, F., Rodriguez A. & Gonzales J. (2017). *Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia*. Revista de investigación agraria y ambiental – volumen 8 Numero 1 – Junio 2017 – Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá - Colombia. Recuperada de <http://oaji.net/articles/2017/5565-1507172096.pdf>

Palacios, J. (2013) Incineración de lodos como alternativa en la línea de fangos de una EDAR. ppt. Unión temporal de empresas de la depuradora de Zaragoza, VEOLIA agua. Recuperado de <http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/Palacios.pdf>

Pérez, A. (2009). *Bases edafológicas para la correcta utilización de un compost de lodos de aguas residuales urbanas, como enmienda orgánica* (Tesis doctoral, Universidad de Granada). Recuperada de <https://hera.ugr.es/tesisugr/1803326x.pdf>

Raschid-Sally, L., & Jayakody, P. (2009). *Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: Results from a global assessment*. Colombo, Sri Lanka, IWMI.

Rojas, H. (2014). *Estudio del efecto de la aplicación de microorganismos efectivos en la calidad del biol en un proceso de biodigestión anaeróbica* (Tesis de titulación, Universidad Nacional Agraria). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1878/F04-R633-T.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Ruiz, A. (2010). *Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del parque porcino de Ventanilla, mediante un sistema de biodigestión y manejo integral de residuos sólidos y líquidos, Lima, Perú* (Tesis doctoral, Universitat Ramon Llull). Recuperada de

[http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9296/Tesis\\_doctoral\\_ARR\\_version\\_final.pdf?sequence=1](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9296/Tesis_doctoral_ARR_version_final.pdf?sequence=1)

Soderberg, C. (2016). *Guías de EPA – 2012 para reutilización de aguas residuales para la agricultura*. Ponencia presentada en la Conferencia Reutilización de Aguas Residuales para la Agricultura, San Juan, Puerto Rico. Recuperada de [http://www.anagmendez.net/umet/pdf/p\\_perspectivas\\_5\\_guias.pdf](http://www.anagmendez.net/umet/pdf/p_perspectivas_5_guias.pdf)

Soliva, M. & Huerta, O. (2004). *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de [http://mie.esab.upc.es/ms/recerca\\_experimentacio/articulos\\_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf](http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentacio/articulos_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf)

Trejos, M. & Agudelo, N. (2012). *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa “Comestibles la Rosa” como alternativa para la generación de biosólidos* (Proyecto de grado para la titulación, Universidad Tecnológica de Pereira) Recuperada de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2775/62839T787.pdf;sequence=1>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Trillo, M. J. D., Trillo, F. I., & Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. New York: McGraw-Hill. [https://pucp.ent.sirsi.net/client/es\\_ES/campus/search/results?qu=metcalf+y+eddy&te=](https://pucp.ent.sirsi.net/client/es_ES/campus/search/results?qu=metcalf+y+eddy&te=)

Yáñez, F. (1998). *Digestión anaeróbica de lodos* (CEPIS/98. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria). Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/05862/05862-16.pdf>