

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“APROVECHAMIENTO CON FINES AGRÍCOLAS DEL LODO GENERADO
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGUES DE PUENTE PIEDRA”**

Tesis para Obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico

Presentado por:

JENNY MARIA FRANCISCO ATENCIO

Asesor:

ING° MSc. LUIS A. CARRASCO VENEGAS

CALLAO – PERU

2010

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente tesis fue sustentada ante el JURADO DE SUSTENTACION conformado por los siguientes Docentes Ordinarios:

Ing. PORLLES LOARTE JOSÉ ÁNGEL	: Presidente
Ing. CALDERÓN CRUZ JULIO CÉSAR	: Secretario
Ing. RODRÍGUEZ VÍLCHEZ RICARDO	: Vocal
Ing. CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO	: Asesor

tal como está asentado en el Libro de Actas de Sustentación de Tesis N° 02, Folio N° 37, Acta N° 220, de fecha VEINTIDOS DE DICIEMBRE DE 2009, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Titulación con Sustentación de Tesis, de acuerdo a lo normado por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 047-92-CU de fecha 18 de junio de 1992 y el Manual de Procedimientos Académicos aprobado por Resoluciones N° 1324-2008-R de fechas 19 de Diciembre de 2008.

AGRADECIMIENTO

Primero, doy gracias a Dios por su infinita bondad y su fortaleza espiritual que me hace crecer como ser humano. Agradezco a las personas e instituciones que contribuyeron en la realización de la presente investigación. Mi profundo agradecimiento al M.Sc. Ing. Luis Carrasco Venegas, Asesor Principal de mi Tesis y al M.Sc. Blgo. Pedro Ramos Matías, profesor en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina, mi Asesor Personal, quienes me han acompañado siempre en la construcción de ideas y elaboración de todo el proceso de investigación de mi trabajo de tesis. Destacar el valioso apoyo recibido por la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en la persona del Ing. Guillermo Aguirre Yato, por permitirme disponer de un año de su Laboratorio de Fertilización de Suelos, para realizar la parte experimental de esta investigación. A la Blga. Sofía Basilio y al Ing. Ronald Huertas, de la Planta de Tratamiento de Desagües de Puente Piedra- SEDAPAL, por la propuesta del tema de mi tesis.

Un especial agradecimiento a la Ing. Sonia Aranibar Tapia, Ing. Olga Andrade Laime e Ing. Hugo Ávalos Jacobo, mis queridos amigos, quienes han compartido conmigo su riqueza intelectual, realizaron comentarios oportunos y lo más importante aún, me hicieron ver que valía la pena desarrollarlo. A Mario y Clever, asistentes del Laboratorio de Fertilidad de suelos (UNALM) y del LOPU (UNAC) respectivamente. A ellos, mi agradecimiento profundo por ser mi apoyo en las faenas diarias.

A mis padres, mis hermanos, a todos mis adorados sobrinos y especialmente a Raúl, mi esposo, por acompañarme y apoyarme con su fortaleza y optimismo y saborear conmigo todos los momentos de mi investigación, a todos Uds., les dedico este trabajo de investigación. Uds. Son la razón de mi alegría y orgullo permanente.

Deseo que este trabajo contribuya para abrir nuevas rutas en este novedoso tema y que promueva la discusión e implementación de soluciones adecuadas en el logro de revertir un problema de acumulación hacia la oportunidad o alternativa aprovechable en otros espacios factibles. A todos les invoco a estudiar el efecto de la incorporación de lodos en el suelo, cualquiera sea su uso o aplicación.

Y, así como dijera un poeta peruano, solamente, "Colegas, hay mucho por hacer"...

Sinceramente,

La Autora.

**“Nada es veneno, todo es veneno: la diferencia esta en
la dosis”**

Theophrastus Von Hohenheim (1493–1541), medico holandés

INDICE

	RESUMEN	1
I	INTRODUCCIÓN	3
II	HIPÓTESIS	5
III	OBJETIVOS	6
IV	ANTECEDENTES	7
V	MARCO TEÓRICO	11
5.1	Aspectos Generales de la producción de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas	11
5.1.1	Sistema de tratamiento de aguas residuales.	11
5.1.2	Sistema de lodos activados de aeración extendida y el reactor secuencial por etapas (SBR)	16
5.1.2.1	Estimación de las cantidades de lodo generado en la planta de tratamiento: Volumen de lodo	19
5.1.2.2	Balance de sólidos	20
5.1.3	Características fisicoquímicas, de metales pesados y biológicos del lodo	23
5.1.3.1	Características físicas y químicas	23
5.1.3.2	Característica de metales pesados	26
5.1.3.3	Características biológicas	30
5.1.4	Disposición final de los lodos	31
5.2	Aspectos generales del aprovechamiento agrícola del lodo y su impacto	34
5.2.1	Utilización del lodo en el suelo agrícola – lodo seco y lodo compostado	34
5.2.2	Otros usos del lodo	40
5.2.3	Impacto social del uso agrícola del lodo de plantas de tratamiento	42
5.3	Aspectos generales de los metales pesados	43
5.3.1	Aspectos generales de los metales pesados relacionados a los lodos	45
5.3.1.1	Arsénico en lodo	46
5.3.1.2	Mercurio en lodo	47
5.3.1.3	Plomo en lodo	47
5.3.1.4	Cadmio en lodo	48
5.3.1.5	Cromo en lodo	49

5.3.2	Aspectos generales de los metales pesados en el suelo agrícola	51
5.3.2.1	Comportamiento químico del arsénico en el suelo	52
5.3.2.2	Comportamiento químico del mercurio en el suelo	56
5.3.2.3	Comportamiento químico del plomo en el suelo	59
5.3.2.4	Comportamiento químico del cadmio en el suelo	60
5.3.2.5	Comportamiento químico del cromo en el suelo	64
5.3.3	Aspectos relacionados a los metales pesados y el sistema suelo-planta – Biodisponibilidad	65
5.3.3.1	Arsénico en el sistema suelo-planta	65
5.3.3.2	Mercurio en el sistema suelo-planta	68
5.3.3.3	Plomo en el sistema suelo-planta	68
5.3.3.4	Cadmio en el sistema suelo-planta	69
5.3.3.5	Cromo en el sistema suelo-planta	73
5.4	Riesgos potenciales a la salud por metales pesados – Bioacumulación	74
5.4.1	Toxicidad del arsénico	74
5.4.2	Toxicidad del mercurio	75
5.4.3	Toxicidad del plomo	76
5.4.4	Toxicidad del cadmio	77
5.4.5	Toxicidad del cromo	78
5.5	Regulaciones acerca de la aplicación de lodos	80
5.5.1	Legislación sobre lodos en Estados Unidos	80
5.5.2	Normativa de lodos en la Comunidad Económica Europea	81
5.5.3	Legislación sobre lodos en América Latina	82
5.5.4	Marco legal peruano	85
5.6	Planta de Tratamiento de Desagües de Puente Piedra	86
5.6.1	Localización y extensión geográfica	86
5.6.2	Cobertura y población servida	86
5.6.3	Descripción del proceso de tratamiento en la planta de Puente Piedra	87
5.6.3.1	Características de la planta de tratamiento	89
5.6.3.2	Etapa de pre-tratamiento	90
5.6.3.3	Etapa de tratamiento secundario	91
5.6.3.4	Tratamiento terciario	94
5.7	Tratamiento de lodos	94
VI	INGENIERÍA DEL PROYECTO	97
6.1	Generalidades	97
6.2	Ubicación y Materiales	99
6.2.1	Ubicación	99
6.2.2	Materiales	100

6.2.2.1	Materiales experimentales	100
6.2.2.2	Otros Materiales y equipos empleados	100
6.2.3	Caracterización de los materiales experimentales	101
6.2.3.1	Lodo	101
6.2.3.2	Suelo	102
6.2.3.3	Agua para riego	103
6.2.3.4	Cultivo indicador: Maíz (<i>Zea mays L.</i>)	104
6.2.3.5	Fertilizantes inorgánicos: NPK	105
6.3	Metodología	107
6.3.1	Cronograma de la fase experimental	107
6.3.2	Actividades previas: Muestreo y recolección de materiales	108
6.3.2.1	Muestreo y recolección de lodos	108
6.3.2.2	Muestreo y recolección de la arena de río	109
6.3.2.3	Recolección de la maleza	110
6.3.3	Montaje del experimento	110
6.3.3.1	Ensayo N° 1: "Influencia de la dosis de lodo seco en la primera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora"	111
6.3.3.2	Ensayo N° 2: "Influencia de la dosis de lodo seco en la segunda formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora".	113
6.3.3.3	Ensayo N° 3: "Influencia de la dosis de lodo compostado en la tercera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora".	117
6.4	Análisis estadístico de los resultados	120
6.4.1	Diseño Experimental	120
6.4.2	Evaluaciones experimentales	123
6.4.2.1	Variables biométricas	123
6.4.2.2	Evaluación estadística de los metales pesados	123
VII.	RESULTADOS Y DISCUSION	124
7.1	Resultados de la caracterización de los lodos utilizados	124
7.1.1	El pH y la CE (conductividad eléctrica, $\mu\text{S/cm}$).	124
7.1.2	Calidad microbiológica del lodo	126
7.1.3.	Metales pesados: Evaluación de As, Hg, Pb, Cd y Cr en los lodos de la PTAR Puente Piedra comparados con las normas de la US-EPA 40CFR-503 y la Directiva 86/278-EEC	127
7.2	Resultado de la evaluación del Ensayo 1: "Influencia de la dosis de lodo en la fertilización"	128
7.3	Resultado de la evaluación del Ensayo 2: "Influencia de la dosis de lodo en la fertilización y medición de metales en suelo y planta"	128

7.3.1	Evaluación de las variables biométricas de la planta indicadora a los 26 y 60 días de la fertilización	128
7.3.2	Evaluación estadística de los metales pesados en el Ensayo N° 2	136
7.4	Resultado de la evaluación del Ensayo 3: "Influencia de la dosis de lodo compostado en la fertilización y medición de metales en suelo y planta"	144
7.4.1	Evaluación de las variables biométricas de la planta a los 37 y 60 días de la fertilización	144
7.4.2	Evaluación estadística de los metales pesados en el Ensayo N° 3	150
7.5	Resumen de los Ensayos N° 2 y N° 3	158
7.5.1	VARIABLES biométricas de la planta de maíz	158
7.5.2	Variable metales pesados en suelo antes y después de la fertilización y en el maíz	160
7.5.3	Análisis de los metales pesados en el lodo compostado, aplicando el método ICP para metales totales (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission spectrometric Method for Trace Element Analysis for Water and Wastes).	162
VIII	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	163
IX	BIBLIOGRAFÍA	165
	ANEXOS	168

INDICE DE CUADROS

01	Niveles de tratamiento de las aguas residuales	12
02	Producción de lodo en los sistemas aerobios y anaerobios.	15
03	Producción de lodo según fuente de origen	20
04	Lodos traídos por los alcantarillados municipales en la CEE	22
05	Algunos metales pesados detectados en materiales utilizados en suelos	27
06	Frecuencia de caracterización de lodos	29
07	Características de los metales en los lodos de varias plantas de tratamiento – por país	29
08	Principales agentes patógenos en los lodos de PTAR	30
09	Indicadores de contaminación fecal en lodos	31
10	Indicadores de maduración del lodo	38
11	Clasificación de lodos residuales, previo tratamiento	39
12	Contenidos máximos en compost de lodo clase A.	40
13	Metales en lodos – Alemania (2007)	45
14	Niveles Máximos permitidos de metales pesados en fertilizantes	52
15	Constantes de disociación del ácido Ortofosfórico H_3PO_4	55
16	Efectos de los metales sobre la salud humana	79
17	Tratamiento de aguas residuales en América Latina	82
18	Determinación de la frecuencia de muestreo y análisis de lodo	85
19	Actividades formales e informales – Cuenca del río Chillón y PTAR Puente Piedra	87
20	Datos técnicos de la PTAR Puente Piedra (2005 a)	89
21	Datos técnicos de la PTAR Puente Piedra (2005 b)	89
22	Volúmenes de agua residual PTAR Puente Piedra	90
23	Características de Temperatura ambiental y Humedad Relativa	99
24	Otros materiales y equipos empleados	101
25	Características de los lodos N° 1 y N° 2 utilizados PTAR Puente Piedra-Lima	102
26	Características básicas de la arena utilizada como sustrato suelo	103
27	Análisis del agua utilizado para el riego del lodo compostado	103

28	Características del fertilizante NPK empleado	106
29	Cronograma de Actividades de la Etapa Experimental	107
30	Hoja técnica Interpretación de resultados	109
31	Balance de materiales del Ensayo N° 1	112
32	Balance de materiales del Ensayo N° 2	114
33	Insumos para el compostaje	115
34	Caracterización del compost preparado con lodos de PTAR	116
35	Balance de materiales del Ensayo N° 3	119
36	Estadística del ANVA	122
37	Fuentes de variación del análisis ANVA para prueba de hipótesis	122
38	El pH del lodo y los rangos recomendados en las normas técnicas	125
39	Resumen de los resultados de las pruebas estadísticas de las variables biométricas del maíz	159
40	Resumen de los resultados de la prueba estadística de los metales pesados en el suelo (inicial), suelo (final) y en la plantas de maíz	161

INDICE DE GRAFICOS

01	Etapas de tratamiento biológico de aguas residuales	14
02	Esquema del reactor SBR	18
03	Esquema del tratamiento biológico discontinuo SBR	19
04	Balance de sólidos para la producción de lodos	21
05	Composición básica de un desagüe doméstico y su porcentaje de sólidos	23
06	Otros usos del lodo	41
07	Normativa internacional en materia de lodos	84
08	Ubicación geográfica de la planta de Puente Piedra	86
09	Tratamiento de aguas residuales en la PTAR Puente Piedra	93
10	Cancha de secado del lodo de PTAR	95
11	Obtención de lodo seco	96
12	Flujograma de la Ingeniería del Proyecto	98
13	Preparación del lodo compostado	115
14	Tratamientos Ensayo N° 2, Sistema de macetas – Ensayo N° 3	118
15	Valores de pH (unidades de pH)	125
16	Valores de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	125
17	Metales en lodos	127
18	Altura de planta (16.04.2007)	129
19	Altura de planta (21.05.2007)	130
20	Espesor del tallo (21.05.2007)	131
21	Emergencia de plántulas (16.04.2007)	132
22	Emergencia de plántulas (21.05.2007)	133
23	Peso seco – Ensayo N° 2	134
24	Peso seco corregido (PCFf) – Ensayo N° 2	136
25	Arsénico en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	137
26	Mercurio en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	138

27	Plomo en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	139
28	Cadmio en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	141
29	Cromo en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	142
30	Altura de planta (28.12.2007)	144
31	Altura de planta (21.01.2008)	145
32	Espesor del tallo (28.12.2007)	146
33	Espesor del tallo (21.01.2008)	147
34	Emergencia de plántula (21.01.08=21.01.2008)	148
35	Prueba de TUKEY para peso seco – Ensayo N° 3	149
36	Arsénico en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	150
37	Mercurio en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	152
38	Plomo en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	153
39	Cadmio en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	155
40	Cromo en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta	156
41	Imagen de los tratamientos del Ensayo N° 3	158
42	Medición de metales por ICP	162

I.- RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación preliminar de diferentes ensayos de fertilización de la planta indicadora de maíz (*Zea mays L.*), a escala de laboratorio en macetas, con el objetivo de determinar el aprovechamiento agrícola del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra – Lima. El trabajo experimental fue desarrollado en el Invernadero de Fertilidad del Suelo de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima entre enero del 2007 y enero del 2008.

El objetivo de la caracterización inicial del lodo mostró valores del pH, conductividad eléctrica (CE) y metales por debajo de los límites máximos permitidos por los métodos estandarizados para uso agrícola de lodo de PTAR, de la US-USEPA, Norma 40CFR Parte 503 y de la Directiva 86/278/CEE, valores adecuados, y se continuaron con los ensayos. Se desarrollaron tres ensayos de fertilización.

Las variables agronómicas evaluadas en el maíz fueron: emergencia de las semillas, altura, espesor y peso seco de la parte aérea (tallos y hojas). Se aplicó el diseño experimental completamente al azar DCA, y se efectuó el análisis de la variancia del promedio - ANVA, y la Prueba de comparación de Tukey. Mientras que, para la evaluación del Hg, Pb, Cd, Cr y As, en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta indicadora, se aplicó la técnica Univariate, analizándose la media y la desviación estándar de la estadística descriptiva, utilizando el paquete estadístico SAS v8.

El resultado del Ensayo N° 1, mostró ausencia de las plántulas de maíz en todos los tratamientos con dosis de lodo, la que fue atribuida a una lenta mineralización del lodo (lodo inmaduro), el poco tiempo de secado y a su conductividad ligeramente alcalina, pudiendo haber influido en el desarrollo normal de las plantas. En el Ensayo N° 2, los resultados más significativos de las variables agronómicas fueron logrados a las tasas más bajas de dosis de lodo, 2%, 4% y 6% inclusive. En tanto, en el Ensayo N° 3, el lodo fue compostado previo a su utilización. Luego, los resultados de este ensayo fueron altamente significativos para las variables agronómicas con el tratamiento en dosis de 100% de lodo compostado.

En cuanto a metales pesados en el suelo antes y después de la fertilización, los resultados mostraron presencia en cantidades dentro de los rangos establecidos,

indicando que no habría riesgo de toxicidad, excepto para el plomo y el cromo en la mezcla de lodo compostado y arena (Ensayo N° 3), que sí mostraron resultado ligeramente mayor a los rangos normales establecidos, aunque esto no afectó los valores en la planta.

Los escasos recursos en logística y financiamiento, así como la limitada información encontrada en la base de datos de Sedapal, limitaron el objetivo de determinar los aspectos económicos de la utilización del lodo.

Finalmente, los resultados obtenidos en ambos ensayos permitieron concluir que los lodos eran adecuados para ser utilizados como enmienda. Aunque la dosis de 100% de lodo compostado presentó las mejores condiciones para su uso como enmienda o mejorador de suelo y sin efecto de toxicidad, el lodo seco en mínimas dosis mostró buenos resultados.

Finalmente, se pudo observar que en este tipo de ensayos influyeron una serie de reacciones químicas y bioquímicas que se realizan en el sistema lodo-suelo, tales como la precipitación, las reacciones Redox, adsorción y desorción, la complexación o quelación de los metales con la materia orgánica del lodo, y en los sistemas suelo-planta, los procesos de absorción. Además, la presencia de microorganismos en estos sistemas complejos cumple un rol fundamental. Algunas investigaciones científicas indican que las raíces son buenas barreras al proceso de absorción de metales.

Este tema es relativamente novedoso en el Perú, y es la primera realizada en lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con lodos activados con el sistema Sequencing Batch Reactor (SBR).

II.- INTRODUCCIÓN

El saneamiento de las aguas residuales implica la construcción y funcionamiento de plantas de tratamiento, permitiendo mejorar su calidad antes de ser reutilizadas o verterlas al mar o ríos. Este proceso genera simultáneamente un residuo con 2 a 5% de sólidos totales denominado lodo y con más del 90% de agua, sin valor económico. Este residuo biológico así producido es variable tanto en calidad como en cantidad, la carga contaminante le otorgan una calidad física y química variable, acumulación de contaminantes orgánicos, microorganismos patógenos, metales pesados y nutrientes. Sin embargo, un tratamiento previo y adecuado produce un material de alto valor como nutriente orgánico denominado por la USEPA, como biosólido, manteniendo los suelos con alta productividad.

En la actualidad, muchos países consideran el reciclaje y el valor del lodo como una vía importante para reducir su disposición final permitiendo su aplicación segura como fertilizante y estimulante del crecimiento de las plantas, o como enmiendas en la recuperación de suelos degradados. La *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos* – Norma 503 EPA 40CFR- Estándares para la aplicación y disposición de lodos de aguas residuales, recomienda su procesamiento antes de ser aplicados o incorporados al terreno y los criterios de aplicabilidad en base a concentraciones límite de metales pesados antes de su aplicación en el suelo agrícola y las tasas acumulativas de carga contaminante aplicado a metales, incluidos los que aquí se evalúan, y sugiere que si estas concentraciones no sobrepasan entonces no es necesario hacer seguimiento de las tasas acumulativas.

Las experiencias de aplicabilidad en la UE, el Reino Unido, EE UU, en Colombia, en Chile, en la región de América Latina, se indican más adelante.

En el Perú, la Ley 27314, *Ley General de Residuos Sólidos*, define al lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas como un residuo especial, es decir, *“residuos de instalaciones o actividades especiales, que se generan en infraestructuras, de gran dimensión, complejidad y de riesgo en su operación, y que presta ciertos servicios públicos o privados, tales como plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros,...”*, indicando su disposición final en un relleno sanitario. A la actualidad no se tienen datos del volumen de producción anual ni de su vertimiento, por lo que se considera importante una profunda revisión y estudio de los lodos y las exigencias para su

destino final, pues los rellenos sanitarios tienden a saturar su capacidad de almacenamiento, que dicho sea de paso existen muy pocos en el país.

La *planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra – Lima*, operada por SEDAPAL, utiliza la tecnología de lodos activados y un reactor SBR *secuencial batch reactor*, logrando una remoción de DBO₅ casi 95% y microorganismos de 99.99%, desinfecta el efluente en forma eficaz y eficiente. La desventaja radica en la descarga de un volumen potencial de lodos en exceso, lo que es una creciente preocupación para la empresa. Al reducir la masa y volumen de agua, destruir las bacterias dañinas, el lodo se trata con cal como bactericida y se expone al sol hasta sequedad entre el 20 y 35%. La técnica no se considera completamente satisfactoria por sus costos y problemas técnicos, y es dispuesta en el relleno sanitario. Esta situación plantea la aplicación al suelo agrícola como alternativa de disposición final más económica y beneficiosa basándose en las exigencias sanitarias y ambientales internacionales. Así, el presente trabajo de investigación realizó una serie de ensayos de laboratorio, se caracterizó el lodo y se evaluaron algunas variables agronómicas y cinco elementos cadmio, arsénico, plomo, mercurio y cromo, con el objetivo de determinar su aprovechamiento. La escasa información obtenida no ha permitido lograr los demás objetivos, aunque se proporcionan algunos alcances al respecto.

Se debe tomar en cuenta que para determinar los alcances reales del lodo, lo definitivo es el análisis y la experimentación. Se requiere una investigación más completa de su contenido y su efecto toxicológico, procesos de biodisponibilidad y bioacumulación en los organismos vivos, lo que implica investigadores, tiempo e inversión, razones por la cual no siempre es considerada, salvo cuando los perjuicios son severos y es una obligación realizarlas.

II. HIPÓTESIS

El lodo producido en la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra presenta una calidad sanitaria adecuada que permite su aprovechamiento para la actividad agrícola.

III.- OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el aprovechamiento con fines agrícolas del lodo generado en la planta de aguas residuales de Puente Piedra, teniendo en cuenta las exigencias sanitarias y ambientales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la caracterización del lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra.
2. Formular la composición de un tipo de abono usando los lodos.
3. Determinar el aspecto económico del compost producido aplicando lodo procedente del tratamiento de aguas residuales.

IV. ANTECEDENTES

La operación en la planta de tratamiento del alcantarillado de zonas urbanas e industriales, elimina en gran cantidad un residuo denominado lodo, formado por compuestos orgánicos biodegradables, sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes, metales y microorganismos patógenos y no patógenos. El lodo en forma líquida contiene del 94 al 97% de agua y 3 a 6% de sólidos totales, y a menudo resulta económico reducir el volumen para su transporte o almacenamiento. La deshidratación se realiza mediante procesos mecánicos permite obtener un suelo húmedo con 30% sólidos secos, más económico para su transporte. (EPA, 2000).

En la Unión Europea se aplica el proceso biológico de lodos activados como la tecnología más común para el tratamiento de aguas residuales urbanas, aunque consume grandes cantidades de energía y genera 16 millones Tm/año lodo aprox. La materia orgánica del agua residual se oxida y se transforma en biomasa microbiana mediante una amplia gama de microorganismos, generalmente con aireación. En la decantación se forma el lodo que cae al fondo del tanque, reciclándose una parte al tanque de aireación, y el exceso es eliminado. Históricamente el tipo de disposición final más usado ha sido el transporte a rellenos sanitarios, la aplicación en suelo agrícola (37% aprox.), el vertidos al mar e incineración, estos dos últimos actualmente, están siendo prohibidas por la ley en varios países. Alemania y Los Países Bajos, regulan su uso en la agricultura convencional. En España, las PTARs Vertresca, Baldevevas y Rejas, del Ayuntamiento de Madrid, y la Universidad de Vigo, producen compost a partir de lodos residuales urbanos, obteniendo altos rendimientos en las cosechas de algunos cultivos comparados con los fertilizados inorgánicos. En Dinamarca y Suecia, se han prohibido la aplicación de lodo de todo tipo a los suelos destinados al pastoreo, debido a los riesgos de la contaminación de sus aguas subterráneas. (Andrade, 2000).

En Israel, la producción de lodos asciende a 104 550 Tm/ año PS y se estima 250 000 Tm materia seca (PS) para el 2020, y la política de manejo ha establecido la disposición de lodos utilizándolos en forma controlada en la agricultura y alcanzar un nivel de lodos tipo "A" de uso seguro. (Quipuzco, 2004).

En Estados Unidos se producen aprox. $13 \cdot 10^6$ Mg¹/año lodo de las aguas residuales, y es una práctica común aplicarlo en terrenos para efectos de acondicionar en el suelo y

¹El Mg, es un múltiplo del gramo y equivale a $10 \exp 6$ g (= 1 000 000g). 1 Mg es equivalente a 1 TM. Ese valor recibió mucha crítica al uso de abono orgánico en la década de los años 1990. Siendo demasiado abono por hectárea de cultivo, exigía una producción masiva de abono orgánico. (comentado

fertilizar los cultivos. Muchas investigaciones científicas han mostrado que la aplicación agronómica del lodo tiene beneficios en la producción agrícola con bajo riesgo ambiental, se mencionan algunas experiencias de esta aplicación. En Georgia, el 25% de los lodos tratados y estabilizados se utilizan en el campo agrícola, y alrededor del 75% se utiliza en la producción de pastos. En Colorado, la calidad del forraje aumentó en especies nativas de gras que recibieron una sola aplicación de lodos de 5 a 40 Mg/ha. En Florida, se registró el aumento en las concentraciones de metales tanto en el suelo y forraje de las parcelas tratadas con lodos en comparación con el comercialmente fertilizado, pero no se observaron niveles tóxicos de metales en la planta durante la estación de pastoreo. Otro estudio de aplicación encontró que los lodos aplicados al doble de la tasa agronómica no afectó la condición mineral del ganado. La aplicación de lodos en suelos áridos de los pastizales mostró que la adición de materia orgánica y metales beneficiaron la producción de los pastizales. La producción de forraje y la calidad del suelo semiárido de pastizales se incrementaron en una sola aplicación de lodos comparados con el control sin enmienda. (Granato, 2004).

Investigaciones en Washington D.C., mostraron que algunas especies forestales con lodo como fertilizante, dieron como resultado un excelente y prolongado incremento tanto en altura y en diámetro, comparados con las muestras control. Plantaciones de pino radiata, tratados con biosólido líquido, después de 3 años de aplicación, incrementaron entre un 27% y 39% comparados con las parcelas testigo. (Lothar, 2008).

Se evaluó el efecto de la aplicación repetida del lodo en un período de hasta 12 años, dentro de un programa de aplicación de lodos en el suelo de una PTAR en Georgia, con el objetivo de determinar si la concentración de metales puede elevarse en el suelo y en el forraje con la aplicación periódica de lodos y que riesgos podrían presentar a la salud de los rumiantes. Se sugirió que existe un pequeño potencial para la acumulación de concentraciones de metal en el forraje en el período de aplicación prolongada de lodos (uno a tres años), incluso a tasas relativamente elevadas. Sin embargo, se lograron pocos datos sobre los efectos a largo plazo en los programas de aplicación de lodos en suelos agrícolas. (Granato, 2004).

Existen relativamente muy pocos estudios de investigación que determinan los efectos de las concentraciones de los metales en el suelo agrícola y la calidad del forraje. La preocupación de la comunidad científica sobre esos posibles efectos se está centrando en la necesidad de contar con más datos sobre los metales y sus efectos en los animales, en plantas y en el ser humano.

Muchos países que aplican lodo en el suelo agrícola se rigen a los resguardos sanitarios y ambientales de la US-EPA 1993 40CFR Part 503: Standards for the use and disposal of sewage sludge, y requiere que los sólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno, con el fin de minimizar los impactos negativos. La EPA denomina al lodo procedente de las aguas residuales tratado y estabilizado con el nombre de biosólido y recomienda reciclarlo con seguridad y aplicarlo como fertilizante o enmienda que mejora y mantiene los suelos productivos y estimula el crecimiento de las plantas, por ser un producto rico en materia orgánica y nutrientes, y adopta medidas para reducir los riesgos de patógenos. (Lodo clase A y B). Esta recomendación se considera como un medio para evitar los costos ambientales y económicos de su eliminación. Además, se han establecido las concentraciones máximas o límite de metales que no pueden sobrepasar en los lodos que van a ser aplicados al terreno, así como las tasas acumulativas de carga contaminante aplicable para ocho metales y que no deben excederse en los lugares de aplicación. (EPA, 2000).

En Chile, el uso agrícola de los lodos se basa en la experiencia de más de 40 años que tienen Europa y Estados Unidos, así como en los estudios de investigación de los aspectos sanitarios y ambientales y el contenido de metales pesados, desarrollados por ellos mismos. En la ciudad de Santiago, se generan 95000 TM/año de lodos a partir del tratamiento de las aguas residuales urbanas y no está permitido incinerarlo debido a las condiciones atmosféricas de la cuenca y a la generación de gases de efecto invernadero, y se prohíbe estrictamente su vertido al mar. (Carrasco, 2007). Un estudio para evaluar los posibles cambios que se producen en las propiedades químicas de un suelo incubado con lodo encontró un aumento significativo en la concentración de algunos metales pesados e inestabilidad durante la incubación atribuyéndosele al pH y a factores antrópicos del suelo. Aunque muchos estudios de investigación realizados promueven el aprovechamiento agrícola del lodo, existen aún discusiones contrarias al respecto.

En la ciudad de Sao Paulo Brasil, se producen 50 Tm/día PS lodo aprox. Para el año 2015, el Plan Director de lodos ha recomendado su disposición en relleno exclusivo, así como el uso agrícola y la incineración.

Se mencionan dos estudios realizados en el Perú. Una tesis de maestría en ciencias – UNALM, realizado en la ciudad de Cajamarca, produjo humus de lombriz con el lodo procedente de la poza primaria de una PTAR con lagunas de estabilización, encontró valores de Zn y Cu por debajo de los límites de concentración permitidos, aunque el

Fe sobrepasó el límite superior recomendado (250 ppm); logrando un aumento en la productividad del suelo y en la planta de maíz. (Alva, 1999). Otra tesis de ingeniería agrícola - UNALM, desarrollado en la ciudad de Trujillo, produjo compost con los lodos de una laguna facultativa de la PTAR Covicorti, para usarlo como mejorador de suelos de calidad aceptable y de bajo costo. (Falcón, 2005). Ambos concluyeron que el producto obtenido reunía las condiciones como abono o enmienda y que podrían ser utilizados en los suelos agrícolas.

Por otro lado, se ha publicado un inventario de las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales existentes en Lima y Callao (Perú), encontrando 37 PTARs, de ellas, ocho son de lodos activados y juntos tratan 178 l/s de aguas residuales (16% del agua residual tratada) para regar las áreas verdes de la ciudad. La más grande y reciente es la planta de Puente Piedra operada por SEDAPAL, que trata 137 l/s de agua residual, utilizados en el riego de 60 has de la zona agrícola de Chuquitanta, descargando el resto al río Chillón. (Moscoso, 2008). Aunque la información respecto a las características, manejo y disposición de los lodos generados en la PTAR es escasa, el tratamiento de las aguas residuales ha generado una producción diaria muy importante, y complica su disposición en el único relleno sanitario existente. Este potencial incremento genera una preocupación por su destino final de este importante subproducto. Con un enfoque agrícola, el lodo podría ser utilizado en suelos arenosos bajos en materia orgánica y aumentar la productividad de dichos suelos, así también en la recuperación de suelos contaminados. Sin embargo, se requiere investigar su toxicidad debida al contenido de metales pesados, su acumulación en las plantas cultivadas y en los suelos enmendados con este producto, así como los monitoreos periódicos. Investigaciones científicas, han mostrado los riesgos asociados a la adsorción de metales en suelos enmendados con lodo, así como la absorción por la planta a la cadena trófica originando problemas de toxicidad. Al respecto, nuestro país carece de estudios de investigación en esta materia, así como de normas técnicas y disposiciones legales asociadas a esta actividad, hecho que limita las posibilidades de aprovechamiento o conversión de los lodos, los beneficios que se podrían obtener, así como las alternativas para evitar perjuicios al hombre y el medio ambiente debido a su potencial acumulación.

V. MARCO TEÓRICO

5.1 ASPECTOS GENERALES DE LA PRODUCCION DE LODOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

5.1.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Grandes concentraciones humanas e industriales traen como consecuencia grandes volúmenes de lodos arrastrados por las aguas residuales en la red de alcantarillado de las ciudades hacia las plantas de tratamiento que las concentran. Se ha calculado que cada persona consume 200 litros de agua potable diariamente para satisfacer sus necesidades y genera aproximadamente el 90% de aguas residuales. Parte de estos residuos lo constituyen además, la materia fecal, restos de alimentos, materiales orgánicos no biodegradable, aceites y grasas, sales, detergentes, sedimentos, microorganismos patógenos, y son vertidos en su disposición final en los cuerpos de agua, mares, lagos, ríos, etc., produciendo la contaminación de estos recursos naturales. (Cszys, 1994). Los contenidos orgánicos e inorgánicos de cada vertido varían dependiendo del tipo de población, el nivel de vida, la época del año, el grado de industrialización, del consumo, etc. Es decir, la depuración de las aguas residuales depende de las características de los vertidos, de su variación diaria y estaciones; procesos diferentes dan origen a distintos tipos de lodos. (PROSAB, 2001; Bettiol, 2008, y otros). Los desagües domésticos contienen importantes caudales de cargas contaminantes similares, mientras que los desagües industriales conducen una gran diversidad de contaminantes que es característica del tipo de industria que la produce, con una calidad física y química heterogénea del lodo formado en el proceso de depuración. El tratamiento consiste de las etapas preliminar, primaria, secundaria y terciaria, mediante procesos físicos, químicos o biológicos. El proceso de depuración biológica del agua residual de los sólidos en suspensión se da en dos etapas, el tratamiento primario que produce la separación de una parte de los sólidos a través del fenómeno físico denominado *diferencia de densidades*; y el tratamiento secundario, donde una parte de la materia orgánica se metaboliza y transforma en materia viva. La acción más importante es la decantación secundaria de los flóculos de materia orgánica, inorgánica y materia viva. La mayor parte de la contaminación de las aguas residuales queda contenida en los lodos extraídos de los decantadores primarios y secundarios. (Hernandez, 1994). En general, el tratamiento de las aguas residuales que constituye el origen de la producción de los lodos puede ser: un tratamiento previo del agua incluido el cribado y la separación de aceite y desarenado; un tratamiento mecánico con

decantación y filtración; un tratamiento físico-químico mediante floculación y flotación, etc.; y un tratamiento biológico mediante lodos activados, lechos bacterianos, laguna de lodos, tratamiento anaeróbico del agua y fosa séptica. En el cuadro N° 01 se muestran las etapas de tratamiento biológico y los niveles de remoción de las aguas residuales, así como los tipos de lodo que se eliminan.

CUADRO N° 01

Niveles de tratamiento de las aguas residuales

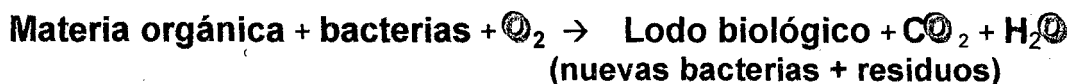
ETAPA	NIVEL DE REMOCION	TIPO DE LODO ELIMINADO
PRE -TRATAMIENTO Sistema de rejillas	Sólidos en suspensión graseros, > 1cm	
TRATAMIENTO PRIMARIO Desarenadores	Sólidos en suspensión, sólidos sedimentables, DBO ₅ en suspensión	los tanques de sedimentación primaria retiran lodo crudo,
TRATAMIENTO SECUNDARIO Presencia de O₂ : microorganismos aerobios, produce biomasa y CO ₂ . Reactor aerobio, lodos activados. Ausencia de O₂ : microorganismos anaerobios, produce biomasa y CH ₄ . Reactor anaerobio, filtro biológico.	DBO ₅ en suspensión fina (no removida en el tratamiento primario), DBO ₅ soluble	los tanques de sedimentación secundaria retiran lodo crudo, lodo activado en exceso.
TRATAMIENTO TERCIARIO Filtro de arena, carbón activado, ósmosis inversa, intercambio iónico.	Nutrientes, patógenos, compuestos no biodegradables, metales pesados, sólidos inorgánicos disueltos y en suspensión.	Lodos químicos

Fuente: Reglamento Nacional de Construcciones Norma S.090

El sistema de tratamiento que se escoja depende de la ubicación, de las características del agua y del uso que se desea dar al efluente así como de la legislación existente. Sin embargo, siempre se generará el lodo como subproducto. El objetivo del tratamiento biológico secundario es remover la demanda biológica de oxígeno DBO₅ soluble que se escapa en el tratamiento primario, así como los sólidos suspendidos (SS). Casi un 85% de la DBO₅ y los SS se remueve por este proceso, y aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno y fósforo, metales pesados, DQO y bacterias patógenas, se le considera como un proceso de fermentación, donde la población microbiana compuesta de bacterias, protozoos, hongos, rotíferos, etc., utiliza la materia orgánica contaminante presente en el afluente como fuente de carbono y energía para su crecimiento y manutención, de modo que ésta es

transformada en CO_2 , H_2O y un nuevo material celular, tomando en cuenta el nivel de oxígeno y otras condiciones como el pH y un adecuado tiempo de contacto. Los mecanismos utilizados para llevar a cabo esta actividad son los lodos activados, los filtros percoladores, lagunas de estabilización, biodiscos, entre otros. En el tratamiento biológico (esquema), la oxidación de la materia orgánica biodegradable se da con la participación de bacterias que aceleran el proceso natural y evita la posterior presencia de contaminantes y la ausencia de oxígeno en los cuerpos de agua: (Carrasco, 2007)

Esquema de la reacción biológica:



La eficiencia de esta transformación biológica requiere de condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano: temperatura 30-40°C; oxígeno 2ppm; pH 6,5-8,0, salinidad < 3.000ppm. Para evitar la inhibición de este crecimiento se precisa la ausencia de sustancias tóxicas tales como los metales pesados Cd, Cr, Hg, Pb, y componentes como cianuros, fenoles, aceites, etc.

Los procesos de tratamiento biológico se pueden dividir según como se encuentren las bacterias responsables de la degradación, en lecho fijo (biomasa bacteriana está soportada sobre superficies inertes, rocas, escoria, material cerámico o plástico), o en suspensión en el agua a tratar. En cada una de estas situaciones, la concentración de oxígeno en el agua determina la existencia de bacterias aeróbicas, facultativas o anaeróbicas.

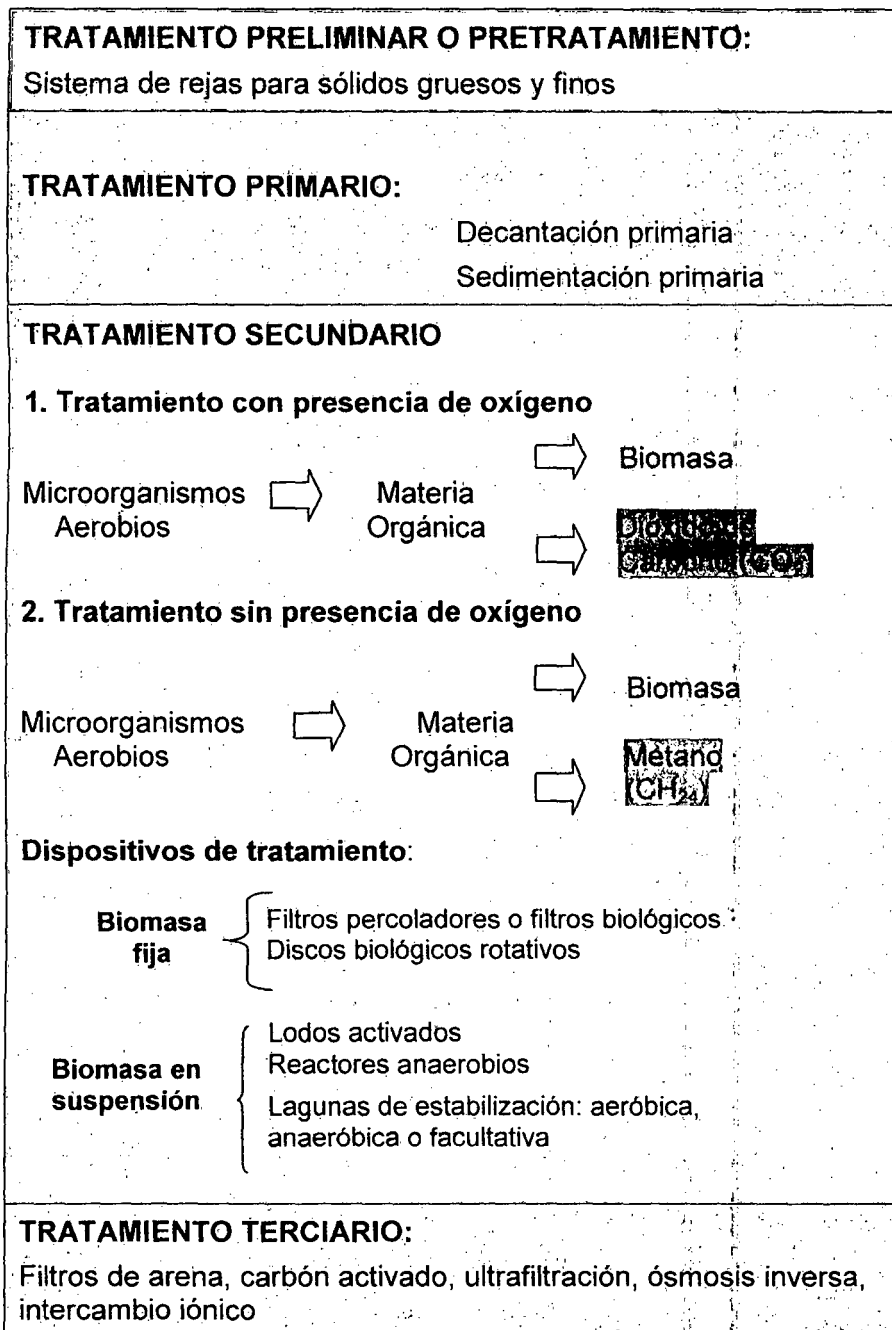
El proceso aerobio con biomasa suspendida que más se aplica actualmente en la Unión Europea es el de lodos activados, y constituye la técnica más compleja para el tratamiento del agua residual, cuenta con la ventaja de controlar el flujo de agua residual, el oxígeno y la densidad bacteriana (lodo activado), presenta mayor independencia de la temperatura, permitiendo la clarificación adecuada del agua residual, lográndose mayor eficiencia en el tratamiento en comparación a otros métodos similares como el de los lechos biológicos, además, cuentan con cortos períodos de arranque de menos de 2 semanas, y no se producen olores desagradables ni atrae moscas. (Hernandez, 1994).

Por otro lado, no todos los sistemas de depuración generan la misma cantidad y calidad de lodos, ello depende de factores tales como el lugar de procedencia, el tipo

de tratamiento del líquido residual, procesamiento posterior del lodo, la etapa de tratamiento de donde son extraídos y de las concentraciones de los distintos parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que caracterizan su composición. (Dellepere, 2008). En el gráfico N° 01 se muestran estas etapas.

GRÁFICO N° 01

Etapas de tratamiento biológico de aguas residuales



Fuente: Elaboración propia. 2007

La cantidad de lodo producido en una planta de tratamiento anaerobio es 16.8 g/(hab*día), menor que la producida en una planta aerobia equivalente que alcanza en promedio a 24.17 g/(hab*día), y produce además, 22 L/hab/día de biogas con una composición de 52% CH₄ y 48% CO₂ debido principalmente al tiempo de retención, se incrementa con el aumento de la población y se considera como una fuente potencial de materia orgánica o de energía (Carrasco, 2007). El lodo líquido procedente de un tratamiento primario y secundario contiene entre 1 a 6.5% de nitrógeno y de 0.6 a 2.5% de fósforo y cuando están digeridos y secados al aire reducen dichos contenidos al 2% de nitrógeno y 1.5% de fósforo. (Torres, 2005). Cada método de tratamiento aplicado a los desagues domésticos presenta sus propias características. En el cuadro N° 02 se muestra la producción de lodo por tipo de tratamiento.

CUADRO N° 02

Producción de lodo en los sistemas aerobios y anaerobios.

Tipo de tratamiento	Lodo producido (m ³ /hab/año)
Laguna facultativa primaria	0,037
Laguna facultativa	0,03 - 0,08
Laguna anaerobia - laguna facultativa	0,01 - 0,04
Laguna aireada facultativa	0,03 - 0,08
Lodos activados convencionales	1,1 - 1,5
Lodos activados (aireación prolongada)	0,7 - 1,2
Lodos activados (flujo intermitente)	0,7 - 1,5
Filtro biológico (baja carga)	0,4 - 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 - 1,5
Biodiscos	0,7 - 0,1
Reactor anaerobio de manta de lodo	0,07 - 0,1
Fosa séptica - filtro anaerobio	0,07 - 0,1

Fuente: Ferreira (1999).

Como ya se ha visto, el último residuo del ciclo urbano del agua es el lodo, el subproducto que resulta del tratamiento de los desagües. Dependiendo de la etapa de tratamiento de donde proceden, reciben diversas denominaciones, como lodo crudo, lodo primario, lodo secundario, lodo químico, lodo asimilable como biosólido, lodo biológico, lodo activado, lodo activado en exceso, lodo deshidratado, entre otros. El interés del presente trabajo de investigación está referido precisamente al lodo activado en exceso procedente de la sedimentación secundaria del sistema de tratamiento de lodos activados, que luego ha sido deshidratado y llevado a la cancha de secado para reducir su humedad antes de su disposición final. De manera que para los efectos de presente trabajo lo denominaremos simplemente lodo.

Por otro lado, los lodos generados por algunas actividades industriales presentan riesgos a la salud y el ambiente, ocasionan daños severos debido a sus propiedades de corrosividad, reactividad, toxicidad, inflamabilidad, o contaminación biológica-CRETIB² y son no apto para el uso como enmienda en suelos agrícolas y la EPA, restringe su uso para los casos en que no exista norma técnica y reglamentación nacional. (Municipio Metropolitano de Quito, 1999).

5.1.2 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS DE AIREACIÓN EXTENDIDA Y REACTOR SECUENCIAL POR ETAPAS (SBR)

La planta de tratamiento que emplea el proceso biológico de lodos activados³ comprende de unidades de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y unidades con equipos de aireación. El proceso es como sigue: se lleva el agua a un tanque de aireación donde el contenido es completamente mezclado y aireado por grandes volúmenes de aire que son bombeados bajo presión dentro del tanque. El aire que burbujea hacia la superficie, transfiere oxígeno al líquido del tanque. Las bacterias aerobias presentes en los lodos activados dentro del tanque usan este oxígeno para convertir el agua servida en gases y líquidos inofensivos, limpios y sin malos olores. Algunas veces este proceso se denomina "hervido húmedo" debido a que las bacterias presentes degradan los desperdicios orgánicos usando oxígeno del mismo modo que el fuego usa el aire para quemar la basura. El agua tratada sale del tanque de aireación, pasa a una cámara de sedimentación en la cual está completamente quieto. Aquí, cualquier partícula tratada parcialmente se precipita al fondo del tanque y retorna al tanque de aireación para un tratamiento adicional. Esta sedimentación permite obtener un líquido altamente tratado, transparente y listo para

² El análisis de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso-CRETIB, características de peligrosidad, determina si un lodo se cataloga como residuo peligroso. Estas condiciones se establecen en el apartado 260 y 261 de la EPA "Identification and Listing of Hazardous Waste", así mismo, lo refieren en la normatividad de residuos peligrosos mexicana. Los metales considerados como parte del CRETIB son As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ag, Pb, Se y Zn., y son indicados en la Ordenanza del Municipio Metropolitana de Quito, Dirección de Medio Ambiente, Quito, 1999.

³ El proceso de lodos activados es uno de los principales procesos biológicos de cultivos en suspensión para el tratamiento de las aguas que eliminan la materia orgánica carbonosa. Este proceso fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. Esta masa de microorganismos es alimentada en un tanque de aireación, en donde metabolizan y flocculan los compuestos orgánicos. Una vez que los microorganismos (lodos activados) han transformado los compuestos orgánicos son llevados al sedimentador y el sobrenadante clarificado es el efluente del sistema. Para mantener la cantidad adecuada de microorganismos en el líquido, una parte de la mezcla los lodos decantados es retornada al tanque de aireación (recirculación de lodos). (EPA, 1999)

su descarga al medio ambiente y cumple con los parámetros exigidos por las normas técnicas. La aireación extendida es el método más eficiente y completo para tratamiento de aguas servidas del que hoy se dispone, por el cual muy rápidamente los contaminantes orgánicos nitrogenados o carbonatados del agua residual pueden ser oxidados y transformados en biomasa microbiana. Los coágulos microbianos caen al fondo del tanque y el agua residual tratada se retira por el rebose. La biomasa sedimentada en el fondo del tanque se extrae después en forma de lodo. Una parte se recicla al reactor tanque para mantener la población microbiana adecuada, mientras que el exceso de lodo producido por el crecimiento de esa población debe ser eliminado. El agua residual contiene suficiente cantidad de nutrientes y existe el oxígeno necesario para las condiciones aerobias. La literatura especializada establece que el 74% de la materia orgánica removida del reactor se transforma en biomasa.

El lodo activado está compuesto por una flora rica en microorganismos floculantes, bacterias⁴, hongos⁵, protozoarios⁶, amebas en el agua residual (biocenosis), que se alimentan de otras bacterias (cilios y flagelados). Los protozoarios permiten producir un lodo de alta calidad, mientras que la materia orgánica se absorbe parcialmente o se convierte en biomasa sedimentable, y se mantiene un contacto permanente entre los contaminantes orgánicos, el oxígeno disuelto y la estabilidad del agua residual. Los microorganismos requieren constantemente de aire para su existencia y consumen rápidamente el oxígeno disuelto en la mezcla agua residual y lodo, razón por la cual uno de los factores más importantes de este proceso biológico es el consumo de grandes cantidades de energía y la generación de grandes cantidades de lodos orgánicos. Es en los flóculos donde se realizan los procesos biológicos. (Hernández, 1991).

El sistema de lodos activados de aireación extendida con reactores tanque secuenciales (Sequency Batch Reactor, SBR⁷), es el proceso aireado optimizado, con

⁴ Las bacterias, un conjunto de microorganismos que se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción puede estar condicionada por la temperatura, pH, presencia de sustancias tóxicas, concentración de oxígeno disuelto. Se nutren de los sólidos orgánicos residuales o materia orgánica muerta, como parte del proceso de depuración del agua residual.

⁵ Los hongos, junto con las bacterias son los principales responsables de la descomposición del carbón de la biósfera.

⁶ Los protozoarios controlan la concentración de las bacterias, que le sirven de alimento, incluyendo otros microorganismos. Son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos. (Alva, 1999).

⁷ Los reactores tanque secuenciales SBR, Sequency Batch Reactor en inglés, desarrollan un proceso aireado, con recirculación de lodos biológicos, donde los microorganismos aceleran la remoción de contaminantes, utiliza ciclos de llenado y de descarga del agua residual por tandas a un único reactor. La aireación se proporciona por medio de bombas que agitan la mezcla para que la materia esté en suspensión y en constante contacto con oxígeno disuelto en el reactor tanque. La sedimentación se realiza en la misma unidad, en forma alternada con a aireación. (Sedapal, 2007).

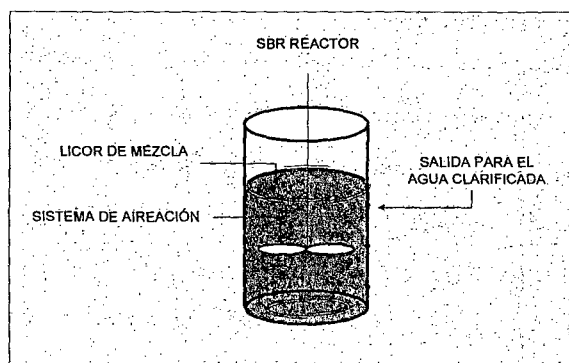
recirculación de lodos, donde la mezcla de agua residual y bacterias aeróbicas floculantes desarrolladas con anterioridad previamente decantada, permanecen en contacto durante algunas horas, y se acelera la remoción de contaminantes. La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en forma alternada en la misma unidad, reactor único. Los lodos en exceso son separados en un decantador secundario como componentes indeseables, después se extraen y depositan en una zona apropiada para su secado para luego ser usado en la formación de campos de lombricultura o compost en el mejoramiento de suelos.

La investigación en el campo de la ingeniería de los procesos ha mejorado los sistemas de aireación y de controles, permitiendo que los SBR compitan con éxito con los sistemas convencionales de lodos activados.

El uso de reactores optimiza el desempeño del sistema, en una secuencia de operación predeterminada. Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales domésticas, y especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes, aunque en algunos casos se limita por su gran tamaño.

GRÁFICO N° 02

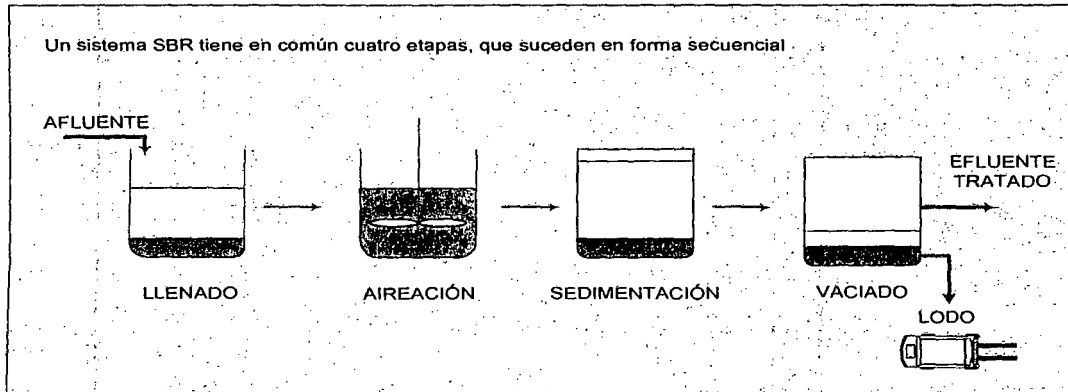
Esquema del reactor SBR



Este sistema permite obtener bajos valores de concentración de materia orgánica y de sólidos suspendidos en el efluente tratado, es muy estable, su operación puede ser ajustada para diferentes condiciones y es resistente a variaciones de carga. No obstante, sus desventajas radican en el costo que implica el suministro de oxígeno y el costo de la disposición del lodo biológico generado. (EPA, 1999). En el gráfico N° 03, se muestra un esquema típico del proceso de lodos activados con SBR.

GRÁFICO N° 03

Esquema del tratamiento biológico discontinuo SBR



5.1.2.1 Estimación de las cantidades de lodo generado en la planta de tratamiento. Volumen del lodo

El volumen de lodo producido por persona diariamente varía según el nivel de vida y los hábitos de la población (consumo de agua, alimentación, centro laboral dentro o fuera de la zona de captación de la misma planta, etc.). Mientras, el contenido de agua en el lodo varía considerablemente, y depende del proceso de clarificación que se aplique, del modo de operación (duración del lodo en las tolvas), de las propiedades del lodo, entre otros factores. La influencia del contenido de agua en un determinado tipo de lodo, con una concentración constante de sólidos en el volumen de lodo, se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{TS_2}{TS_1} = \frac{100 - WG_2}{100 - WG_1}$$

Donde:

V_1, V_2 = Volúmenes de lodo, antes y después del proceso.

TS_1, TS_2 = Contenido de sólidos totales, en % por unidad de peso.

WG_1, WG_2 = Contenido de agua, en % por unidad de peso

Esta fórmula demuestra la importancia que se debe dar al drenaje del agua que contiene el lodo, para reducir el volumen de este último y facilitar su utilización o eliminación. La relación entre WG y V con TS constante, se aplica estricta y únicamente cuando la densidad de los sólidos debe ser de 1. En realidad, ésta es de 1,3 a 1,4 g/cm^3 aproximadamente, para lodos del agua residual doméstica, pero en la práctica se puede considerar que esta diferencia no es significativa cuando el contenido de agua es de 75% ó más, lo cual es importante desde un punto de vista técnico. Es más importante conocer el contenido de sólidos que el contenido de agua. Una de las razones para ello es que éste indica directamente la reducción del volumen de lodo en las operaciones. (Hernandez, 1994).

Se considera que se sedimentan en promedio alrededor de dos tercios del total de sólidos suspendidos y que se separen aproximadamente en un 90 a 95% después de dos horas de sedimentación. La operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra origina importantes volúmenes de lodo durante la fase de descarga del reactor, produciendo 3Kg de lodo compuesto/ m^3 agua tratada.

5.1.2.2 Balance de sólidos

La magnitud de producción de lodos es como se indica en el cuadro N° 03.

CUADRO N° 03

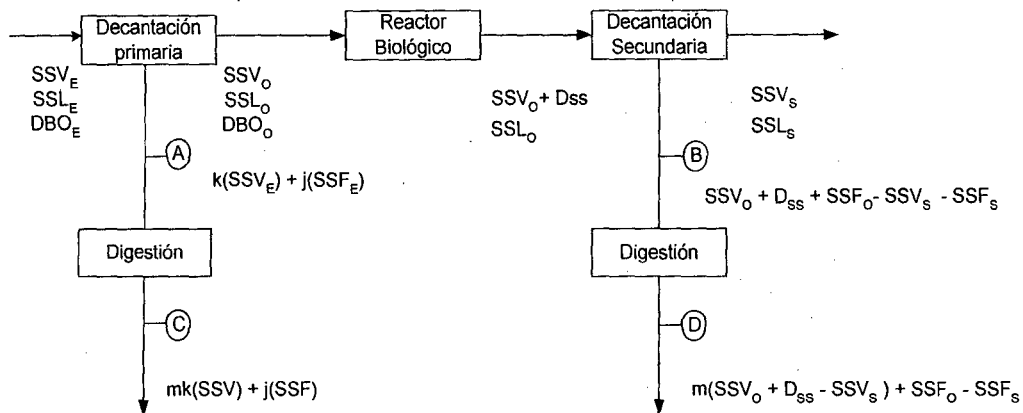
Producción de lodo según fuente de origen

Tipo de lodo	Materia Seca g/hab./día
Primario	40 – 50
Mezcla primario y activado	70 -82
Mezcla primario y lechos	60 – 75

Fuente: Hernández, 1994. España

Es en esta etapa donde el lodo se origina como subproducto residual y corresponden aprox. 35 g/hab/día PS, y entre 0.7 y 0.8Kg DBO_5/kg lodo eliminado. Estos sistemas se consideran como procesos de fermentación, ya que la población microbiana utiliza la materia orgánica contaminante presente en el afluente como fuente de carbono y energía para su crecimiento y manutención. El gráfico N° 04 muestra el balance en la línea de lodos de la depuración de los sólidos en el tratamiento del desagüe.

GRÁFICO N° 04
BALANCE DE SÓLIDOS PARA LA PRODUCCIÓN DE LODOS



Fuente: Hernandez, 1994

Siendo

DBO_E = DBO_5 filtrada, en Kg/día a la entrada

SSV_E = sólidos en suspensión volátiles a la entrada

SSF_E = sólidos en suspensión fijos a la entrada

SSV_0 = sólidos en suspensión volátiles, después de la decantación primaria

SSF_0 = sólidos en suspensión fijos después de la decantación primaria

k = coeficiente de reducción de SSV en la decantación primaria

j = coeficiente de reducción de S.S.F. en la decantación primaria.

M = coeficiente de reducción de S.S.V. en el digestor.

Δ_{SS} = producción neta en Kg/día de S.S.V. en el reactor biológico

S.S.V._s = sólidos en suspensión volátil en el efluente

S.S.F._s = sólidos en suspensión fijos en el efluente

Para las aguas residuales urbanas, se tiene:

$K = j = 0,55$

$m = 0.55$ en digestión aerobia

$m = 0.65$ en digestión anaerobia

Antes de evaluar la alternativa de los lodos, la EPA recomienda determinar la cantidad y el grado de variación de sus características. Los sistemas de tratamiento modernos de aireación extendida, biodiscos, lechos bacterianos, garantizan una mejor calidad del agua, usan poca área, aunque generan grandes cantidades de lodo; mientras, otros sistemas de tratamiento pequeños (filtros, fosas sépticas, etc.), y los sistemas tradicionales (lagunas) generan poco lodo, usan mucha área y garantizan la calidad del agua depurada siempre y cuando se cumplan todas las especificaciones. (Torres, 2005). El cuadro N° 04 muestra las características de un alcantarillado municipal en la CEE.

CUADRO N° 04:

Lodos traídos por los alcantarillados municipales en la C. E. E.

Cantidad de fangos traída por los alcantarillados municipales, por habitante (CEE)					
Tipo de fangos	a. Materias secas en g/hab/día	b. Materias volátiles en g/hab/día	c. Materias secas	d. % de agua contenido	e. Cantidad de fangos/hab/día (valor medio)
A. Fangos frescos de sedimentación ⁽¹⁾					
1. Fangos de decantación primaria	54	38	5-10	90-95	0.72
2. Residuos de decantadores secundarios después de lechos					
a. Baja carga	13	8	4-8	92-96	0.22
b. Alta carga	20	12	4-6	94-96	0.40
3. Fangos en exceso de decantación secundaria de fangos activos					
a. Baja carga	31	23	0.5-1.5	98.5-99.5	3.1
b. Alta carga	25 ⁽²⁾	19	1.5-3.0	97-98.5	1.1
B. Fangos digeridos según su procedencia					
1. Fangos digeridos de decantación primaria	31	17	5-12	88-95	0.40
2. Fangos digeridos de decantación primaria más residuos de lechos de baja carga	43	21	5-10	90-95	0.57
3. Fangos digeridos de decantación primaria más residuos de lechos de alta carga	48	24	5-10	90-95	0.64
4. Fangos digeridos de decantación primaria más fangos en exceso de fangos activados (baja carga)	55	27	4-8	92-96	0.92
5. Fangos digeridos de decantación primaria más fangos en exceso de fangos activados (alta carga)	55 ⁽²⁾	26	4-8	92-96	0.87

Nota a la tabla: ⁽¹⁾ En la mayor parte de los casos, el contenido de materias secas puede incrementarse por el empleo de espesadores, por lo que estos datos pueden variar. ⁽²⁾ Los estudios establecen que los lodos activados se generan en la misma cantidad g/hab/día, sea el funcionamiento de alta o de baja carga.

Fuente: Hernandez, 1994.

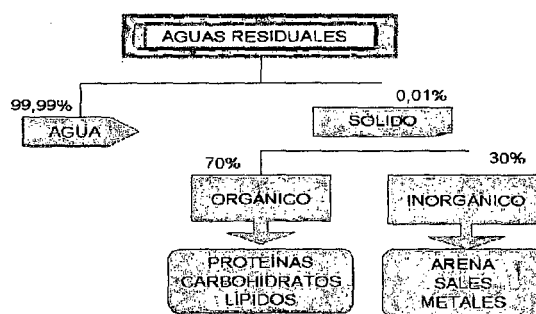
5.1.3 Características fisicoquímicas, de metales pesados y biológicos del lodo

Existen diversos tipos de lodo en una planta de tratamiento de agua residual. El lodo en exceso es el resultante de la actividad biológica de los microorganismos que intervienen en el proceso de tratamiento, presenta una estructura escamosa y es separado en la unidad de sedimentación secundaria, y se extrae en el proceso de filtración biológica de la unidad de clarificación final. En el proceso de activación, la mayor parte es reciclada dentro de la unidad de activación como lodo de recirculación y solo se extrae el lodo sobrante en cada caso como lodo en exceso. Ambos lodos son conducidos nuevamente al afluente que ingresa en la planta, luego se les separa conjuntamente con el lodo primario en la unidad de clarificación preliminar. Con esta técnica se reduce el alto contenido de agua de los lodos biológicos. El interés de este trabajo de investigación incidirá sobre el lodo en exceso, al cual se le ha reducido el contenido de agua en la etapa de filtración de los lodos, y que luego es conducido a la cancha de secado de lodos para su reducción hasta 10 – 25% humedad. A este material en lo sucesivo lo denominaremos simplemente con el término de lodo.

Otro tipo de lodo es el lodo digerido, denominado así porque atraviesa un proceso de estabilización. (Czys, 1994). El gráfico N° 05 representa la composición básica de un desagüe doméstico y su composición en porcentajes que se trata en la planta.

Gráfico N° 05

Composición básica de un desagüe doméstico y su porcentaje de sólidos



COMPOSICIÓN BÁSICA DE UN DESAGUE DOMÉSTICO
Fuente: Bardo, 2009

5.1.3.1 Características físicas y químicas

Dependiendo del origen del desagüe, del proceso de tratamiento y de su carácter estacional, el lodo presenta una composición muy variable. Un lodo de desagüe típico

presenta 40% de materia orgánica, 4% de nitrógeno, 2% de fósforo y los demás son macro y micronutrientes, además de elementos potencialmente tóxicos (Bettiol, 2008), es homogéneo comparado con el lodo primario, cuando está fresco su color varía de gris a marrón y presenta un olor a tierra; la materia seca varía de 3 a 8%.

➤ **Contenido de agua**, es técnicamente la característica más importante del lodo, se determina a partir de la pérdida de peso debido a la total deshidratación del lodo en el horno de secado (a 105 °C). El contenido de sólidos o residuo seco es de 10% cuando la pérdida es de 90%. (Cszyz, 1994).

➤ **Nutrientes NPK⁸**, son necesarios para la actividad biológica de las bacterias; junto con la materia orgánica, mejoran las características físicas de tamaño y estabilidad de los agregados, la capacidad de almacenamiento e infiltración de agua, aumenta la fertilidad del suelo. Son fuente de macro y micronutrientes para las plantas a través de su mineralización y disminuye la susceptibilidad de los suelos a la erosión. Así, 1g de lodo próximo a descomponerse requiere 7mg de nitrógeno. Si 1litro de lodo crudo contiene 60g de sólidos de los cuales 15g pueden descomponerse, se debe disponer de $7 \times 15 = 105$ mg de nitrógeno. El nitrógeno, el fósforo y el potasio son sustancias que favorecen el crecimiento de las plantas y que tienen por consiguiente mucha importancia para la utilización agrícola de los lodos. (Cszyz, 1994). El nitrógeno en los lodos de plantas de tratamiento de desagüe varía de 2 a 6%, principalmente en forma orgánica, de la cual 10 a 40% se mineraliza en el primer año de aplicación en el suelo. Estudios más recientes sobre la relación entre el carbono y el nitrógeno han demostrado que una razón C/N de 10 a 16 es particularmente favorable, y la relación entre el nitrógeno y el fósforo debería ser de 7. El porcentaje de materia orgánica en el lodo digerido por completo es aproximadamente de 45 a 50%, mientras que existe un porcentaje aproximado de 50 a 55% de minerales. El fósforo presente en el lodo se encuentra en mayores concentraciones que en materiales orgánicos de uso habitual

⁸ NPK (Nitrógeno, Fosfato y Potasio) nutriente mineral esencial para las plantas. Una característica particular de las plantas verdes, es que las sustancias requeridas para su alimentación son exclusivamente del tipo mineral o inorgánico, distinguiéndolo de los otros seres vivos, quienes necesitan alimentos orgánicos. Se ha establecido la esencialidad de 13 elementos para las plantas superiores, además del carbono, hidrógeno, oxígeno y agua, que los toma del aire, de aquí que estos no se consideran nutrientes minerales. Los nutrientes se clasifican de acuerdo al comportamiento bioquímico y función biológica como sigue:

Primer grupo: constituyentes principales. C, H, O, N, S.

Segundo grupo: forman ésteres de fosfato y participa en la transferencia de energía. P, B, S.

Tercer grupo: participan en reacciones específicas de activación de enzimas, balance de aniones, control de la permeabilidad celular. K, Na, Mg, Ca, Mn, Cl.

Cuarto grupo: formación de quelatos en los grupos prostéticos. Fe, Cu, Zn, Mo.

en la agricultura y presenta baja solubilidad en el suelo. El potasio se presenta en niveles generalmente inferiores a 1% en el lodo, por ser un elemento muy soluble. Se considera que el 100% de potasio es asimilable por las plantas. (Falcón, 2005).

Desde el punto de vista de la viscosidad, los lodos no son líquidos newtonianos, más bien presentan caracteres tixotrópicos⁹. Los lodos líquidos procedentes de un tratamiento primario y secundario contienen 1 a 6.5% de nitrógeno y 0.6 a 2.5% en fósforo. Mientras que los lodos digeridos y secados al aire contienen 2% de nitrógeno y 1.5% de fósforo. (Torres, 2005)

➤ **Valor calorífico**, depende del contenido de materia orgánica de los lodos, que les proporciona a éstos una capacidad de combustión más o menos elevado, permitiendo su incineración. El lodo digerido con 9,2% sólidos presenta una pérdida al calor de alta temperatura de 40,8% y poder calorífico de 11,1 kJ/g sólidos. Los valores para los lodos frescos son mayores.

➤ **Materia orgánica**¹⁰, usualmente de color café oscuro, floculentos, de aspecto homogéneo comparado con los lodos de un tanque de sedimentación simple, y tienen olor a tierra, corresponde a la materia volátil (o sólidos volátiles, VS) y proporciona un estimado de la rápida descomposición, varía de 60 a 85% de la materia seca parcialmente descompuesta; son determinantes importantes del potencial problema de olor en los sitios de aplicación al suelo. Un número de procesos de tratamiento, incluyendo la digestión anaeróbica, digestión aeróbica, estabilización alcalina, y compostaje, pueden ser usados para reducir el contenido de VS y el potencial olor.

➤ **Contaminantes orgánicos**, son productos químicos de síntesis muy utilizados, se hallan en los detergentes y los antibióticos, actúan negativamente sobre la flora bacteriana de los lodos y sobre su utilización en la agricultura.

➤ **El pH** del lodo es un indicador de la etapa de digestión en la carga doméstica. El lodo proveniente del proceso de clarificación es 7. El lodo digerido por completo o el

⁹ La tixotropía es la propiedad de ciertos geles, en virtud de la cual la agitación les convierte en líquidos relativamente fluidos. El fluido (fase sol) así formado se transforma en gel después de un reposo prolongado. Esta transformación es reversible para los fluidos tixotrópicos. Esta propiedad es responsable del mantenimiento de finos en suspensión.

¹⁰ Materia orgánica, es la fracción orgánica del suelo que incluye componentes de naturaleza variable que llegan al suelo por diversos caminos. Incluyen hidratos de carbono (azúcares, pectinas, almidones); proteínas, aminoácidos libres y derivados; grasas, aceites, resinas y otros similares; alcoholes, aldehídos, cetonas; lignina; fenoles, taninos y otros compuestos carboxílicos; alcaloides, purinas, hormonas, enzimas, antibióticos y otras sustancias biológicamente muy activas en pequeñas concentraciones. Uno de los procesos importantes en los que interviene la materia orgánica, es la liberación del NPK y micronutrientes disponible para las plantas, y el poder amortiguador del suelo

lodo clarificado en la etapa de fermentación metanogénica presentan una reacción ligeramente alcalina, de 7,0 a 7,5, mientras que la reacción del lodo crudo o el lodo bajo "fermentación ácida" presenta valores de pH ligeramente ácidos, hasta 6,0 o menos. (Czys, 1994).

El pH del lodo es con frecuencia elevado con materiales alcalinos para reducir el contenido de patógenos y la atracción de vectores (organismos productores de enfermedades), la cal incrementa la volatilización del amonio en forma de nitrógeno gaseoso, reduciendo el valor de fertilizante nitrogenado del lodo. Un pH mayor de 11 mata virtualmente todos los patógenos, es de utilidad biológica, reduce la solubilidad y moviliza muchos metales.

➤ **Conductividad eléctrica (CE).**- Se basa en la facilidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de iones en solución. Con un enfoque agronómico, se determina la conductividad eléctrica para estimar la salinidad del lodo, que reflejará la concentración de sales solubles. Un elevado contenido en sales solubles del lodo disminuye la capacidad de germinación de las semillas y crecimiento de las plantas. El contenido de sales del lodo puede cambiar con el lavado.

➤ **Sólidos totales (ST),** incluye sólidos suspendidos y sólidos disueltos y usualmente expresados como la concentración presente en el lodo; depende del tipo de proceso del agua residual y tratamiento del lodo antes de la aplicación al suelo.

5.1.3.2 Características de metales pesados

La presencia de metales pesados¹¹ en los lodos, independientemente del tipo de disposición que se escoja, genera un impacto negativo en la salud y en el ambiente. Los análisis en cuanto a su uso en la agricultura determinan la magnitud de este impacto, tanto en el suelo como en las plantas que en él se desarrollan. Los metales

¹¹ Metales pesados (MP), son considerados como los elementos que poseen masa específica igual o mayor que 6,0 g/cm³ (Falcón, 2005) y cuya presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%, con excepción del Fe (5,0%), aunque el término "metal pesado" es algunas veces utilizado indiscriminadamente para los elementos químicos que contaminan el medio ambiente y pueden provocar diferentes niveles de daño a la biota. Se distinguen dos grupos de metales: los microelementos o elementos esenciales, que son requeridos por el organismo en pequeñas cantidades, y desempeñan importantes funciones en los organismos vivos, componen el sistema dador de electrones y funcionan como puente en los compuestos enzimáticos, pero que pasado cierto umbral pueden volverse tóxicos y letales, son Fe, Cu, Mn, Se, Si, B, Mo, Co y Zn. Otros metales en los que se desconoce su función biológica y que se acumulan en los organismos vivos, su presencia en determinadas cantidades produce disfunciones en el organismo de los seres vivos y resultan altamente tóxicos, son principalmente Ag, Cr, Cd, Hg, Ni, Pb, Sb y Bi. (Falcón, 2005; Alva, 1999, Tomoyuki, 2004).

pesados son elementos químicos que poseen peso específico mayor de 5 g/cm^3 y su número atómico es mayor de 20. Su contenido en el suelo, debería ser únicamente función de la composición del material parental y de los procesos edáficos que ocurren en el suelo, sin embargo, las diversas actividades humanas: el empleo de fungicidas, fertilizantes minerales y estiércol de animales en la agricultura y los desechos de residuos urbanos y el lodo procedente del tratamiento de los desagües domésticos e industriales, pueden elevar su concentración en el suelo a niveles capaces de causar daño a la biota y además son acumulativos en el organismo.

La presencia de metales pesados, es el principal factor limitante para el uso agrícola de los lodos de las planta de tratamiento de los desagües, proviene principalmente de las actividades económicas, que son lanzados en las redes de alcantarillado público, mientras que el lodo de las plantas de tratamiento que recibe los desagües domésticos contiene poca cantidad de metales pesados, que provienen de la propia naturaleza de los residuos y de los canales de distribución. Destacan los vertidos ilegales de conexiones clandestinas de pequeñas fuentes a las redes de alcantarillado de aceites lubricantes usados con altos contenidos de plomo, de baterías pilas de cadmio, níquel o mercurio procedentes del ámbito doméstico, la corrosión de tuberías y depósitos metálicos, lavanderías que contienen As, Zn, Cr y Hg, laboratorios fotográficos, tintas de cromado y otras. (Tomoyuki, 1999; León, 2008, otros). El cuadro N° 05 muestra los niveles de estos metales detectados en algunos materiales utilizados en el suelo.

CUADRO N° 05

Algunos metales pesados detectados en materiales utilizados en suelos

Material	Cd	Cr	Pb	Hg
Fertilizante fosfatado	0,1 - 170	66 - 245	7 - 225	-
Calcáreo	0,04 - 0,1	10 - 15	20 - 1250	10 - 450
Basura urbano	2	26	135	-
Compuesto con lodo	-	60	38	89
Estiércol de cerdo	0,58	19,3	19,6	-
Estiércol de aves	0,33	15,9	5,9	-
Lodo de desague de Curitiba	ND	175	123	1,0
Compuesto de lodo y Residuo de poda de árboles	0	48,2	105,6	-
Recomendado EPA	39	1200	300	17
Límite máximo EPA	85	3000	840	57
Recomendado SANEPAR	20	1000	750	16

Leyenda: ND = no detectado. Concentración en mg/Kg.
Fuente: Bettioli, 2008.

El comportamiento químico de los metales en el suelo es bastante complejo, y está influenciado por diferentes tipos de reacciones, como la adsorción, complejación, precipitación, oxidación y reducción, que definen su biodisponibilidad en las plantas, la solubilidad y la lixiviación en los suelos, así como, su potencial riesgo a la salud humana y el ambiente; pueden también interferir en la dinámica y ecología general de los microorganismos en ambientes naturales. Se ha calculado que el tiempo de residencia en el suelo, de los metales provenientes de los lodos, está en el orden de 10^3 - 10^4 años. El riesgo asociado a los metales pesados del lodo está principalmente ligado al hecho de que el suelo es capaz de almacenarlo, aunque diversos factores interfieren en la dinámica de su disponibilidad tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la textura y el contenido de la materia orgánica. De este modo, dependiendo de las condiciones ambientales, los metales pueden estar presentes en el suelo en formas no disponibles para las plantas, esto se denomina especiación. En este caso, la transferencia de los metales para la cadena alimenticia dependerá de las características de cada suelo y del tipo de planta, pues las especies vegetales tienen capacidades variables de absorción de metales. (Chicón, 1997). El contenido de metales pesados en el lodo tiene que ser monitoreado periódicamente antes de su utilización. En el Perú no se cuenta con información en cifras acerca de la cantidad de lodos producido por las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes, y la norma técnica S.090 (1997) es la única que se refiere a su aplicación al suelo. Y, el monitoreo de la calidad del lodo puede considerarse aplicando las referencias recomendadas por la EPA 40CFR 503, de frecuencia de monitoreo del lodo que se aplicará al suelo como biosólido¹², sea una vez por año cuando se dispone de pequeñas cantidades de lodos, hasta una vez al mes para la disposición de grandes cantidades de lodos, tal como se muestra en el cuadro N° 06, mientras, el cuadro N° 07 muestra las variaciones de la composición de lodos generados en varias plantas de tratamiento de desagües de varios países.

¹² Los biosólidos son los lodos biológicos y constituyen de materiales orgánicos ricos en nutrientes, producidos durante el tratamiento de las aguas residuales, son de uso benéfico en el suelo agrícola, en la forestación, suelos degradados, y como alternativa frente a los fertilizantes sintéticos (químicos). Sólo los biosólidos que reúnen los más exigentes estándares exigidos en los reglamentos del estado federal pueden ser aprovechados para usarse como fertilizante. (EPA 832-F-00-064-2000 y versión 2006).

CUADRO N° 06
Frecuencia de caracterización de lodos

Producción de lodo en la planta de tratamiento de desagues Ton/año base seca	Frecuencia de muestreo
0 – 290	Anual
290 a 1500	Trimestral
150 a 15000	Bimensual
Mayor de 15000	Mensual

Fuente: EPA 40CFR 503, 2000

CUADRO N° 07

Características de los metales en los lodos de varias plantas de tratamiento - por país

PARAMETRO	Lodos activados (1)	Laguna de estabilización (2)	Laguna (3)	Laguna facultativa (4)	Lodo activado (5)	Laguna (6)	EPA 40-CFR -503 EU (7)	Norma UNION EUROPEA (8)
METALES PESADOS:								
Arsénico (As)	16	< 1	0,47-		15,8	0,66	41	N.R
Mercurio (Hg)	0,725	< 0,01	0,85	63		12,8	17	16-25
Plomo (Pb)	49,6	348,9	84	134	98,9	66,6	300	750-1200
Cadmio (Cd) *	< 2,00	9,4	2,78	2,00	< 0,5	1,28	39	20-40
Cromo (Cr)	12,4	1297,2	849	30	43,0	37,9	3000 ⁽⁷⁾	N.R

Leyenda: Concentración: mg/kg

Leyenda: NR = No Regulado

Fuente:

- (1) Pta de Puente Piedra, Lima - Perú (Sedapal, 2007).
- (2) Laguna de Barueri – Brasil. (Bettiol, 2008)
- (3) PTAR El Salitre (Bogotá) – Colombia (Municipio Quito, 1999)
- (4) Laguna de Santiago de Chile (Carrasco, 2007)
- (5) Pta. Sao Paulo –Brasil (PROSAB, 2001)
- (6) Laguna de Granada – Nicaragua (Cortesía UNALM, 2006)
- (7) EPA SW-846-3051 (1986) EPA – (1993).
- (8) Límites Unión Europea 86/278/CEE (2001)

Se analizarán los cinco elementos químicos, los que por su "bien ganada mala reputación", merecen un tratamiento específico y representan el interés del presente trabajo de investigación, nos referimos al arsénico (As), mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr). El arsénico que, aunque no es metal está considerado entre ellos por su alto grado de toxicidad, y así será considerado aquí. Este aspecto se basa en la literatura de Alloway (1993) que recopila experiencia europea.

5.1.3.3 Características biológicas

Los microorganismos patógenos, normalmente presentes en el desagüe, se dividen en cuatro grupos: hongos, virus, bacterias y parásitos. Normalmente, en los sistemas de tratamiento, los microorganismos quedan adsorbidos a las partículas sólidas y tienden a precipitar durante la fase de decantación concentrándose en el lodo. El cuadro N° 08 contiene los agentes patógenos más comunes encontrados en los lodos.

CUADRO N° 08

Principales agentes patógenos en los lodos de PTAR

ORGANISMO	ENFERMEDAD/SÍNTOMAS
BACTERIA	
Salmonella sp.	Salmonelosis, tifoidea
Shiguella sp.	Disentería bacilar
Yersina sp.	Gastroenteritis aguda
Vobrio cholerae	Cólera
Campylobacter jejuni	Gastroenteritis
Escherichia coli (cepas patógenas)	Gastroenteritis
VIRUS ENTÉRICOS	
Virus de la hepatitis A	Hepatitis infecciosa
Virus y semejantes	Gastroenteritis epidémica, Diarreas graves
Rotavirus	Gastroenteritis epidémica, Diarreas graves
ENTEROVIRUS	
poliovirus	Poliomielitis
Coxsackievirus	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
Echovirus	Meningitis, parálisis, encefalitis, diarrea, fiebre, etc.
Reovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis.
Astrovirus	Gastroenteritis epidémica
Calicivirus	Gastroenteritis epidémica
PROTOZOARIOS	
Cryptosporidium sp.	Gastroenteritis
Entamoeba histolítica	Enteritis aguda
Giardia lamblia	Giardiasis
Balantidium coli	Diarrea y disenteria
Toxoplasma gondii	Toxoplasmosis
HELMINTOS	
Ascaris lumbricoides	Prob. digestivos, nutricionales, vómito, etc.
Ascaris suum	Dolor en el pecho, tos, fiebre
Trichuris trichiura	Diarrea, anemia, pérdida de peso
Toxocara canis	Fiebre, dolor muscular, síntomas neurológicos.
Taenia saginata	Disturbios digestivos, insomnio, anorexia.
Taenia solium	Disturbios digestivos, insomnio, anorexia, etc.
Necator americanus	Disturbios digestivos
Hymenolepis nana	Teniasis

Fuente: EPA. 1993, Alva, 1999.

Por lo tanto, la densidad de patógenos presentes en el lodo es variable y está ligada a las características de la ciudad y al tipo de tratamiento a que el lodo fue sometido. Su

concentración es un indicador de contaminación fecal. La densidad de algunos agentes patógenos en el lodo de los países en vías de desarrollo comparado con los países altamente desarrollados es elevada y la incidencia de parasitosis puede estar asociada a la ineficiencia del tratamiento del desagüe, pudiendo limitar la utilización del lodo para otros fines. El conocimiento de los agentes patógenos y de su viabilidad permite evaluar el potencial de riesgos de infecciones a que el hombre y algunos animales están expuestos, y limitan su aprovechamiento por un tiempo en cultivos agrícolas de consumo directo como las hortalizas. Dentro de los agentes patógenos presentes, la mayor preocupación es la presencia de parásitos intestinales, huevos de helmintos, quistes de protozoarios. Los sistemas de tratamiento convencionales no son capaces de eliminar el 100% de los microorganismos, principalmente los huevos de helmintos. La EPA¹³ recomienda la presencia de menos de 01 huevo/04g lodo PS para clasificarlo como lodo tipo A, y que no representa riesgos a la salud.

CUADRO N° 09
Indicadores de contaminación fecal en lodos

Indicador	Rango Colombia	NORMA EPA 40CFR-503	
		Clase A	Clase B
Coliformes fecales (NMP/g)	$1.5 \times 10^5 - 5.1 \times 10^5$	< 1000	<2.000.000
Huevos de helminto (Huevos/4 g)	<1	< 1	>1

Fuente: EPA, 2000; Municipalidad de Quito, 1999

La Clasificación higiénica de acuerdo a los estándares microbiológicos de la US EPA establece que el lodo de la clase A puede ser usado sin ninguna restricción para cultivos de consumo directo, mientras que el lodo de la clase B puede usarse en la recuperación de suelos, plantaciones forestales, en cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios.

5.1.4 Disposición final de los lodos

Las vías tradicionales de disposición final¹⁴ del lodo de PTARs generados por décadas en países de la Unión Europea y EE UU, han sido el transporte a los rellenos

¹³ Environmental Protection Agency: EPA 1993.

¹⁴ Algunas formas tradicionales de disposición final conocidas son: (a) Disposición en lagunas o cochas de secado, donde la digestión anaeróbica se realiza en el fondo, mientras que la digestión aeróbica se realiza en la parte superior, este lodo así obtenido era utilizado para la restauración de suelos. (b) El esparcido directo de lodo líquido en los suelos agrícolas y en áreas de reforestación, mediante vehículos de riego similar al que se emplea en el riego con agua residual; mientras que el lodo con metales

sanitarios, la incineración y el vertido al mar. En la Unión Europea, hasta 1994, el 40% era transportado a los vertederos o rellenos sanitarios, el 37% era esparcido en las tierras de cultivo, el 11% se incineraba, el 6% era vertido al mar y otro 6% con destino desconocido. (León, 2008). El vertido al mar y la incineración han sido prohibidas desde 1999 tanto en el Reino Unido como en España. La producción de lodos en el Reino Unido es de 1.5 millones de TM/año PS, y se calcula que en la UE se produce 6.5 millones TM/año PS aprox., y se prevé un aumento de esta cifra en los próximos años como resultado de la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas en las pequeñas comunidades. Actualmente, esta situación está tomando nuevos rumbos debido a las exigencias ambientales, se plantea el uso en suelo agrícola, a la hora de planificar su disposición final. (León, 2008). Desde el 2005, la Directiva del Consejo de la UE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, 91/271/EEC, exige que cada núcleo urbano de más de 2000 habitantes que realice vertidos a aguas superficiales y estuarios, y cada núcleo urbano de más de 10000 habitantes que lo haga a aguas costeras, debe al menos aplicar un tratamiento secundario a sus aguas residuales antes del vertido. La nueva propuesta del Consejo Europeo sobre transporte de los lodos a los vertederos como vía de eliminación está cambiando, y pretende reducir gradualmente, hasta el año 2010, al menos del 25% de la cantidad total (en peso) de los residuos urbanos biodegradables y los lodos producidos.

En Israel, la disposición de lodos es 104 550 TM/año PS (base seca), de ellos el 57% son vertidos al Mar Mediterráneo, el 35% es utilizada en la agricultura como fertilizante, el 7% se utiliza en la producción de compost y 1% se disponen en los basurales. (Quipuzco, 2004).

En EEUU, por más de treinta años miles de ciudades americanas vertían sus aguas residuales crudas directamente a los ríos, lagos y bahías. Debido al tratamiento del agua residual, actualmente estas corrientes de agua han mejorado y son seguras para la recreación y la cosecha de productos marinos, y debido a las restricciones federales y sus estándares nacionales, los lodos procedentes del agua residual tratado se

pesados u otros contaminantes peligrosos son dispuestos en lugares especiales o rellenos exclusivos. (Tomoyuki, 1999). (c) Los vertederos o rellenos sanitarios son espacios de confinación permanente; ha sido y continúa siendo una vía de eliminación de los lodos ampliamente utilizada. Estos depósitos requieren de áreas extensas de terreno, difíciles de obtener actualmente y desaprovecha los elementos benéficos presentes en los lodos. (Falcón, 2005; León, 2008) (d) El vertido al océano, mar, ríos y/o lagos, ha sido una de las vías más populares de disposición final en el Reino Unido y en España, pero el riesgo potencial de biomagnificación de ciertos elementos presentes en los lodos sobre los alimentos marinos que puede ocasionar serios problemas a este ecosistema, ha prohibido esta práctica actualmente por las leyes de diferentes países.

reciclan con seguridad y los gobiernos toman la decisión cuando debe reciclarse como biosólido.

En América Latina, el 90% de los desagües son vertidos al mar, ríos y lagos sin ningún tipo de tratamiento, o son usados en el riego de áreas agrícolas. En la región del Caribe no existen cifras claras de la cantidad de lodo producido, y se infiere que es considerable y que casi en su totalidad no presenta opciones de reutilización. La Bahía de La Habana en Cuba, su puerto más importante actualmente recibe 300000 m³/día aguas residuales urbano industriales sin tratamiento, considerándose un clásico ejemplo de zona contaminada. (León, 2008).

En México, los lodos se disponen en las corrientes de aguas superficiales, basureros a cielo abierto o rellenos sanitarios provocando contaminación en el aire, suelo y acuífero. Según Cardoso (2007), el volumen del agua residual es de 100m³/s, con un promedio superior a 4000ppm de DBO₅ o carga orgánica que se vierte a los cuerpos receptores, ello representa 12'614,400 TM/año lodo, equivalente a 406 g/hab/d a diferencia de los países de la CEE que es de 60 g/hab/d y existe la tendencia de utilizar el lodo como abono para suelos agrícolas o como corrector de suelos y recuperación de áreas erosionadas.

En Chile, los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales presentan niveles más bajo de metales pesados que en los países de alta industrialización, siendo los lodos de la Metrópoli los de mayor nivel de contaminación en el país. (Carrasco, 2007).

Como sucede en la mayoría de países de la región, donde solamente las grandes ciudades cuentan con sistemas de tratamiento de las aguas residuales, en Lima y Callao (Perú), el sistema de drenaje comprende unos 8000Km de alcantarillas que recogen 18000L/s de aguas servidas o 2000000m³ diarios y por lo general, son vertidas al mar del océano Pacífico, a través de ocho colectores, sumándose las que recogen los ríos Rímac, Chillón y Lurín, contaminándolas por saturación de materia orgánica, residuos químicos y patógenos contenidos (bacterias, virus, huevos de parásitos, etc.). Moscoso y col. (2008), indicó que existe 37 PTARs, siendo ocho de ellas de tecnología de lodos activados, y juntos tratan 178L/s de aguas residuales, equivalente a una cobertura de 14% de las aguas residuales. Actualmente, no se tiene información acerca de la producción ni de la disposición final de los lodos, tampoco se conoce de proyectos que contemplen estos aspectos ni del manejo de los lodos que vayan a producirse, más aún cuando se tiene proyectado la instalación de 20 PTARs a nivel nacional, y que las exigencias ambientales actuales plantean reducir la

contaminación de los recursos agua y suelo, como parte de las metas del milenio. Así mismo, la Ley General de Residuos Sólidos, Ley 27314, define a los lodos de las PTARs como residuos de actividades especiales, considerando que ellos deberán ser dispuestos en los rellenos sanitarios.

Concluyendo, se puede afirmar que en la mayoría de los países, el vertido en los cuerpos de agua y los rellenos sanitarios son las principales vías de eliminación de lodos, con el consiguiente impacto ambiental con la consecuente producción de gases de efecto invernadero y de la contaminación de aguas subterráneas por lixiviado; al mismo tiempo se desaprovecha la materia orgánica que puede ser aplicada a la remediación de suelos, a la agricultura y a nuevos usos que serían posibles gracias a la aplicación de tecnologías innovadoras. La caracterización de los lodos es condición fundamental para realizar una disposición final adecuada de este material. (Czsys, 1994; Falcón, 2005; Tomoyuki, 1999; otros).

5.2 ASPECTOS GENERALES DEL APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA DEL LODO Y SU IMPACTO

5.2.1 Utilización del lodo en el suelo agrícola – lodo seco y lodo compostado

Razones de índole económica conducen a considerar siempre la posibilidad de utilizar los lodos en la agricultura. además debe cumplirse ciertos requisitos antes de su aplicación, eliminarse todo riesgo para la higiene y la salud pública y de los animales, el lodo no debe incrementar sustancias nocivas indeseables al suelo o las plantas, ni afectar a la producción ni a la calidad de los cultivos, debe contener una cantidad suficiente de nutrientes y de materia orgánica. (Czsys, 1994). Su uso podría ayudar a remediar las deficiencias de ciertos elementos traza que a menudo se presentan en suelos que han sido cultivados por décadas; en la recuperación de suelos degradados; y para sustituir el uso de insumos tradicionales en la agricultura, entre otros. (Falcón, 2005; León, 2008). Las propiedades agronómicas del lodo como mejorador de suelos brinda la posibilidad de disponer de ellos en forma rentable. En la actualidad muchos países desarrollados lo aplican, y diversas investigaciones publicadas demuestran sus efectos benéficos en el crecimiento de los cultivos y rendimiento de los suelos.

El lodo solo tiene propiedades fertilizantes cuando es aplicado sobre el suelo en estado fresco, es decir, sin digestión previa, porque de otra manera pierde una gran cantidad de nutrientes, especialmente el nitrógeno. Esta práctica sólo es empleada excepcionalmente, debido a problemas sanitarios y estéticos. (Lothar, 2008).

En respuesta a la legislación en muchos países los cuales prohíben la disposición directa del lodo al océano, las autoridades han invertido en trabajos de tratamiento diseñados para retener los componentes orgánicos del lodo, fermentándolo para destruir microorganismos patógenos y deshidratarlo para proporcionar un material orgánico con un alto contenido de N y P. Este residuo está a disposición de los agricultores como una alternativa al estiércol de corral, y sus propiedades de abono están bien documentadas en la literatura agronómica. Se afirma que el 44% de lodo producido en el Reino Unido es aplicado al suelo agrícola, y se ha evaluado su contribución a la necesidad de fertilizantes en el país en 1.1% para N, 5.4% para P_2O_5 y 0.8% para K_2O .

En Europa los lodos son utilizados para el mejoramiento del suelo agrícola (37%), aunque con un carácter geográfico y limitado, permitiéndoles adquirir una notable experiencia en relación con su naturaleza, forma, dosis de aplicación y efectos sobre el suelo, agua, cubierta vegetal y la salud humana, y constatar el carácter perjudicial debido a su contenido de metales pesados. (Carrasco, 2004). Desde 1990, España cuenta con un marco normativo con el objetivo de regular la utilización de los lodos de las plantas de tratamiento de las aguas residuales, el Real Decreto 1310/1990, el cual ha incorporado directivas específicas a la protección del medio ambiente y en particular del suelo, proporcionando el ordenamiento jurídico que establecen la forma y la dosis de aplicación, a fin de prevenir los efectos perjudiciales de determinadas especies químicas como los metales pesados y la protección de sus recursos naturales y la salud humana. La Comisión de las Comunidades Europeas coordina con los países miembros, el seguimiento de la utilización de los lodos de depuración en la actividad agraria. En España el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en respuesta a estas exigencias, elabora y envía periódicamente su informe de síntesis sobre el empleo de los lodos en la +agricultura, en cumplimiento con el mandato de la Comisión Europea. (Real Decreto 1310/1990, 1990; Directiva 86/278/CEE, 1986).

A continuación se menciona algunas experiencias de investigación y aprovechamiento agrícola del lodo en algunos países de la región de América Latina:

1. En Colombia, la aplicación de lodo compostado de una planta de tratamiento primario de aguas residuales (PTAR¹⁵ Cañaveralejo) en un suelo agrícola para evaluar hortalizas como rábanos y acelga, obteniendo resultados en la germinación y altura de

¹⁵ PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales. Acronimio que se utiliza para indicar que se trata las aguas residuales domésticas.

los tratamientos sin diferencia significativa en la productividad de los suelos acondicionados, todos presentaron alto contenido de materia orgánica y nutrientes y mejores características del suelo. Se recomendó el uso de compost de lodo que mejora la producción y la evaluación del efecto de bioacumulación de metales pesados con el objetivo de minimizar los riesgos asociados a su presencia en los cultivos. (Torres, 2005).

2. En Brasil, desde 2001 la necesidad de encontrar una mejor alternativa para el destino final de los lodos de las ETEs¹⁶, los llevó a implementar un sistema de gestión de los lodos de desagüe con un control de calidad del lodo aplicado, homogenización con tratamiento alcalino, selección de áreas adecuadas, monitoreo ambiental y asistencia agronómica a los agricultores, generando inclusive normas técnica, en Curitiba, Paraná y São Paulo. Actualmente se reciclan en promedio 1500 TM/mes de lodo húmedo tratado con cal. A pesar de ser una excelente alternativa desde el punto de vista económico y ambiental, el reciclaje agrícola demanda una organización gerencial y criterio técnico para una seguridad ambiental adecuada y que al mismo tiempo el agricultor pueda sacar el máximo provecho del uso del lodo de desagüe. (PROSAB, 2001).

3. En Chile desde el 2001 ha empezado a implementarse la práctica del tratamiento y reciclaje de las aguas servidas, y aunque la información respecto de la generación, manejo y disposición de los lodos es escasa, y basándose en las experiencias desarrolladas en Europa y EE UU, se aplica al suelo agrícola como alternativa de disposición económica y beneficio de su contenido en nutrientes y materia orgánica como mejoradores de la calidad del suelo y favoreciendo la producción agrícola. Sin embargo, la preocupación por algunos efectos nocivos de este uso les ha llevado a investigar la toxicidad de los lodos de los diferentes sistemas de tratamiento que existen en el país. A través de bioensayos, se ha investigado el efecto tóxico de la materia orgánica, nitrógeno amoniacal, metales, entre otros, y han demostrado que el nivel de tratamiento de las aguas residuales influye en el grado de toxicidad, entre "muy tóxicos" y "extremadamente tóxicos", concluyendo que en el reciclaje de este producto debe considerarse el efecto fitotóxico y la posible contaminación del suelo, de las aguas subterráneas y superficiales por estos compuestos. (Carrasco, 2007). El proyecto "Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólido en plantaciones forestales", demostró el aporte de nutrientes y el no daño al medio ambiente de los

¹⁶ ETEs : sinónimo de PTARs, se denomina en portugués como Estações de Tratamiento de Esgotos.

metales pesados en perfiles de suelos y suelos adicionados con biosólido y no hubo incremento sustancial en un año de tratamiento. Los metales pesados se encontraron por debajo de los límites de detección del método utilizado, no alcanzaron niveles peligrosos y sin riesgo en la aplicación.

4. En el Perú se conocen dos tesis de investigación en lodos orientados a la aplicación agrícola. Una tesis de grado, con el Programa de Agua Potable y Alcantarillado de la Empresa SEDALIB S. A.¹⁷ (Trujillo) y la Cooperación Técnica Alemana (GTZ/PROAGUA), que evaluaron la producción de compost con los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Trujillo. Sus resultados determinaron que el material era adecuado para compostaje, con alto valor agronómico y de calidad sanitaria aceptable y como mejorador de suelos y los costos de producciones estimadas, mostraron que el proceso es una alternativa de muy baja inversión y recuperable a corto plazo. (Falcón, 2005). El otro, es una tesis de maestría, el cual produjo humus con lodos de PTAR para uso agrícola en la ciudad de Cajamarca, utilizando maíz como cultivo indicador; mostrando resultados favorables de excelente valor agronómico, recomendándolo en la recuperación de suelos. (Alva, 1999).

El compostaje, es un proceso aeróbico controlado que acelera la degradación natural de la materia orgánica de un residuo transformándolo en un producto lo suficientemente inocuo y estable para poder ser empleado como un acondicionador de suelos. Este proceso es aplicable a residuos orgánicos que posean contenido de metales pesados inferiores a lo establecido en las normativas y guías de referencia. Este proceso consiste en mezclar un sustrato con un soporte (aserrín, viruta, material de poda, etc.) pudiendo efectuarse de dos maneras:

- a) Abierto : ésta se divide en pilas estáticas aireadas y en hileras (windrows)
- b) Cerrado: cuando el proceso se realiza en un reactor

Durante el proceso se observan tres etapas de actividad microbiana y temperaturas asociadas: mesofílica, termofílica y curado.

- Etapa mesofílica, es la etapa inicial donde comienza a elevarse la temperatura de la mezcla hasta un valor menor a los 55°C.

¹⁷ El Programa de Agua Potable y alcantarillado de la cooperación Técnica alemana (GTZ/PROAGUA), asesora a las empresas de saneamiento en el país, y conjuntamente con la empresa SEDALIB S. A. - Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de La Libertad, y la Universidad Agraria La Molina - Lima, financiaron el estudio de investigación "Producción de composta a partir de lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales COVICORTI", 2005.

- Etapa termofílica, es el período en que la temperatura está por los 55°C y se mantiene durante tres días (pilas aireadas) ó 15 días con un mínimo de 5 volteos mecánicos (hileras). El objetivo de esta etapa es el tratamiento térmico para una fuerte reducción de organismos patógenos. De esta forma se obtiene la desinfección del lodo y el comienzo de la estabilización del mismo.
- Etapa de curado, se caracteriza por la reducción de la actividad microbiana y por ende de la temperatura, concluyendo así el proceso de estabilización. Los índices que determinan la finalización de esta etapa son:
 - De estabilidad, que se verifica cuando cae la temperatura a la del ambiente y no se producen recalentamientos.
 - De madurez, que se confirma cuando el carbono no es más hidrolizable. Los parámetros que brindan esta información varían según los criterios adoptados por organismos de aplicación y/o investigaciones específicas. El cuadro N° 10 muestra algunos indicadores de madurez establecidos en las normas técnicas internacionales.

CUADRO N° 10

Indicadores de maduración del lodo

Parámetros Organismos	% de reducción de sólidos volátiles	Deflexión de O _{disuelto}	Relación CSA/N _{total}	Relación COT/N _{total}	Relación CSNaOH/CSA
Resolución Ministerial Nacional N° 97/01 USEPA Golueke – 1977 Hue and Liu - 1995	>40 >38 %	<10% en promedio del O ₂ disuelto en agua dest.	<0.7	<20	>6

Fuente: Cortesía León, 2008

Según las guías y normativas de referencia, el producto así obtenido es un acondicionador de suelos (asegura la estabilidad del pH, mejora la capacidad de retención de agua en el suelo, la estabilidad estructural y aeración, aumenta la resistencia para el riego y la erosión del viento, mejorando la penetración de las raíces de las plantas), su calidad está determinada por sus concentraciones microbiológicas y contenido de metales pesados, pudiendo ser de varios tipos: agrícola-ganadero, forestal, recuperación de suelos degradados o contaminados, restauración del paisaje. El compost promueve el desarrollo rápido de la raíz y contribuye al rendimiento de las cosechas agrícolas. Estas propiedades reducen el potencial de una fuente de contaminación como se observa al uso de fertilizantes comerciales.

Dependiendo de las necesidades agrícolas, los beneficios obtenidos utilizando lodo no compostado pueden incrementarse con el uso de lodo compostado, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. El lodo no compostado tiene una alta disponibilidad de nutrientes, que se descomponen y mineralizan rápida y fácilmente en el suelo, proporcionando grandes cantidades de nitrógeno y fósforo para el uso inmediato de las plantas. Mientras que el lodo compostado retiene materiales orgánicos muy estables que se descomponen lentamente, comportándose como una fuente a largo plazo de nutrientes en el suelo a una proporción también lenta y más gradual que el lodo sin compostar. (Falcón, 2005).

Las normas propuestas por la EPA para clasificar el lodo de desagüe, son utilizadas para clasificar los lodos que han sido sometidos a algún tipo de tratamiento, tal como el compostaje. Estas normas clasifican microbiológicamente a los lodos en dos categorías: A y B, según los parámetros como se indican en el cuadro N° 11.

CUADRO N° 11

Clasificación de lodos residuales, previo tratamiento

Parámetros	Lodo tratado Clase A	Lodo tratado Clase B
Coliformes fecales	$<10^3$ NMP/g	Media geométrica de 7 muestras $< = 2*10^6$ NMP/g
Salmonella sp	<3 NMP/g	No especificado
Huevos viables de Helminthos	$\frac{1}{4}$ g MS	No especificado
Virus entéricos	$\frac{1}{4}$ g MS	No especificado

Leyenda: NMP/g = número más probable
MS = materia seca

Fuente: EPA, 1993

Para el uso de lodos en el suelo agrícola, la clase A no presenta restricciones, mientras que la clase B puede ser usado como mejorador de suelos agrícolas alejados, silvicultura, recuperación de suelos degradados, para cultivo de pastizales u otros cultivos de consumo no humano. La norma de la EPA considera que el compostaje puede lograr lodos tratados clase A o B (método de pilas estáticas aireadas mecánicamente), siempre que el proceso cumpla las siguientes condiciones:

- Para lodos tratados clase A: la temperatura interna durante la etapa termofílica se mantenga a 55 °C o más por lo menos 3 días consecutivos.
- Para lodos tratados clase B: que la temperatura termofílica se mantenga a 40 °C o más por lo menos 5 días y alcance 55 °C por 4 hrs.

Con referencia al contenido de metales pesados, se presenta en el cuadro N° 12 los contenidos máximos aceptables en compost de lodo clase A.

CUADRO N° 12
Contenidos máximos en compost de lodo clase A.

Metal		As	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Hg
mg/Kg	(*)	-	285	500	1250	1000	100	12.5	5
BS	(**)	75	840	4300	7500	3000	420	85	57

(*) LMP de metales en composta de desagüe urbano. EEUU

(**) LMP de metales en lodos para abono

Fuente: EPA/625/10-84-003, 1993

5.2.2 Otros uso del lodo

La producción de abono en las modalidades de jardinería, agroforestería, compost y acondicionamiento de suelos, se ha convertido en una alternativa adecuada e interesante para los lodos, ya que reemplaza a los fertilizantes químicos de alto costo como fuente potencial de nutrientes y materia orgánica para el desarrollo de las plantas y el mejoramiento de los suelos y resuelve el problema de usar los otros métodos de eliminación. La presencia de metales pesados limita su uso por los riesgos de toxicidad y potencial de acumulación en los suelos y contaminación. (Falcón, 2005; León, 2008).

El reuso industrial mediante la recuperación de los productos minerales a través de la tecnología de "fusión de lodos", que vitrifica el lodo en una cámara de combustión a 1400°C, estabiliza y disminuye al mínimo el volumen ocupado por el lodo, al tiempo que ofrece posibilidades de reutilizarlo como material de construcción (producción de agregado leve, cemento, ladrillos de baja dureza, vidrio, producción de tejas, cerámicas, escoria cristalizada, etc.).(Liew, 2004). En Japón, la legislación más reciente limita el transporte a relleno de las cenizas que contengan metales pesados procedentes de incineradoras de lodo. La incineración requiere secado para remover la humedad y la combustión de algunos compuestos combustibles y volátiles para llevar al lodo a su punto de ignición.

Después de esto, el lodo puede quemarse si tiene suficiente cantidad de combustible y de energía. El rango de valores térmicos de 6500BTU/lb en base seca para los residuos de lodos activados y 17000BTU/lb para lodo aceitoso. En un incinerador-calentador múltiple, los gases de la humedad son llevados por el exhaustor de gases a 600°F y luego son lavados, un incinerador de lecho fluidizado, al contrario opera a 1400-1500°F, resultando más rápido y más exhaustivo el secado y la combustión. Aunque el sistema es otra forma alternativa no económica, origina problemas

asociados a la contaminación atmosférica, con gases de invernadero, inclusive (Falcón, 2005; León, 2008); Se espera que esta alternativa aumente debido a las restricciones sobre el contenido en materia orgánica del material que se lleva a los rellenos, además reduce el volumen del lodo en más del 90% produciendo una ceniza principalmente mineral (<5% de materia orgánica) que se puede reutilizar como aceite combustible y es una alternativa de tecnología emergente .(Tomoyuki, 1999).

GRÁFICO N° 06

Otros usos del lodo



Actualmente se conocen diversas varias otras alternativas de aprovechamiento del lodo de desagües, dependiente de algunos factores técnicos – económico y ambientales, así como de las exigencias legales del país. Fuente: Elaboración propia

Otro de los grandes incentivos para el aprovechamiento de los biosólidos como fuente alterna de energía representa su potencial acreditación como “bonos de carbono” para la reducción de gases con efecto invernadero de acuerdo con el Protocolo de Kioto de 1997. Dicho protocolo establece que de acuerdo con el Programa Internacional de Permisos de Emisión Transables se permite a los emisores comprar créditos de reducción de emisiones a través de un mercado especial que se instalará con este propósito. El mercado de carbono se viene desarrollando desde 1996, pero sólo en los últimos años adquirió mayor fuerza. Se estima que sólo en el año 2002 se negociaron bonos equivalentes a 70 millones TM en promedio, en el mercado internacional 01 TM CO₂ se negocia en alrededor de 3.50 US dólares, aunque el precio puede llegar a incrementarse en un futuro debido al incremento en la demanda. Entre los principales

compradores de bonos de carbono se cuentan actualmente países como Japón, Holanda, Canadá, Dinamarca y el Reino Unido.

5.2.3 Impacto social del uso agrícola del lodo de plantas de tratamiento

El uso en los suelos agrícolas de los lodos procedentes de las PTARs genera problemas asociados a su composición, su procedencia y a la aceptación que tengan las personas de consumir productos que hayan sido cultivados en los suelos tratados con estos materiales.

Se han estudiado muchas técnicas de gestión eficaces en muchos países del mundo, sin embargo, se ha investigado muy poco en las ciencias sociales, a fin de determinar los obstáculos que comúnmente interfieren en la aceptación pública de los programas de reciclaje, tales como la percepción del rechazo público por las consideraciones de riesgos a la salud y a la aplicación de los lodos.

En el 2004, un estudio publicado por *The Water Environment Research Foundation – WERF*, puso de relieve la importancia de desarrollar vías de comunicación y relaciones con las partes interesadas que participan en los diversos aspectos de un programa de manejo de lodos, concluyendo en que estos programas pueden beneficiarse prestando atención a las decisiones y acciones que afectan a las relaciones, y la participación en el diálogo a largo plazo con las partes interesadas, los que incluyen a las autoridades y funcionarios locales, algunos grupos de agricultores, líderes de la comunidad y grupos ambientalistas, recicladores y la comunidad académica. Basándose en la investigación científica y en las prácticas de gestión desarrolladas hasta ese momento, realizaron campañas de difusión a nivel nacional con el objetivo de poner de relieve los aspectos positivos y dirigir el conocimiento y lograr la aceptación a las prácticas del reciclaje de los lodos, proporcionando información científica y reglamentos. Se incluyeron redes de administradores de programas, ingenieros consultores que fueron capacitados para responder las controversias que surgían; en algunos casos las propuestas fueron adecuadas y permitieron continuar con los programas. (Goldstein, 2007). A continuación se menciona un caso del impacto social y ecológico generado por la utilización de los lodos:

Durante los últimos 25 años, en el asentamiento humano más grande de la región norte de Ghana, en la Municipalidad de Tamale, África, los agricultores aplican lodos fecales parcialmente estabilizados a los campos, aprovechando el clima local para facilitar el secado y obteniendo mayor rendimiento en los cultivos en comparación con fertilizantes inorgánicos u orgánicos. Sin embargo, se observaron algunos problemas

que afectaron la utilización del lodo en la producción agrícola: (1) Aumento de la urbe, resultando que tierras agrícolas se convierten en áreas de asentamientos humanos; (2) Los vecinos y los propietarios de tierras no permitieron que los campos cercanos de las grandes urbes usen lodos en razón del mal olor, a pesar de los efectos positivos para la fertilidad del suelo; (3) Algunas personas evitan consumir los productos cultivados con lodos. (Cortesía Dr. Ghani, 2007).

En algunas ciudades de los EE UU sucedió de manera similar, el rechazo inicial de la población al uso del lodo. Con el tiempo, se mejoraron las campañas de difusión, logrando mejorar el conocimiento y la participación de los vecinos.

Finalmente, dada la falta de seguridad total, hay una creciente resistencia de los agricultores a esparcir lodos procedentes de las plantas de tratamiento en sus tierras. Cada vez más “nichos de mercado” (por ejemplo, alimentos sanos, alimentos para niños, conservas vegetales) exigen expresamente a sus proveedores que prohíban el uso de lodos residuales. (Vega, 2004).

5.3 ASPECTOS GENERALES DE LOS METALES PESADOS

Ha sido una práctica común de los efluentes industriales para ser aprobado ante la ausencia de alcantarillado la efectiva remoción de los iones metálicos por complejación con los residuos orgánicos, así, los contaminantes metálicos se retienen en el lodo de desagüe. No fueron vistas las implicancias de esto hasta que estudios posteriores reportaron la contaminación de suelos por metales que siguieron períodos largos de aplicación con grandes tasas de lodos. Desde esa fecha se han producido muchos estudios de metales en lodos y en cultivos de plantas que crecieron sobre suelos tratados con estos materiales. Varios países tienen ahora límites recomendados para regular el uso de lodos en tierras agrícolas. Más atención se ha dado al cadmio, aunque el plomo también es sujeto de investigación.

Los metales de fuentes naturales y domésticas tienden a concentrarse en el residuo orgánico del tratamiento de los desagües. En general, los lodos domésticos tienen menos contenido de metales¹⁸ pesados que los lodos industriales. El origen y el

¹⁸ Desde hace tiempo, la expresión “Metales Pesados” - MP (o Heavy Metals, en inglés), ha venido usándose con mayor frecuencia para aludir o definir de un modo no muy preciso a un conjunto de diversos elementos químicos (metales y sus compuestos, semimetales y a un no metal) a los que se les atribuyen diferentes efectos de contaminación, toxicidad y/o ecotoxicidad, y en muchos documentos se les presenta acotados de un modo válido sólo en el contexto del propio documento. Todo esto contribuye a causar cierta confusión sobre este tema. Se ha empleado el término “conjunto” para evitar el uso de la palabra “grupo” que implicaría alguna relación con la Tabla Periódica. Entre los elementos

método de tratamiento influyen notablemente en sus características. En el largo plazo, el comportamiento de metales pesados después de la aplicación de lodos aún se desconoce. Existe una extensa investigación sobre la complejación¹⁹ y la precipitación de los MP en suelos buscando minimizar su contaminación. Lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y casi más importante aun, el tipo de especie que forman en un determinado medio, es decir, su especiación²⁰. Cabe recordar que de hecho los seres vivos "necesitan", en pequeñas concentraciones, a muchos de éstos elementos para funcionar adecuadamente. Ejemplos de metales requeridos por el organismo incluyen el cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio, y zinc. La observación de que los metales se acumulan en los suelos enmendados con lodos al grado de verse la fitotoxicidad y la posibilidad de bioacumulación²¹ del plomo en los cultivos a niveles de riesgo, ha llevado a los países a formular guías para el uso del lodo. (Czys, 1994)

Numerosos MP son necesarios para los seres vivos, pequeñas cantidades de cobre, cromo y zinc, son esenciales para la vida. Además, algunos de los denominados MP

que suelen citarse como MP se encuentran principalmente el aluminio, arsénico (no metal), bario, berilio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio, zinc.

Además, como ya se indicó más arriba, diversos criterios han sido empleados para definir los MP, como las propiedades de densidad, peso atómico y la masa atómica. Algunas no coinciden entre sí y las definiciones sólo se refieren a metales y no a semimetales o metaloides. En muchos casos no se deslinda si se trata del elemento puro o de algunos o la totalidad de sus diversos compuestos, los que no presentan las mismas propiedades físicas, químicas, tóxicas ni ecotóxicas. Por ejemplo, algunos compuestos del cromo hexavalente (Cr VI) son citados como carcinogénicos humanos, pero prácticamente, no se encuentra información sobre cánceres ocasionados por exposición a ese metal puro, además, el cromo y alguna de sus aleaciones se emplean sin problemas, desde hace tiempo, en prótesis médicas y dentales. Finalmente, hasta la actualidad no se dispone de una definición oficial ni de un listado de esos elementos, tampoco de una referencia clara y exacta de las propiedades o caracteres de los MP que provenga de alguna sociedad científica u organismo referente de alto nivel, como la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) o la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE UU).

¹⁹ Los complejos metálicos llamados también compuestos de coordinación o simplemente complejos, son compuestos que contienen un átomo o ión central que generalmente es un metal, rodeado por un grupo de iones o moléculas. El complejo tiende a mantener su identidad aún en solución, aunque puede haber disociación parcial. La carga eléctrica del complejo depende de las cargas del átomo central y de los iones y moléculas que lo rodean y puede resultar un catión, un anión o no iónico. La importancia de los complejos metálicos se puede demostrar en la clorofila que es un complejo de magnesio, vital para la fotosíntesis de las plantas, y la hemoglobina que es un complejo de hierro que lleva oxígeno a las células animales.

²⁰ La especiación es un concepto clave para estimar la peligrosidad real de un determinado contaminante. El grado de "peligrosidad" de los metales liberados al medioambiente, y las consecuencias a la salud humana se derivan de las diferentes interacciones.

²¹ Bioacumulación, es la propiedad de los metales pesados de persistir durante largo tiempo en el interior de los organismos vivos.

ingresan habitualmente a nuestro organismo en porciones menores, vehiculizados por los alimentos, el agua o el aire que respiramos; varios persisten o se bioacumulan durante largo tiempo en los organismos vivos. Actualmente, los principales MP calificados como contaminantes son el cadmio, mercurio y plomo, que resultan nocivos para el hombre, los animales, las plantas y el ambiente. Al mismo tiempo, se atribuye a algunos compuestos de cromo ser carcinógenos y provocar daño genético. El mercurio es considerado un contaminante universal. El plomo, que es el metal con propiedades tóxicas que más se ha propagado en el ambiente, fue ampliamente usado para construir tuberías para conducir agua, vasijas para vino y objetos similares. Hasta la década de 1970 fue muy utilizado en pinturas, conductos para agua en las viviendas y hasta no hace mucho tiempo en algunos combustibles para automotores.

CUADRO N° 13
Metales en lodos – Alemania (2007)

Metallgehalte der KW1 TST-Proben für 2007																	
Auftrag	Beschreibung	Sprechende Probennummer	Proben-Nr.	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Ca [mg/kg]	K [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Ag [mg/kg]	As [mg/kg]	P [mg/kg]	
20070004	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Januar	07-01887	280	1,7	52	540	44	1,1	1300							
20070325	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Februar	07-03285	190	1,2	52	530	40	0,88	1200							
20070476	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco März	07-04481	110	1,7	53	550	40	0,88	1200							
20070709	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco April	07-05368	99	1,7	52	710	38	0,87	1300	37000	3800	6600				
20070907	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Mai	07-08453	89	1,8	50	580	38	1,1	1300							
20071090	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Juni	07-11017	130	2,3	64	560	41	1,2	1500							
20071335	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Juli	07-13671	150	2,5	62	580	43	1,3	1500							
20071583	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco August	07-16418	140	2,4	66	570	44	1,0	1500			12	210	13		
20071838	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco September	07-19193	110	2,3	72	590	47	0,92	1400			16	160			
20071991	KW1-SCH TST lodo activado seco	lodo activado seco Oktober	07-21529	96	1,9	64	540	46	1,0	1400	38000	2900	6200			36000	

Fuente: Cortesía del Dr. Ing. Balzer. (Metallgehalte der KW1 TST-Proben für Alemania,60 - 2007)

5.3.1 Aspectos generales de los metales pesados relacionados a los lodos

Muchos metales se acumulan en altas concentraciones en la capa superficial de los suelos tratados con lodos. A continuación estudiamos algunos aspectos de As, Hg, Pb, Cd y Cr relacionado con el lodo, con el suelo y la planta, considerando a los componentes que participan en el sistema agrícola, como son

1. Aspectos generales de los metales pesados relacionados a los lodos.
2. Aspectos generales de los metales pesados relacionados al suelo agrícola, que determina su grado de contaminación.

3. Aspectos generales de los metales pesados relacionados al sistema suelo-planta, que determina su nivel de biodisponibilidad.

5.3.1.1 Arsénico en lodo

El arsénico se encuentra principalmente en la superficie del suelo y de ahí pasa a la atmósfera, sumándose los residuos del uso de plaguicidas. Sus diferentes compuestos poseen propiedades fitotóxicas. Los niveles de arsénico en los lodos de PTAR reflejan el grado de industrialización del área servida por el sistema de alcantarillado. Su presencia se deriva principalmente de la escorrentía superficial, de la atmósfera y de los residuos del uso de plaguicidas. Actualmente, los usos más importantes son como pesticidas, preservantes de la madera y como promotores del crecimiento de las aves de corral y el cerdo. Los detergentes fosfatados añaden pequeñas cantidades de Arsénico y los efluentes industriales, en particular de la industria de transformación de metales (metalurgia), pueden añadir cantidades significativas, se encuentran rangos de 0 – 188mg/Kg PS (Peso Seca); en el Reino Unido se ha recomendado un promedio de 8mg/kg PS para los lodos de PTAR que se disponen en suelos agrícolas, comparado con los 10mg/Kg PS para todos los lodos en general en ese país, mientras que los lodos más contaminados con 29mg/Kg PS en promedio, en general son incinerados.

No se considera que la disposición de los lodos en los campos agrícolas sea la causa de un incremento significativo de arsénico en los cultivos. Una tasa de aplicación típica de 5Tm lodo/ha estima una adición de 4mg As/m³, esto es 30 veces mayor que las adiciones de fertilizante fosfato, y representa un incremento de casi 0.15% en la parte superior 20cm del suelo. En vista de que el área utilizada para la disposición del lodo es mucho más pequeña que aquel donde el fertilizante fosfato es aplicado, se calcula que con el lodo se añade As casi 2.5TM/año y 6.1 TM/año con el fertilizante fosfato en total.

Alloway (1993), menciona que el As en suelo puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica, y que muchos de estos procesos son mediados por la materia orgánica la que puede producir transformaciones del tipo:

- Cambios de redox que inducen la transformación arsenito-arsenato.
- La reducción y metilación del arsénico.
- La biosíntesis de compuestos de arsénico.

5.3.1.2 Mercurio en lodo

El lodo de las PTARs es utilizado con frecuencia como fertilizante en el suelo agrícola. Aunque a menudo se imponen restricciones sobre su uso debido a su alto contenido de algunos metales pesados encontrados en el lodo, incluyendo al Hg, se indica un valor de 5–10µg/g en el lodo, y ocasionalmente se han reportado valores de 100µg/g; datos recientes en la literatura respaldan esta tendencia. Asumiendo que se aplican 50 TM/ha de lodo al suelo, la cantidad añadida de Hg es de 50mg/m², considerado como un incremento considerable con respecto a los niveles normales históricos. El Hg²⁺ puede ser depositado en suelo para formar complejos con la materia orgánica de los suelos como ácido fúlvico y/o húmico.

5.3.1.3 Plomo en lodo

Una fuente del plomo (Pb) en suelo que ha alcanzado una considerable relevancia en los últimos años es el lodo de desagüe. El estiércol de las aves ha sido reconocido por mucho tiempo como un material de enmienda para el suelo, y como una fuente muy útil a corto y largo plazo de nutrientes NPK, esencial para las plantas y micronutrientes para los animales en el arado tradicional. Desafortunadamente se ha sustituido por otro abono especializado y el suministro de estiércol a un precio económico ha disminuido. Por lo tanto, los agricultores han recurrido como material alternativo al uso los residuos orgánicos derivados del alcantarillado de la ciudad. El exceso de Pb se deriva de las tuberías de agua y los pintados de las calles. El contenido de Pb en lodo es muy variable, y un contenido típico es <1000µg/g, mientras que el contenido medio en el lodo de un área no industrial es 121µg/g. Se ha encontrado en materia seca un contenido de plomo de 120 - 3000µg/g y un promedio de 820µg/g. Otros valores de Pb de 545-7431µg/g para lodos de algunas ciudades de USA. Se ha establecido una concentración típica en heces humanas de 11µg/g PS. *El Departamento de Medioambiente del Reino Unido* ha recomendado que la adición de Pb por un período encima de 30 años no debe exceder de 1000Kg/ha o 450µg/g a 200mm de profundidad del suelo y recomienda 550µg/g de acumulación máxima. En Alemania el contenido de Pb del lodo no debe exceder a 1200mg/Kg PS y si el suelo contiene > 100µg/g, el lodo no debe ser aplicado. *La Comisión de la Comunidad Europea* ha adoptado la *Directiva de Consejo* para el uso de lodo de desagüe en la agricultura. Los estados miembros pidieron prohibir la propagación del lodo en suelo agrícola a tasas por encima de 15Kg/ha/año hasta 10 años y la *Directiva* recomienda límites más estrictos de 10Kg/ha/año. Las restricciones actuales exigen que las aplicaciones

repetidas de lodo no deben permitir una acumulación de 100µg/g (mandatorio) o 50µg/g (recomendado).

El Pb es un metal difícilmente movilizable, se encuentra presente en un gran número de minerales, la forma más común es el sulfuro de plomo (galena, PbS), y carece de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos; debido a su tamaño y carga, el Pb puede substituir al calcio (Pb^{2+} 0.84 Å; Ca^{2+} 0.99 Å).

5.3.1.4 Cadmio en el lodo

Los desagües contienen cadmio (Cd) de las excretas humanas, de los productos domésticos que contienen zinc (Zn) y de los efluentes industriales. Casi todo el Cd acumulado en el lodo se produce durante el tratamiento de los desagües. En Europa y Norte América se ha encontrado Cd desde <1 hasta 3650mg/Kg BS²². En lodos británicos se han encontrado valores promedio de 17 a 23mg/Kg. Se encontraron 16mg/Kg en 150 lodos de USA, un promedio muy bajo de 1mg/Kg ha sido reportado en los lodos en Irlanda, el cual es un reflejo del relativamente bajo nivel de desarrollo industrial en muchas partes de ese país. Usando un valor de Cd promedio de 23 mg/Kg en lodo, se ha estimado que el aporte anual al medioambiente para la aplicación de lodo al suelo era de 480 t/año.

La concentración del Cd en lodos es ampliamente variable debido a los continuos cambios en la composición y volumen de las descargas de los efluentes en el alcantarillado. En las últimas décadas las concentraciones de Cd de los desagües han disminuido en algunos países como resultado del control de la contaminación y por lo tanto, algunos valores del período de los 70s, son considerados altos comparados con los encontrados hoy en día.

Las concentraciones máximas aceptables en lodos aplicados al suelo agrícola en Europa son 5mg/Kg en los Países Bajos, 20 mg/Kg en Alemania y Francia. La *Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas* recomienda un contenido de Cd de 20 mg/Kg en materia seca y un máximo mandatorio de 40mg/Kg. En USA se ha propuesto un máximo de 50mg/Kg. Otros investigadores indican que el contenido de Cd no debería exceder el 1% del contenido de zinc. Donde las concentraciones de Zn fueron elevadas su toxicidad podría reducir las posibilidades de consumir cultivos con altos contenidos de Cd.

²² BS: se refiere al análisis en Base Seca, es el sinónimo de peso seco, PS.

El máximo anual recomendado de Cd en suelos agrícolas aplicados con lodos de desagüe varía entre los países, en Europa y Canadá era de 0.01Kg/ha/año en Dinamarca y 0.17Kg/ha/año en el Reino Unido. Actualmente, *el Proyecto de Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas* ha recomendado una carga máxima de 0.15Kg/ha/año; la máxima carga de Cd en el suelo mejorado con lodo recomendado en el Reino Unido es 5 Kg/ha para todos los suelos. En USA, las directrices para la adición acumulativa de Cd en el lodo para suelos está relacionado al CEC del suelo, de modo que la carga acumulativa máxima es 5.5Kg/ha para suelos con un CEC de <5 mEq/100g, una carga de 11Kg/ha para CEC del suelo de 5-15 mEq/100g y una carga de 22Kg/ha para suelos con CEC >15 mEq/100g. Se ha indicado que algunos complejos de Cd con materia orgánica soluble cargados negativamente pueden moverse hacia la profundidad del suelo después de haberse aplicado lodo fresco.

A pesar de ser una forma rápida de disposición de residuos y una fuente de nutrientes N y P, la aplicación de lodo al suelo ha resultado ser significativamente una de las fuentes de mayor contaminación de Cd y otros metales no esenciales, y conducen inevitablemente a su incremento en la absorción en los cultivos y un problema económico crucial y aunque su contenido está ahora limitada a 3mg/kg, el uso continuo de suelo con lodo para la producción de cultivos alimenticios deberán ser mantenidos en constante revisión.

5.3.1.5 Cromo en lodo

El cromo (Cr) contenido en los efluentes es descargado al alcantarillado por las actividades industriales de pigmentos, teñidos y textiles, fabricación de tintas, vidrios, recubrimiento metálico, anodización, cerámicos, pegamentos o cola, curtido, preservación de la madera, inhibidores de la corrosión en agua de refrigeración y de industrias químicas. Significa que las fuentes industriales contribuyen con el 48% de cromo. La presencia de industrias como las curtiembres y los recubrimientos de metales explican las más altas concentraciones de cromo reportados en los lodos de desagüe en muchos países. Tanto, Cr^{3+} y Cr^{6+} puede estar presente en las aguas residuales, el Cr^{6+} predomina en el efluente del recubrimiento de metales. Actualmente, muchos efluentes son tratados in situ para disminuir la carga potencial tóxica del agua residual y de los equipos de tratamiento, el Cr^{6+} es reducido por la materia orgánica y en consecuencia compuestos de Cr^{3+} se encuentran en el lodo. La toxicidad, tanto del Cr^{6+} de carácter cancerígeno como del Cr^{3+} puede ocasionar manifestaciones agudas y crónicas en las personas que hayan estado en contacto

directo. El alto peso molecular de los polímeros extracelulares producidos por los microorganismos que componen los flocúlos, provee muchos grupos funcionales que pueden actuar como sitios de unión para los iones metálicos (especiación). La remoción de cromo del agua residual depende del proceso usado y de la edad del lodo. En sistemas experimentales de flujo continuo usando lodo activado se removieron cerca del 100% de Cr(III) principalmente por precipitación y el Cr r^{6+} fue removido sólo 26–48%. Se estima que a nivel mundial se deposita Cr al suelo de 1.4 a $11 \cdot 10^3$ TM/año por la disposición de lodos de desagüe.

La profundidad de los suelos contaminados depende de la profundidad a la que el lodo es físicamente incorporado con el arado u otras formas de cultivo, o sobre grietas y canales en el suelo a la hora de aplicar el lodo líquido. Después de la adición, sin embargo, existen escasas pruebas de que los metales de los suelos con lodo se muevan hacia la profundidad del suelo, aún después de largos períodos de tiempo. En general, el lodo de las áreas rurales tendrán las más bajas concentraciones de cromo, y por el contrario, los campos que reciban lodos de áreas industriales urbanas por muchos años pueden contener grandes cantidades de cromo comparado con sus similares en áreas rurales.

El tiempo de residencia de los metales provenientes de los lodos es probablemente del orden de 10^3 – 10^4 años. En un experiencia de campo mostró que casi el 80% de cromo aplicado por un largo período permanecía en la capa cultivada después de 45 años. Tanto el Cr $^{3+}$ y Cr $^{6+}$ pueden estar presente en el agua, el Cr $^{6+}$ predomina en el efluente del enchape. Muchos efluentes son tratados in situ para disminuir la potencial carga tóxica del agua residual o en la planta de tratamiento de los desagües donde la materia orgánica reduce el Cr $^{6+}$ a Cr $^{3+}$, en consecuencia el lodo contiene estos compuestos en mayor cantidad.

Muchos países hoy regulan las cantidades de metales que serán aplicados al suelo a través del lodo de desagüe o las concentraciones máximas del metal en el suelo mismo. En el pasado dichos reglamentos no existieron y la disposición final dependía de la cantidad de lodo aplicado y las concentraciones de metales en el lodo. La disponibilidad del Cr en los suelos con lodos parece ser bajo, y la absorción de Cr $^{3+}$ por las plantas y el transporte a los tejidos aéreos es mínimo a pH del suelo cerca del neutro.

5.3.2 Aspectos generales de los metales pesados en el suelo agrícola

Algunas características que se combinan en la evaluación de suelos, requiere definir de una manera general algunas de las propiedades que más influyen en el uso agrícola. Se destacan los siguientes:

- **Contenido de materia orgánica**, constituye un rasgo esencial en los suelos, favorece el desarrollo de la estructura mejorando las propiedades físicas (aumenta la porosidad, la permeabilidad, el drenaje y la capacidad de retención de agua útil) y las propiedades químicas (contenido en nutrientes y capacidad de intercambio iónico) y protege al suelo de la erosión. A la pérdida de materia orgánica, el suelo se vuelve pulverulento, inestable e infértil.

- **Capacidad de cambio de cationes**, imprescindible, pues representa el almacén donde son retenidos los nutrientes cuando la meteorización los libera de los minerales.

- **Grado de saturación en bases**, representa la relación entre los nutrientes que ocupan las posiciones de cambio de cationes frente a las ocupadas por el hidrógeno y aluminio (sin interés desde el punto de vista de la fertilidad)

- **pH**, incide en muchas propiedades de los suelos, por ejemplo regulando la biodisponibilidad de los nutrientes o el grado de agresividad del suelo por las partículas minerales. Junto a los parámetros anteriores de materia orgánica, capacidad de cambio, grado de saturación y pH regulan la fertilidad química del suelo.

- **Carbonatos**, la presencia de ión bicarbonato en el agua del suelo puede bloquear la absorción de hierro, provocando clorosis férrica. Este parámetro es de gran importancia en las explotaciones de árboles frutales. Además, su presencia impide la acidificación del suelo y la desaturación del complejo de cambio.

- **Salinidad**, las sales solubles pueden provocar graves problemas de estrés hídrico para las plantas (las plantas no pueden absorber el agua del suelo debido a su alta salinidad).

- **Los Fertilizantes**, la *Asociación Americana de Oficiales del Control de Plantas Alimentarias (AAPFCO)*, ha establecido reglas y requisitos de contenido de metales pesados en fertilizantes. Los fertilizantes que contienen cantidades garantizadas de fosfatos y/o micronutrientes son adulterados cuando contienen metales en proporciones mayores que los niveles de metales establecidos. (O'Brien, 2008). Cuadro /N° 14.

CUADRO N° 14

Niveles Máximos permitidos de metales pesados en fertilizantes

Metales	ppm por 1% P2O5	ppm por 1% Micro-nutrientes
Arsénico	13	112
Cadmio	10	83
Cobalto	136	2228
Plomo	61	463
Mercurio	1	6
Molibdeno	42	300
Níquel	250	1,900
Selenio	26	180
Zinc	420	2,900

Fuente: O'Brien, 2008

Los Departamentos de Estado de Agricultura de California, Óregon y Washington requieren que se hagan pruebas de metales pesados antes de otorgarle su registro de producto.

El consumo de fertilizantes en el suelo peruano es alto constituyendo más del 98% del volumen de importaciones de los principales insumos agrícolas, siendo su objetivo aumentar la producción. Con relación a la oferta de los fertilizantes en el mercado peruano, al momento toda la gama de productos es completamente importada. La urea procede de Rusia, el fosfato de USA y el cloruro de potasio de USA y Chile. En el país, los fertilizantes preparados por medio de una mezcla física hicieron su aparición en el año 1992, con la *Empresa SQM-Nitratos*, produciendo potasio a partir del nitrato de potasio. En 1994, la *Empresa Corporación Misti S.A.*, inicia la producción de fertilizantes compuestos en mezcla física con formulaciones básicas y posteriormente con formulaciones especiales para los diferentes cultivos. (Ramírez, 2006).

A continuación estudiamos algunos aspectos del comportamiento químico del As, Hg, Pb, Cd y Cr, metales de interés de la presente investigación, y su relación con el lodo y el suelo, tomando en cuenta los resultados de las investigaciones de Alloway (1993).

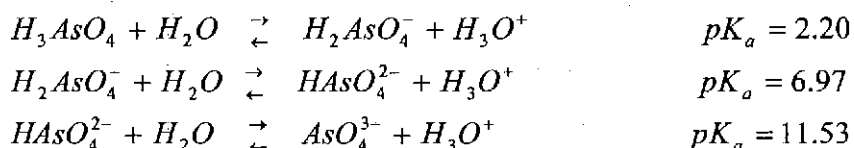
5.3.2.1 Comportamiento químico del arsénico en el suelo

El arsénico (As) con una configuración electrónica de $4s^2 4p^3$, se ubica tercero en el grupo de elementos del nitrógeno (N, P, As, Sb, Bi). La disminución de la electronegatividad según que desciende este grupo no es suficiente para darle al As mucho carácter metálico o para producir cationes simples. Este elemento es a menudo descrito como un metaloide, pero para propósitos de describir su comportamiento

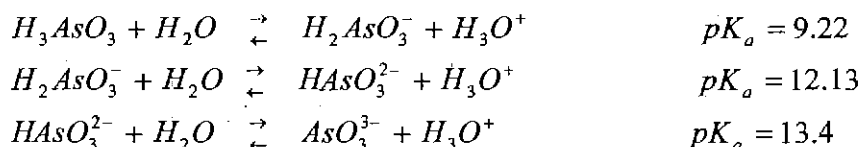
químico en el suelo puede considerarse como compuesto covalente no metálico o como especie aniónica. Existe una aparente similitud entre la química del As y del fósforo (P), en el sentido de que ambos comúnmente forman oxi-aniones de arseniato y fosfato con el estado de oxidación +5 en los suelos. Sin embargo, el fosfato es estable en un amplio rango de condiciones de pH y Eh que el arseniato. El As se encuentra también en el suelo en el estado de oxidación +3 y forma especies ligandos²³ estables con el oxígeno, que no se encuentran con el fósforo.

Las fuentes naturales de As en el suelo son principalmente las oxisales²⁴ y los minerales que contienen azufre. Las condiciones de oxidación normal en la superficie de la tierra en el que el tiempo influye, contribuyen en la formación de oxianiones con el estado de oxidación +5. Los rangos de Eh y pH en el suelo permiten al As^{5+} o al As^{3+} con la actividad microbiana producir metilación²⁵, dimetilación y/o cambio en el estado de oxidación y la presencia de especies de azufre podrían, si el potencial redox es lo suficientemente bajo, favorecer la formación de los minerales de sulfuro de arsénico. La presencia de minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio y materia orgánica pueden influir en la solubilidad y la tasa de oxidación. Los equilibrios para el ácido arsénico As^{5+} y el ácido arsenioso As^{3+} en soluciones acuosas se indican a continuación:

Equilibrio para el ácido arsénico:



Equilibrio para el ácido arsenioso:

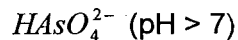
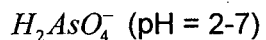
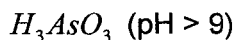


²³ Ligantes, la mayor parte de los elementos poseen dos tipos de valencias (a) primaria, que corresponde al estado de oxidación y (b) secundaria, que corresponde al número o índice de coordinación. Las moléculas que usan las valencias secundarias, se dice que están coordinadas al metal y se las llama grupos ligantes, y están directamente enlazados al átomo central y se dice que están situados en la esfera de coordinación del metal.

²⁴ Oxisales, sales que provienen de una reacción una base y un ácido.

²⁵ Metilación, adición de grupos alquilo (R-), son grupos de átomos que deriva de la eliminación de un átomo de hidrógeno de un alcano y se nombran sustituyendo el sufijo ano por el o ilo. Se les denomina también como grupos sustituyentes.

Los valores pK_a muestran las especies que termodinámicamente son más estables sobre rangos normales de pH del suelo de 4 a 8:



En ausencia de especies complejantes y de organismos metilantes, el H_3AsO_3 es la especie termodinámicamente más estable del As, el valor de Eh está por debajo de +300 mV a pH 4 y -100mV a pH 8. La tasa de cambio en el estado de oxidación con el cambio en las condiciones Eh/pH no siempre es muy rápido en los sistemas acuosos, por lo que la proporción de las diferentes especies de arsénico presentes en la solución suelo no siempre corresponden a la distribución esperada.

Un cambio en la proporción de As^{5+} a As^{3+} puede conseguirse por un mecanismo inorgánico, cambiando las condiciones Eh/pH, aunque la presencia de microorganismos puede influir en el camino de la reacción. La metilación de los oxianiones influye en la formación de $CH_3AsO(OH)_2$ ácido monometilarsonic, $(CH_3)_2AsO(OH)$ ácido dimetilarsenico o ácido cacodílico, $(CH_3)_3AsO$ óxido trimetilarsenico, $(CH_3)_3As$ trimetilarsina, $(CH_3)_2AsH$ dimetilarsina. Las reacciones de biometilación que se produzcan dependen de los microorganismos y de los compuestos de arsénico presentes. Algunos microorganismos pueden rápidamente metilar compuestos de As en un amplio rango de condiciones de pH, mientras que otros microorganismos están limitados en los sustratos que metilan y el grado de metilación que producen. Existen dificultades analíticas para determinar las diversas especies de As en el suelo, y se ve reflejada en la dispersión de los datos. Los problemas de aislamiento y preservación de las fases sólidas secundarias y cualquier especie soluble en la solución del suelo han hecho que gran parte de la información de la química del As se deduzca de sistemas simples con sólo un limitado número de componentes.

Se ha encontrado que la reducción de arseniato a arsenito puede producirse ya sea por la acción de los microorganismos o por un cambio en las condiciones fisicoquímicas independiente de la actividad microbiana. La formación del ácido monometilarsonic es un indicador de la presencia de la actividad microbiana que ocurre en alguna parte del suelo o sedimento. Se ha encontrado ácido dimetilarsenico en suelos tratados con pesticidas arsenicales como la principal especie metilada, altos niveles de este ácido se atribuyen a la producción de macrófitos. La lixiviación de As de los suelos es inhibida por la presencia de óxidos hidratados de hierro y aluminio, arcillas y materia orgánica. La sorción de arsenato y arsenito en óxido de hierro amorfo

se opera en dos procesos, la sorción inicial de las especies de As descrita por medio de la isoterma adsorción de Langmuir, donde el ploteo c/S vs C es lineal, C es la concentración de la fase solución de las especies de As, y S es la concentración de la fase sorbida.

La isoterma de Langmuir describe la superficie de los sólidos como un conjunto de sitios de adsorción de igual energía que tienen la capacidad de adsorber una especie, situación que se espera encontrar en la superficie del sólido cristalino puro con pocos defectos. Las isotermas de Langmuir describen la adsorción de arsenato y arsenito en hidróxido de aluminio, y arsenato en suelos. En general, se ha encontrado que la sorción de As^{5+} es mayor en los hidróxidos de hierro y aluminio que la sorción de As^{3+} . Las isotermas de Langmuir (mecanismo de adsorción homogénea) y las isotermas de Freundlich (mecanismo de sorción) describen bien la adsorción del As con grupos de diferentes sitios de adsorción de energía y diferentes interacciones. Este conjunto de características pueden darse en un suelo con un rango de minerales cada cual con sus propias propiedades en su superficie individual asociada con una capa delgada de varios óxidos hidratados de Fe, Mn y Al. Las diferencias de las tasas de sorción de los diferentes suelos se explican por las diferencias en el pH, el contenido de Fe_2O_3 y de carbono orgánico, la baja desorción de As^{3+} se relaciona con el pH y $Fe_2O_3\%$. Las constantes de disociación del ácido ortofosfórico H_3PO_4 son muy similares a las del ácido arsénico:

CUADRO N° 15

Constantes de disociación del ácido Ortofosfórico H_3PO_4

Constante de Disociación	Ácido Ortofosfórico H_3PO_4	Ácido Arsénico
pK1 =	2,124	2.20
pK2 =	7.20	6.97
pK3 =	12.40	11.53

Fuente: Cszys, 1994.

Consecuentemente, las especies de As y de P competirán por los sitios de sorción con los componentes del suelo. El tamaño más pequeño de las especies de fosfato, comparado con su correspondiente de las especies de arsenato, con sus cargas más altas que las especies de arsenito, conducen a la expectativa de que el fosfato se

unirá más fuertemente que el arsenato o arsenito tomando en cuenta las concentraciones relativas de varias especies ya que la posición del equilibrio puede ser desplazada. El uso de la mayor concentración de solución de arsenato puede desplazar el fosfato de los suelos.

El fosfato interfiere en la sorción de arsenato y arsenito en los ácidos húmicos. La máxima sorción de As^{5+} en ácido húmico se da a pH 5.5, y con el As^{3+} el máximo se encuentra a pH superior y la relación entre el pH y el tipo de material húmico varía. Generalmente los ácidos húmicos sorben 20% menos As^{3+} que As^{5+} y su comportamiento de sorción se describe por una isoterma de Langmuir con cierta desviación en altas concentraciones. Este mecanismo de adsorción se explica asumiendo que el material húmico actúa como un intercambiador aniónico. A medida que el pH del As se hace más alcalino, el material húmico se hace más soluble y su capacidad para eliminar el As de la solución se reduce.

Los niveles de sulfuro generalmente son bajos en el suelo debido a su alto potencial redox y son oxidados a sulfato en sus lechos y lixiviados hacia el exterior. En consecuencia, es inusual encontrar sulfuro de As en los suelos aún cuando ellos son la fase sólida más estable en condiciones de reducción como si podrían ser encontrados en suelos pantanosos. En lagos, ríos, estuarios y sedimentos marinos, la presencia de sulfuro As y de condiciones reducidas puede permitir la precipitación de As_2S_3 . La superficie de los suelos ricos en compuestos orgánicos contiene muy poco As, la actividad microbiana produce compuestos volátiles de As, y es responsable de la mayor pérdida de As del horizonte superficial.

5.3.2.2 Comportamiento químico del mercurio en el suelo

Dependiendo de las condiciones redox, el mercurio (Hg) puede encontrarse en tres diferentes estados de valencia como Hg^0 , Hg^{2+}_2 y Hg^{2+} , de los cuales Hg^0 y Hg^{2+} son los que normalmente se encuentran en el suelo. Además del potencial redox, el pH y la concentración de iones Cl^- son parámetros claves en la determinación de la especiación del Hg en la solución suelo y las transformaciones químicas que allí ocurran. Además de las reacciones químicas, las transformaciones pueden ser mediadas por la actividad microbiana. El conocimiento de la especiación y las reacciones de transformación del Hg es importante para explicar la retención y movilización del Hg en el suelo, el equilibrio entre las fases sólido y la solución suelo, y la disponibilidad para la absorción en las plantas.

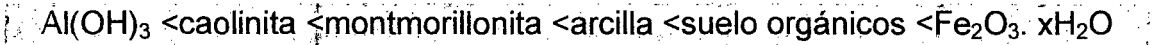
El Hg^{2+} rara vez se presenta en su forma iónica en condiciones normales, debido a su fuerte capacidad para formar complejos. El Hg^{2+} es estable en soluciones ácidas por encima de 0.4V de potencial redox y normalmente se presenta como un complejo de $HgCl_2$; por encima del pH 7 se presenta el complejo $Hg(OH)_2$ estable; también forma complejos fuertes con materias húmicas, pero el carácter de estos complejos no es muy conocido.

Otra propiedad importante del Hg es su capacidad para formar enlaces fuertes con los iones sulfuro, y en condiciones fuertemente reducidas el Hg^0 es estable en presencia de H_2S o HS^- , pero al incrementarse el potencial redox el HgS precipitará, y en suelos fuertemente alcalinos se formará el HgS_2^{2-} . Además provocará la oxidación del sulfuro a sulfato, pero aquí el potencial aún no es suficientemente alto como para evitar la reducción del Hg^0 . Luego la elevación del potencial redox de la superficie del suelo transformará el Hg al estado +2. El Hg^{2+} se produce en la solución del suelo sólo una fracción de minuto, la mayor parte se une a los minerales del suelo o es adsorbido en las superficies sólidas, inorgánicas y orgánicas. Desde que $HgCl_2$ está débilmente retenida a la materia mineral, puede asumirse que Hg^{2+} se une a la materia orgánica en suelos ácidos, mientras que en suelo neutro y ligeramente alcalino, los compuestos minerales están también activas.

Lixiviación del Hg.- el suelo presenta una fuerte capacidad de fijación del Hg^{2+} haciendo que la remoción por lixiviación en la mayoría de los casos sea insignificante. Se obtuvieron estimaciones de bajas cantidades en el transporte de Hg (menos de 1% de la cantidad almacenada) desde las capas superficiales del suelo en períodos de escurrimiento y desde los coloides del humus en los suelos forestales hacia los lagos en algunos países como Suecia. Además, no se encontraron en cantidades medibles en los suelos por debajo de 20cm de profundidad.

Adsorción.- aparentemente, la adsorción es el proceso dominante en la retención de las especies de Hg en el suelo y depende de una serie de factores que incluyen la forma química del elemento introducido, la distribución del tamaño de grano del suelo, la naturaleza y cantidad de elementos coloidales orgánicos e inorgánicos del suelo, el pH del suelo y el potencial redox. El Hg^{2+} puede ser fijado en la forma de precipitado de baja solubilidad, en particular, el sulfuro. La retención del Hg^{2+} puede ocurrir como resultado del intercambio iónico, pero los enlaces más fuertes son probablemente incluidos en gran medida, tales como los hidroxilandos en el caso de sesquióxidos y

varios ligandos en casos de sustancias húmicas. Se ha encontrado la siguiente secuencia para la retención de Hg inorgánico bajo condiciones neutras:



Por debajo del pH 5.5, el HgCl_2^0 es la especie dominante en la solución suelo y la materia orgánica será la responsable principal de la sorción del Hg. La retención del Hg en los suelos orgánicos no se reduce significativamente hasta $\text{pH} < 4$ en que disminuye lentamente. En suelos neutros ($\text{pH} > 5.5$) el óxido de hierro y los minerales de arcilla participan más eficientemente en la adsorción de Hg. La máxima adsorción se da a pH 7, donde el HgOHCl^0 es la especie dominante, y los compuestos organo-mercúricos como el cloruro metil-mercúrico y el acetato fenil-mercúrico son fuertemente adsorbidos en el suelo. En este sentido, los minerales de arcilla parecen ser muy eficientes, pero sólo en un estrecho rango de pH y cuando los compuestos están presentes en concentraciones lo suficientemente bajas y en forma disociada.

Metilación del Hg.- se ha observado la metilación natural del Hg con microorganismos acuáticos produciéndose $(\text{CH}_3)\text{Hg}$ y $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ en ambientes acuáticos y terrestres. El $(\text{CH}_3)\text{Hg}$ puede formarse en los suelos bajo diversas condiciones, incluyendo la metilación abiológica posiblemente asociada con la fracción de ácido fúlvico del suelo.

Concentración y distribución de mercurio.- en la mayoría de los suelos el contenido de Hg varía con la profundidad en particular los suelos vírgenes, lo que significa que la profundidad del muestreo es importante. En los suelos cultivados la capa arable (0-20cm) es homogenizada para su manejo. Comparar datos de suelos cultivados y no cultivados es difícil a menos que la profundidad del muestreo homogenizado o el horizonte de suelo sea el mismo para ambos. La mayoría de las publicaciones pertenece a trabajos realizados en EE UU y Europa, la información de suelos de Asia, África, América Latina es muy escasa y se cree que son representativos para las áreas que no tienen la influencia de las fuentes antropogénicas.

Los suelos orgánicos comúnmente tienen elevadas cantidades de Hg a diferencia de los suelos mineralizados. Existe una correlación significativa entre el Hg y la materia orgánica contenida en la capa superior de un suelo forestal. En un estudio de Hg en perfiles de suelo virgen se mostró una relación muy cercana entre el Hg y el contenido de materia orgánica en suelos ácidos, mientras que en los suelos neutros ($\text{pH} > 6$) donde las especies dominantes son el HgOHCl y Hg(OH)_2 en lugar de HgCl_2 , se observó la co-variación entre el Hg y el Fe más fuerte que la del Hg y la materia orgánica. Es posible que el mayor contenido de Hg encontrado en los suelos del este

de USA comparados con los del oeste, se explican en parte por las diferencias de contenido de la materia orgánica. En suelos con bajo contenido en materia orgánica y $\text{pH} > 6$ se presume que el Hg se agota en los horizontes mas bajos.

Lo que parece ser evidente, sin embargo, es que el contenido de Hg en la superficie del suelo normalmente excede en un grado sustancial al del material mineral de donde proviene. Mucho de este exceso probablemente está en alguna forma que le permita su participación en procesos de intercambio con el suelo y entre la atmósfera y el suelo.

5.3.2.3 Comportamiento químico del plomo en el suelo

El plomo (Pb) se acumula de manera natural en los horizontes²⁶ superficiales del suelo, y es bastante notable, aún en suelos no contaminados. Existe un conocimiento limitado de la química y la especiación del Pb en el suelo. Las mediciones del metal total tienen mucho valor para identificar y describir las áreas del manto contaminado del suelo. Análogamente al comportamiento de los nutrientes, se asume que sólo una parte del Pb total está disponible para la absorción de las plantas y el resto de compuestos de Pb ingresan al suelo y se distribuyen en los diversos compartimientos, como son la solución suelo, la superficie de adsorción de los complejo de intercambio arcilla-humus, precipitados, óxidos de Fe y Mn y tierras carbonatadas, el humus del suelo y el conglomerado de silicatos.

El humus del suelo con ácidos húmicos de alto peso molecular contribuye a una mayor inmovilización del Pb uniéndose por enlaces de coordinación de los pares de electrones libres. El Pb de la solución suelo es la fuente inmediata para las raíces de las plantas y el equilibrio dinámico puede asumirse entre la solución suelo y los otros compartimientos. La muy baja concentración del Pb en la solución suelo produce dificultades analíticas las cuales han limitado el estudio de esta forma del elemento. Algunos investigadores han encontrado concentraciones de 10^{-7}M de metales pesados en solución, obtenidos centrifugando el suelo no contaminado, y propusieron que el contenido normal de Pb en un suelo no contaminado es casi $40\mu\text{g Pb/g}$ ($0.2 \cdot 10^{-6}\text{M}$). Un estudio de fijación de Pb encontró una distribución en los compartimientos del

²⁶ Horizontes o capas del suelo. Horizonte A, superficial ó aluvial, oscura y rica en humus y sustancias minerales, presencia de microorganismos, hongos, bacterias, etc. Es el componente fértil de los suelos, aptos para el cultivo. Horizonte B ó iluvial, capa donde se acumulan los materiales lavados del horizonte A, que llegan por procesos de infiltración, predominan las partículas minerales y los componentes orgánicos procedentes de restos de plantas y materiales en descomposición. Horizonte C ó inferior, resultado de la alteración y fragmentación de la roca madre.

suelo en la forma de ión Pb en un tiempo entre 24 a 48hrs, y 20–40°C sin afectar el equilibrio. Estadísticamente se ha determinado que, tanto el pH como el CEC del suelo fueron las principales propiedades involucradas en la inmovilización de Pb en suelo, presentando enlaces coordinados con un par de electrones libres. Además, se reportó que la isoterma de Langmuir proporcionaba un buen ajuste para los datos de adsorción; el pH y las bases intercambiables del suelo fueron controles importantes en la inmovilización. En suelos ácidos se encontró Pb en forma catiónica con algunos complejos orgánicos. En suelos calcáreos dominan los complejos neutros con algunos cationes de Pb. Se mostró que la solubilidad del Pb en suelos no calcáreos era regulada por $\text{Pb}(\text{OH})_2$, $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, y en suelos calcáreos el PbCO_3 era importante. Se ha determinado la especiación del Pb en la solución suelo utilizando cromatografía de intercambio iónico.

El Pb puede influir en las actividades microbianas del suelo y por lo tanto reducir su productividad. Inhibe la mineralización y nitrificación del nitrógeno en el suelo, El orden decreciente de inhibición es:

$\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb}$

La productividad de la planta es menos sensible a la contaminación por metales pesados que al proceso mismo de descomposición, y este hecho es como sigue:

productividad < acumulación de residuos < degradación de la materia
orgánica del suelo < descomposición del humus del suelo.

La resistencia de las bacterias del suelo al Pb ha sido demostrada en el suelo contaminado por la minería y las fundiciones en algunos lugares, aunque los porcentajes de resistencia es menor en el suelo contaminado con Pb que en aquellos con Zn o Cd, esto se debe probablemente a su baja solubilidad y baja biodisponibilidad del Pb.

5.3.2.4 Comportamiento químico del cadmio en el suelo

Algunos aspectos del comportamiento químico del cadmio (Cd) en el suelo puede explicarse por factores como la especiación, las isotermas de adsorción, el pH, la competencia entre iones metálicos y el efecto de los ligandos orgánicos.

Especiación.- es importante tener la capacidad de identificar las diferentes formas de los metales en el suelo, especialmente en la solución suelo, para comprender

ampliamente las dinámicas del metal en los diferentes ecosistemas agrícolas y naturales. La especiación y las concentraciones de un metal como el cadmio en la solución suelo, dependerá parcialmente de la concentración de los ligandos en la solución suelo y las constantes de estabilidad de los complejos ligando-metal. Se ha desarrollado el modelo GEOCHEM para la predicción de las especies presentes en el suelo y contiene una base de datos con valores típicos de las constantes de estabilidad para pares individuales metal-ligando. La inserción de parámetros como pH, carbono orgánico, concentraciones de aniones y cationes hacen posible la predicción de las especies predominantes formadas. Usando este modelo se ha predicho que las principales especies químicas de Cd en soluciones de suelo oxisol, son en orden decreciente: Cd(II), CdSO₄(0) y CdCl⁺ en suelos ácidos; Cd(II), CdCl⁺, CdSO₄(0) y CdHCO₃⁺ en suelos alcalinos. Aunque, se encontraron que algunas predicciones del modelo para el contenido de iones libres de algunos metales en la solución suelo no estaban acordes con los determinados experimentalmente, obteniéndose sobreestimaciones en gran medida con el GEOCHEM, sugiriendo que el modelo requiere un refinamiento con respecto las a constantes de estabilidad de los ligandos presentes en las soluciones suelo. El suelo que ha sido fuertemente modificado con lodo de desagüe sólo complejó el Cd orgánicamente en 13.2%. El método puede haber subestimado la proporción de Cd atrapado, pero los resultados fueron comparables a los pronosticados para los sólidos enlodados utilizando el modelo GEOCHEM

Adsorción.- el equilibrio dinámico entre el Cd en la solución suelo y aquella adsorbida en la fase sólida del suelo depende del pH, la naturaleza química de las especies metálicas, la estabilidad de los complejos de Cd, la energía de enlaces de los grupos funcionales y de la fuerza iónica de las soluciones así como de los iones que compiten. La adsorción de cualquier metal pesado en el suelo raramente es una simple relación entre su coeficiente de distribución y las propiedades del suelo, debido a que más de una especie de cada metal, por lo general, se presenta en el suelo como resultado de la formación de complejos orgánicos o inorgánicos. Algunos aspectos del comportamiento químico del Cd en suelos suelen explicarse por el principio químico ácido-base fuerte-débil de Lewis (HSAB). El Cd es un ácido débil de Lewis y por tanto, reaccionará y formará complejos más fácilmente con bases débiles de Lewis, tales como el cloruro y los grupos hidroxilo; además tiende a ser muy móvil en los suelos y con más disponibilidad para las plantas que otros metales pesados tal como el plomo.

La importancia de los mecanismos de adsorción en las dinámicas del Cd en los suelos muestra que los procesos de adsorción, más que la precipitación, parecen controlar su distribución entre la fase soluble y las formas de enlaces del suelo a las concentraciones normalmente encontradas aún en la mayoría de suelos contaminados. Aunque en concentraciones extremadamente elevadas del metal, se puede esperar la formación de precipitados de fosfatos y carbonatos. En muchos casos se ha encontrado que la adsorción de Cd en las suspensiones de suelos o de sus constituyentes se ajusta a las ecuaciones de las isothermas de Langmuir o de Freundlich. La elección del modelo no es muy importante, ya que el Cd por lo general es de muy baja saturación en los rangos de concentración reales; algunos estudios encontraron a la isoterma de Langmuir como el más apropiado para la adsorción del metal en suelos contaminados. Tanto la adsorción y desorción de Cd mostraron una mayor sensibilidad al pH superior a la del Pb.

Estudios de adsorción de Cd en suelo mostraron que la data de la isoterma de adsorción de Freundlich formaba dos secciones definidas, sugiriendo dos sitios de adsorción: (i) sitios de baja capacidad y alta afinidad a concentraciones bajas de solución de Cd, y (ii) sitios de baja afinidad pero alta capacidad a altas concentraciones de la solución. Este tipo curva de dos secciones ha sido encontrado también en trabajos con Pb. Normalmente la adsorción de Cd es rápida con más de 90% en los primeros 10 minutos.

Algunas investigaciones en suelos conteniendo calcita libre encontraron CaCO_3 con adsorción de Cd y reducción de su biodisponibilidad, y encontraron una alta afinidad de la calcita por el Cd formando una isoterma de adsorción lineal a bajas concentraciones ($<1\mu\text{mol/g}$). Sin embargo, en altas concentraciones de Cd predominaba la precipitación del CdCO_3 . La quimisorción del Cd a bajas concentraciones implicaba reemplazar el calcio por Cd en los cristales superficiales de la calcita. Es más probable que el ión libre Cd^{2+} se adsorba en la superficie sólida del suelo que las especies neutras o aniónicas.

Efecto del pH.- algunos trabajos de investigación mostraron que el incremento del pH aumenta marcadamente la adsorción de Cd en determinados rangos, en diferentes tipos de suelos, la adsorción aumenta con el incremento de cada unidad de pH. Así, suelos con alto contenido de materia orgánica u óxido de Fe hidratado con pH 6 y 7 adsorbieron más Cd que aquellos con grandes cantidades de arcilla. Todas las isothermas de sorción mostraron dependencia de pH típico con un máximo alrededor de pH 7. Con el incremento del pH, las concentraciones de Cd en la solución disminuye

debido al incremento en hidrólisis, densidad de adsorción y las cargas negativas dependientes del pH. Usando la curva de regresión múltiple, se mostró que el pH era uno de los factores claves, junto con la materia orgánica y el contenido de óxido hidratado, controlando la adsorción específica de Cd en varios tipos de suelos.

Competencia con otros iones metálicos.- Algunos iones metálicos como Ca, Co, Cr, Cu, Ni y Pb, compiten e inhiben la adsorción de Cd. Así, se ha encontrado que el Zn presenta el mayor efecto inhibitor sobre la adsorción de Cd, y el aumento de la concentración de calcio en la solución de 10^{-3} a 10^{-2} redujo la capacidad de adsorción del Cd en un 67%.

Efecto de los ligandos orgánicos.- la formación de complejos de Cd con ciertos ligandos orgánicos en la solución suelo puede presentar efectos importantes sobre las cantidades sorbidas. El EDTA y el NTA inhibieron la adsorción de Cd en el suelo formando complejos no adsorbentes. El ligando NTA forma complejos aniónicos, aunque estos se disocian a pH bajos adsorbiendo algo de Cd. Todas las isothermas de sorción mostraron una dependencia del pH con un máximo alrededor de $\text{pH}=7$. Con el incremento de la acidificación de la solución, se forman menos complejo ligando-metal debido a que H^+ se unía preferentemente a pH bajo. El Cd forma complejos aniónicos con los ácidos húmico y fúlvico, aunque menos estables que el Pb y Cu. La influencia de azufre en la isoterma de adsorción del Cd en suelo con lodo demostró que los ligandos en la solución acuosa tenían una fuerte afinidad a bajas concentraciones de Cd que las cargas de la superficie del suelo. Después de lavar el suelo para remover los ligandos orgánicos solubles, las isothermas más comunes eran lineales. Los ligandos orgánicos no solo aumentan las solubilidades de los metales traza, sino que reducen los efectos sobre las plantas, porque el ión libre (hidratado) parece ser más tóxico que los complejos inorgánicos estables, como los complejos orgánicos.

Los lixiviados de los rellenos.- los lodos de desagüe y los residuos del incinerador con Cd, contenían complejos de Cd estables, complejos de Cd ligeramente lábiles y relativamente pequeño Cd^{2+} libre. Estos complejos redujeron el grado de adsorción del Cd en el suelo reaccionando con el lixiviado. Se encontró que el Cd en las soluciones de ácido fúlvico extraídos de lodos de desagüe solo fue débilmente inmovilizado (con menos fuerza que el Zn y Ni), aunque pudieron variar en diferente ácido fúlvico derivado de lodos.

Las constantes de estabilidad de los complejos de Cd con ácido húmico se determinaron usando valoraciones potenciométricas. El Cd fue débilmente inmovilizado a diferencia del Pb y el Cu especialmente a pHs bajos. Se concluyó que

los grupos carboxil y fenoxil formaron ligandos con todos los metales. Se encontró también que la materia orgánica soluble del lodo digerido forma dos grupos de intercambio, uno ligado al Ca, Mg, Zn, Ni, Co, Mn, Cd, Pb y Fe^{3+} y otros ligados sólo al Cu, Pb y H^+ .

5.3.2.5 Comportamiento químico del cromo en el suelo

Los estados de oxidación más comunes y estables del cromo (Cr) son Cr^{3+} y Cr^{6+} , y ambos muestran propiedades químicas fuertemente contrastantes: el Cr^{6+} , existe como anión, y es más fácilmente extraído del suelo y de los sedimentos, es considerada como la forma más tóxica. El cromato está en equilibrio con otras formas de Cr^{6+} dependiente del pH, como el cromato ácido, HCrO_4^- y el dicromato, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, a $\text{pH} > 6$ predomina el ión CrO_4^{2-} . Por otra parte, Cr^{3+} es mucho menos móvil y se adsorbe fuertemente a las partículas. La solubilidad del Cr^{3+} disminuye por encima del $\text{pH}=4$, y precipita completamente por encima de $\text{pH}=5,5$.

El Cr^{6+} es la forma más estable en equilibrio con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, con su alto potencial de reducción es una de las especies fuertemente oxidante, y en presencia de la materia orgánica del suelo se reduce a Cr^{3+} , reduciéndose más rápidamente en suelos ácidos que en suelos alcalinos. En consecuencia, esta forma relativamente más insoluble y menos móvil es la que predomina en la mayoría de los suelos, generalmente como hidróxidos y óxidos insolubles. Se observaron que adiciones de cromo soluble, como Cr^{6+} o Cr^{3+} al suelo, cambiaron a la forma insoluble y no disponible para las plantas. Tras la reducción de Cr^{6+} , se concluyó que el Cr insoluble en el suelo se presentaba como óxidos hidratados de Cr^{3+} mezclado o inmovilizado en óxido de Fe. En suelos tratados con desague, se consideraron los complejos orgánicos muy estables para la extremadamente baja disponibilidad del elemento. Sin embargo, el complejo Cr^{3+} -ácido orgánico soluble (ácido cítrico, DTPA, ácido fúlvico y extractos de suelo de materia orgánica soluble en agua) mantiene al Cr^{3+} en solución por encima del pH al cual el Cr no complejo precipita y es un medio de mejoramiento de su movilidad. Se ha observado que los cambios de pH y de los estados del fósforo del suelo manifestaron similitud en el comportamiento de la solubilidad y de la adsorción del Cr^{3+} y del Al^{3+} . Suelos con $\text{pH} > 5$ y rico en óxido de manganeso puede oxidar una parte del Cr^{3+} , aunque existe la dificultad de detectar la transición debido a que el secado y el almacenamiento aparentemente destruyen la capacidad del suelo para oxidar al elemento; es decir, el pE del suelo se reduce por el secado. Se encontró que la cantidad de Cr^{3+} oxidado a Cr^{6+} era proporcional al manganeso reducido. Cuando la concentración del Cr^{6+} supera la capacidad de

adsorción y reducción del suelo, permanecerá en el suelo y su capacidad de adsorción es similar a la del ortofosfato y el anión permanecerá móvil. La adsorción del Cr^{6+} en determinados suelos puede compensar su reducción. Se conoce que el HCl extrae a la mayoría de las formas inorgánicas de Cr^{3+} , tales como hidróxidos y fosfatos, mientras el pirofosfato ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) elimina las formas orgánicas del Cr^{3+} .

La aplicación de lodos de desagüe en los suelos puede dar lugar a cambios en la dosificación de las formas fisicoquímicas de los metales en ambos componentes, se ha reportado que la solubilidad del Cr en el agua aumenta en la mezcla de suelos y lodo. El aumento de pH por el encalado no causa una gran disminución de la solubilidad del Cr de la mezcla suelo-lodo, esto es coherente con la observación de que la toxicidad del Cr aumenta con el pH_{suelo} y relacionado a un incremento de Cr^{6+} .

Evaluando el movimiento vertical del metal en suelos tratados con lodos, la mayoría de los informes indican una escasez general del lixiviado por debajo de la zona de incorporación de los lodos. Experimentalmente, se encontró que el Cr del suelo que había recibido tratamiento con lodo contaminado de metales, no mostró evidencia de movimiento significativo por debajo de la profundidad al cual fue cultivado el suelo. La acidificación y la textura, incluido el agrietamiento del suelo y el grado de saturación son probablemente factores importantes para que el movimiento vertical sea significativo.

5.3.3 Aspectos relacionados a los metales pesados y el sistema suelo-planta - Biodisponibilidad

Se presentan aquí algunos aspectos relevantes de los estudios de investigación desarrollados por Alloway, 1993.

5.3.3.1 Arsénico en el sistema suelo-planta

El nivel de As en las plantas comestibles es generalmente bajo, a menudo está cerca del límite de detección, aun cuando los cultivos han crecido en suelos contaminados. Según datos se tiene que en varios tipos de suelos que contienen similares concentraciones de As, los niveles más bajos se han encontrado en las plantas cultivadas en arcillas y limo con mayor grado de arcilla mineral y contenido de óxidos de Fe y Al que en plantas cultivadas en suelos más ligeros como la arena, esto refleja las características de sorción de los suelos.

Como en la mayoría de los elementos traza, el grado de adsorción varía considerablemente de una especie a otra. A diferencia de algunos organismos marinos y de agua dulce donde las concentraciones son muy elevadas (más de 1000mg As/Kg peso fresco como el encontrado en algunas macrofitas), los niveles en las plantas terrestres permanecen muy por debajo del nivel del suelo. En general, las raíces contienen más altos niveles que en los tallos, hojas o frutos, y es raro obtener niveles de As cercanos a 1mg/kg peso fresco en cultivos de alimentos. Los pastos que crecieron en suelos cerca a una antigua mina de As (Inglaterra) contenían más de 3460mg/kg PS, y los pastos que crecieron en suelos de una zona urbana con 20mg/Kg, tenían 3mg/kg PS máximo.

La disponibilidad de As en suelos es afectada por los cambios de pH, los efectos de la toxicidad en las plantas aumenta con la acidez del suelo, en particular a $\text{pH} < 5$, cuando las especies ligando-As tales como los oxocompuestos de Fe y Al se hacen más solubles. Sin embargo, la absorción de As en las plantas puede incrementarse en suelos de pH más alto. En ensayos de campo acerca del efecto de la aplicación de lodos de desagüe conteniendo arsenato, a una arena ($\text{pH}=6$) y un suelo calcáreo ($\text{pH}=8$) indicó factores de enriquecimiento de 3-4 veces mayor en la lechuga y hojas del centeno cultivadas en el suelo calcáreo. El nivel más alto alcanzado en los cultivos fue de 2mg/kg PS en la lechuga. El aumento de la concentración de As en los tejidos de las plantas se correlacionaron significativamente con el As del suelo para ambos tipos de suelo.

Un repentino descenso en la movilidad en el agua, indica el efecto fitotóxico del As, como se sugiere en la plasmolisis y decoloración de la raíz seguida de necrosis de las puntas y bordes de las hojas, y se detiene la germinación de las semillas. La sensibilidad de una planta al As se determina por la habilidad de la planta a no absorber o no translocar²⁷ el As a sitios susceptibles. Los frijoles y otras legumbres están entre las plantas más sensibles a la toxicidad del As. La absorción y la toxicidad de las especies de As también varían. El grado de absorción y concentración de las especies de As absorbidos de soluciones nutritivas por las raíces del frijol fue: arseniato > arsenito > monomethylarsonate > dimethylarsinate, con una toxicidad directamente proporcional a la concentración en la raíz.

El As 'disponible' contenido en el suelo es el mejor indicador de la fitotoxicidad que la concentración total de As. La cantidad de As soluble o potencialmente soluble en un

²⁷ Translocación, se refiere al movimiento del agua, sales minerales y sustancias orgánicas de una parte a otra, dentro de los sistemas vasculares de una planta.

suelo varía ampliamente con el pH, Eh y la presencia de otros componentes del suelo como el Fe, Al, arcilla mineral y materia orgánica. El valor obtenido para el nivel de As disponible en un suelo es una función del agente de extracción usado. La adición de fosfato en suelos enriquecidos con limo y arcilla mejora los campos de cultivos. Con suelos arenosos no se observa mejoría o se produce un aumento de la toxicidad del As, se ha observado también un aumento del As disponible en el suelo. Los efectos que produce la competencia entre el fosfato y arseniato dependen de las diferentes magnitudes relativas entre ellas. En suelos enriquecidos con limo y arcilla donde hay un gran número de sitios de sorción en los minerales del suelo, la competencia por los sitios serán menos importante y la competencia por la absorción en las raíces de las plantas será más importante. Sin embargo, en los suelos arenosos donde hay menos sitios de sorción el fosfato puede desplazar algunos ligandos de iones arsenato que pasa a la fase de solución y está disponible para la absorción por las raíces de la planta.

La labranza profunda puede ser usado para reducir los efectos del As en la superficie del suelo por dilución, suministro extra de sitios ligandos especialmente si están expuestos en el Horizonte B ricos en arcilla/Fe/Al, y desplazando al As por debajo de la zona radicular. Se obtuvieron resultados variables en la reducción de la toxicidad del As en suelo mediante la adición de compuestos de Al, Fe y Zn, S, cal y materia orgánica.

Ya que las concentraciones de As en las plantas son generalmente bajas, las cantidades utilizadas como pesticidas en las plantas en crecimiento resultan en gran parte absorbidas por el foliar que por el suelo. Así como el arseniato inorgánico y los compuestos de arsenito, los ácidos monometilarsonic y dimethylarsinic y sus sales han sido ampliamente utilizados. Los residuos de la aplicación de estos compuestos pueden acumular altos niveles de As en el suelo y pueden continuar con efectos fitotóxicos grandes mucho después de que la aplicación haya cesado. Particularmente, los residuos de arseniato de Pb han sido de larga vida en los huertos donde la tasa de aplicación era mucho más alta antes que las que ahora se utilizan para los plaguicidas arsenicales.

Ya que las concentraciones de As en las plantas son generalmente bajos, el consumo de As por parte de los animales desde esta fuente es también bajo; sin embargo, la ingesta directa desde el suelo puede ser una fuente importante de este metal en la dieta en el pastoreo del ganado. La cantidad actual de suelo ingerido varía de una estación a otra, siendo más bajo a principios de verano, cuando la cubierta del suelo

con la hierba está en su máximo. El promedio de la ingesta de As que se estimaba procedía del suelo era 60-75%. También se ha estimado que alrededor del 1% As en el suelo era realmente ingerido por el ganado y el resto era directamente excretado.

5.3.3.2 Mercurio en el sistema suelo-planta

La mayor parte de los trabajos han sido realizados en semillas bajo condiciones experimentales controladas, y casi exclusivamente con cantidades de mercurio (Hg) por encima de los encontrados normalmente. En general, el aprovechamiento del Hg del suelo a las plantas es bajo y hay una tendencia general a la acumulación en las raíces que sirven de barrera a la absorción del Hg. Experimentos de la absorción de Hg^{2+} en plantas superiores desde un cultivo en solución mostró un cierto transporte de Hg a los brotes a niveles que excedían 0.1mg/kg en el medio externo. La fracción de Hg retenido en las raíces fue casi 20 veces que el observado en los brotes.

La concentración de Hg en la parte aérea de las plantas en la superficie del suelo parece ser dependiente de la absorción del Hg metálico volatilizado desde el suelo al foliar. Algunos autores indican que los compuestos del Hg aplicado a algunas partes de las plantas encima del suelo pueden ser rápidamente translocados a otros. El contenido de Hg en plantas de cultivo que crecen en suelos con bajo contenido de Hg es el mismo que para el suelo; en cereales el contenido en los granos fue casi 3-10 veces más bajo que en la paja. Otro trabajo mostró niveles de Hg más bajo aún (~1-2ng/g) en granos de cebada y trigo. Aún en estos muy bajos niveles, puede asumirse que la absorción foliar del Hg metálico atmosférico juega un rol importante.

5.3.3.3 Plomo en el sistema suelo-planta

Se han realizado algunos intentos para diseñar procedimientos que prediga la absorción de Pb pero con relativo éxito, debido principalmente al poco conocimiento de los factores que controlan su disponibilidad en la interfase raíz/suelo, pero hay consenso al determinar que sólo una pequeña proporción de Pb del suelo está disponible para su absorción en las plantas. También se ha calculado un factor de concentración (CF) para comparar los niveles de Pb en planta y suelo y su aplicación determinó valores similares a los publicados por otros autores. La ecuación CF es la siguiente:

$$CF = Pb \text{ en planta } (\mu g / g \text{ peso seco}) / Pb \text{ en suelo } (\mu g / g \text{ peso seco})$$

Un estudio determinó la rapidez de la absorción y transporte de Pb en los brotes, aunque la cantidad translocada fue pequeña después de siete días. Técnicas histoquímicas se han utilizado para investigar la distribución del Pb en semillas germinadas de rábano, determinando que el metal se acumula en la endodermis de la planta que actúa como una barrera parcial a la translocación del plomo, concluyéndose que la translocación es altamente dependiente del estado fisiológico de la planta, y bajo condiciones de óptimo crecimiento el metal precipita por las paredes de la célula de las raíces en la forma amorfa insoluble, identificado en el maíz como fosfato de Pb.

Otra observación determinó que la absorción de Pb en las raíces de la planta y su translocación a los brotes variaba según la estación, se observó que el contenido de Pb en el gras se incrementaba durante el otoño y el invierno. Durante el período de crecimiento activo la concentración de Pb fue 0.3–1.5ug/g en PS, luego en el otoño éste se elevó a 10ug/g y en el invierno se elevó a 30–40ug/g. Estudios del fenómeno de acumulación del metal determinaron que la relación de absorción y la concentración del sustrato es curvilínea para la especie acumuladora. La absorción disminuye progresivamente a elevadas concentraciones, y se concluye que el Pb es un metal acumulador. La ecuación de absorción se describe como sigue:

$$plant Pb = 0.74[1 - \exp(-1.4 s)] + 0.16 s$$

donde "s" es la concentración del sustrato Pb. Se indica que los nutrientes importantes y otros metales pesados afectan la absorción del Pb en la planta, sin embargo, no se puede concluir a partir de la literatura y existe escasa evidencia convincente que otras prácticas agrícolas, tales como el uso de estiércol o fertilizantes sean particularmente efectiva.

5.3.3.4 Cadmio en el sistema suelo – planta

El Cd es un metal pesado que se encuentra naturalmente asociado al fosfato en menor o mayor concentración. Los procesos químicos del suelo que afectan la absorción y acumulación del Cd en las plantas son importantes, aunque su toxicidad puede presentarse en las plantas de suelos severamente contaminados; su acumulación en los cultivos alimenticios en niveles de sub-toxicidad o toxicidad es una de las mayores causas de riesgo a la salud de las personas. Aún en concentraciones ligeramente elevadas, el Cd en los alimentos puede tener un efecto significativo a

largo plazo. Se ha encontrado un orden de toxicidad para algunas hortalizas en suelos, según: Cd>Ni>Cu>Zn.

Las concentraciones relativamente grandes de Cd en porciones comestibles pueden acumularse sin que la planta muestre síntomas de estrés. El índice de Plastochron, que es un índice numérico que indica la edad de desarrollo de las plantas, puede mostrar una tasa de desarrollo reducida. La toxicidad aguda se manifiesta por clorosis de la hoja, marchitez y crecimiento reducido, aunque es raramente encontrado. La cantidad del metal en las plantas depende de la combinación de los factores suelo-planta.

Se toman en cuenta algunos factores del suelo que afectan la absorción de Cd en la planta como son:

La cantidad total del Cd presente en el suelo.- es el primer factor principal que afecta su absorción en la planta. Investigaciones realizadas en cultivos alimenticios han determinado que el Cd en hojas de espinaca, tallos de papa y grano de la cebada tienen una relación lineal con el metal del suelo. Se encontró otra correlación sumamente significativa entre el Cd total del suelo tratado con lodo y algunas hortalizas. El origen del Cd en el suelo puede también afectar su biodisponibilidad; así, el Cd en los suelos contaminados desde fuentes inorgánicas (minería y fundición) tienden a acumularse más fácilmente en la parte comestible de los vegetales a comparación de los suelos tratados con lodos de desagüe, considerada como la fuente más común de altas concentraciones de Cd en el suelo. La materia orgánica del lodo de desagüe aumenta la capacidad de adsorción del suelo enmendado. Se observó que los productos que se cultivaron en suelos con sales de Cd absorbieron más metal que los cultivados en suelos que contienen el equivalente de Cd en el lodo de desagüe. Así, el maíz absorbió de 5 a 18 veces más Cd del suelo con CdSO₄ comparado con las cantidades equivalentes en el lodo de desagüe. Un experimento de una mezcla de suelo, lodo y CdSO₄ y otro suelo sin lodo mostró que el Cd estaba menos disponible en el primero que en este último. El encalando del suelo mostró una reducción en la absorción de Cd y este efecto fue mayor en el suelo con lodo. También se encontró mayor disponibilidad en suelos tratados con sales de metal comparado con los suelos recogidos de sitios contaminados que se habían dejado a equilibrarse durante muchos meses después del tratamiento. Se encontró que la actividad del Cd²⁺ en la solución suelo comparado con el cadmio soluble total, presenta mejor correlación en la absorción de la planta. Sugirieron que el modelo GEOCHEM fue el camino más conveniente para evaluar las principales especies solubles de Cd.

pH del suelo.- es el segundo factor más importante para determinar la disponibilidad del Cd en el suelo ya que afecta a todos los mecanismos de adsorción y especiación de los metales en la solución suelo. La absorción de Cd se relaciona inversamente con el pH del suelo. Así, se encontró que la absorción de Cd en el arroz y en el trigo disminuyó con el incremento del pH desde 5.5 a 7.5; la adición de CaO en el suelo agrícola redujo la absorción de Cd en el forraje del ganado debido al aumento del pH y la competencia entre los iones Ca^{2+} y Cd^{2+} .

El incremento de la acidez aumenta parcialmente la actividad del Cd^{2+} , debido a la disolución de los óxidos hidratados y la co-precipitación de sus metales y una disminución de las cargas negativas dependiente del pH reduce la adsorción de los coloides. Una excepción a la relación anterior se observó en el maíz después de encalar el suelo enmendado con lodo digerido anaeróticamente a pH 6.5, no se observó reducción en el contenido de Cd en el maíz. La mayor acumulación tiende a presentarse en plantas que crecen en suelos ácidos.

Capacidad sortiva del suelo.- es otro factor importante. Se ha demostrado que el contenido de Cd en la planta es inversamente proporcional al CEC de los suelos donde crecieron. Se encontró una relación inversa entre los coeficientes de distribución (K_d) para el Cd determinado de las isothermas obtenidos a partir de experimentos de absorción específica y el contenido de Cd en col en diferentes suelos. La materia orgánica contribuye en parte al CEC del suelo pero también adsorbe metales pesados formando complejos. Se reporto que el Cd absorbido por el maíz fue inversamente relacionado al CEC del suelo tratado con CdCl_2 , pero no fue correlacionado con el CEC en los suelos enmendados con lodos de desagüe que contenían Cd. La relación entre CEC y la absorción de la planta no es clara. Se indica que el CEC mismo no es el parámetro mas apropiado para indicar la disponibilidad de un suelo a la adsorción de metales tales como el Cd. No obstante, la USEPA ha basado sus recomendaciones en el $\text{CEC}_{\text{suelo}}$ para la disposición de lodos de desagüe junto con el pH_{suelo} y la concentración de Cd_{total} .

La condición redox²⁸ es un factor que ocurre en aproximadamente todos los suelos y es importante en aquellos procesos que regulan la disponibilidad y movimiento de elementos como el Fe y el Mn, y en la acumulación de materia orgánica, etc. Escasos cultivos alimenticios como el arroz, crecen en condiciones especiales de suelos, exigen campos completamente inundados, produciéndose estados de potencial

²⁸ REDOX, reacciones de reducción - oxidación, la preparación de muchos complejos metálicos implica frecuentemente una reacción, participan los estados de oxidación de los elementos y se coordina a ciertos grupos ligantes. Supone una reacción rápida entre el ión y el ligante para formar el complejo.

reducción con mínima permeabilidad del suelo durante el desarrollo del cultivo (procesos anaerobios), debido a los altos rendimientos de la producción de estos cultivos. El manejo exige el drenaje, según las necesidades del cultivo. En estas condiciones se acumula mucho menos Cd y muestra menos pérdida de campo que cuando crecen en condiciones de oxidación y se forma $CdS_{sólido}$ en condiciones anóxicas. Cuando el sulfuro es oxidado, habrá acidificación del suelo y contribuye a la disponibilidad del Cd. Cuando se drenan los suelos aumenta su potencial redox, disminuye el contenido de Fe^{2+} y Mn^{2+} , el sistema reductor se transforma en oxidante (agentes reductores: materia orgánica, suelo arcilloso). En un campo experimental, se observó que los suelos tratados con lodo y los suelos de arena presentaron mayor absorción de Cd que el suelo arcilloso. El suelo arcilloso presenta bajo contenido de óxidos de Fe y Mn hidratados y bajo valor K_d para el Cd que el suelo arenoso.

Otros factores de la planta que afectan la absorción de Cd_{suelo} son:

(i) El genotipo²⁹ de la planta.- especies de plantas y variedades de cultivos difieren ampliamente en su capacidad de absorción, acumulación y tolerancia a los metales pesados. Se ha mostrado que algunas hortalizas (lechuga, espinaca, el apio y col) tienden a acumular relativamente altas concentraciones de Cd, mientras que algunos tubérculos y cereales (papas, maíz, habichuelas y frijol) acumularon solamente una pequeña cantidad. Muchos investigadores encontraron que entre los cultivos alimenticios, la lechuga es un gran acumulador de Cd, las hojas de tomate acumulan 70 veces más Cd que las hojas de zanahoria en la misma solución suelo. Los cultivos entre especies pueden diferir ampliamente en su tolerancia a los elementos traza. Se observó que la acumulación de Cd en especies pertenecientes a familias de plantas eran más dependientes de su familia que del pH.

(ii) Distribución de Cd en las plantas.- factor importante que se manifiesta a través de algunas observaciones. El Cd, junto con el Mn, Zn, B, Mo, y Se son reconocidos como los elementos traza que son fácilmente traslocados a la parte más alta de la planta después de su absorción a través de las raíces. Experimentalmente se encontró que el Cd estaba presente en altas concentraciones en las raíces más que en otros órganos de varios cultivos (alfalfa, maíz, gras y tomate), pero ninguno de estos es cultivado para el consumo de sus raíces, mientras, en hortalizas (lechuga, zanahoria y papas), el contenido de Cd era más elevado en las hojas. En la planta de soya, el 2% Cd se acumuló en las hojas y 8% en las semillas.

²⁹ El genotipo, es una característica específica que participa en el mecanismo de absorción de los elementos nutritivos hacia la planta, manifestando diferencias en la absorción de las distintas especies de iones en las plantas. (Azabache, 2003).

(iii) La especiación del Cd en los tejidos de las plantas alimenticias es un factor importante para determinar su acumulación en el organismo humano. El Cd se ha encontrado en las proteínas plasmáticas de la planta que usualmente contienen cisteína y son en conjunto denominadas fitoquelatinas³⁰. Estas proteínas han sido identificadas en soya, cebolla, frijol, etc. Aún no se conoce si algún factor del suelo puede influir en la especiación del Cd en los cultivos, aparte de la determinación de la cantidad de metal que ha ingresado a la planta.

5.3.3.5 Cromo en el sistema suelo-planta

Las concentraciones de $Cr_{\text{disponible}}$ para las plantas son extremadamente pequeñas en la mayoría de los suelos, y la escasez de la solubilidad se refleja en las bajas concentraciones del elemento en las plantas. Las concentraciones de Cr en el foliar muestran escasa relación con el contenido global de Cr en el suelo, y las concentraciones en el subsuelo o en suelos no contaminados son del orden de 0.23mg/Kg, y en general, las concentraciones son inferiores a 1mg/Kg. La biodisponibilidad del Cr en las plantas evaluada en suelos serpentinos (suelos poco productivos para la agricultura) con un pH=6,8 promedio es escasa. Las concentraciones de Cr en plantas que crecen en zonas de minas, escombros y diversos tipos de residuos de Cr, están comúnmente en el rango de 10-190mg/kg, pero las concentraciones tóxicas pueden acumularse en las plantas que crecen en residuos de cromato en el cual predomina el Cr^{6+} más soluble. Se indujo la toxicidad con Cr en la mostaza, cebada y alfalfa adicionando Cr^{3+} a los suelos frescos y húmedos, pero notablemente se registró menos daño añadiendo Cr^{3+} a los suelos secados al aire; la diferencia fue atribuida a la formación de Cr^{6+} a partir de Cr^{3+}_{suelo} . Sin embargo, la concentración de Cr en cultivos que crecieron en suelos tratados con lodos de desagüe con niveles elevados de Cr fue apenas sobre el límite, esto refleja la formación de precipitados de Cr^{3+} o de complejos orgánicos muy estables. La opinión predominante es que el Cr^{6+} es más tóxico que el Cr^{3+} . Se observó que el Cr^{6+} inhibía el crecimiento de los brotes y de las raíces de las plantas de cebada en mayor medida que el Cr^{3+} y que la absorción de Cr^{3+} fue mayor que de Cr^{6+} en las raíces. Sin embargo, se sostiene que la diferencia de toxicidad observada entre las dos formas es debida a la muy reducida biodisponibilidad del Cr^{3+} a pH > 5.

³⁰ Fitoquelatinas son ligandos de alta afinidad que complejan metales pesados. Se piensa que ellas pueden desempeñar en las plantas el transporte de cadmio. Su disminución provoca una mayor sensibilidad a los metales pesados, por tanto su papel en la tolerancia y acumulación es crítico.

Ajustando las condiciones y lograr concentraciones iguales de Cr^{3+} y Cr^{6+} en cultivos en flujo continuo fue demostrado que ambas formas eran tóxicas para las plántulas de avena. En esas concentraciones, la inhibición del crecimiento de las raíces fue mayor con Cr^{3+} que con Cr^{6+} . Así, la toxicidad de Cr^{3+} es poco probable, excepto en suelos extremadamente ácidos, y a pesar de todo se le considera como relativamente no tóxico, pero el Cr^{6+} es invariablemente tóxico para las plantas. Sin embargo, los aniones cromato están más disponibles a pH más altos y el mejoramiento del suelo pobre en materia orgánica o montones de residuos contaminados con Cr^{6+} depende en gran medida del aumento del potencial de reducción de Cr^{6+} al Cr^{3+} menos tóxico añadiendo materia orgánica, un proceso que se da de modo natural en la mayoría de los suelos. Independientemente de la forma del cromo a que la planta está expuesta, la mayoría absorbida permanece en los tejidos de la raíz. Así, la concentración en plantas de cebada expuestas al Cr mostró que el 98% de cualquiera Cr^{3+} o Cr^{6+} absorbido era retenido por las raíces de la planta; otra experiencia con exposición de la planta al complejo $\text{Cr}_{\text{orgánico}}$ no mostró aumento de la sorción del elemento relativo a los compuestos Cr^{3+} o $\text{Cr}^{6+}_{\text{inorgánicos}}$. Por otra parte, la translocación en la planta no se incrementa por el abastecimiento de Cr en la forma de ácidos orgánicos. La absorción de Cr desde suelos tratados con K_2CrO_4 para diferentes especies de plantas muestran que las hojas de los cultivos de cereales son menos eficaces acumulando Cr que las hojas de las hortalizas. Se ha indicado que las plantas que tienden a acumular Fe también acumulan Cr. El tri-oxalato de Cr^{3+} es la forma química del elemento en los tejidos vegetales, y un compuesto de Cr con propiedades similares ha sido encontrado en etanol extraído de plantas de cebada y coliflor. Ahora la *Comisión de las Comunidad Europea* ha evaluado los límites del $\text{Cr}_{\text{disponible}}$ en suelos y ha sugerido límites CE 150-250mg/kg recomendados para suelos tratados con lodos de desagüe, incluyendo un margen de seguridad en los suelos.

5.4 RIESGOS POTENCIALES A LA SALUD POR METALES PESADOS – BIOACUMULACIÓN

5.4.1 Toxicidad de arsénico

Las formas del $\text{As}_{\text{soluble}}$ son fuertemente tóxicas. La ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso y finalmente a la muerte. Recordemos que el As ha sido uno de los venenos de largo plazo más utilizados en la historia de la humanidad, siendo Napoleón (el emperador de

Francia), la víctima más famosa. Dosis bajas pero sostenidas (ejm., causas laborales) superiores a $0.75 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{año}$ (ejm. 15 años con concentraciones de $50 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) pueden llevar al desarrollo de cánceres. La vida acuática y terrestre muestra una amplia gama de sensibilidades a las distintas especies arsenicales. En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas, y el arsenito más peligroso que el arseniato. Los arsenitos pueden fijarse a las proteínas, mientras que el arseniato afecta a la fosforilación oxidativa (en relación con Ciclo de Krebs).

Los organismos marinos contienen residuos arsenicales que van desde < 1 a $100 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$, los cuales se encuentran como arseno-azúcares en las algas, o arsenobetaina en invertebrados y peces. Las plantas terrestres pueden acumular As por captación a través de las raíces, o por adsorción de As aerotransportado, en las hojas.

5.4.2 Toxicidad del mercurio

Es un contaminante global, proviene principalmente de la desgasificación de la corteza terrestre, las emisiones volcánicas y la evaporación de las masas de agua. Es utilizado en pilas, lámparas y termómetros. También se usa en las amalgamas para obturación de caries (odontología), en la industria farmacéutica. Las principales fuentes de emisión de Hg son la fabricación de cloro en celdas de Hg, producción de metales no ferrosos, combustión de carbón mineral, entre otros. Es tóxico y pueden provocar temblores, gingivitis, alteraciones psicológicas y aborto espontáneo. Algunos procesos biológicos naturales pueden generar compuestos metilados de Hg y bioacumularse en peces. El mono y el dimetil Hg son muy tóxicos y provocan enfermedades neurológicas. La principal ruta de ingreso a los seres humanos es por la cadena alimentaria y no por inhalación. El único mineral supergénico (natural) de Hg reconocido es la schuetteita, ésta aparece como costras recubriendo rocas en las proximidades a escombreras de mineral (*mineral dumps*). El Hg posee una de las peores reputaciones entre los metales pesados. El incidente de la Bahía de Minamatta (Japón, años 50s-60s) bastó para que este elemento infundiese alarma pública en todas las regiones del mundo donde podía haber fuentes de contaminación. Todas las investigaciones indican claramente que el Hg puede constituir una amenaza para la salud humana y la vida silvestre, el riesgo viene determinado por el tipo de exposición a la especie de Hg presente; los factores geoquímicos y ecológicos que influyen en la forma de migración del metal al medioambiente, y los cambios que puede sufrir durante dicha migración.

De todas las especies de Hg conocidas la más peligrosa es sin duda el metilmercurio CH_3Hg . Aunque la forma exacta en que se produce la metilación del Hg se desconoce, se sabe que en el proceso intervienen bacterias que participan en el ciclo $\text{SO}_4^{2-} - \text{S}^{2-}$. Estas bacterias, que por lo tanto contendrán metilmercurio, son consumidas por el peldaño superior de la cadena trófica, o bien lo excretarán. En este último caso el metilmercurio puede ser rápidamente adsorbido por el fitoplancton y de ahí pasar a los organismos superiores. Debido a que los animales acumulan metilmercurio más rápido de lo que pueden excretarlo, se produce un incremento sostenido de las concentraciones en la cadena trófica (biomagnificación). Así, aunque las concentraciones iniciales de metilmercurio en el agua sean bajas o muy bajas, los procesos biomagnificadores acaban por convertir el metilmercurio en una amenaza real para salud humana. El metilmercurio daña al organismo, afectando al sistema inmunológico, alterando los sistemas genéticos y enzimáticos, afecta al sistema nervioso, interfiriendo en la coordinación, en el sentido del tacto, el gusto y la visión e induce a un desarrollo anormal de los embriones (efectos teratogénicos); los embriones son 5 a 10 veces más sensibles a los efectos del Hg que un ser adulto.

5.4.3 Toxicidad del plomo

Proviene de fuentes naturales y antropogénicas, puede ingresar al organismo por el agua, alimentos, tierra y polvillo desprendido de viejas pinturas conteniendo Pb. Es maleable, dúctil y se le puede dar forma con facilidad. Asimismo, es uno de los metales no ferrosos que más se recicla. Se emplea en aleaciones, baterías, compuestos y pigmentos, revestimientos para cables, proyectiles y municiones. La exposición puede tener diversos efectos en humanos. Los niveles altos de exposición pueden afectar la síntesis de hemoglobina, la función renal, el tracto gastrointestinal, las articulaciones y el sistema nervioso. (Falcón, 2005).

Las partículas de Pb relacionadas con los problemas metalúrgicos constituyen el problema principal, pero existen otras fuentes que entrañan también una peligrosidad extrema. En los años 90 se constató en la ciudad de Antofagasta (Chile) que había niños que presentaban altos contenidos de Pb en sangre, la fuente del problema eran minerales y concentrados de Pb que se acumulaban sin protección en las instalaciones portuarias (pertenecientes a Bolivia), para su posterior envío. Esto nos lleva a encaminar nuestra mirada no solo a las fundiciones, sino también a las zonas donde se acumulan minerales o concentrados de Pb. Las partículas finas de Pb, 10-100 μm , pueden ser extremadamente peligrosos en razón de su fuerte adherencia a la

piel; es más soluble que las partículas gruesas en el tracto gastrointestinal y fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio. Su sitio de acumulación es el tejido óseo; esta situación es particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio. Altas dosis de calcio hacen que el Pb sea "removido" de los tejidos óseos, y que pase a incorporarse al torrente sanguíneo; una vez ahí puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad, e hipertensión. Niveles de Pb_{sangre} 0.48 $\mu\text{g/l}$ pueden inducir en los niños daño durante el desarrollo de los órganos del feto; daño en el sistema nervioso central y en las funciones del calcio; reducción de las habilidades mentales e iniciación de desordenes del comportamiento. A su vez, niveles de 1.2 $\mu\text{g/l}$ pueden inducir a descenso del coeficiente intelectual (CI), problemas de desarrollo cognitivo y del comportamiento, déficits neurológicos que pueden persistir hasta la adolescencia, elevación de los umbrales auditivos, peso reducido en recién nacidos y desarrollo cognitivo temprano anormal.

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, la acumulación en los huesos tiene una vida media superior a los 20 años. La osteoporosis, embarazo, o enfermedades crónicas pueden hacer que éste Pb se incorpore más rápidamente a la sangre. Problemas asociados con la sobreexposición al Pb en adultos incluyen daño a los riñones, al tracto gastrointestinal y al sistema reproductor; daño en los órganos hematopoyéticos, daños neurológicos y abortos.

5.4.4 Toxicidad del cadmio

El Cd proviene principalmente de la refinación del zinc, su toxicidad es similar a la del Zn. Es persistente en el ambiente y si es absorbido por el organismo humano puede persistir por décadas antes de ser excretado. En humanos, la exposición prolongada se relaciona con la disfunción renal, enfermedad pulmonar, cáncer de pulmón inclusive, y en humanos y animales puede provocar osteoporosis. La ingesta media diario para humanos se estima en 0,15 μg procedente del aire y 1 μg desde el agua, fumar unos 20 cigarrillos puede provocar la inhalación de unos 2 a 4 μg . Debido a su toxicidad, el Cd se encuentra sujeto a una de las legislaciones más severas en términos ambientales y de salud humana. En la vida acuática se incorpora en los peces a través de dos rutas principales: la ingesta y la introducción en las agallas; se acumula en el hígado, riñones y en el tracto gastrointestinal. Sus efectos son: problemas en las agallas y riñones, pobre mineralización de los huesos, anemia, crecimiento retardado y anormalidades del desarrollo y comportamiento.

En el caso de los humanos, el Cd puede adquirirse por ingestión e inhalación. Sus efectos se dividen en dos categorías:

- **Agudos:** fiebre ("*metal fume fever*") causada por una exposición severa; síntomas equivalentes a los de una gripe; en 24 horas se desarrolla generalmente un edema pulmonar agudo, el que alcanza su máximo en 3 días; si no sobreviene la muerte por asfixia, el problema puede resolverse en una semana.
- **Crónicos:** la consecuencia más seria del envenenamiento por Cd es el cáncer. Uno de los efectos crónicos observados es el daño a los riñones. Se piensa que el Cd es también el causante de enfisemas pulmonares y enfermedades de los huesos (osteomalacia y osteoporosis). Los problemas óseos han sido observados en Japón (problema con metilmercurio; Incidente Minamata, donde se les denominó como la enfermedad "*itai-itai*")por consumo de arroz contaminado con Cd en la irrigación. Anemia, decoloración de los dientes, y pérdida del sentido del olfato (anosmia).

5.4.5 Toxicidad del cromo

El Cr es muy usado en aleaciones y pigmentos para cemento, papel, pinturas, caucho y otras aplicaciones. Frecuentemente se acumula en ambientes acuáticos, por lo que existe cierto riesgo de ingerir pescado contaminado. Bajos niveles de exposición pueden provocar irritación de la piel y úlceras, y la exposición prolongada puede causar daños hepáticos y renales, al tejido nervioso y al sistema circulatorio.

El cuadro N° 16 muestra una síntesis de algunos efectos de la toxicidad por metales pesados sobre la salud humana.

CUADRO N° 16

Efectos de los metales sobre la salud humana

METAL	EFFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA
Cadmio	Provoca desorden gastrointestinal grave, bronquitis, enfisema y cálculo renal
Cromo	En dosis bajas causa irritación en las mucosas gastrointestinales, úlceras e inflamación de la piel. Dosis alta causa dolencias en el hígado y los riñones, pueden llevar a la muerte.
Plomo	Provoca cansancio, ligeros trastornos abdominales, irritabilidad y anemia.
Mercurio	Causa trastornos neurológicos y renales, tiene efectos tóxicos en las glándulas sexuales, altera el metabolismo del colesterol y provoca mutaciones.
Arsénico	Acumulación en el organismo por ingesta. Superado ciertos niveles de concentración, puede ocasionar lesiones dérmicas (neoplasias), enfermedades respiratorias, neurológicas, cardiovasculares y diversos tipos de cáncer (pulmón, riñón, hígado, vejiga y piel). Dosis letal: 1 – 4mg/Kg peso. Arsenito es 10 veces superior a la del arsenato

Fuente: Manual práctico para compostagem de biosólido. Programa de Pesquisa en Saneamento

Básico 2001

5.5 REGULACIONES ACERCA DE LA APLICACIÓN DE LODOS

Las regulaciones en materia de lodos en el mundo tienen varias consideraciones, por ejemplo, establecen límites y parámetros en las concentraciones de metales pesados. En *EEUU* y *la UE* existen normativas muy similares al respecto, las cuales han sido imitadas en muchos otros países. En España se tienen en cuenta valores límite de metales pesados dependiendo del pH del suelo. Principalmente en Europa, se controla la tasa de aplicación (concentración de metales pesados por hectárea). *EEUU* recomienda calcular las tasas de aplicación teniendo en cuenta el contenido de nutrientes del lodo (biosólido) y los requerimientos de los cultivos agrícolas. Adicionalmente, regula otros metales pesados como arsénico, selenio y molibdeno. La mayoría de normatividades regulan los mismos indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales y huevos de helminto), y establecen la necesidad de tratamiento de los lodos (digestión anaeróbica, aeróbica, secado térmico, estabilización química, etc.) para que al ser convertidos en biosólidos puedan ser aplicados al suelo.

5.5.1 Legislación sobre lodos en Estados Unidos

EE UU: Clean Water Act (1977); la EPA define el término "biosólido" (1977); se emiten los primeros requerimientos específicos sobre lodos (1989);

Norma específica para lodos – Standards for the use or disposal of sewage sludge USEPA, 1993; Code of Federal Regulations, CFR 40:

Parte 257, establece reglas para los sólidos generados en las instalaciones industriales y para lodos sépticos combinados con lodos industriales.

Parte 258, establece condiciones para la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios municipales: niveles máximos de contaminantes, necesidades de impermeabilización, características físicas de los lodos.

Parte 503, define estándares para el uso y disposición de lodo (biosólidos) y su disposición superficial, incineración y para toda forma de aplicación en terreno de uso benéfico a tasas agronómicas que provean la cantidad necesaria de nitrógeno para los cultivos o vegetación, minimizando la cantidad que pasa más allá de la zona de raíces. Recomienda procesos de tratamiento aplicado a los lodos para reducir el contenido de patógenos y a la reducción de la atracción de vectores, estabilización de lodos, y la clasificación de los lodos en función al contenido de patógenos, en clase A y B, y los criterios de aplicabilidad en base a concentraciones límite de metales pesados antes de su aplicación en el suelo agrícola y las tasas acumulativas de carga contaminante

aplicado a ocho metales, incluidos los que aquí se evaluaron (arsénico, cadmio, plomo, mercurio, cobre, molibdeno, níquel, selenio y zinc). Es decir, que hay un aumento en la concentración de metal en el suelo a través del tiempo, comparado con la concentración en el ambiente, se absorbe más rápido que su metabolismo o excreción y se bioacumula en cualquier momento en el organismo vivo. Por lo que no debe excederse en los lugares de aplicación. Otro criterio de aplicabilidad sugiere que si estas concentraciones no sobrepasan entonces no es necesario hacer seguimiento de las tasas acumulativas. El análisis de riesgo para identificar compuestos químicos en los biosólidos que presentan mayor riesgo a la salud pública, animales, plantas y organismos del suelo, bajo los escenarios más probables de exposición.

El análisis de riesgo provee una base científica para determinar cambios ambientales aceptables cuando los biosólidos son usados o dispuestos, a través de los cuales la salud pública y el medio ambiente se mantienen protegidos de los efectos adversos que razonablemente puedan anticiparse aún cuando, como resultado de la aplicación de lodos, se observen algunos cambios en el ambiente.

5.5.2 Normativa de lodos en la Comunidad Económica Europea

CEE, tiene como antecedentes a las normas en Alemania y Suiza (1982).

La Directiva 86/278/EEC modificada 91/692 EEC, su objetivo es regular la utilización de los lodos de depuradora en la agricultura para evitar efectos nocivos en los suelos, la vegetación, los animales y el ser humano, fomentando al mismo tiempo su correcta utilización. Reconoce que los lodos pueden presentar propiedades agronómicas útiles y por consiguiente resulta justificado fomentar su uso correcto en la agricultura. La utilización de los lodos no debe perjudicar la calidad de los suelos y de la producción agrícola. Considera límites para concentraciones de metales pesados en el suelo (cadmio, plomo, mercurio, zinc, cobre, níquel). Se prohíbe la utilización de los lodos cuando la concentración de dichos metales supere los valores límite. Evitar que los valores límites (límites en los lodos) se superen a consecuencia de una utilización de lodos (límites en el aporte a los suelos cultivados – tasa de aplicación). Los países miembros han introducido algunas modificaciones a la Directiva 86/278/EEC, proponiendo límites más exigentes para los metales pesados. La Directiva no incluye ninguna mención específica a patógenos, aún cuando algunos países han impuesto límites (Francia, Italia, Dinamarca, Austria, Luxemburgo). Indica que los lodos deben haber sido sometidos a tratamiento. La Directiva 99/31/EEC regula la disposición de lodos en los rellenos sanitarios (1999).

Una diferencia significativa entre las normativas en lodos en Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea es que mientras que en Estados Unidos los límites se basan en la evaluación de los riesgos potenciales al hombre, animales y plantas debido a los contaminantes seleccionados en los lodos. El límite se establece como aquella concentración mínima que representa un riesgo aceptable para las vías de exposición evaluadas. Para la Comunidad Económica Europea, muchas regulaciones están basadas en límites precautorios de los contaminantes en el suelo, reconociendo la persistencia por contaminantes; el objetivo es prevenir la acumulación de contaminantes inorgánicos por sobre los valores establecidos.

5.5.3 Legislación sobre lodos en América Latina

La regulación y manejo de lodos en América Latina está basada en las experiencias en EE UU y la UE. Los riesgos potenciales de la acumulación, sin una disposición final adecuada, se debe a una serie de factores que se resume en las siguientes causas:

- La Información muy diversificada y variada.
- Una interpretación subjetiva de la información disponible.
- Limitaciones de acceso a la información debido al lenguaje.
- Limitaciones en los fondos económicos para hacer investigación en lodo

CUADRO Nº 17

Tratamiento de aguas residuales en América Latina

PAÍS	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (%)	NORMA EFLUENTES (A)	NORMA LODOS (A)
Argentina	7 (b)	Si	Si
Bolivia	40	Si	No
Brasil	66	Si	Si
Chile	84	Si	Si
Colombia	32	Si	Si (c)
Costa Rica	8	Si	No
Ecuador	24	Si	No
El Salvador	3	Si	No
Guatemala	8	Si	No
Haití	5	No	No
Honduras	22	Si	No
México	36	Si	Si
Nicaragua	50	Si	No
Panamá	16	Si	No
Paraguay	15	Si	No
Perú	23	Si	No
República Dominicana	35	Si	No
Uruguay	57	Si	No
Venezuela	20	Si	No

Leyenda: (a) Fuente LATINOSAN, 2007. (b) Fuente: CEPIS, 2003. (c) Abonos y enmiendas, Norma no específica para lodos. Fuente: XXXI Congreso Interamericano AIDIS –María Mena (Chile) 2008.

Algunas experiencias en materia de lodos en algunos países vecinos:

En Ecuador, el Municipio Metropolitano de Quito cuenta con una ordenanza que establece los límites máximos permisibles para los diferentes contaminantes presentes en las descargas líquidas y emisiones a la atmósfera. Algunos lodos que por sus características se denominan biosólidos pueden ser reutilizados como mejoradores de suelos, y otros se consideran desechos peligrosos. Por su relevancia, el municipio de Quito con la cooperación técnica de la Agencia Alemana de Cooperación Técnica-GTZ planteó la ejecución del proyecto Manejo ambientalmente adecuado de lodos provenientes de las plantas de tratamiento.

Algunas Normas sobre manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales en AL:

En Argentina, la Resolución N° 97/01 (22/11/2001) Ministerio de Desarrollo Social y Medioambiente de la Nación, tiene como objetivo regular el manejo, tratamiento, utilización y disposición de las diferentes operaciones que realicen las plantas de tratamiento de efluentes, a efectos de asegurar una gestión sustentable de estos productos, subproductos y residuos. Esta disposición alcanza: a los lodos generados en el tratamiento de efluentes cloacales, mixtos cloacales-industriales, industriales, agroindustriales y/o especiales. Define criterios para aplicación agrícola, disposición en rellenos sanitarios e incineración.

En Brasil, la Resolución N° 375 (29/08/2006) Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA tiene como objetivo establecer criterios y procedimientos para el uso en áreas agrícolas del lodo y sus productos derivados, procurando beneficios a la agricultura y evitando riesgos a la salud pública y al medio ambiente, y está dirigida a los lodos cloacales generados en estaciones de tratamiento de alcantarillado sanitario. Sólo se refiere a la aplicación agrícola.

En Chile, el Decreto Supremo N° 123 (30/08/2006) Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (aún no está vigente). Su objetivo es regular el manejo de lodos; establecer la clasificación y las exigencias sanitarias mínimas y restricciones, para su aplicación agrícola en determinados suelos. Este decreto alcanza a los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas domésticas.

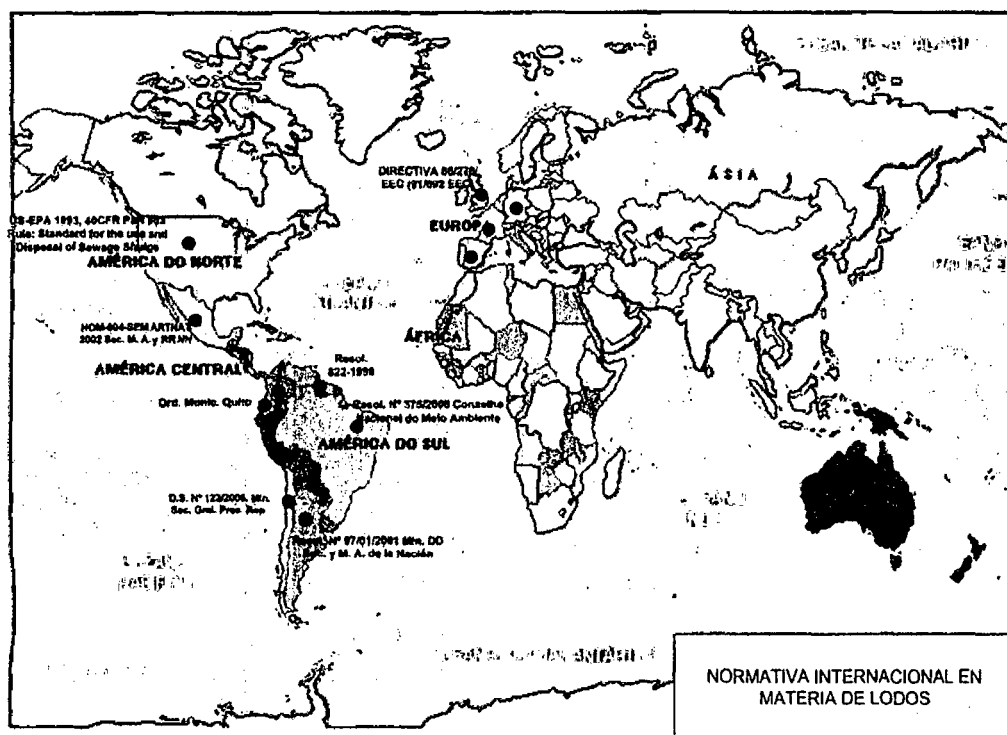
En Colombia, se cuenta con la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (31/05/2004) para materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos, con el objetivo de establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los

cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes o como enmiendas del suelo, aunque no es específica para lodos de tratamiento. Esta norma alcanza a los fertilizantes o abonos orgánicos, orgánicos minerales y enmiendas orgánicas. Enmienda orgánica no húmica (producto orgánico sólido obtenido a partir de la deshidratación y estabilización de los residuos provenientes de las plantas industriales y de tratamiento de aguas residuales industriales, urbanas, residuos sólidos urbanos separados en la fuente). Define los requisitos a cumplir para la aplicación agrícola.

En México, la Norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 de la Secretaría - Medio Ambiente y Recursos Naturales ha establecido las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólido provenientes de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud. La norma alcanza: a los lodos de sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Define criterios para aplicación agrícola.

GRÁFICO N° 07

Normativa Internacional en materia de lodos



Fuente: Elaboración propia, con mapamundi tomado de

<http://images.google.com.pe/images?hl=es&source=hp&q=mapamundi&btnG=Buscar+im%C3%A1genes&gbv=2&aq=f&oq=>

Se ha determinado que la frecuencia de muestreo y análisis de lodos tratados, destinados a la aplicación en suelo, depende de la cantidad generada en un período determinado. Ver Cuadro N° 18.

CUADRO N° 18

Determinación de la frecuencia de muestreo y análisis de lodo en algunos países

Argentina		Brasil		Chile		México	
< 300	Anual	<60	Anual	0 – 300	Anual	< 1500	Anual
300 – 1500	Trimestral	60 – 240	Semestral	300 – 1500	Trimestral	1500 – 15000	Semestral
1500 – 15000	Bimestral	240 – 1500	Trimestral	1500 – 15000	Bimestral	> 15000	Trimestral
>15000	Mensual	1500 - 15000	Bimestral	> 15000	Mensual		
		> 15000	Mensual				

Fuente: XXV Jornadas Chilenas de Química. 2007

5.5.4 Marco Legal Peruano

El marco legal peruano para el manejo de los residuos sólidos lo constituye la *Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos (20 de julio de 2000, el 21/07/2000)*, y su Reglamento. Los aspectos importantes relacionados a los lodos residuales son:

Párrafo 15.1 De la clasificación, para los efectos de esta ley y sus reglamentos, los lodos se denominan residuo de instalación o actividades especiales.

Párrafo 15.2 considera los lodos residuales como subproductos en estado semisólido generados a partir del tratamiento de las aguas residuales domésticas en la planta de tratamiento y pueden ser manejados a través de un sistema que incluya operaciones o procesos de aprovechamiento aplicando los lineamientos de política especialmente, en función de las posibilidades técnicas y económicas.

La 10° Disposición complementaria, transitoria y finales, N° 22, considera “residuos de instalaciones o actividades especiales a los residuos generados en infraestructuras de gran dimensión, complejidad y de riesgo en su operación, con el objeto de prestar ciertos servicios públicos o privados, tales como plantas de tratamiento de agua para consumo humano o de aguas residuales, entre otras; ...”

El Reglamento Nacional de Construcciones Norma S.90 (1997), capítulo 5.9.4 (1a5) sobre aplicación de lodos sobre terreno, establece algunos criterios de aplicabilidad de lodos estabilizados, incluyendo niveles máximos permisibles de metales pesados, entre otros.

5.6 PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGUES DE PUENTE PIEDRA.

5.6.1 Localización y Extensión Geográfica.

La Planta de Tratamiento de desagués de Puente Piedra se localiza en el límite de los distritos de Puente Piedra y San Martín de Porres, en la ciudad de Lima - Perú, en la margen izquierda del Río Chillón, sobre un área de seis hectáreas.

GRÁFICO N° 08

Ubicación geográfica de la planta de Puente Piedra



Fuente: http://www.sedapal.com.pe/nuestra_empresa/tratresiduales.php

5.6.2 Cobertura y población servida

El proceso permite tratar 36,460 m³/día de efluente y está orientado a la descontaminación del río Chillón y cubrir las necesidades de riego, tanto de los terrenos agrícolas de miles de agricultores ubicados en el distrito de Puente Piedra en el cono norte de Lima como, de áreas verdes, beneficiando a más de 150000 (30.000) habitantes de asentamientos humanos cercanos del distrito de San Martín de Porres. Mientras que los lodos producidos son secados y depositados en un relleno sanitario. (SEDAPAL, 2005).

La cuenca baja del río Chillón se encuentra entre los 0 y 500 msnm hasta la desembocadura del mar, recorre la zona norte de las regiones geográficas de Lima y Callao, atravesando los distritos de San Martín de Porres, Los Olivos, Puente Piedra, Comas, Carabayllo y Callao distrito. Un diagnóstico de esta zona registra la influencia de un mayor número de la población con centros urbanos que reducen el espacio de la antigua actividad agrícola y que en la actualidad abastece básicamente de hortalizas, y es un pulmón verde de Lima capital. Así mismo, la presencia de recursos de arcilla y

calizas son explotados y transformados para producir cemento premezclado. Las actividades formales e informales en la cuenca del río Chillón y en el entorno de la planta de Puente Piedra y que impactan en la calidad del recurso hídrico se indican en el cuadro N° 23.

CUADRO N° 19

Actividades formales e informales - Cuenca del río Chillón y PTAR Puente Piedra

Actividades formales	Actividades Informales
Fábrica de locetas.	Plantas clandestinas de curtiembres.
Industria papelera.	Lecho apelmazado con los residuos sólidos de la planta papelera.
Riqueza geológica, canteras, caliza.	Suelos afectados por la quema de residuos de las chancherías antiguas (6%).
Zonas arqueológicas.	Los mercados arrojan sus residuos sólidos al río, botaderos y quema de RS (33%).
Planta de concreto premezclado.	Recicladores de residuos textiles de algodón.
Zona de diversidad biológica.	Poblaciones urbanizadas y asentamientos humanos sin abastecimiento de agua/alcantarillado.
Afloramiento de agua subterránea.	Descarga de aguas residuales domésticas/letrinas/lavado de costalillos y ropa en la orilla del río (22%).
Línea - Gas de Camisea.	Zona de cultivo (cebollita china, espinaca, rosas, maíz, papa, perejil) y canal de regadío afectados por los residuos sólidos (19%).
Desembocadura del mar.	

Fuente: Grupo Técnico Estratégico de la Cuenca del río Chillón (2006)

5.6.3 Descripción del proceso de tratamiento en la planta de Puente Piedra

La planta está diseñada de manera que los desagües atraviesan todo el proceso mediante gravitación. El agua proveniente de la red de alcantarillado ingresa en el pozo de derivación mediante un sistema de rejas, una de sólidos gruesos y otra de sólidos finos, con el objetivo de retener los sólidos y evitar que pasen y dañen al resto de las unidades. Luego pasa por un desarenador desengrasador aerado, aquí se elimina arena y grasa, que de no ser removidos podrían ocasionar serios problemas más adelante en la planta de tratamiento; Los desagües libres de sólidos pasan por una estación de bombeo compuesta de una bomba tipo inmersible; y desde este punto son impulsados hacia la cámara de distribución que reparte el caudal en forma uniforme y proporcional en un canal de medición hasta llegar a uno de los tres tanques tipo T, el reactor tanque de aeración SBR parcialmente lleno que contiene la biomasa ya aclimatada a los componentes del agua residual durante los ciclos anteriores. Una vez que el reactor se llena con los desagües y lodos recirculados, este opera como un sistema convencional de lodos activados pero sin el flujo continuo de afluente o descarga de efluente. Se airea mediante sopladores de desplazamiento positivo, produciéndose el proceso de lodos activados, que consiste en la degradación

bacteriana aerobia de la materia orgánica con lodos en recirculación. Se realiza el tratamiento biológico descomponiéndose el material orgánico y se produce una remoción importante de nitrógeno mediante desnitrificación simultánea. Con el SBR solo se maneja un tipo de lodos, y son utilizados para caudales menores o iguales a 5 millones de gal/día. La desventaja radica en la descarga potencial de lodos o sedimentos durante la fase de decantación del reactor en algunas configuraciones SBR. (EPA, 1999). Finalmente, la aireación y la mezcla se descontinúan después de completarse las reacciones biológicas, se sedimenta la biomasa (lodos activados) y se remueve el sobrenadante (agua tratada) en uno de los dos tanques externos. El exceso de biomasa se purga en cualquier punto de este ciclo. La purga frecuente hace que de un ciclo al siguiente se mantenga una relación de masas casi constante entre el sustrato afluente y la biomasa. Luego, el agua residual fluye a un tanque de homogenización de caudales y se controla el flujo a la siguiente unidad. La sedimentación que se aplica permite la eliminación de sólidos sedimentables a valores que puedan efectuarse la desinfección del efluente en forma eficiente y eficaz.

Mediante una bomba centrífuga el desagüe clarificado pasa a una pre-cloración en donde se le aplica una primera dosis de cloro para evitar la formación de biomasa en la batería de filtros de presión y se colmate rápidamente. El efluente descarga en una cisterna de regulación donde será sometido al proceso de desinfección final; desde este punto podrá ser utilizado para el sistema de riego, sin ningún riesgo para la salud pública. Se prevé una eficiencia en la remoción de DBO_5 en el orden de 80 a 95%; así mismo una eficiencia en remoción de coliformes fecales después de la desinfección no menor de 99.99% El efluente así producido se utiliza para regadío.

Los lodos contienen de 0,5 a 5% de sólidos, por lo que no tienen valor económico y si perjuicio ambiental. Para convertir su materia orgánica en sólidos estables, reducir la masa y volumen de agua y destruir las bacterias dañinas, el lodo se concentra por sedimentación y coagulación-floculación, se filtra al vacío para eliminar parte importante del agua. Este lodo, así concentrado, se trata con cal como bactericida y se expone al sol para evaporar su agua. Aunque, ninguna de estas técnicas es completamente satisfactoria por sus costos y problemas técnicos. El lodo deshidratado se dispone en el relleno sanitario. Sin embargo, si se desea utilizarlo como fertilizante y acondicionador del suelo, es necesario conocer caracterizarlo

5.6.3.1 Características de la planta de tratamiento

La planta pertenece a la empresa Sedapal, y fue construido entre el 2001-2002. Las características técnicas del caudal y de carga contaminante sobre los cuales se basa el dimensionamiento de la planta de tratamiento, se muestran en el cuadro que sigue.

CUADRO N° 20

Datos técnicos de la PTAR Puente Piedra (2005 a)

Datos	Detalle
Ubicación y área total	En los lotes 28 y 29 de la ExHacienda Chuqitanta, en el distrito de San Martín de Porres, en la margen izquierda del río Chillón, en un terreno de 7 Has. Cono Norte de Lima.
Entorno	Eriazo con algunos asentamientos humanos.
Desagüe tratado	Doméstico
Caudal de diseño	36500 m ³ /d
Caudal promedio día	422 l/s 36500 m ³ /d
Caudal punta (máximo)	670 l/s 2412 m ³ /h
Caudal actual	162 l/s 1520 m ³ /h promedio (Marzo 2005)
Sistema de tratamiento	Lodos activados con aeración extendida, optimizada con el sistema SBR (SEQUENCY Batch Reactor) o reactor por lotes secuenciales.
Componentes	Rejas mecánicas, desarenadores, tanques aeradores tipo T, desinfección y deshidratación de lodos.
Uso del efluente	Descontaminación del río Chillón, riego de terrenos agrícolas y de áreas verdes de la zona.
Parámetros	DBO5 total (mg/L), sólidos suspendidos (mg/L).

Fuente: http://www.sedapal.com.pe/erdf/resumen_df.htm (2006)

CUADRO N°21

Datos técnicos de la PTAR Puente Piedra (2005b)

Parámetro		Carga básica	Salida	Reducción
DQO	575 mg/L	20 965 Kg/d		
DBO ₅	250 mg/L	9.115 Kg/d	25	90 %
SS	200 mg/L	7.300 Kg/d	20	85 %
N	45 mg/L	1.640 Kg/d	20	
P	12,5 mg/L	460 Kg/d		
Personas equivalentes (P.E.)	N°/100	152000 Aprox		
Coliformes fecales	mg/L		< 1000	

Fuente: http://www.sedapal.com.pe/erdf/resumen_df.htm (2006). Carga contaminante en la planta de tratamiento (2005)

Algunos datos de volúmenes de producción de agua residual que ingresan a la planta de tratamiento se pueden observar en el siguiente cuadro.

CUADRO N°22

Volúmenes de agua residual PTAR Puente Piedra													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2003 miles m ³	351	302	405	430	337	337	321	276	382	394	389	-	-
TOTAL	3671	3386	3829	3884	3863	3797	3866	3813	3600	3785	3721	-	-
2004 miles m ³	410	411	447	467	429	387	407	396	372	-	-	-	-
TOTAL	4039	3863	4196	4209	4162	4069	3897	4059	3936	-	-	-	-

Fuente: http://www.sedapal.com.pe/erdf/historico_detalle.htm (2006)

El agua tratada es vertida al río Chillón. La tecnología aplicada es un paquete de tecnología danesa. El proceso es versátil, con alta eficiencia de remoción de carga orgánica y buena calidad de efluente tratado, a la vez que utiliza menor área de terreno para sus unidades. Sin embargo, su desventaja se debe a la alta producción de lodos, alto consumo de energía y personal calificado para el control, operación y mantenimiento. Los lodos generados albergan entre otros, contaminantes como metales pesados. La producción creciente de los lodos procedentes de la planta de tratamiento ocasiona serios problemas de almacenamiento y/o eliminación.

5.6.3.2 Etapa de pretratamiento

La estructura de ingreso a la planta de tratamiento es un buzón con compuerta deslizante de 6" de diámetro que permitirá controlar el flujo hacia la planta.

● Cámara de desbaste:

● ● **Reja gruesa y pozo de derivación.**- el agua pasa por una cámara de desbaste de rejas gruesas, 50mm de distancia entre barras, ubicada en el pozo de derivación en donde se eliminan las partículas grandes que de no ser removidas podrían causar un atascamiento de la reja fina. El material dejado en las rejas es extraído manualmente y se deposita en un contenedor para ser llevado al relleno sanitario.

● ● **Reja fina y pozo de derivación.**- el agua pasa por las rejas finas, 20mm de distancia entre barras, en donde se eliminan las partículas con el objetivo de evitar el atascamiento de los equipos y proteger bombas, válvulas, etc. Las partículas se

remueven automáticamente mediante un rastrillo o cepillo y se recoge en un contenedor.

● ● **Reja manual de derivación.**- es otra estructura de la cámara de desbaste, que se utiliza en el caso de rebose de emergencia. Si el nivel de agua antes de la reja sube por encima de cierto nivel, las aguas residuales se dirigen automáticamente por esta reja de derivación.

● **Desarenador - desengrasador de aeración doble.**- tiene la función de remover arena y grasa del agua residual para minimizar el desgaste en las bombas y la maquinaria así como el riesgo de molestias causado por el olor, la corrosión y la inhibición de los procesos de tratamiento subsiguientes. Las partículas pesadas de arena se sedimentan mientras que la materia orgánica más ligera es llevada por las aguas.

En la sección de grasas se crea una zona de aguas tranquilas donde la grasa flota en la superficie. La nata en la superficie y la arena en el fondo del tanque se remueven automáticamente mediante un puente rascador, se recogen y se conducen, a un separador de arena y pozo de grasa respectivamente antes de su disposición final.

● **Flujómetro tipo Parshall.**- su función es la medición del caudal del agua, por el canal abierto de Parshall, que asegura una buena precisión de medición.

● **Cámara de distribución al tratamiento biológico con distribuidor de entrada.**- distribuye el agua de entrada de una manera alternada a las unidades de proceso.

5.6.3.3 Etapa de tratamiento secundario

● ● **Tanques de aeración con aeración de superficie.**- El sistema de tanques de aeración tipo T consiste de tres tanques biológicos del mismo volumen y conectados entre sí. Los dos tanques exteriores son de doble función y trabajan de manera alternada entre fases de operación con aeración y fase de operación con sedimentación, y están equipados con turbinas en su superficie que funcionan como aeradores de flotación añadiendo el oxígeno en los lodos activados; la cámara de distribución de entrada que distribuye el agua al tanque dependiendo de la fase en la que está el sistema, y los vertederos de salida que conducen el agua tratada a la salida después de separarse de los lodos activados. La dirección del flujo del agua residual se determina por ambos vertederos en los dos tanques de doble función. El tercer tanque funciona solamente con aeración continua, donde la carga contaminante

contenida en las aguas residuales es biodegradado por microorganismos de los lodos activados.

Para mantener un contenido de lodos constante en los tanques de aeración, se separa las aguas tratadas de los lodos activados parando la aeración en uno de los tanques de doble función. La recirculación de lodos se omite con el ingreso alternado del agua residual cruda en los tres tanques biológicos y los tanques exteriores funcionan como tanques de sedimentación final. El tiempo de retención prolongada y las condiciones anóxicas del lodo activado durante la fase de sedimentación en los tanques exteriores permite remover una cantidad importante de nitrógeno, por medio de desnitrificación simultánea, una parte más pequeña del nitrato se remueve en los tanques de aeración por medio de desnitrificación simultánea debido a la baja concentración de oxígeno en los tanques de aeración.

☛ ☛ Ciclo operacional del sistema de tanques tipo T

Fase A.- Los desagües se llevan por el distribuidor de entrada al tanque I, donde los lodos se mantienen en suspensión continua y se aeran por los aeradores superficiales (condiciones aerobias) para lograr la descomposición biológica de la materia orgánica y la conversión del amonio del agua residual a nitrato.

Cuando los desagües crudos entran al tanque I, un volumen correspondiente de agua y lodos activados sale del mismo tanque y fluye hasta los tanques II y III. En el tanque II tiene lugar el mismo proceso que el tanque I. Los desagües biológicamente tratados y los lodos activados siguen hasta el tanque III que sirve como un tanque de sedimentación final en esta fase y la siguiente. No se realiza ninguna mezcla o transferencia de oxígeno. El agua y los lodos activados se separan, y los lodos activados se sedimentan mientras los desagües tratados fluyen por los vertederos de salida hasta el receptor.

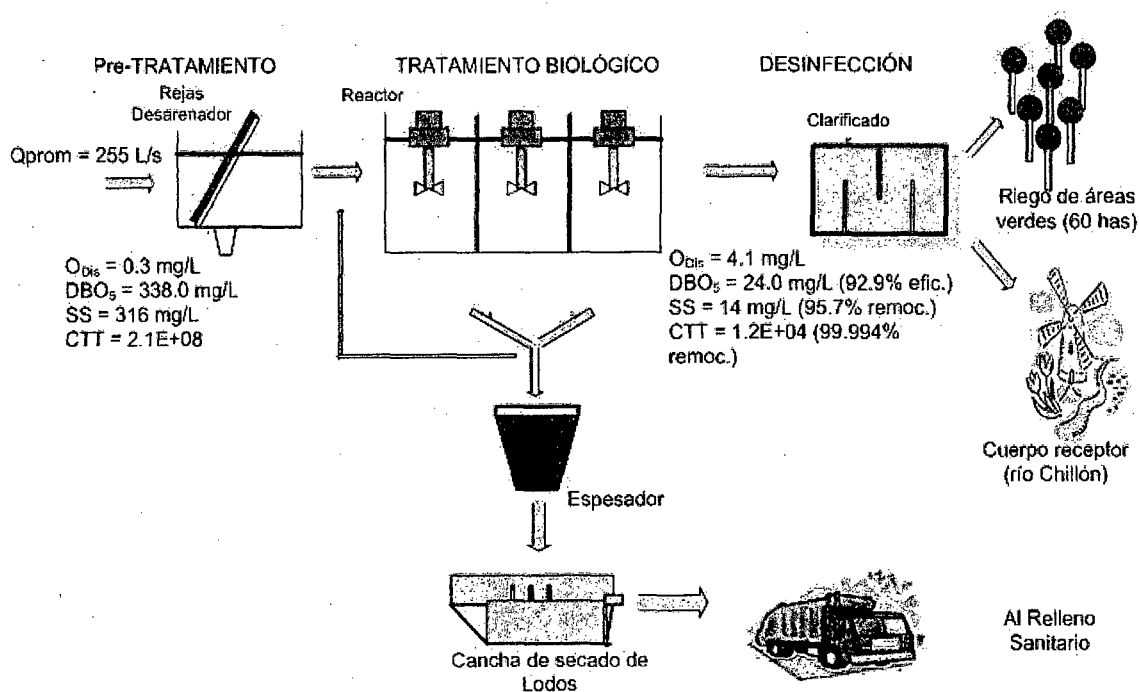
Fase B.- En esta fase y la siguiente, los desagües se admiten al tanque II. El oxígeno se introduce a los tanques I y II (condiciones aerobias). En el tanque III tiene lugar la sedimentación.

Fase C.- Durante la fase C, los desagües se siguen admitiendo al tanque II. La aeración tiene lugar tanto en el tanque II como en el tanque III. Los aeradores del tanque I están apagados para que se produzca la sedimentación. En esta fase, los vertederos de salida de los dos tanques exteriores están cerrados lo cual implica que el nivel en el sistema de tanques está aumentado en esta fase. Esto permite a los

lodos activados sedimentarse antes de que los vertederos de salida en el tanque se abran. El ciclo de operación está ya medio completo. En las siguientes tres fases D, E y F, se intercambian el flujo de entrada de aguas residuales, la descarga y las condiciones de proceso en los tanques I y III. Puesto que los microorganismos se reproducen continuamente, se remueve a diario la misma cantidad de lodos como lodos en exceso de los tanques exteriores durante la fase de sedimentación. Los lodos en exceso se bombean directamente al tratamiento de lodos.

GRÁFICO Nº 09

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PTAR PUENTE PIEDRA
Sistema de lodos activados de aireación extendida y SBR (Sequency Batch Reactor)



Fuente: Elaboración propia, a partir del brochure de Sedapal

● **Nitrificación.**- El contenido de nitrógeno en las aguas residuales crudas comprende en su mayor parte amonio y nitrógeno orgánico. La mayor parte del nitrógeno orgánico que no se acumula en los lodos activados es convertida en amonio por las bacterias. El amonio se convierte en nitrato por el proceso de nitrificación, que tiene lugar bajo condiciones aeróbicas y es un proceso que consume oxígeno y es inevitable en procesos de lodos activados de aeración prolongada.

● **Transmisor de Oxígeno.**- Dos transmisores de oxígeno ubicados en cada uno de los tanques de aeración y sus medidores que registran continuamente el nivel de oxígeno en el tanque de aeración. Durante los períodos aerobios, el sistema de mando

y control mantiene el contenido de oxígeno en cada tanque de aeración dentro de los límites predeterminados, mandando la operación de los aeradores y optimizando el consumo energético.

5.6.3.4 Tratamiento terciario

Cloración.- se utiliza para desinfectar el agua residual tratado antes de que sea descargado al cuerpo receptor o utilizado para otros propósitos. El efecto de la cloración depende de la cantidad de cloro que se añade, la temperatura y el tiempo de contacto. El cloro se dosifica de manera proporcional al caudal, las estructuras aguas abajo están equipadas de una zona de mezcla y una zona de contacto para obtener una desinfección eficiente.

5.7 TRATAMIENTO DE LODOS

El tratamiento de lodos constituye una parte fundamental de las plantas de tratamiento de aguas residuales, y supone un 50% del costo de inversión, además de los costos de mantenimiento y control. Se incluyen las siguientes etapas:

● **Estación de homogenización.-** Los lodos sedimentados en el tanque de aeración exterior son llevados mediante gravitación a esta estación, aquí tanto las variaciones hidráulicas como la de los sólidos en los lodos se igualan antes de un tratamiento adicional. De este modo se obtiene una calidad de lodos uniforme que permite un mejor control de la dosificación de polímero en el siguiente paso que es la deshidratación de los lodos.

● **Predeshidratación mecánica.-** su objetivo es obtener un rápido y extenso espesamiento³¹ del lodo para reducir la carga hidráulica en la subsiguiente unidad de

³¹ El espesamiento es conveniente (rentable), ya que permite reducir al mínimo el volumen para facilitar su manejo, transporte y almacenamiento. Los procedimientos más usuales son la centrifugación o flotación. El dimensionamiento de los espesadores requiere de datos técnicos de capacidad de espesamiento, velocidad ascensorial (que influye sobre la forma de la curva de sedimentación), altura del espesado y el tiempo de retención.

El tratamiento de los lodos incluye un proceso de estabilización o digestión, que puede ser aerobia o anaerobia. La digestión pasa por procesos de licuefacción, gasificación y mineralización, produciéndose un producto final inerte, libre de gases.

La digestión aerobia es la eliminación de la parte fermentable de los lodos en presencia de aire. Los microorganismos dentro del reactor reducen el volumen de los lodos, a la vez que se produce una mineralización de la materia orgánica, produciéndose anhídrido carbónico, agua y productos solubles inorgánicos. Se considera una disminución del 30 - 35% de sólidos en suspensión para una estabilización adecuada.

El proceso termofílico de la biodegradación de la materia orgánica (por el calor metabólico que produce) alcanza 45 - 65 °C de temperatura, y destruye patógenos.

deshidratación final. Se añade un polímero catiónico líquido para la floculación del lodo y luego se bombea directamente de la estación de bombeo a la unidad de predeshidratación. De allí pasa directamente a la deshidratación final, y el líquido de la deshidratación así como el agua de lavado se devuelven a la planta de tratamiento de las aguas residuales.

● **Dosificación de polímero.**- para el propósito de deshidratación mecánica, los lodos se mezclan con el polímero en la unidad mezcladora estática de polímero inmediatamente antes de la predeshidratación. El polímero es una emulsión, que es mezclada con el agua altamente diluida inmediatamente antes de la predeshidratación.

● **Deshidratación del lodo final.**- se efectúa para reducir el costo de disposición final del lodo. El sistema descarga directamente a un filtro banda con la adición de polímero antes de la unidad de predeshidratación, lo que constituye un ahorro en los costos de operación. Los lodos deshidratados son llevados a un tanque de almacenamiento o contenedor, y transportados a la cancha de secado hasta lograr una humedad de 5%. El retiro de los lodos depende de su concentración en los tanques, y debe ser 3kg lodo/m³ agua en el reactor tanque. La producción de lodo es de 580 TM/mes ó 6960 TM/año.

El lodo sale de la planta de tratamiento de aguas residuales con una humedad del 84% aprox., y se retira hacia la cancha de secado, en donde se logra obtener un lodo con 40 – 45% de humedad. El tiempo en el lecho de secado es aproximadamente 3 semanas. Este tiempo de secado responde al área disponible. El secado es variado, según la estación: En invierno es 1 semana en la cancha de secado con un espesor de secado de 1.0 cm. En verano es de 2 días, en la cancha de secado con un espesor de 10.0 cm. El área estimada del lecho es de 1 há a 1.2 há aprox. El lodo muestreado pertenece al área N° 1, que tiene un tiempo mínimo de secado de 10 días.

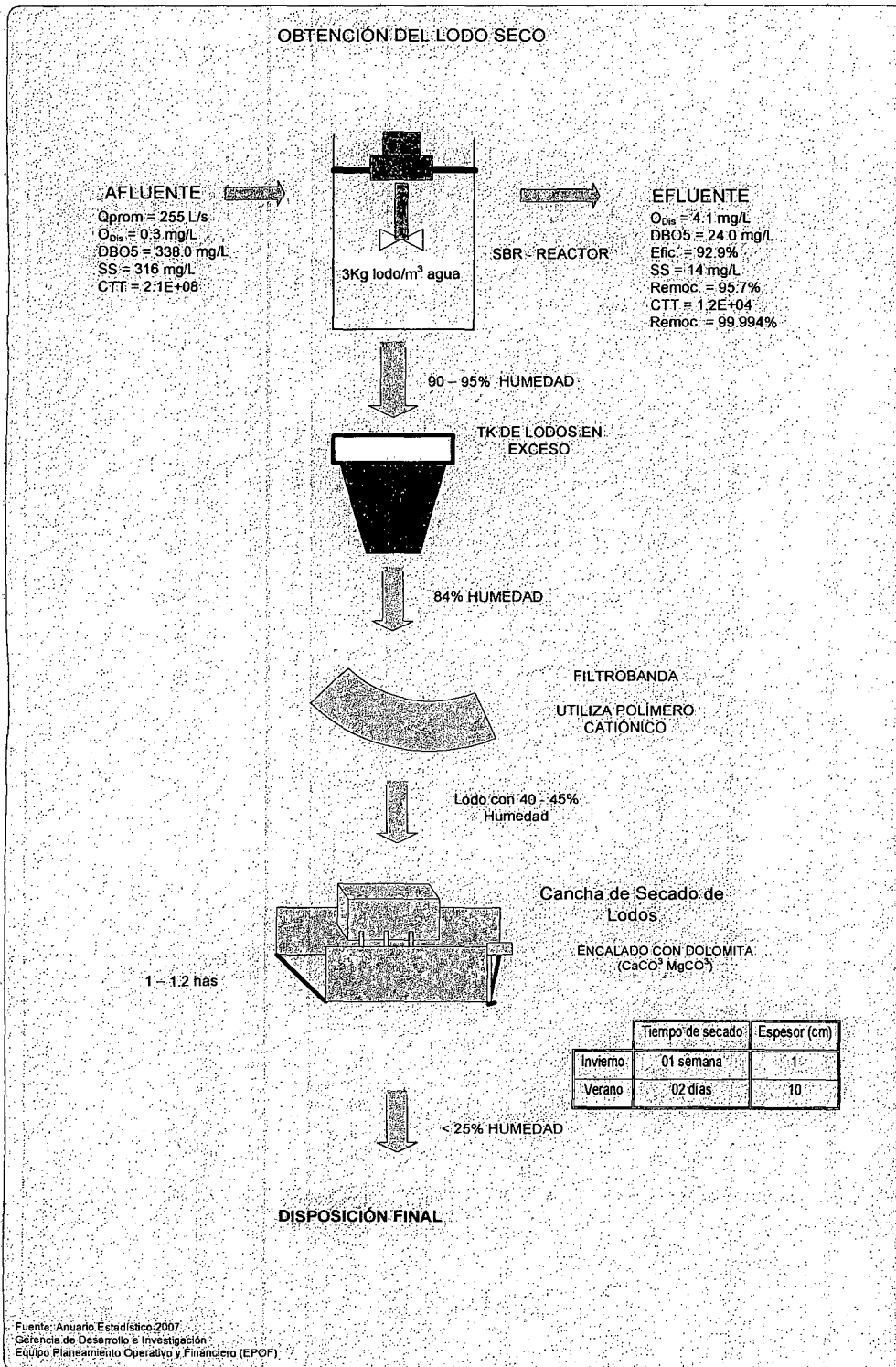
GRÁFICO N° 10
Cancha de secado del lodo
de la PTAR Puente Piedra



Fuente: <http://www.sedapal.com.pe>

La digestión anaerobia descompone la materia orgánica en ausencia de aire. El oxígeno necesario para su desarrollo lo obtiene del mismo alimento. Se considera el método más adecuado para obtener un producto final aséptico. (Torres, 2005)

GRÁFICO N° 11



VI. INGENIERÍA DEL PROYECTO

6.1 Generalidades

En el presente capítulo se abordaron los aspectos de interés del desarrollo de la investigación como son: la ubicación de la fase experimental, la caracterización de los materiales experimentales utilizados, los procedimientos aplicados en los ensayos para evaluar la fertilización de los lodos, establecido en la metodología y de acuerdo con en el cronograma de actividades, así como la evaluación estadística de los datos de las mediciones agronómicas y concentración de los elementos As, Hg, Pb, Cd y Cr, con el objetivo de determinar el aprovechamiento agrícola del lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra.

El trabajo experimental propiamente dicho comprendió principalmente el muestreo de los lodos y de la arena de río (utilizado como sustrato de mezcla), aplicando el protocolo de muestreo de la UNALM. Otro paso necesario fue la caracterización de los lodos, con el pH y la conductividad eléctrica. Sus valores no alteraron las condiciones requeridas para el desarrollo adecuado de la planta. Se analizaron metales pesados en el lodo seco antes de los ensayos, con resultados menores a los rangos exigidos.

Paso siguiente fue la fertilización en macetas de plástico de 4.0Kg de capacidad, y la siembra del maíz como cultivo indicador, siguiendo las técnicas que se aplican en la fertilización de suelos de la UNALM, por 60 días aprox. hasta el momento del corte de la planta. Un paso previo fue la molienda del lodo con el objetivo de uniformizar el tamaño de partícula de la mezcla lodo-suelo.

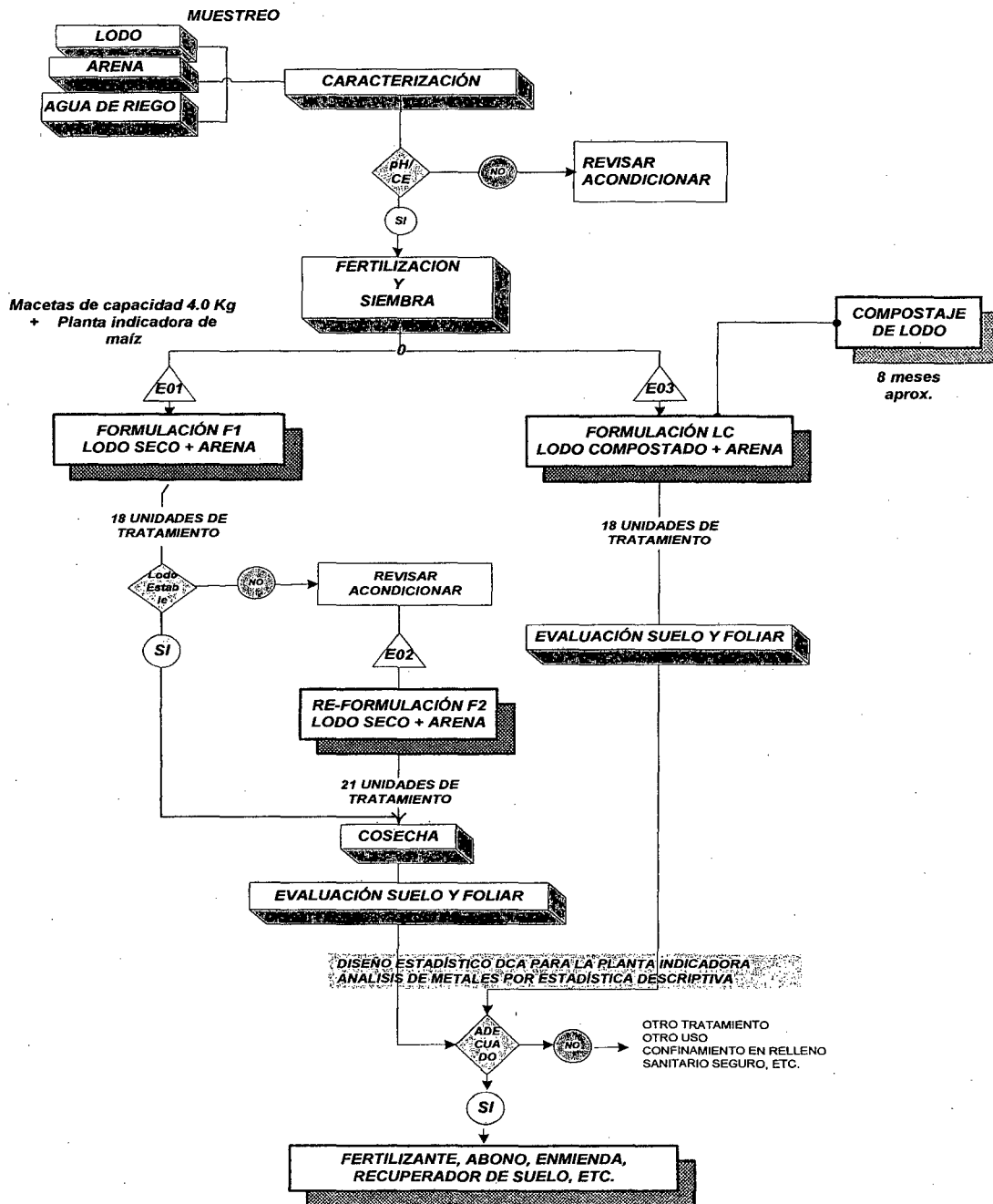
En el Ensayo N° 1 se instalaron y por triplicado 06 tratamientos con dosis de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lodo seco. El ensayo fue interrumpido aprox. a 10 días de la siembra, en vista de que los tratamientos con dosis de lodo no favorecieron el crecimiento de la planta. Se desmontó el ensayo y se reformuló.

En el Ensayo N° 2 se instalaron 07 tratamientos por triplicado y dosis de lodo de 0, 2, 4, 6, 8 y 10 % de lodo. Y, en el Ensayo N° 3 se instalaron 06 tratamientos por triplicado con dosis de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lodo previamente compostado para ese fin. Todos los ensayos incluyeron 01 testigo puro (arena de río) y otro Ctrl NPK (fertilizante inorgánico). Todos los tratamientos recibieron los mismos cuidados de riego a capacidad de campo y protección contra las aves. Se realizaron mediciones agronómicas de altura (H, cm) y espesor (D, cm), de la planta indicadora y el número de semillas emergentes (s), el peso fresco y peso seco de cada tratamiento. Se evaluó el efecto del lodo y de los metales en el suelo y en el crecimiento de la planta a través

del análisis estadístico de los datos aplicando el método de diseño completamente al azar – DCA para la planta y el análisis de los metales con la estadística descriptiva exploratoria preliminar. El gráfico N° 12 muestra el flujograma del contenido de la ingeniería del proyecto.

GRÁFICO N° 12

FLUJOGRAMA DE LA INGENIERÍA DEL PROYECTO



Fuente: Diseño propio (2007).

6.2 Ubicación y Materiales

6.2.1 Ubicación

La fase experimental del presente trabajo de investigación se realizó en el período comprendido entre enero de 2007 y enero de 2008, en la Estación de Invernadero de Fertilidad del Suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en el distrito de La Molina – Lima (coordenadas geográficas: 12°05'06" Lat. Sur, 75°57'00", Long. Oeste y a 243.7 msnm).

Las características climatológicas de temperatura ambiental (T_a) y de humedad relativa (HR) de la zona experimental durante toda la fase experimental fueron obtenidas de los registros del Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y se indican en el siguiente cuadro:

CUADRO N° 23

Características de Temperatura ambiental y Humedad Relativa

Mes	T_a (°C) Prom. Mensual	HR (%) Prom. Mensual
Año 2007		
Febrero	24.3	75
Marzo	24.4	79
Abril	22	79
Mayo	19.4	82
Junio	16	91
Julio	15.1	91
Agosto	14.7	90
Setiembre	14.9	88
Octubre	16.6	87
Noviembre	18.5	82
Diciembre	20.1	81
Año 2008		
Enero	23.9	80
Febrero	24.6	71
Marzo	25.3	74

Fuente: Observatorio Meteorológico "ALEXANDER VON HUMBOLT" – UNALM (desde Febrero 2007 hasta Febrero 2008)

La temperatura afecta profundamente el crecimiento y la actividad de los microorganismos y determina la velocidad de estabilización de los materiales orgánicos. La mayoría de los microorganismos en los lodos sanitarios son mesófilas, logrando su mayor desarrollo en un intervalo de 20 a 35°C, y a medida que la temperatura va aumentando durante el proceso de biodegradación aerobia, otro grupo de microorganismos empieza a predominar. Estos son los organismos termófilos aerobios que se desarrollan solo a temperaturas altas multiplicándose velozmente en

el intervalo de 40 °C a 65 °C, generando suficiente calor de tal manera que se eleva la temperatura a tal grado que destruye a los patógenos humanos. (Falcón, 2005). Del cuadro N° 26, se obtiene que la temperatura del ambiente promedio, durante todo el período de la fase experimental ha fluctuado entre los 14.7°C y 25.3°C.

La descomposición de la materia orgánica depende de la humedad para mantener la actividad microbiana. Un rango óptimo de humedad se encuentra entre 50% a 60%, mientras que demasiada humedad compacta el lodo, reduciendo la cantidad de espacios libres, y la humedad menor de 40% puede limitar la razón de descomposición. (Falcón, 2005). La humedad relativa promedio en el período de experimentación fue de 71% a 91%.

La presencia de amplias áreas con vegetación y forestación que existe en la ciudad universitaria facilitaron la obtención de una parte de los materiales (maleza, arena de río, agua para riego) que se utilizaron como insumo para la experiencia. Sumando la presencia profesional e institucional, determinaron que estas serían las condiciones adecuadas que sirvieron de criterios de selección para la zona de trabajo de la fase experimental del presente trabajo de investigación.

6.2.2 MATERIALES

6.2.2.1 Materiales Experimentales

Los principales materiales empleados en la fase experimental son:

- 1) Lodo seco procedente del tratamiento de las aguas residuales, para ser evaluado en su contenido de metales y utilizado como fertilizante alternativo.
- 2) Suelo: arena de río o arena lavada, obtenida de la cancha de arena de la UNALM para la macetería. Es el sustrato que se mezcla con el lodo.
- 3) Agua de riego, obtenido de dos fuentes: una para el riego de las macetas que fue obtenida del tanque de almacenamiento de agua potable para el laboratorio de fertilización de suelos y, la otra para el riego del lodo en la etapa de compostaje, obtenida de la poza de distribución para la UNALM.
- 4) Cultivo indicador: semillas de maíz, del programa de investigación -UNALM.
- 5) Fertilizantes inorgánicos: urea, superfosfato triple de calcio y cloruro de potasio.

6.2.2.2 Otros materiales y equipos empleados

Otros materiales auxiliares necesarios para la investigación, se indican en la siguiente tabla.

CUADRO N° 24**Otros materiales y equipos empleados**

De campo	De laboratorio
Macetas de plástico de 4 Kg	Estufa
Mesa de invernadero	Termómetro para medir sólidos
Mallas protectoras contra aves.	Balanza de precisión
Vasos de precipitación, 250 y 1000 ml	Balanza de 2 platos
Bandejas de plástico de 40*60 cm ²	Equipo de molienda (molino de laboratorio) y equipo de tamizado (diámetro, 2 mm).
Instrumentos para el compostaje: carretilla, lampa, trinche, balde, manguera, tijera, lija, wincha, caja para compostera, bolsas de polietileno de alta densidad y de primer uso, etc.	Equipo de protección: mandil blanco, mascarilla, guantes, toalla, elementos para desinfección.
Material de escritorio: Libreta de campo, plumón de tinta indeleble, cinta adhesiva, lápiz, etiquetas, etc.	Recipientes para secado de muestra, bolsas de plástico de primer uso.
Material fotográfico	Vernier (calibrar diámetro y longitud) bolsas de papel kraft, entre otros.

Fuente: elaboración propia

6.2.3 Caracterización de los materiales experimentales**6.2.3.1 Lodo**

El lodo es el principal material objeto de la presente investigación, procedente de la planta Puente Piedra, utiliza el proceso de lodos activados y reactor secuencial por etapas (SBR, sequency batch reactor), donde los lodos al final del tratamiento se recirculan y los microorganismos aceleran la remoción de contaminantes.

El exceso de lodos es retirado al tanque de lodos con una humedad de 85%, luego atraviesa un filtro banda donde es deshidratado utilizando un polímero catiónico con el fin de obtener un rápido espesamiento del lodo, lográndose una humedad inferior al 70% en peso. El lodo así obtenido se traslada a la cancha de secado y se seca a cielo abierto por varias semanas hasta reducir su humedad a menos de 25% en peso. Se le esparce cal para reducir la carga de patógenos y evitar la presencia de vectores (ratas, moscas, etc). Este material así obtenido, generalmente, es trasladado al relleno sanitario. Es en este lugar donde se obtuvieron muestras, según la metodología de la UNALM, y se trasladó al laboratorio para su análisis de pH, CE, MO, densidad, %H, metales pesados, principalmente los contenidos de arsénico, mercurio, plomo, cadmio y cromo, además de microbiológicos. Los análisis de los lodos se llevaron a cabo en los laboratorios de CERPER S. A. Se recogieron, además, cantidades de lodos de aprox. 50 Kg en cada oportunidad, para ser utilizados en los ensayos experimentales. El pH no es el mismo en cada punto del material, pero tiene la propiedad de autorregularse durante su proceso de aprovechamiento. El intervalo óptimo de pH para

el desarrollo de la mayoría de las bacterias está entre 6.0 y 7.5 y para los hongos se encuentra entre 5.5 a 8.0. Ver cuadro N° 22.

CUADRO N° 25

Características de los lodos N° 1 y N° 2 - PTAR Puente Piedra-Lima

PARAMETRO	Unidad	LODO N° 1 5 Febrero 2007	LODO N° 2 12 Marzo 2007
FISICOQUÍMICOS⁽¹⁾			
pH		6.97	6.82
Conductividad Eléctrica	mS/cm	4.69	3.65
Materia Orgánica	g/100g	41.94	61.55
Densidad	Kg/L		0.756
Humedad	g/100g		8.22
METALES PESADOS⁽²⁾			
Arsénico (As)	(mg/kg)	16.00	11.40
Mercurio (Hg)	(mg/kg)	0.725	0.81
Plomo (Pb)	(mg/kg)	49.6	48.49
Cadmio (Cd) *	(mg/kg)	< 2.00	<2.00
Cromo (Cr)	(mg/kg)	12.4	22.59
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS⁽³⁾			
Coliformes Fecales (CF)	NMP/g	14*10	>160,000
Escherichia coli (E. coli)	NMP/g	14*10	>160,000
Salmonella sp	NMP/g	6	>1600
ANÁLISIS PARASITOLÓGICO⁽⁴⁾			
Giardia lamblia, quistes	Nº/g	2	
Uncinaria. huevos	Nº/g	1	
Uncinaria, larvas	Nº/g	4	132

(1), (2). Laboratorio de División Ambiental de Certificaciones del Perú S.A.-CERPER S.A.

(3), (4). Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos y Aguas. Facultad de Ciencias Biológicas, UNMSM

(*) Límite de detección para el Cadmio: 2.00 mg/Kg.

6.2.3.2 Suelo

El suelo utilizado en todos los ensayos fue arena fina lavada, obtenida de la cancha de acumulación de la universidad. Esta arena es obtenida desde las orillas del río en una zona del distrito de Cieneguilla. Se requirieron una cantidad de 170Kg: 45Kg (Ensayo N° 1), 80Kg (Ensayo N° 2) y 45Kg (Ensayo N° 2). Se analizaron pH, conductividad eléctrica y CaCO₃ en la muestra de arena con la finalidad de garantizar la germinación de la planta. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Agua de la UNALM, los resultados se indican en el cuadro que sigue:

CUADRO N° 26

Características básicas de la arena utilizada como sustrato suelo

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
pH 1:1 (*)		7.38	Potenciométrico
CE _(1:1) (*)	dS/m	0.51	Lectura del extracto de relación suelo-agua 1:1
CaCO ₃ (*)	%	0.0	Gasó-volumétrico
Arsénico (as)	mg/kg	24.08	Generación de hidruros
Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0500	AA vapor frío
Plomo (Pb)	mg/kg	8.60	Absorción atómica
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 2.00	Absorción atómica
Cromo (Cr)	mg/kg	38.68	AA aspiración directa

Fuente: (*) Laboratorio de análisis de suelos, plantas y agua, UNALM Febrero, 2007.
Laboratorio de División Ambiental Certificaciones del Perú S.A.-CERPER S.A.

Los resultados obtenidos permiten su utilización como sustrato de mezcla con el lodo, y no afecta el crecimiento de las plantas.

6.2.3.3 Agua para riego

Se utilizaron dos fuentes diferentes de agua para la etapa experimental:

El agua para el riego de las macetas en la etapa de fertilización, fue obtenida del tanque de almacenamiento de agua potable del mismo laboratorio de fertilización de suelos denominado agua potable, mientras que, el agua utilizada para la preparación del lodo compostado fue obtenida del pozo que distribuye el agua a toda la ciudad universitaria de la UNALM al que se le denomina agua de riego.

CUADRO N° 27

Análisis del agua utilizado para el riego del lodo compostado

Parámetro	Unidad	Agua de riego (1)
C. E.	dS/m	3.71
pH	Unid. pH	7.00
o Ca	meq/L	20.66
o Mg	meq/L	5.66
o Na	meq/L	10.82
o K	meq/L	0.31
Suma de Cationes	meq/L	37.45
o Nitratos	meq/L	0.80
o Carbonatos	meq/L	1.41
o Bicarbonatos	meq/L	1.64
o Sulfatos	meq/L	6.97
o Cloruros	meq/L	28.10
Suma de Aniones	meq/L	38.92
Sodio	%	28.93
SAR		2.98
Boro	ppm	0.60
Clasificación del agua		C4S1

Fuente: Extraído de Sanchez, 2007. Tesis - Agronomía

Los resultados de los análisis fisicoquímicos fueron tomados de la tesis de Sánchez, 2007, que considera esta agua como salobre, con predominio de los cationes calcio y magnesio en la forma de sulfato y cloruros. La presencia de nitratos indica una fuente importante de nitrógeno para las plantas.

6.2.3.4 Cultivo indicador: Maíz (Zea mays L.)

El maíz es un cereal que pertenece a la familia POACEAE, genero *Zea* y especie *mays*, gramínea constituido de un tallo cilíndrico erecto de elevada longitud, sin ramificaciones, formado por la epidermis, tejido parenquimatoso y los haces vasculares; interiormente es carnoso, filamentoso y con alto contenido de agua; alcanza su máximo desarrollo cuando la panoja ha emergido totalmente y se ha iniciado la producción de polen. Puede medir de 0,6 a 4 m; su altura final y el diámetro son directamente afectados por la disponibilidad de agua, nutrimentos, temperatura y cantidad de luz. Las hojas crecen en la parte superior de los nudos en forma dística o alternada, son anchas, planas y largas, abrazándose al tallo mediante estructuras llamadas vainas, con un haz piloso adaptado a la absorción de energía. El maíz es una planta con anatomía típica, imprescindible que le confiere una mayor eficiencia en la fijación de CO₂, en el uso del agua, y le proporciona el potencial necesario para alcanzar altos niveles de productividad, en condiciones ambientales adecuadas y óptimas.

El maíz es uno de los cultivos de mayor interés en cuanto a su origen, estructura y variación. Las investigaciones han desarrollado tipos tan diferentes de maíz, que ha llegado a ser uno de los cultivos de mayor variabilidad genética y adaptabilidad ambiental sembrándose en latitudes desde 55°N a 40°S y desde el nivel del mar hasta 3800m de altitud. Existen cultivares menores de un metro de altura, de 40 a 42 hojas y una madurez de 340 días. Esa adaptabilidad, representada por genotipos variados, es paralela a su variable utilización ya sea como alimento natural, forraje y productos industriales.

Se eligió el maíz como cultivo indicador, además de la facilidad de contar con la disponibilidad de la semilla, porque es considerado un cultivo extractivo, resistente, que puede desarrollarse en una amplia variedad de suelos, así como por su velocidad de crecimiento y formación de materia seca, permitiendo ver rápida y claramente los efectos de la fertilización. El maíz es una planta vigorosa, de hojas anchas y gruesas. (Sánchez, 2007). Para la fertilización se emplearon las semillas híbridas de maíz

amarillo producidas por el programa de investigación y proyección social en maíz de la UNALM.

6.2.3.5 Fertilizantes inorgánicos: NPK

Se utilizó la urea como fuente de nitrógeno, superfosfato triple de calcio como fuente de fósforo y cloruro de potasio como fuente de potasio, todos proporcionados por el laboratorio de análisis de suelos y se utilizaron para fertilizar el tratamiento Ctrl NPK. Su formulación fue 300-400-200 y se utilizó para compararlo con los tratamientos con dosis de lodo. Los cálculos efectuados se muestran en el Anexo D.

Una vez formulada y calculada la dosis de fosfato, se pesa, se pulveriza y se mezcla en seco, y se homogeniza antes de la siembra. En el caso de los cristales blancos de urea y de cloruro de potasio, las dosis formuladas se pesan por separado, y se diluyen con agua en un matraz y se adiciona al agua de riego y se aplica al suelo.

A continuación, algunas características del fertilizante NPK y de sus componentes.

El NPK es una mezcla de elementos nutrientes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), importantes para la nutrición del maíz. La cantidad de fósforo en el suelo y en la planta es baja en comparación con el nitrógeno y el potasio, su deficiencia causa un crecimiento raquítico, maduración retardada, mal desarrollo de las raíces, las hojas y tallos adquieren un color morado-rojizo debido a la acumulación de azúcar en los tejidos y a la lentitud en el desarrollo y madurez de la planta.

El NPK se encuentra presente en la masa del lodo. Las recomendaciones generales para la aplicación de lodo en el suelo son en principio basadas en el reconocimiento de la limitación de su capacidad nutriente. Se considera que es capaz de complementar el uso de fertilizantes comerciales, de forma que sean obtenidas las tasas óptimas de crecimiento de los cultivos agrícolas. (Ramírez, 2006).

● Urea ($CO(NH_2)_2$), fuente de nitrógeno

Es un fertilizante de alta concentración de nitrógeno, su fórmula química es $CO(NH_2)_2$, peso molecular 60 y una ley de 45% de nitrógeno en forma de amida que pasa luego a nitrato para ser absorbido por el cultivo. Es menos absorbida que las sales amónicas y mayor movilidad en el suelo. No provoca aumento alguno de la conductividad eléctrica y constituye una forma inorgánica no disociada en la disolución. Se utilizó urea granulada de color blanco, que tiene una solubilidad muy alta (1.033g/l a 20°C) que se reduce con la temperatura, y su eficacia depende de las condiciones de extrema solubilidad antes de su aplicación al suelo (riesgo de lavado). (Ramírez, 2006).

La dosis formulada, se pesa, se diluye en agua fría y se adiciona al agua de riego para su aplicación. Se requirieron 300 ppm de nitrógeno, que equivale a 2608.7 mg de urea/maceta de 4 Kg.

● **Superfosfato triple de calcio ($Ca(H_2PO_4)_2$), fuente de fósforo**

El STC se obtiene mediante el ataque con ácido fosfórico de los fosfatos naturales, posee entre 46 a 47% de P_2O_5 , de los cuales el 40 a 49% se halla en forma asimilable como ortofosfato monocálcico, muy soluble en agua (90%), presenta de 1 a 5% de contenido de azufre. Su presentación comercial es generalmente, granulado de color pardo oscuro, no influye sobre el pH. Los mejores resultados se obtienen en suelos neutros o ligeramente ácidos. (Ramirez, 2006).

La dosis formulada, se pesa, se pulveriza y se mezcla en seco con la arena hasta su homogenización antes de la siembra. Se requirieron 400 ppm de P_2O_5 , que equivale a 3.5 g de STC/maceta de 4 Kg.

● **Cloruro potásico (KCl), fuente de potasio**

Densidad 1.99 g/cc, higroscópico de 14.3 a 20°C; se encuentra en grandes cantidades en el suelo, pero sólo un 2% es directamente utilizable por la planta (disponibilidad), mediante su disolución en las soluciones del suelo y un 10% queda retenido en las arcillas y lenta disponibilidad para las plantas. Su mayor producción proviene de la silvinita y tiene que ser refinado mediante el proceso de cristalización o de flotación antes de su utilización como fertilizante. En el mercado, el KCl se dispone en cinco presentaciones, blanco soluble, estándar especial, estándar grueso y granular; y en forma pura se presenta como cristales cúbicos blancos. (Ramirez, 2006).

CUADRO N° 28

Características del fertilizante NPK empleado

Característica	Urea	SFT	KCl
Fórmula	$CO(NH_2)_2$	$Ca(H_2PO_4)_2$	KCl
Ley	46% NH_2	46% P_2O_5	60% K_2O
Índice de salinidad	75	10	114
Índice de acidez	8.0	-	-
Índice de alcalinidad	-	Neutro	Neutro
Higroscopicidad (30°C)	27.5	Bajo	16

Fuente: Clemente, 2007

Leyenda: $CO(NH_2)_2$ (Urea); KCl (Cloruro de potasio); SFT (Super fosfato triple)

La dosis formulada, se pesa, se diluye junto con la urea en el agua fría y se adiciona al agua de riego para su aplicación. Se requirieron 200ppm de K_2O , que equivale aproximadamente a 1.0g de KC por maceta de 4 Kg.

6.3 METODOLOGÍA

6.3 1 CRONOGRAMA DE LA FASE EXPERIMENTAL

La fase experimental tuvo una duración de un año (Enero 2007 - Febrero 2008), e incluyó tres ensayos experimentales. El cuadro N° 29 detalla las actividades realizadas

Cuadro N° 29

Cronograma de Actividades de la Etapa Experimental

FECHA	ACTIVIDADES
10-01-07	Actividades previas: Muestreo y recolección de lodos, arena y maleza
23-01-07	Instalación del área de trabajo y de materiales a usarse
Ensayo N° 1: "Influencia de la dosis de lodo seco en la primera formulación, medición de metales inicial y final y de la planta indicadora"	
05-02-07	Muestreo de Lodo N° 1 utilizado en el primer ensayo
06-02-07	Preparación de suelo y fertilizantes y formulación del lodo
13-02-07	Molienda del lodo N° 1
19-02-07	Instalación del Ensayo N° 1
20-02-07	Siembra de la planta indicadora – Maíz
03-03-07	Desinstalación del Ensayo N° 1
Ensayo N° 2: "Influencia de la dosis de lodo seco en la reformulación y medición de metales inicial y final y de la planta indicadora".	
21-03-07	Reformulación e Instalación del del Ensayo N° 2
21-05-07	Desinstalación del Ensayo N° 2
28-05-07	Cálculo de los datos biométricos de la planta indicadora y de metales pesados
Ensayo N° 3: "Influencia de la dosis de lodo compostado y medición de metales inicial, final y de la planta indicadora".	
05-03-07	Preparación de materiales para el compostaje (Lodo y maleza)
13-03-07	Muestreo de Lodo utilizado en el Ensayo N° 3
13-03-07	Molienda del lodo
16-03-07	Instalación del sistema de compostaje del Lodo
24-10-07	Desmontaje del sistema del Lodo compostado
25-10-07	Molienda del Lodo compostado
26-10-07	Instalación del sistema de fertilización del Ensayo N° 3
21-01-08	Desinstalación del Ensayo N° 3
25-01-08	Cálculo de los datos biométricos de la planta indicadora y de metales pesados.

Fuente: Elaboración propia. Mayo, 2008

6.3.2 Actividades previas: Muestreo y recolección de materiales

6.3.2.1 Muestreo y recolección de los lodos

Los muestreos y la recolección de los lodos fueron realizados en dos fechas.

Lodo N° 1 (Ensayo N° 1 y N° 2): 05 de Febrero de 2007

Hora de muestreo: 9:00hr.

Temperatura del ambiente: 23°C

Cantidad de lodo recolectado: 50Kg aprox.

Lodo N° 2 (Ensayo N° 3): 12 de Marzo de 2007

Hora de muestreo: 9:00hrs

Temperatura del ambiente: 23 °C

Cantidad de lodo recolectado: 50 Kg aprox.

Preparación del lodo compostado, que luego fue utilizado en la fertilización.

En ambos casos, el lugar de muestreo y recolección de los lodos fue la cancha de secado del lodo. El lodo se presenta conglomerado formando bloques de diversos tamaños y de consistencia algo dura, por lo que fue necesario llevarlo a la molienda hasta obtener gránulos finos de lodo antes de la aplicación. Esta operación permitió obtener la máxima homogeneidad posible de las partículas y facilitó su manipulación en la mezcla. Se sabe que la respuesta al tamaño del gránulo del fertilizante aumenta cuando éste se reduce, logrando una amplia superficie de contacto suelo-fertilizante-planta (aumento de la tensión superficial), esto acelera la disolución de la fuente de fertilizante. Es un factor muy importante y una recomendación que se aplica a los fertilizantes sólido. (Sánchez, 2007). Para esta operación se utilizó el equipo de molienda del laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

Se realizó la caracterización de los lodos analizando los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica y materia orgánica, análisis de metales arsénico, mercurio, plomo, cadmio y cromo, en el Laboratorio de División Ambiental de Certificaciones del Perú CERPER SA, y los análisis microbiológicos se realizaron en el Laboratorio de Control de calidad de alimentos y aguas de la facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. En todos los casos se siguieron las recomendaciones de la EPA Guide to the Part 503 Rule – págs. 129 a 131, así como la siguiente hoja técnica del Laboratorio de la guía para muestreo del laboratorio de

análisis de suelo, plantas, agua y fertilizantes de la UNALM (Cuadro N° 30) Los resultados obtenidos permitieron continuar con los ensayos experimentales.

CUADRO N° 30

**HOJA TÉCNICA
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Salinidad		Reacción o pH	
Clasificación del Suelo	CE	Clasificación del Suelo	pH
* Muy ligeramente salino	<2	Fuertemente ácido	<5.5
* Ligeramente salino	2 – 4	Moderadamente ácido	5.6 - 6.0
* Moderadamente salino	4 – 8	Ligeramente ácido	6.1 – 6.5
* Fuertemente salino	>8	Neutro	7.0
		Ligeramente alcalino	7.1 – 7.8
		Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4
		Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y Fertilizantes – Facultad de Agronomía – UNALM.

Materia Orgánica	
Clasificación	%
*bajo	<2.0
*medio	2 – 4
*alto	>4.0

Fuente: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y Fertilizantes – Facultad de Agronomía – UNALM.

6.3.2.2 Muestreo y recolección de la arena de río

Muestra: arena de río de grado fino (0.25 – 0.30 mm) lavada.

Muestreo: 07 de Febrero de 2007

Hora: 9:00hrs

Temperatura del ambiente: 23.5 °C

Cantidad: 150 Kg, para todos los ensayos.

Lugar del muestreo: Cancha de acumulación de arena de la UNALM

Para la arena se realizaron análisis básico de suelo en el laboratorio de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la UNALM. Los análisis de metales fueron realizados en CERPER S.A. La arena como sustrato de soporte, es un suelo pobre, tiene bajo contenido de materia orgánica y es incapaz de retener los nutrientes liberados por los fertilizantes. Esta propiedad favoreció la evaluación de los tratamientos y las dosis aplicadas.

6.3.2.3 Recolección de la maleza

Muestreo: 13 de Abril de 2007

Cantidad: 50 Kg aprox.

Se recolectaron residuos de la poda de las áreas verdes de la misma universidad a los alrededores del laboratorio. No se analizaron metales en la maleza.

Una vez acumulado y pesado la cantidad de residuos para el compostaje, se procedió a picar y mezclar las hojas y las ramas delgadas utilizando algunos materiales específicos para ese fin (tijeras, hoz, etc). Este proceso permite obtener fuentes de carbono y nitrógeno.

6.3.3 Montaje del experimento

La preparación y montaje del experimento en macetas y en invernadero se realizó a través de un conjunto consecutivo de 03 ensayos de fertilización, cada uno por triplicado, en macetas con capacidad de 4Kg y con drenaje; las dosis de lodo y arena fueron establecidas en cada formulación. Cada Tratamiento contenía 6 semillas de maíz. Los ensayos fueron

- Ensayo N° 1: "Influencia de la dosis de lodo seco en la primera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora".
- Ensayo N° 2: "Influencia de la dosis de lodo seco en la segunda formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora".
- Ensayo N° 3: "Influencia de la dosis de lodo compostado en la tercera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora".

A continuación se detalla cada uno de los ensayos.

6.3.3.1 Ensayo N° 1: “Influencia de la dosis de lodo seco en la primera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora”

Procedimiento

- Caracterización del lodo y de la arena.
 - Se pesan los componentes por separado en las proporciones calculadas, luego se mezclan, homogenizan, y se coloca en cada uno de los tratamientos respectivamente.
 - Los tratamientos N° 1-T (testigo puro), 2-T, 3-T, 4-T y 5-T recibieron la dosis de 0, 1, 2, 3 y 4Kg de lodo seco para 0, 25, 50, 75 y 100% de lodo y arena en proporciones de 4, 3, 2, 1 y 0 Kg por tratamientos respectivamente.
 - **Fertilización:** del Control NPK o tratamiento 6-T (NPK:300-400-200) con una dosis única de super-fosfato-triple granulado, pulverizado y mezclado en seco con la arena; la urea y el cloruro de potasio dosificados en 3 partes, diluido con agua potable, la primera fracción al momento de la siembra, la segunda y la tercera fracción en las dos semanas siguientes respectivamente, así hasta completar la dosis total. Es.
 - **Siembra:** 6 semillas/tratamiento a una profundidad de 3cm desde la superficie del suelo.
 - **Riego:** recibió aprox. 200ml/día/tratamiento de agua potable, manteniéndose la capacidad de campo (suelo húmedo) durante todo el ensayo.
- Se prepararon 18 tratamientos y se ubicaron en la mesa de invernadero con mallas protectoras contra aves.
- Al cuarto día de la siembra, germinaron las semillas de los tratamientos control (1 y 6) y su desarrollo fue normal en los días siguientes. Mientras, los tratamientos 2, 3, 4 y 5 no germinaron, el olor fétido del lodo empezó a aumentar con los días.
 - Al décimo día se procedió a desmontar el sistema y se reformuló el ensayo.

El cuadro siguiente muestra las proporciones de cada uno de los tratamientos evaluados en el Ensayo N° 1.

CUADRO N° 31

Balance de materiales del Ensayo N° 1

N° Tto	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN	PORCENTAJE	COMPOSICIÓN DE LAS PROPORCIONES	MACETA
1	1-A, 1-B, 1-C	0% de lodo y 100% de arena	0.0 Kg de lodo + 4.0 Kg de arena	Testigo puro, sólo arena
2	2-A, 2-B, 2-C	25% de lodo y 75%de arena	1.0 Kg de lodo + 3.0 Kg de arena	Muestra 25% lodo seco
3	3-A, 3-B, 3-C	50% de lodo y 50% de arena	2.0 Kg de lodo + 2.0 Kg de arena	Muestra 50% lodo seco
4	4-A, 4-B, 4-C	75% de lodo y 25% de arena	3.0 Kg de lodo + 1.0 Kg de arena	Muestra 75% lodo seco
5	5-A, 5-B, 5-C	100% de Lodo y 0% de arena	4.0 Kg de lodo + 0.0 Kg de arena	Muestra 100% lodo seco
6	6-A, 6-B, 6-C	NPK (300-400-200)	0.0 Kg de lodo + 4.0 Kg de arena	Muestra control NPK

Elaboración del Diseño Experimental

6.3.3.2 Ensayo N° 2: “Influencia de la dosis de lodo seco en la segunda formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora”.

Procedimiento

- El ensayo se procedió en forma idéntica al anterior, reformulando las dosis de lodos. El cuadro N° 29 muestra las proporciones de la reformulación.
- Tratamiento 1-T: es el testigo puro o absoluto, solo arena.
- Los tratamientos N° 2-T, 3-T, 4-T, 5-T y 6-T, recibieron según la dosis de 0, 2, 4, 6, 8 y 10% lodo seco en la mezcla con arena en cada tratamiento respectivamente.
- **Fertilización:** solamente el tratamiento 7-T recibió el fertilizante NPK (400-300-200). Denominado Control NPK.
- **Siembra:** cada tratamiento con 6 semillas de maíz a 3cm de profundidad.
- **N° de tratamientos:** 21 en total, instalados sobre la mesa de invernadero con mallas protectoras contra aves, hasta que crecieron hasta 2 meses como máximo.
- **Riego:** cada maceta recibió aprox. 200 ml/día agua potable, manteniendo su capacidad de campo (suelo húmedo) durante todo el ensayo.
- **Crecimiento de las semillas:** el brote se inició en el cuarto día de la siembra.
- **Mediciones:** se midieron las variables agronómicas de altura del tallo (H, cm) utilizando una regla graduada considerando como punto de división el primer nudo sobre la superficie del suelo; el espesor del tallo (D, mm) en el tallo sobre el mismo punto de división, utilizando un vernier; el número de plántulas que emergieron³² (s). Se extrajeron las plantas manualmente. La parte aérea de la planta se pesó en fresco y luego en seco (estufa a 70°C por 8h.) y se determinó la materia seca por tratamiento.
- Se desinstala el sistema el 21 de Mayo de 2007.
- Se trasladan las muestras a laboratorio para su evaluación de metales mercurio, plomo, cadmio cromo y el arsénico, en el lodo, en el suelo antes y después del ensayo, y en la planta de las macetas 1, 4 y 7.

³² Plántulas emergentes, se refiere al afloramiento de las plántulas después de la germinación. La germinación – emergencia es una fase crítica y fundamental para el establecimiento óptimo de cualquier cultivo.

Cuadro N° 32**Balance de materiales del Ensayo N° 2**

N° Tto.	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN	PORCENTAJE	COMPOSICIÓN DE LAS PROPORCIONES	MACETA
1	1-A, 1-B, 1-C	0% de lodo y 100% de arena	0 000Kg de lodo + 4.00Kg de arena	Testigo absoluto, sólo arena
2	2-A, 2-B, 2-C	2% de lodo y 98%de arena	0.080Kg de lodo + 3.92Kg de arena	Muestra 2% lodo seco
3	3-A, 3-B, 3-C	4% de lodo y 96% de arena	0.160Kg de lodo + 3.84Kg de arena	Muestra 4% lodo seco
4	4-A, 4-B, 4-C	6% de lodo y 94% de arena	0.240Kg de lodo + 3.76Kg de arena	Muestra 6% lodo seco
5	5-A, 5-B, 5-C	8% de Lodo y 92% de arena	0.320Kg de lodo + 3.68Kg de arena	Muestra 8% lodo seco
6	6-A, 6-B, 6-C	10% de Lodo y 90% de arena	0.400Kg de lodo + 3.60Kg de arena	Muestra 10% lodo seco
7	7-A, 7-B, 7-C	NPK (300-400-200)	0.000Kg de lodo + 4.00Kg de arena	Muestra control NPK

(i) Actividades de preparación del lodo compostado**Materiales e instrumentos utilizados**

En el cuadro N° 33 se indica la relación de insumos utilizados y los materiales se encuentran indicados en el cuadro N° 24.

CUADRO N° 33

Insumos para el compostaje

Insumos	Cantidad
Lodo	50 Kg
Rastrojo y hojas verdes	50 Kg
Agua	1.0 m ³ aprox.

(ii) Metodología aplicada a la preparación del lodo compostado

Una forma práctica de preparar compost es el tradicional y sistemático "Método INDORE", practicado por primera vez por Sir. Albert Howard, agrónomo del gobierno inglés. (India, 1905-1934), que lo realizó para atender la necesidad de mejoramiento de suelos y de los cultivos. Consiste en disponer los materiales orgánicos en capas alternadas de materiales vegetales y estiércol de ganado, formando una pila sobre el suelo. Howard concluyó que estos sistemas mejoran la fertilidad del suelo debido al abundante humus que producen.

GRÁFICO N° 13**PREPARACIÓN DE LODO COMPOSTADO**

SECUENCIA DE COLOCACIÓN DE MATERIALES



Esquema de distribución de los componentes del compostaje de lodo. Esquema propuesto por Eder Falcón (2005)

Esta metodología es la misma que se proporcionan en los cursos de compostaje de la UNALM. Las cantidades se calcularon siguiendo las recomendaciones de Falcón, 2005.

(iii) Construcción de las pilas de compostaje

Se colocaron los materiales a compostar a manera de "sándwich". (gráfico N° 13)

Estabilización mediante compostaje.- el experimento se realizó en el invernadero de la misma estación experimental de la facultad de Agronomía de la UNALM. Las pilas aireadas se diseñaron a escala experimental con las dimensiones: base 0.6, alto 0.4, largo 0.6, y montadas en cajas de madera sobre una base de plástico. Se colocaron los reiduos vegetales picados y húmedos, formando la primera capa, luego se esparció el lodo hasta alcanzar la altura de 5 cm aprox., se humedece el lecho. Una vez mas se repite todo el procedimiento, hasta formar la pila de compost con capas alternadas, hasta alcanzar la altura de 40 cm. Se controló la temperatura de la pila (19 – 35°C) y se realizaron 02 volteos mensuale con riego cuya frecuencia estuvo determinada por la evolución de la temperatura. El proceso duró desde el 16 de marzo de 2007 hasta el 26 de Octubre de 2007. Se obtuvo un fertilizante orgánico de color marrón oscuro, y se llevó una muestra al laboratorio para análisis de metales. El material final pasó por molienda para homogenizar el producto, actividad que fue realizada en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Universidad Nacional del Callao. Los resultados de laboratorio del compost obtenido fue como sigue:

CUADRO N° 34

Caracterización del Compost preparado con lodos de PTAR

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
pH	7.86	Cd, mg/Kg	6.75
CE, dS/m	0.33	Cr, mg/Kg	20.0
CaCO ₃ , %	0.2	As, mg/Kg	42.10
Pb, mg/Kg	0.37	Hg, mg/Kg	0.540

Fuente: Resultados del laboratorio CERPER (2007)

Paso siguiente, se instala el sistema de fertilización.

6.3.3.3 Ensayo N° 3: “Influencia de la dosis de lodo compostado en la tercera formulación, medición de metales antes y después de la fertilización y de la planta indicadora”.

Procedimiento (idéntico al Ensayo N° 1)

- Se pesaron por separado los materiales arena y lodo seco, luego se mezclaron en las proporciones establecidas, se homogenizaron y se colocaron en cada una de las macetas de 4 Kg respectivamente.

- Tratamiento 1–T: testigo puro o control absoluto, arena sin adición de fertilizante.

- Los tratamientos N° 2-T, 3-T y 4-T recibieron la dosis propuesta para este ensayo que fue 1, 2 y 3Kg de lodo compostado equivalente a 25, 50 y 75 % respectivamente, mezclándose con arena hasta completar 4Kg/tratamiento.

- El tratamiento 5-T recibió 4Kg de lodo compostado, equivalente al 100%.

- **Fertilización** en la maceta 6-T con el fertilizante inorgánico NPK: 300-400-200, idéntico al utilizado en los ensayos anteriores. Una dosis única de súper-fosfato-triple granulado, que se pulveriza y se mezcla en seco con la arena. La urea y el cloruro de potasio se dosifican en 3 partes, diluido con el agua de riego, la primera fracción al momento de la siembra, la segunda y tercera fracción en las dos semanas siguientes respectivamente, hasta completar la dosis total.

- **Siembra:** se sembraron 6 semillas de la planta indicadora de maíz/ tratamiento, distribuyéndose a una profundidad de 3 cm desde la superficie del suelo.

- **Riego:** cada tratamiento se regó con aprox. 200 ml de agua potable diariamente, manteniendo la capacidad de campo (suelo húmedo) durante todo el ensayo.

- Se prepararon 18 tratamientos en total y se ubicaron en la mesa de invernadero con mallas protectoras contra aves, en el campo experimental del laboratorio de fertilidad de suelos.

- Al cuarto día de la siembra, empezaron a emerger las semillas en todas las macetas, y su crecimiento fue normal en los días siguientes.

- Del mismo modo que en los ensayos anteriores se mantuvo un régimen de agua, a capacidad de campo y se realizaron mediciones del tallo y del espesor del maíz y se contaron la cantidad de semillas emergentes.

- Al final del ensayo se tomaron muestras de suelo y planta para análisis de metales. Se desinstala el sistema el 21 de Enero de 2008

Observación: como se puede observar en la fotografía del gráfico siguiente, el crecimiento de la planta de maíz presentó mayor tamaño y también mayor espesor, en

el tratamiento con mayor dosis de lodo compostado (tratamiento 5). Cabe resaltar que los tratamientos con menores tamaños fueron el 1-T y 7-T(control NPK).

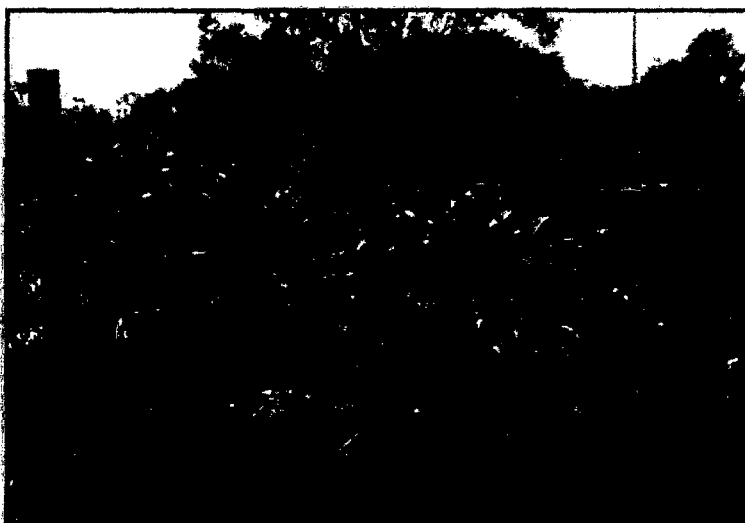
GRÁFICO N° 14

Tratamientos Ensayo N° 2



Se observa el crecimiento del maíz a los 60 días de la siembra. (21/05/2007)

Sistema de macetas – Ensayo N° 3



Después de 45 días de la siembra, se observa El avance del crecimiento de la planta indicadora de maíz. (5 Enero 2008).

CUADRO N° 35**Balance de materiales del Ensayo N° 3**

N° Tto	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN	PORCENTAJE	COMPOSICIÓN DE LAS PROPORCIONES	MACETA
1	1-A, 1-B, 1-C	0% de lodo compostado y 100% arena	0.0 Kg de lodo compostado + 4.0 Kg arena	Testigo puro, sólo arena
2	2-A, 2-B, 2-C	25% de lodo compostado y 75% arena	1.0 Kg de lodo compostado + 3.0 Kg arena	Muestra 25% lodo compostado
3	3-A, 3-B, 3-C	50% de lodo compostado y 50% arena	2.0 Kg de lodo compostado + 2.0 Kg arena	Muestra 50% lodo compostado
4	4-A, 4-B, 4-C	75% de lodo compostado y 25% arena	3.0 Kg de lodo compostado + 1.0 Kg arena	Muestra 75% lodo compostado
5	5-A, 5-B, 5-C	100% de Lodo compostado y 0% arena	4.0 Kg de lodo compostado + 0.0 Kg arena	Muestra 100% lodo compostado
6	6-A, 6-B, 6-C	0% de Lodo compostado y 0% arena	0.0 Kg de lodo compostado + 0.0 Kg arena	Muestra 0% lodo compostado
	7-A, 7-B, 7-C	NPK (300-400-200)	0.0 Kg de lodo compostado + 4.0 Kg arena	Muestra control NPK

6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

6.4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental empleado en el presente trabajo de investigación es el Diseño Completamente al Azar (DCA), ó diseño de clasificación de una sola vía (*one way*), en él los tratamientos constituyen el único criterio de clasificación para las unidades experimentales que son bastante homogéneas y con una muy pequeña variabilidad. Se aplica el Modelo de Efectos Fijos ya que se ajusta a los niveles de los factores en estudio y es válida para su evaluación. El modelo estadístico determinado que se usará para poner a prueba la hipótesis planteada es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, 2, \dots, \tau \\ j = 1, 2, \dots, r \end{array}$$

Donde :

Y_{ij} = rendimiento observado

μ = efecto de la media general

τ_i = efecto del i – ésimo tratamiento o

ε_{ij} = efecto del error experimental en el i – ésimo tratamiento o con j – ésima repetición

τ = tratamiento

r = repetición

Las hipótesis son:

* En términos de los efectos de los tratamientos :

$$H_0 : \tau_i = 0 \quad \forall i$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad \forall \text{ al menos a algún } i$$

* En términos de las medias de los tratamientos :

$$H_0 : \mu_i = \mu \quad \forall i$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu \quad \forall \text{ al menos a algún } i$$

La hipótesis nula H_0 implica que con todos los tratamientos se obtienen los mismos resultados. La hipótesis H_1 implica que con al menos uno de los tratamientos se obtiene un resultado que es diferente a los demás.

- **Factor en estudio**, es la dosis de lodo, es la variable independiente que afecta los resultados de los tratamientos del experimento, su valor es controlado, y su efecto durante la fase de crecimiento se evalúa en los resultados.
- **Niveles del factor**, son los distintos valores en la dosis del lodo, asumidos en cada ensayo. Los cuadros balance de materiales explican los contenidos de los ensayos.
- **Unidad experimental**: es cada uno de los tratamientos (maceta de 4 Kg).
- **Tratamiento**, Es la combinación de los niveles de los factores en estudio, es decir, el conjunto de procedimientos cuyo efecto se mide y compara con otros tratamientos.
- **Error experimental**, puede darse como variabilidad inherente al material experimental o por el resultado de la variabilidad en la manipulación del experimento.
- **Variable respuesta**: los efectos de los tratamientos en las unidades experimentales.
 - a) Altura máxima de la planta (cm)
 - b) Espesor del tallo de la planta (D, cm)
 - c) Emergencia de las plántulas (s)
 - d) Peso fresco de la planta (g)
 - e) Peso seco de la parte aérea de la planta (g)

La variancia descompone la variabilidad total de los resultados del experimento en sus fuentes de variación, tratamiento y error experimental, con la finalidad de compararlas e identificar su importancia relativa en la explicación de la variabilidad total.

CUADRO N° 36
Estadística del ANVA

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F_c
Tratamientos	$\tau - 1$	$\sum_{i=1}^{\tau} \frac{Y_i^2}{r_i} - TC$	$\frac{SC_{Trat}}{gl_{Trat}}$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_{Error}}$
Error Experimental	$r - \tau$	$\sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=1}^{r_j} Y_{ij}^2 - \sum_{i=1}^{\tau} \frac{Y_i^2}{r_i}$	$\frac{SC_{Error}}{gl_{Error}}$	
TOTAL	$r - 1$	$\sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=1}^{r_j} Y_{ij}^2 - TC$		

CUADRO N° 37

Fuentes de variación del análisis ANVA para prueba de hipótesis

Fuente de variación	Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3
Factor - estudio	Dosis de lodo	Dosis de lodo	Dosis- lodo compostado
Niveles del factor	0 (testigo), 25, 50 y 100% lodo mezcla lodo-suelo y NPK	0(testigo), 20, 40, 60, 80 y 100% lodo en la mezcla lodo-suelo, NPK.	0 (testigo), 25, 50, 100% LC en la mezcla LC-arena, y NPK.

Leyenda: Lodo, es el lodo seco en la mezcla lodo-arena. LC = Lodo compostado preparado a partir del lodo seco y maleza. Sustrato suelo = arena

El coeficiente de variabilidad (coeff. Var) es una medida usada para evaluar el grado de homogeneidad de los resultados del experimento. En investigaciones con plantas en invernadero, valores menores <50% ofrecen confiabilidad de los resultados, mientras que valores mayores al indicado, muestran amplia dispersión, y no existe independencia de las condiciones exigidas por el modelo, y los resultados no son confiables.

El modelo incluye la Prueba de Tukey de comparaciones múltiples ($P \leq 0,05$), que permite evaluar la significancia de la hipótesis planteada, de las diferencias entre los tratamientos, y con un solo valor juzga dicha significancia. Es rápido y fácil de usar.

El análisis estadístico se realizó con el software *Statistical Analysis Software-SAS vs 8*.

Todos los cálculos de la evaluación estadística de las variables biométricas, así como los resultados de laboratorio de los elementos As, Hg, Pb, Cd y Cr se adjuntan en el Anexo A.

6.4.2 Evaluaciones experimentales

Fueron evaluados las siguientes variables

6.4.2.1 Variables biométricas

a. Evaluaciones biométricas principales

Denominadas variables biométricas, por ser características de los sistemas biológicos susceptibles de ser cuantificados y que pueden ser influenciadas por el medio ambiente, en el que se encuentran los elementos nutritivos. Estas variables son la Altura y Espesor de tallo de la planta (cm), medidos desde el nudo del tallo hasta el ápice de la hoja de mayor tamaño, y la Materia Seca Total de la parte aérea de la planta (g.), evaluada en el conjunto de sus componentes, y desecada en la estufa hasta peso constante

b. Variables biométricas secundarias

Se registraron dos mediciones para determinar la emergencia de las plántulas por cada tratamiento en cada uno de los ensayos. El primero se realizó en la cuarta semana y el otro antes del corte a los 60 días aprox. Se calculó el número de plántulas por cada tratamiento. A partir de ello, se pudo observar el número de fallas (número de plántulas no habidas) por maceta.

Para uniformizar el número de plántulas, se realizó el ajuste utilizando una adopción de la corrección por "fallas" mediante la fórmula de Jenkins, así:

$$\text{Peso de campo corregido por fallas} = \text{peso de campo} * \frac{M - 0.3 N}{M - N}$$

Donde :

M = número de plántulas cuando la población es perfecta (0 fallas).

N = número de fallas .1 falla equivale a una planta que no está en el golpe .

6.4.2.2 Evaluación estadística de los metales pesados

Se midieron metales totales en las muestras de lodo puro, arena, compost, y las mezclas de lodo seco-arena y lodo compostado-arena, antes y después de la fertilización, así como en la parte aérea de la planta indicadora del maíz después del corte. Se midieron As, Hg, Pb, Cd y Cr. Se aplicaron la media y la desviación estándar con la técnica del Univariate del paquete estadístico Statistical Analysis System - SAS v 8. Este sistema es un sistema integrado de aplicaciones, que proporciona un procedimiento completo y capacidades de análisis de los datos.

VII. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados que se discuten a continuación, muestran los valores promedios de las variables biométricas morfológicas, evaluadas con la mezcla de lodo y arena, incluye el resumen del análisis de variancia del promedio de los factores en estudio y su interpretación estadística, coeficientes de variabilidad y prueba de comparación Tukey para cada una de ellas.

7.1 Resultados de la caracterización de los lodos utilizados

7.1.1 El pH y la CE (conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$).

El lodo N° 1 (4690 $\mu\text{S}/\text{cm}$), el lodo N° 2 (3650 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el control NPK (2030 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mostraron valores de conductividad eléctrica por encima de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo calificados como materiales moderado o ligeramente salino respectivamente, para ser utilizados como componente del suelo. En tanto, la arena inicial (510), arena final (960), el tratamiento 4 (750) del Ensayo N° 2 y el compost producido (330), mostraron valores menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y fueron calificados como suelos muy ligeramente salino. (Tabla de interpretación en Anexo C). El valor incrementado de la CE de la arena al final del ensayo fue atribuido a una posible contaminación del tratamiento ya que tuvieron ubicación muy apilada. Sin embargo, se consideran valores aceptables hasta 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto al pH, el valor más alto fue del compost (7.86), seguido por la arena (inicial 7.38 y final 7.48), y calificados como suelos ligeramente alcalinos. El tratamiento 4 (6.82), el tratamiento 7 (7.11) y el lodo N° 2 (6.82) eran suelos neutros.

El pH y la CE influyen en la germinación de la planta y se relacionan estrechamente con el mantenimiento de las condiciones de vida óptimas para los organismos *metanogénicos*, especialmente bacterias (*Methanospirillum hungatei*, *Methanosarcina barker*, *Methanobacterium thermoautotrophicum* y *Methanobac terium formicicum*).

Acosta y col. (1999) expresaron que para no afectar negativamente el crecimiento de la planta y suelo, el pH del lodo residual debe estar cercano a la neutralidad y la conductividad eléctrica no debe ser demasiado elevada. Desde el punto de vista del efecto de las sales sobre determinados cultivos como el maíz, los resultados obtenidos de pH y C.E. permitieron continuar con la fase experimental de fertilización de la planta indicadora. Ver gráficos 15 y 16

GRÁFICO N° 15

Valores de pH (unidades de pH)

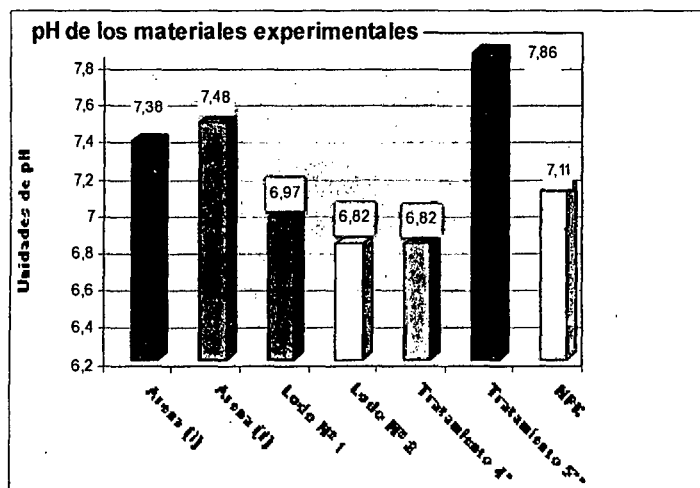
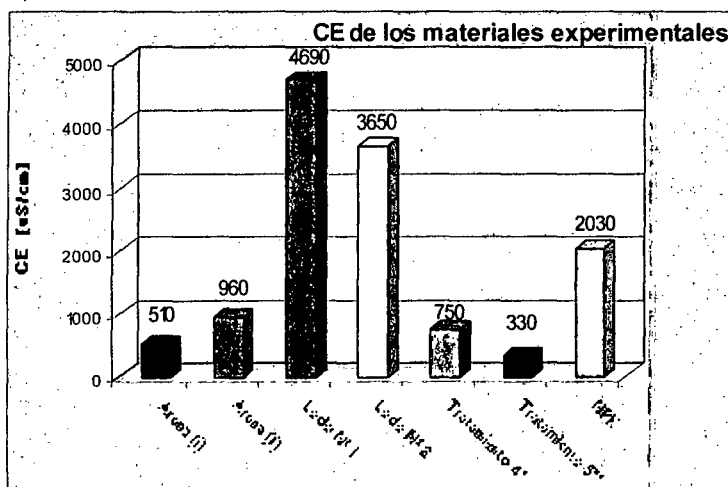


GRÁFICO N° 16

Valores de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Los valores de pH encontrado en los lodos de la PTAR Puente Piedra fueron comparados con los rangos de las normas internacionales, mostrando resultados cercano al neutro, como se puede ver en el cuadro N° 35.

CUADRO N° 38

El pH del lodo y los rangos recomendados en las normas técnicas

Elemento	Lodo 1	Lodo 2	Rangos comunes		
			C.E.E.	EPA	JAPON
pH	6.97	6.82	6,8 – 10.3	6,5 – 8,0	6,1

Fuente: Leppe (2002)

Se midieron materia orgánica (%) en el lodo N° 1 (41.94) y el lodo N° 2 (61.55), considerados altos respectivamente. Se sabe que estos resultados tienen que ver con el tratamiento con cal que los lodos reciben en la cancha de secado: Al incrementarse el pH se produce una rápida liberación del fósforo de la materia orgánica (solubilidad del fósforo de los suelos ácidos) y la disminución de la solubilidad del Al^{3+} y Mn^{2+} (que pueden ser tóxicos para las plantas), las bacterias autotróficas incrementan la velocidad de nitrificación. Aunque, se pueden producir otros efectos perjudiciales como la disminución del aprovechamiento del Fe, Mn, Cu, Zn y B. Este parámetro es un buen indicador del potencial de compostación del material. (Falcón, 2005; Lenom, 1977). No se realizó análisis de materia orgánica en el lodo compostado, aunque fue notorio su efecto en las plantas. Falcón (2005) ha recomendado el 47% como un valor óptimo frente a los valores establecidos en la literatura científica mayor de 35%.

No se evaluaron nitrógeno, fósforo ni potasio, como nutrientes disponibles en los lodos. En nuestro país son muy escasos laboratorios realizan este tipo de análisis, y por el escaso presupuesto con que se contaba. En consecuencia, se consideró la potencialidad agrícola expresada en las experiencias de la literatura científica a nivel mundial.

7.1.2 Calidad microbiológica del lodo

El análisis microbiológico inicial del lodo N° 1 presentó coliformes fecales $>14 \times 10^6$ NMP/g, *salmonella* 6 NMP/g, y parásitos *Giardia lamblia* 2 quistes/g, larvas y huevos de *Uncinaria*. En el lodo N° 2 se encontraron coliformes fecales $>160,000$ NMP/g, parásitos como larvas de *Uncinaria* 132 u/g. La norma técnica de la US-EPA considerado a estos parámetros como indicadores de enfermedades parasitarias en la zona servida.

Estos resultados encontrados en los lodos de la PTAR Puente Piedra, califican al lodo dentro de la categoría B, según la Norma Técnica de la US-EPA 1993, 40CFR Part 503 Rule: Standard for the use and Disposal of Sewage Sludge, que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes e impone restricciones en lodos de uso agrícola. Sin embargo, se ofrecen opciones de tratamiento de compostaje y estabilización alcalina avanzada (técnica moderna).

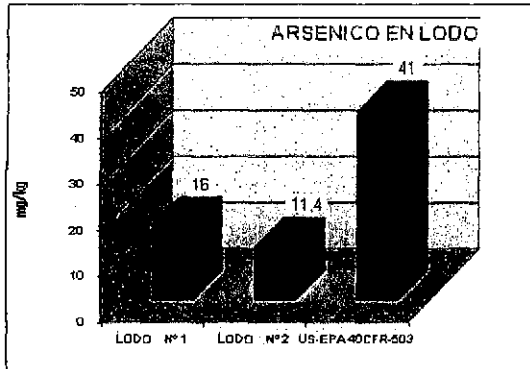
Los resultados del análisis microbiológico del tratamiento 4 al final del ensayo N° 2 mostraron una cantidad en coliformes fecales 240 NMP/g, *salmonella* <2 NMP/g con ausencia de parásitos.

7.1.3 Metales pesados: Evaluación de As, Hg, Pb, Cd y Cr en los lodos de la PTAR Puente Piedra comparados con las normas de la US-EPA 40CFR-503 y la Directiva 86/278-EEC

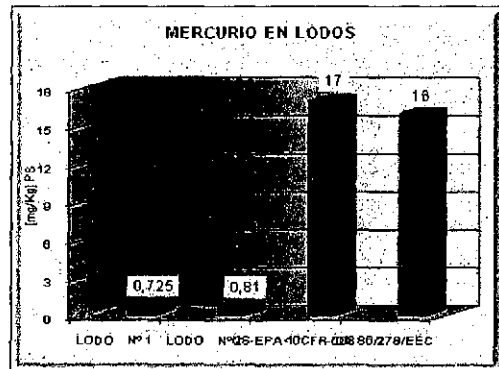
Los resultados de metales totales en las muestras del lodo N° 1 y N° 2 se ilustran en los gráficos N° 17 (A, B, C, D y E).

GRÁFICO N° 17

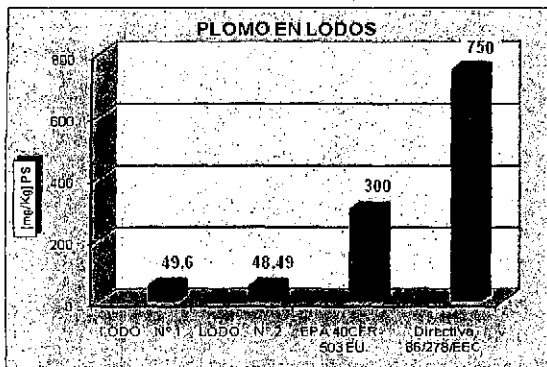
Metales en lodos



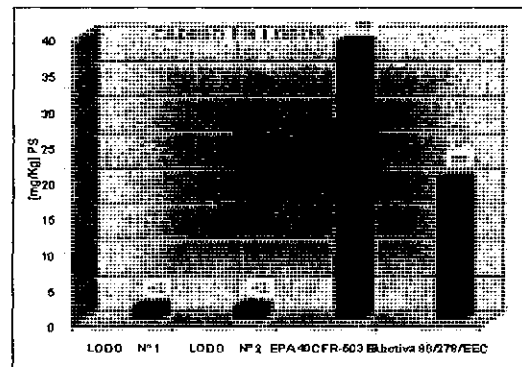
16-A: Arsénico en las muestras de lodo de la PTAR Puente Piedra comparado con las normas internacionales.



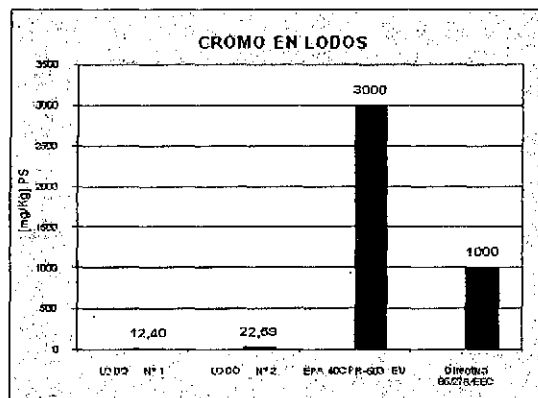
16-B: Mercurio en las muestras de lodo de la PTAR Puente Piedra comparado con las normas internacionales



16-C: Plomo en las muestras de lodo de la PTAR Puente Piedra comparado con las normas internacionales



16-D: Cadmio en las muestras de lodo de la PTAR Puente Piedra comparado con las normas internacionales



16-E: Cromo en las muestras de lodo de la PTAR Puente Piedra comparado con las normas internacionales

Todos los valores se encontraron en el intervalo normal exigido para su aplicación en el suelo agrícola, establecidos en las normas técnicas de la EPA 40CFR-503 US y en la Directiva 86/278-EEC, las más ampliamente utilizadas. Los gráficos mostraron que EE UU permite las concentraciones más altas de metales en suelos agrícolas, excepto para el plomo, que admite valores menores a los indicados en la norma europea.

Según Tomoyuki (2004), un alto contenido de metales en lodos, se atribuye al alto grado de industrialización del área servida por el sistema de tratamiento o de un país.

7.2 Resultado de la evaluación del Ensayo 1: “Influencia de la dosis de lodo en la fertilización”

En este ensayo no se produjo la emergencia de las plántulas en ninguno de los tratamientos con dosis de lodo. La discusión de este resultado concluyó en que el lodo requería más tiempo para su maduración (mineralización) antes de su aplicación y disposición de nutrientes para la planta; y su característica como suelo entre ligero y moderadamente salino que le confirió la arena, contribuyó en su alto contenido de sales solubles en la mezcla, disminuyendo la capacidad de germinación de las semillas e inhibiendo el crecimiento de las plántulas. Estos factores probablemente influyeron en el resultado de este ensayo. El sistema fue eliminado a los pocos días de su instalación y el ensayo fue reformulado en el ensayo siguiente.

7.3 Resultado de la evaluación del Ensayo 2: “Influencia de la dosis de lodo en la fertilización y medición de metales en suelo y planta”

7.3.1 Evaluación de las variables biométricas de la planta indicadora a los 26 y 60 días de la fertilización

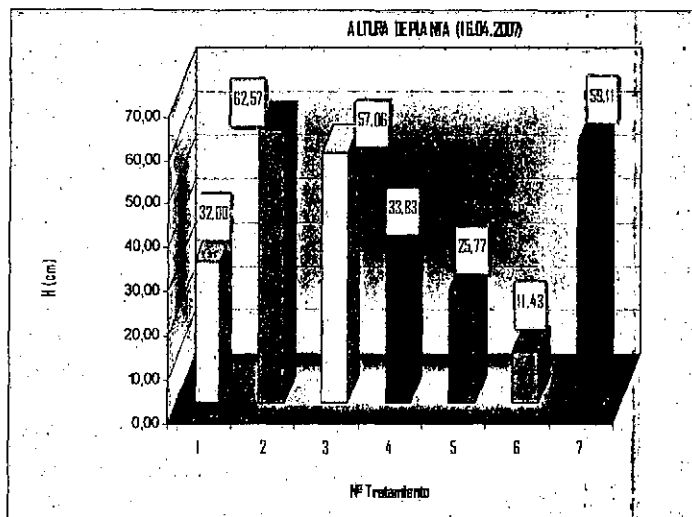
1. ALTURA DEL TALLO DEL MAIZ (16.04.2007)

Altura máxima: 67.0 cm (tratamiento 2)

Altura mínima: 11.8 cm (tratamiento 6)

Altura promedio: 40.25 cm.

GRÁFICO N° 18



Dado $P_r > F < .0001$ y nivel de significación del 5% se consideró que existía una diferencia altamente significativa, rechazándose H_0 . El Coeff. Var. 11.9% mostró un buen grado de confiabilidad de los resultados. La gráfica muestra los resultados de los promedios de las alturas.

La agrupación de los resultados según Tukey ($\alpha = 0.05$ de significancia), mostró alta diferencia significativa entre los tratamientos, siendo mejor el tratamiento 2 (62.6 cm) con la mayor altura promedio, seguido de los tratamientos 7 (59.1cm) y 3 (57.1cm). El tratamiento 4 (33.8cm), 1 (32cm), y 5 (25.8cm) estadísticamente con menor altura. El tratamiento 6 (11.4cm) casi detuvo su crecimiento. Se observó que en los tratamientos con mayor dosis de lodos, se detuvo el crecimiento de la planta.

Ensayos realizados con lodos de depuradora, por otros investigadores como Gonzáles (2002) recomiendan necesario considerar el tiempo de incorporación al suelo, y Alva (1999) recomienda un período de 20 días antes de la siembra a fin de estabilizar el lodo en la mezcla, y mejorar el crecimiento de la planta.

2. ALTURA DEL TALLO DEL MAIZ (21.05.2007)

Altura máxima: 122.0cm (tratamiento 3)

Altura mínima: 39.8cm (tratamiento 1)

Altura promedio: 62.86cm.

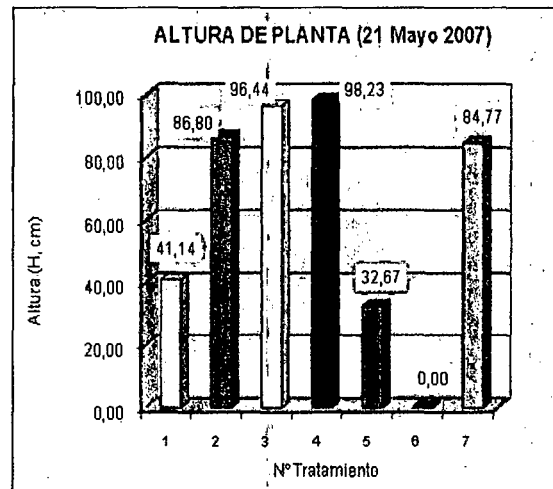
Del análisis estadístico ANVA, con $P_r > F < 0.0010$ (5% de significancia), se observó una diferencia altamente significativa entre los promedios de los tratamientos para

aceptar la hipótesis, según el cual, con al menos uno de los tratamientos se obtiene variación de altura en las plantas. El Coeff. Var. 38.59% aprox., mostró homogeneidad de los datos del experimento y confiabilidad de la investigación.

GRÁFICO N° 19



Maíz a los 60 días de crecimiento – Ensayo N° 2.



La Prueba Tukey con $\alpha = 0.05$ de significancia mostró diferencia significativa de los datos. Estadísticamente, el tratamiento 4 alcanzó la mayor altura promedio (98.23cm), seguido por el tratamiento 3 (96.43cm), 2 (86.8cm), y 7 (84.77cm) en ese orden. Aquí se observó que excepto el tratamiento 7, un mayor tiempo de contacto del lodo con la planta favoreció al crecimiento de la planta y su acción fertilizante quedó comprobada.

En el tratamiento 6, todas las plántulas se marchitaron antes de los 60 días. Cabe resaltar que hasta el momento del corte, en el tratamiento 5 permaneció una sola planta (98.0 cm) de las 6 semillas que se habían cultivado. El resultado mostró que en la relación dosis de lodo y maíz existió un límite de aceptación para un adecuado crecimiento y desarrollo de la planta, a partir del cual el efecto benéfico desapareció dando paso a un retardo e inhibición, hasta la muerte de la planta inclusive. No se determinó que factor influyó en este efecto negativo del aprovechamiento del lodo, se requería evaluar otros componentes agronómicos.

3. ESPESOR DEL TALLO DEL MAIZ (21.05.2007)

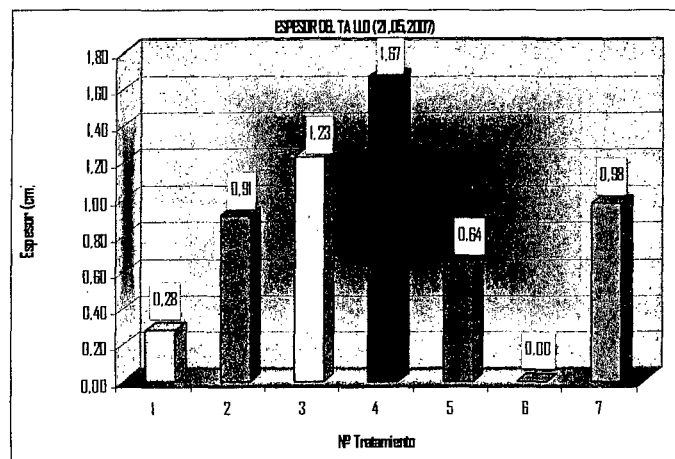
Espesor máximo: 2.10cm (tratamiento 4)

Espesor mínimo: 0.21cm (tratamiento 1)

Espesor promedio: 0.81cm.

El análisis estadístico del ANVA para la variable Espesor del tallo de la planta, con $P_r > F .0095$ a un nivel de significación del 5%, mostró evidencia altamente significativa de la diferencia entre los promedios de espesor de planta de los tratamientos. El Coeff. Var. 56.67% aprox., indicó ligera variación en la homogeneidad de los datos. En general, esta dispersión se atribuye a la técnica de medición utilizada. La Prueba Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, proporcionó la secuencia de los espesores promedio (D, cm) de la planta, como se muestra en el gráfico N° 20. Se observó diferencia altamente significativa entre los tratamientos 4 y 1.

GRÁFICO N° 20



El tratamiento 4 (1.67cm) logró el mayor espesor promedio, seguido por el tratamiento 3 (1.23cm), 7 (0.98cm), 2 (0.91cm), y 5 (0.64cm), en ese orden, estadísticamente iguales. Aquí se observó que, excepto el tratamiento 7, y análogamente a la variable altura de planta, a mayor dosis de lodo aplicado al suelo, se mejora el espesor del tallo de la planta, favorecida probablemente, por la disponibilidad de los nutrientes. Estadísticamente, el tratamiento 5 (0.63cm) mostró menor espesor promedio, que correspondió a la medición de la única plántula sobreviviente (1.91cm). El tratamiento 1 (0.28cm) con característica de planta raquítica, y el tratamiento 6 sin plántulas. Los resultados mostraron que se tiene que evaluar la estabilidad del lodo.

4. EMERGENCIA DE LAS SEMILLAS DEL MAIZ (16.04.2007)

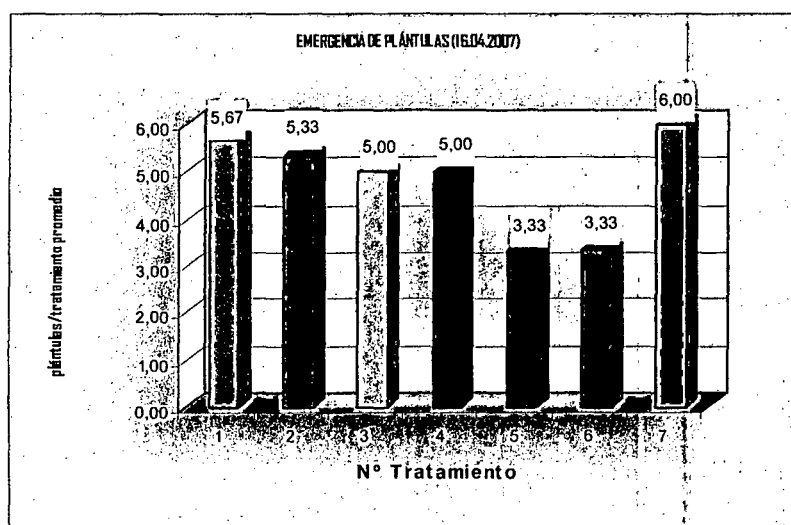
Emergencia máxima: 6 plántulas (tratamiento 7)

Emergencia mínima: 2 plántulas (tratamiento 6)

Emergencia promedio: 4.8 plántulas

El análisis estadístico ANVA de la variable Emergencia de las plántulas con $P_r > F$.0187 y con un nivel de significación del 5%, mostró evidencia altamente significativa por el cual a diferentes niveles de dosis de lodo existieron diferencias en la variable biométrica para aceptar H_1 . El Coeff. Var. 19.78% mostró un alto grado de homogeneidad de los resultados del experimento, y confiabilidad en la investigación. La Prueba Tukey a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, mostró los resultados de los promedios de la emergencia de las plántulas, como se observó en el Gráfico N° 21.

GRÁFICO N° 21



Estadísticamente, el tratamiento 7 (6 plantas) mostró el máximo promedio de la emergencia de las plántulas, seguidos por el tratamiento 1 (5.67 plantas), 2 (5.33 plantas), 4 (5.00 plantas) y 3 (5.00 plantas), en ese orden, iguales y con mayor número de plantas promedio. Diferencia altamente significativa mostraron los tratamientos 6 (3.33 plantas) y 5 (3.33 plantas) por las pérdidas que fueron casi en 50% fallas.

Aquí se observó la bondad del NPK que logró un rendimiento adecuado en la productividad de las plantas. Las plántulas del tratamiento 1, aunque raquíticas y

decoloradas moderadamente, se mantuvieron hasta el momento del corte.

5. EMERGENCIA DE LAS SEMILLAS DEL MAIZ (21.05.2007)

Emergencia máxima: 6 plántulas (tratamiento 7)

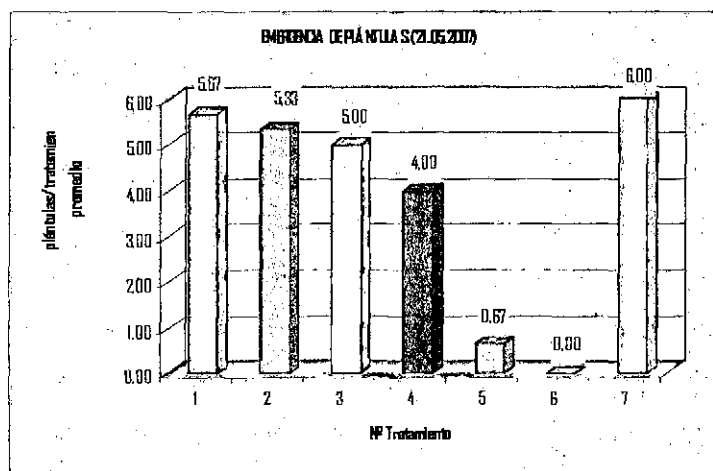
Emergencia mínima: 2 plántulas (tratamiento 5)

Emergencia promedio: 3.8 plántulas

El ANVA para la variable Emergencia de las plántulas con $P_r > F$.0001 y nivel de significación del 5%, mostró evidencia que a diferentes niveles de dosis de lodo existe diferencias significativas de esta variable dependiente para aceptar H_1 . El Coeff. Var. 28.06% demostró un alto grado de homogeneidad de los resultados del experimento y buena confiabilidad de la investigación.

La Prueba Tukey a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, proporcionó los promedios de la emergencia de las plántulas, como se observa en el gráfico N° 22:

GRÁFICO N° 22



El tratamiento 7 (6 plantas) mantuvo el máximo promedio de las plántulas, seguido por el tratamiento 1 (5.67 plantas), 2 (5.33 plantas), 3 y 4 (5 plantas) cada uno en ese orden, estadísticamente iguales y mostrando el mayor contenido promedio de plantas. En tanto, el tratamiento 5 (0.67 plantas) mostró un 89% de pérdidas (fallas) aprox., y el tratamiento 6 con 100% de fallas, antes de llegar al final del ensayo.

Los resultados obtenidos evidenciaron una deficiencia de la fertilización con lodos en el cultivo de maíz en los tratamientos 5 y 6, con fases de desarrollo tardío y marchitez inclusive, a diferencia del NPK muy favorable a la planta.

Desde la siembra, el conteo a los 26 días fueron 101 plántulas (80.2%), a los 60 días, fueron 80 plántulas (63.49%). Al final del ensayo se observó 36.5% de fallas. Miralles (2002) observó, en ensayos de emergencia con plántulas de maíz con dosis de lodo después de 20 días de la siembra, disminución del número de plántulas emergentes cuando se incrementó la cantidad de nitrógeno, disminución en la germinación y atraso en la emergencia de la planta. Se dedujo que el maíz es muy sensible a la acción de los fertilizantes, afectándose en su crecimiento y productividad.

6. PESO SECO DE LA PARTE AÉREA DEL FOLIAR DEL MAIZ (21.05.2007)

Peso seco máximo: 54g (tratamiento 7)

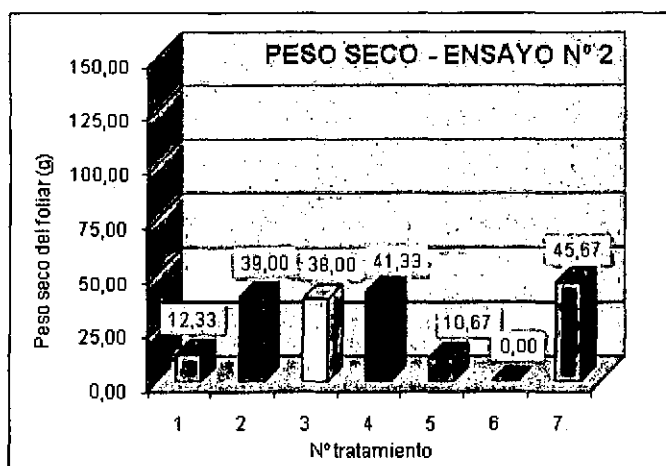
Peso seco mínimo: 11g (tratamiento 1)

Peso seco promedio: 26.7g

El análisis estadístico ANVA de la variable Peso Seco de la mezcla de hojas y tallo, con $P_r > F < .0001$ y nivel de significancia 5%, mostró evidencia que a diferentes dosis de lodo existieron diferencias significativas de la variable. El Coeff. Var. 33.85% mostró un buen grado de homogeneidad de los resultados del experimento, por tanto, buena confiabilidad de la investigación.

La Prueba Tukey con $\alpha = 0.05$, proporcionó la información del peso seco de la parte aérea de la planta.

GRÁFICO N° 23



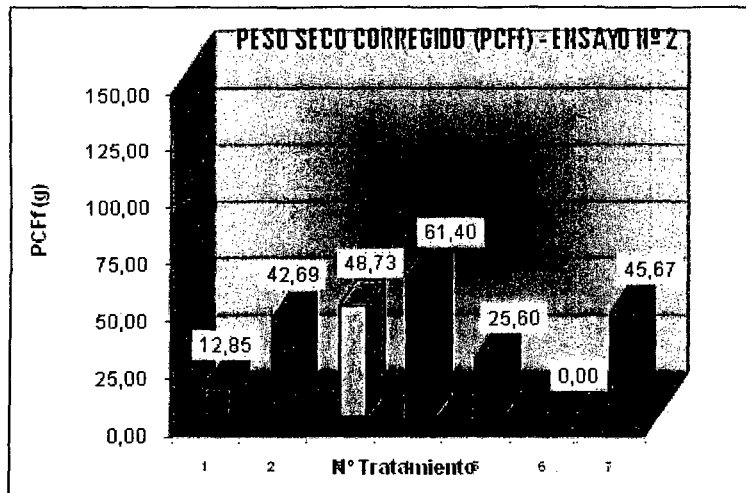
Estadísticamente, el tratamiento 7 (45.67g) registró el mayor promedio en peso seco de la planta, seguido por los tratamientos 4 (41.33g), 2 (39.0g) y 3 (38.0g) sin diferencia significativa entre ellos. En tanto, se mostró diferencia altamente significativa con los tratamientos 5 (10.67 g), y 6 (100% de fallas), que junto con el tratamiento 1 (12.33 g), presentaron el menor contenido promedio de materia seca.

Este resultado significó una buena asimilación de los elementos nutritivos que ofrecía el lodo en pequeña proporción en la mezcla y buena disponibilidad de nutrientes, logrado hasta el momento del corte de la planta. Según Alva (1999), la incorporación de materia orgánica del lodo al suelo aporta nutrientes, incrementa la retención de humedad, mejora la actividad biológica, e incrementa su productividad; la acumulación de materia seca en el maíz es influida por el nivel de fertilidad y de disponibilidad del nitrógeno, elemento asimilable adecuado del suelo y factor limitante más común de las plantas; y un suministro deficiente puede provocar notables descensos en la producción vegetal.

Los tratamientos con mayor dosis de lodo, sufrieron el efecto de lenta mineralización del lodo afectando directamente al desarrollo y crecimiento de la planta. Alva (1999) comparó algunos tratamientos que recibieron varios tipos de abonos orgánicos donde la acumulación de materia seca en las plantas correspondió al siguiente orden: estiércol de ave > compost > Biomix (abono a partir de lodo de depuradora) > estiércol de vacuno. Concluyó que el estiércol de ave es una fuente de materia orgánica de menor grado de transformación (aún en estado casi fresco), y que libera mayor cantidad de CO₂, el cual se va a disolver en el agua formando ácido carbónico, bajando el pH del suelo temporalmente y aumentando la liberación de microelementos como B, Fe y P. El peso seco permite estimar la ganancia de materia seca por crecimiento y acumulación de fotosintatos. Es una variable muy confiable que comúnmente se emplea en los estudios dosis-respuesta de toda la planta.

Se realizó un cálculo de ajuste del número de plántulas y la corrección de las "fallas" mediante la fórmula de Jenkins para uniformizar el peso seco, aplicando la fórmula del peso de campo corregido por fallas (PCF) para el peso seco de las hojas y tallo del maíz. Se obtuvieron los siguientes resultados:

GRAFICO N° 24



Peso de campo corregido por fallas para la parte aérea del maíz al final del ensayo N° 2 (PCFf).

Haciendo una comparación de los gráficos N° 22 y N° 23, se observó una ligera variación de los resultados con la ecuación de Jenkins, para los tratamientos con dosis de lodo, mostrando el tratamiento 4 (61.4g) con el mayor contenido de materia seca, seguido por el tratamiento 3 (48.73g). El tratamiento 7(45.67g) ocupó el tercer lugar, seguido por el tratamiento 2(42.69g), 5 (25.60g) y 1(12.85g). Cabe resaltar que esta evaluación es un cálculo referencial.

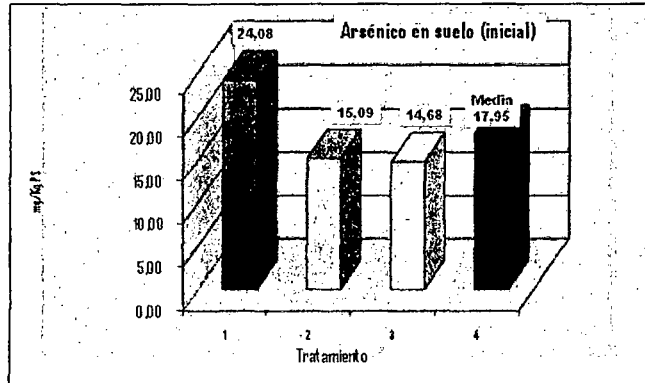
Conviene mencionar que la estadística permite conseguir un entendimiento básico de los datos y las relaciones existentes entre las variables analizadas, y garantiza los resultados obtenidos en el análisis de la investigación.

7.3.2 Evaluación estadística de los metales pesados en el Ensayo N° 2

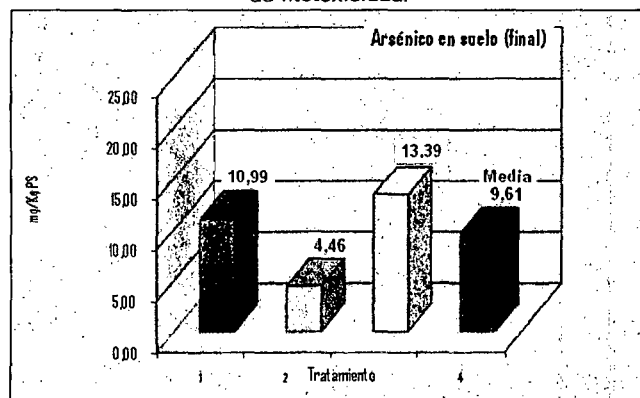
Los valores se refieren a las concentraciones de metales totales Hg, Pb, Cd, Cr y As en los tratamiento 1 (0% lodo), tratamiento 4 (6% lodo), tratamiento 7 (NPK) y en la parte aérea de la planta.

Los gráficos N° 25 (a,b y c) muestran los resultados de la medición de Arsénico en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta.

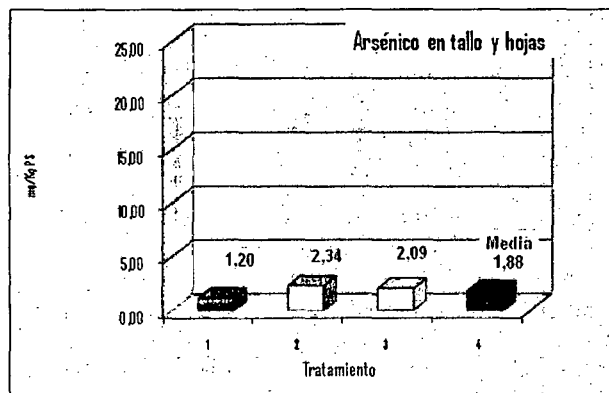
GRÁFICO N° 25



24-A: Contenido de Arsénico en el suelo antes de la fertilización. El Tto 4 contiene 15,09 mg/Kg PS del metal, dentro del rango normal (0,1 - 40), según Alloway (1993). En tanto, el testigo puro con 24,08 mg/Kg se ubica en el rango crítico (20 - 50) con riesgo de fitotoxicidad.



24-B: Contenido de Arsénico en el suelo después de la fertilización. El Tto 4 contiene 4,46 mg/Kg PS del metal, menor al valor inicial.



24-C: Contenido de Arsénico en la planta de maíz. El Tto 4 contiene 2,34 mg/Kg PS del metal, dentro del rango establecido (0,02 - 7).

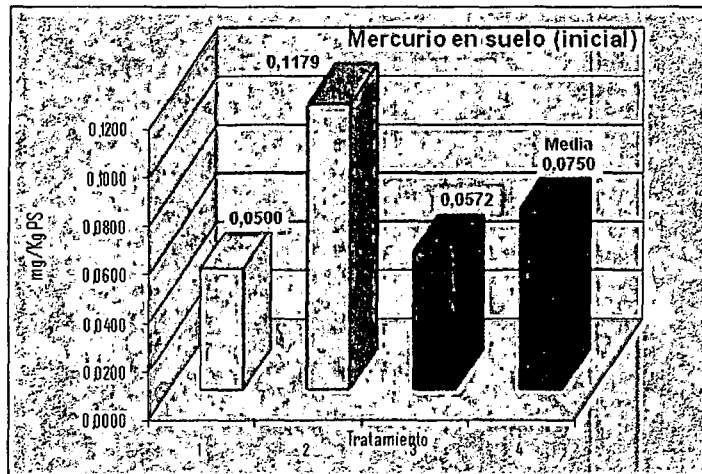
La media y la desviación estándar mostraron una dispersión normal de los datos. En la planta, los valores tuvieron un comportamiento similar.

En cuanto a la concentración del metal, se observó en todos los casos que los valores se encontraron dentro del rango normal establecidos por Alloway (1993), sin riesgo de toxicidad para la planta. La solubilidad del arsénico depende de factores como el pH, la presencia de la materia orgánica, óxidos Fe y Al, arcilla mineral, etc., haciéndose

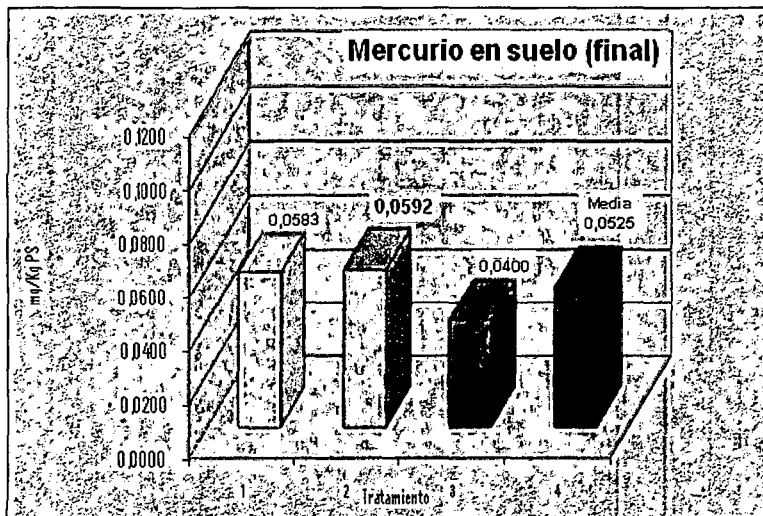
disponible en la absorción de la planta. Se recomienda que para reducir los efectos se realice una labranza profunda.

Los gráficos N° 26 (a, b y c) muestran los resultados de la medición de Mercurio en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta.

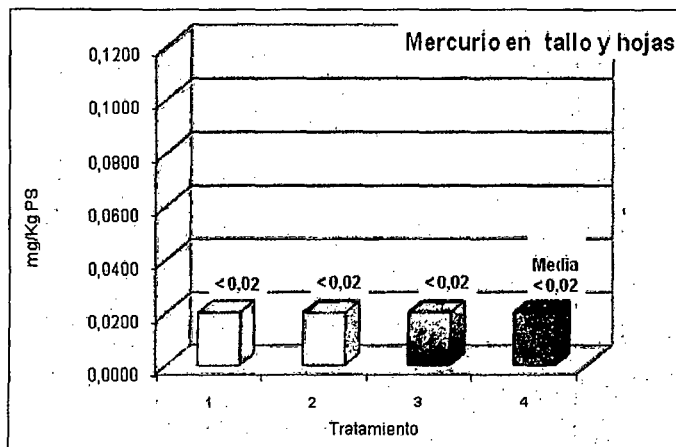
GRÁFICO N° 26



26-A: Contenido de Mercurio en el suelo antes de la fertilización. El Tto 4 contiene 0,1179 mg/Kg PS del metal, menor al rango normal (0,01 - 0,5).



26-B: Contenido de Mercurio en el suelo después de la fertilización. El Tto 4 contiene 0,0592 mg/Kg PS del metal, menor al valor inicial.



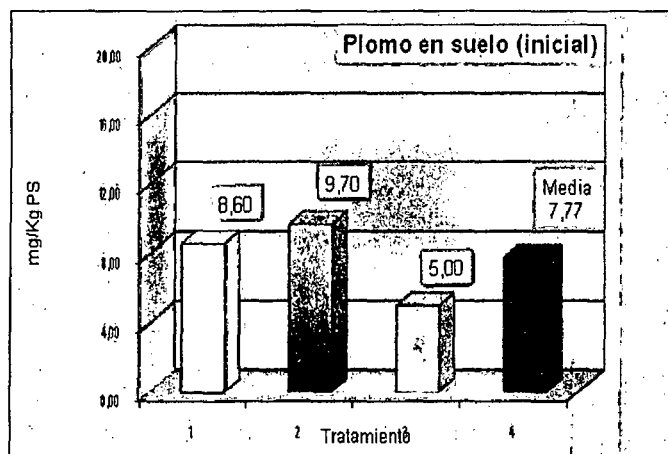
25-C: Contenido de Mercurio en la planta de maíz. El Tto 4 contiene menos de 0,02 mg/Kg PS del metal, dentro del rango establecido (0,005 - 0,17).

Estadísticamente, el tratamiento 4 mostró el valor más alto en la evaluación del suelo inicial, disminuyendo después de la fertilización. En ambos casos la media y la desviación estándar estuvieron dentro de los rangos normales. En la planta los valores mostraron una dispersión normal de los datos.

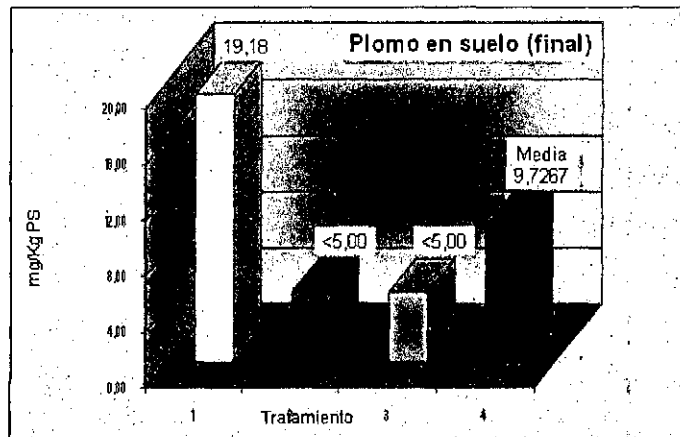
En cuanto a la concentración del metal, todos los tratamientos mostraron valores dentro del rango normal sin riesgo de toxicidad. Alloway (1993) indica que la tendencia general es la acumulación en las raíces, comportándose como una barrera a la absorción de la planta.

Los gráficos Nº 27 (a, b y c) muestran los resultados de la medición de Plomo en el suelo antes y después de la fertilización y en la planta.

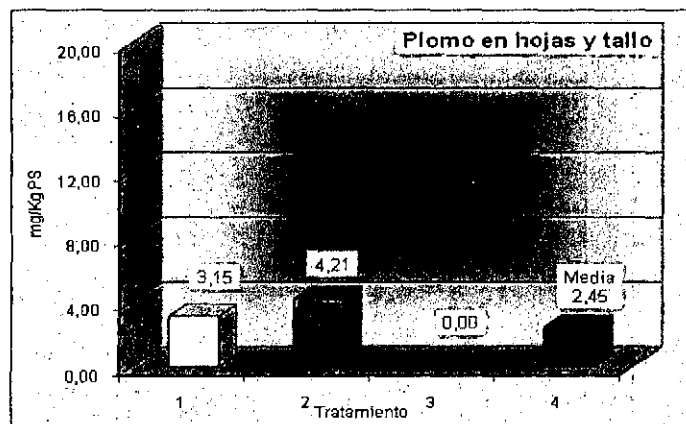
GRÁFICO Nº 27



26-A: Contenido de Plomo en el suelo antes de la fertilización. El Tto 4 contiene 9,70 mg/Kg PS del metal, dentro del rango normal (2,0 - 300).



26-B: Contenido de Plomo en el suelo después de la fertilización. El Tto 4 contiene <math><5,0\text{ mg/Kg PS}</math> del metal, ha disminuido respecto al valor inicial.



26-C: Contenido de Plomo en la planta de maíz. El Tto 4 contiene $4,21\text{ mg/Kg PS}$ del metal, dentro del rango establecido ($0,2 - 20$).

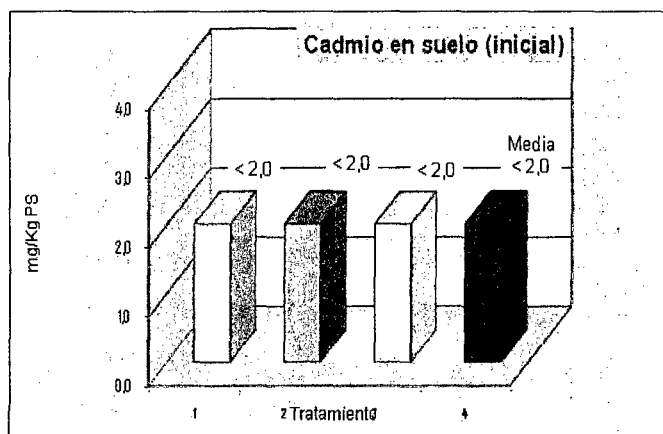
Estadísticamente, los valores de plomo en el suelo antes de la fertilización mostraron una media y la desviación estándar con una dispersión normal y homogénea. Al final de la fertilización, el tratamiento 1 ($19,18\text{ mg/Kg}$) aumentó su valor alejándose de la media, produciéndose una alta dispersión de los datos; elevándose el valor de la media y de la desviación estándar respecto de los valores iniciales. En la planta, los valores mostraron una dispersión normal de la media y de la desviación estándar.

En cuanto a la concentración del plomo, tanto en el suelo como en la planta, sus valores estuvieron dentro de los rangos normales establecidos por Alloway (1993). El tratamiento 7 en la planta registró $0,0\text{ mg/kg}$, lo que podría indicar que el plomo quedó retenido en las raíces. El análisis de plomo en las raíces de la planta podría ayudar a determinar esta conclusión. Alloway (1993), manifiesta que se desconocen los factores que controlan la disponibilidad del plomo en la interfase raíz-suelo, y considera que solamente una pequeña proporción de plomo está disponible para su absorción en las

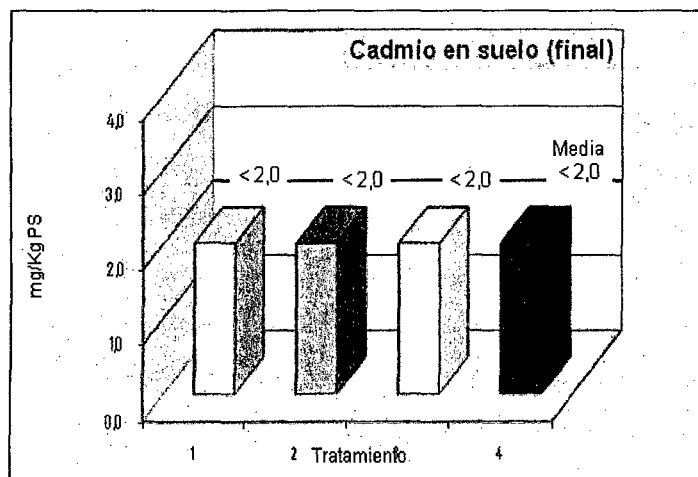
plantas; establece además, que siempre habrá absorción de plomo en las plantas, dependiente de su estado fisiológico, el crecimiento óptimo de la planta precipita el plomo en su forma amorfa e insoluble de fosfato de plomo. El Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de Holanda (1992), ha establecido que los fertilizantes minerales son fuentes de alta contaminación por metales pesados en suelos europeos, especialmente de plomo y cadmio.

Los gráficos N° 28 (a,b y c) muestran los resultados de la medición de Cadmio.

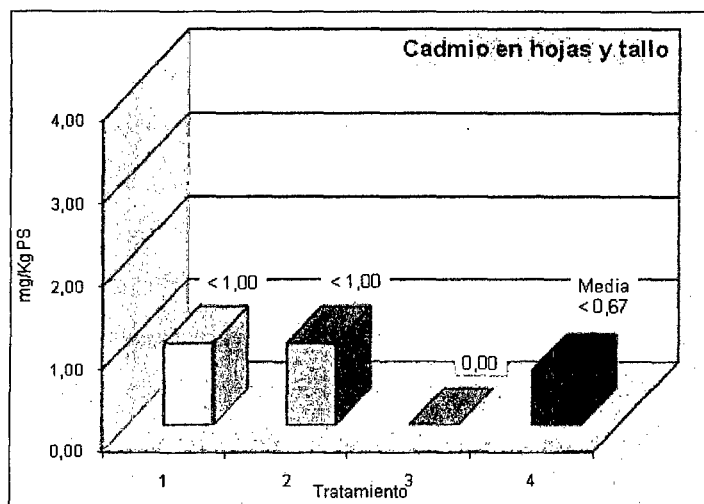
GRÁFICO N° 28



27-A: Contenido de Cadmio en el suelo antes de la fertilización. El Tto 4 contiene <2,0 mg/Kg PS del metal, menor al límite superior del rango normal (0,01 - 2,0).



27-B: contenido de Cadmio en el suelo después de la fertilización. El Tto 4 contiene <2,0 mg/Kg PS del metal, idéntico al valor inicial y menor al límite superior del rango normal (0,01 - 2,0).

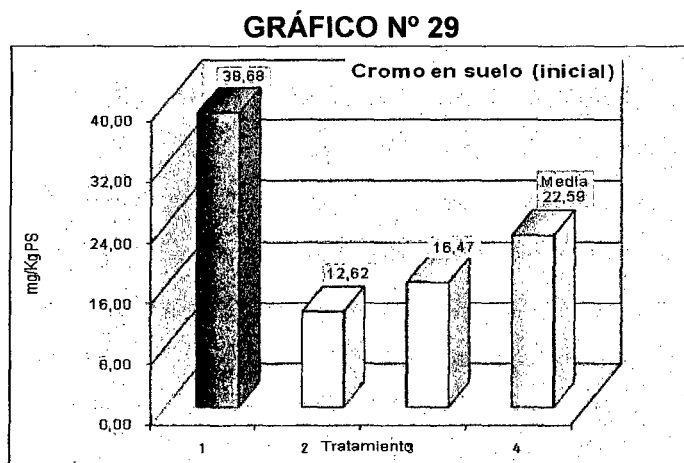


27-C: contenido de Cadmio en la planta de maíz. El Tto 4 contiene <1,00 mg/Kg PS del metal, dentro del rango establecido (0,1 - 2,4).

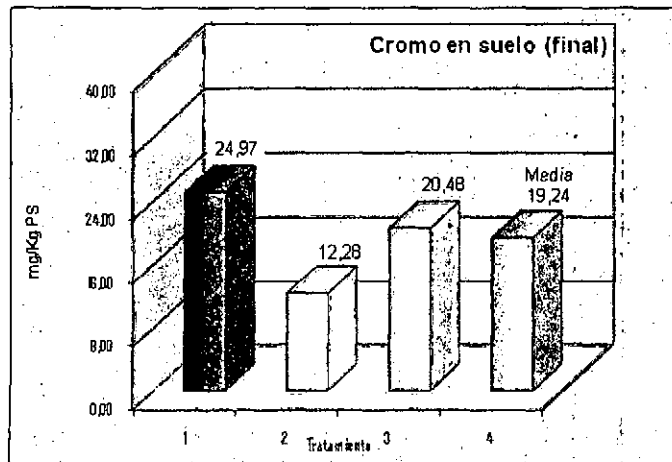
Los valores del cadmio en el suelo antes y después de la fertilización, mostraron una media y desviación estándar con una dispersión normal. En la planta, los valores tuvieron un comportamiento similar.

En cuanto a la concentración de cadmio, la fertilización no hubo variación en las muestras, manteniendo siempre el mismo valor en suelo y en planta, siendo idéntico al contenido de cadmio en el lodo que se utilizó como insumo para la fertilización. Se sabe que el cadmio es un metal que naturalmente se encuentra asociado al fosfato en mayor o menor concentración. La materia orgánica contenida en el lodo aumenta la capacidad de adsorción del suelo, y reduce su capacidad de absorción en la planta.

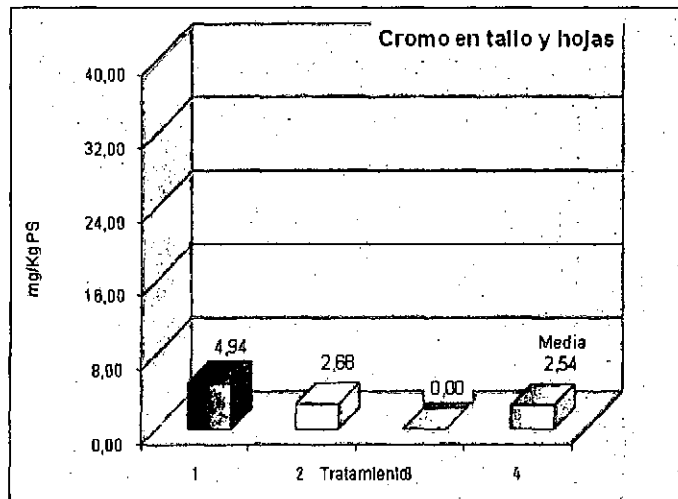
Los gráficos N° 29 (a,b y c) muestran los resultados del Cromo en suelo y planta.



28-A: contenido de Cromo en el suelo antes de la fertilización. El Tto 4 contiene 12,62 mg/Kg PS del metal, cercano al límite inferior dentro del rango normal establecido (5,0 - 1500).



28-B: contenido de Cromo en el suelo después de la fertilización. El Tto 4 contiene 12,28 mg/Kg PS del metal, idéntico al valor inicial.



28-C: contenido de Cromo en la planta de maíz. El Tto 4 contiene 2,68 mg/Kg PS del metal, dentro del rango normal establecido (0,03 - 14).

La estadística del cromo en el suelo antes y después de la fertilización mostró una media de los datos y desviación estándar con dispersión normal, aunque, el tratamiento 1 mostró el valor más alto en todos los casos. Todos estuvieron dentro del rango normal sin riesgo de toxicidad.

Alloway (1993), indica que la planta tiene la propiedad de retener el cromo en la raíz, en cualquiera de sus formas Cr^{3+} ó Cr^{6+} hasta 98% aprox., y que el Cr^{3+} es de escasa toxicidad. Además, se ha indicado que las plantas que tienden a acumular hierro también acumulan cromo; el superfosfato y otros fertilizantes fosforados tienen alta concentración de cromo, plomo y cadmio (U. Chile, 1999). La Comisión de la Comunidad Europea ha sugerido límites de 150 – 250 mg/Kg de cromo para suelos tratados con lodos de desagüe.

7.4 Resultado de la evaluación del Ensayo 3: "Influencia de la dosis de lodo compostado en la fertilización y medición de metales en suelo y planta"

7.4.1 Evaluación de las variables biométricas de la planta indicadora a los 37 y 60 días de la fertilización.

1. ALTURA DEL TALLO DEL MAIZ (28.12.2007)

Altura máxima : 86.0 cm (tratamiento 5)

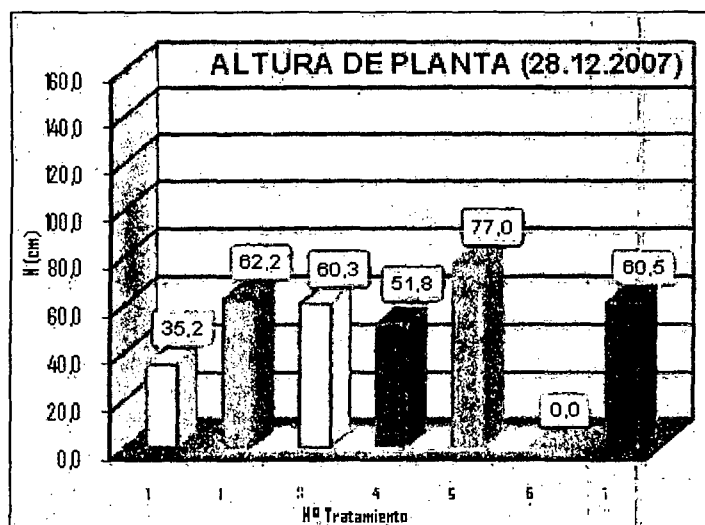
Altura mínima : 34.5 cm (tratamiento 1)

Altura promedio : 49.57 cm.

Con $P_r > F < 0.0001$ y nivel de significancia de 5% mostró una diferencia altamente significativa, y el Coeff. Var. 14.59% ofreció un buen grado de confiabilidad de los resultados de la investigación.

La Prueba Tukey ($\alpha = 0.05$), mostró una alta significación estadística entre los tratamientos, siendo el tratamiento 5 (77.0cm) el de mayor altura, seguido del tratamiento 2 (62.2cm), 7 (60.5cm) y 3 (60.3cm). En tanto, el tratamiento 4 (51.8cm) y 1 (35.2cm) presentaron las menores alturas. Cabe indicar que no se instaló el tratamiento 6 para este ensayo. Gráfico N° 30.

GRÁFICO N° 30



Los resultados obtenidos mostraron una buena madurez y disponibilidad de los nutrientes del lodo compostado en la mezcla los cuales influyeron en la velocidad de crecimiento de la planta. Haciendo una comparación con los resultados del Ensayo N° 2, se observó que la velocidad de crecimiento de los tratamientos 5 (77cm) y 4 (51.8cm) mejoraron su altura muy favorablemente, en casi un mes desde la siembra. Se dedujo que el compostaje favoreció la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, elemento esencial para el desarrollo en forma satisfactoria del maíz.

2. ALTURA DEL TALLO DEL MAIZ (21.01.2008)

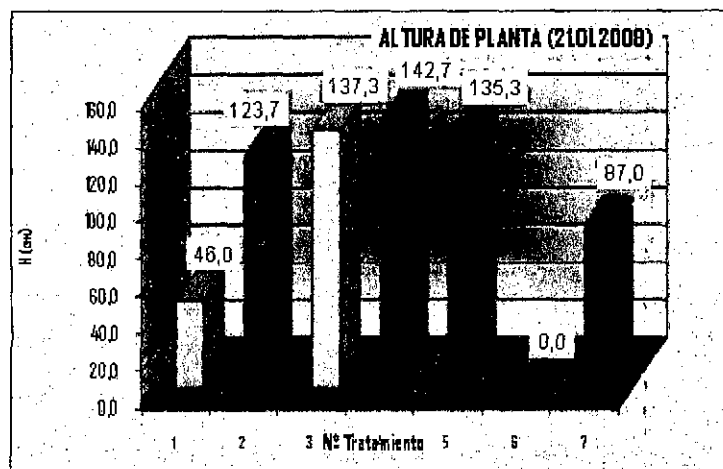
Altura máxima : 150.0 cm (tratamiento 4)

Altura mínima : 44.0 cm (tratamiento 1)

Altura promedio: 96.0 cm.

Estadísticamente, con $P_r > F < .0001$ y significación del 5% se considera que existe una diferencia altamente significativa. El Coeff. Var. 7.37% ofrece un buen grado de confiabilidad de los resultados.

GRÁFICO N° 31



La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), mostró alta significación estadística entre los tratamientos, siendo el tratamiento 4 (142.67cm) que alcanzó la mayor altura, seguido por el tratamiento 3 (137.3cm), 5 (135.3 cm) y 2 (123.7cm), sin diferencia estadísticamente significativa. El tratamiento 7(87.0cm) con fertilización química, y el tratamiento 1 (46.0cm) testigo puro, mostraron diferencia significativa y menor valor.

Se observó que a mayor dosis de lodo en los tratamientos, había mejor respuesta de la variable evaluada. Esto sugirió mejor disponibilidad de nutrientes aprovechables para las plantas contenidas en el lodo compostado, en los tratamientos 3, 4 y 5 con 50, 75 y 100% de lodo compostado respectivamente.

La evaluación del efecto del lodo en esta variable se apreció mejor en este ensayo con el lodo compostado que es un producto altamente mineralizado, y ofrece mayores cantidades de nutrientes para las plantas por su mayor contenido de los mismos.

3. ESPESOR DEL TALLO DEL MAIZ (28.12.2007)

Espesor máximo: 1.74cm (tratamiento 5)

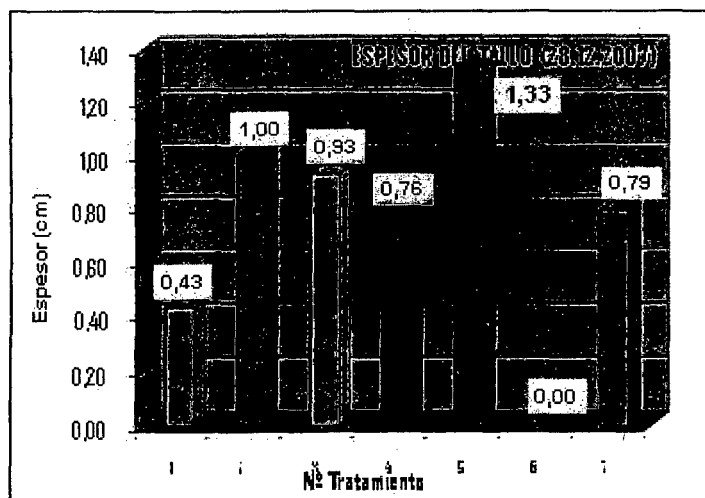
Espesor mínimo: 0.34cm (tratamiento 1)

Espesor promedio: 0.83cm.

El ANVA con $P_r > F < .0001$ y nivel de significación de 5%, para el Espesor del tallo de la planta mostró evidencia de la diferencia entre los promedios de la variable de los tratamientos para aceptar H_1 y el Coeff. Var. 22.36% proporcionó un buen grado de homogeneidad y confiabilidad de los resultados.

La Prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) proporcionó los siguientes resultados a los 37 días después de la siembra:

GRÁFICO N° 32



Estadísticamente, el tratamiento 5 (1.33cm) alcanzó el mayor espesor, seguido por el tratamiento 2 (1.00cm) y 3 (0.93cm), sin diferencia significativa. Los tratamientos 7 (0.94cm), 4 (0.85cm) y 1 (0.47cm), mostraron los menores valores y alta diferencia significativa respecto de los anteriores.

Se concluyó que la mayor dosis de lodo compostado del suelo efectivamente, produjo un efecto benéfico en el crecimiento de las plantas. Similar a la evaluación de la altura de planta, estos resultados indicaron que el lodo compostado presentó un buen proceso de mineralización con buen contenido de nutrientes disponibles que fue favorablemente aprovechada por la planta.

4. ESPESOR DEL TALLO DEL MAIZ (21.01.2008)

Espesor máximo: 2.35 cm (tratamiento 5)

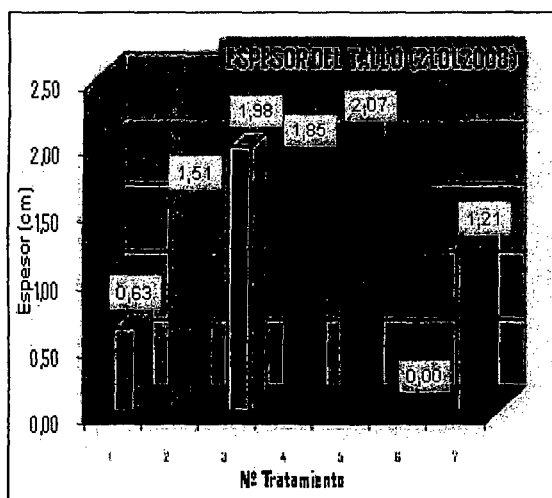
Espesor mínimo: 0.58 cm (tratamiento 1)

Espesor promedio: 1.32 cm.

El ANVA con $P_r > F < 0.0001$ y nivel de significancia 5%, dio evidencia de la diferencia entre los promedios de la variable de los tratamientos para aceptar H_1 y que a diferentes dosis de lodo existía diferencias significativas de la variable biométrica. El Coeff. Var. 13.82% ofreció buen grado de homogeneidad de los resultados del experimento y confiabilidad de los mismos.

La Prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) a los 60 días de la siembra proporcionó los siguientes resultados. Gráfico N° 33

GRÁFICO N° 33



De izq. a der., tratamiento 7 (NPK) y tratamiento 5 (100% lodo compostado). Altura de planta a los 60 días de la fertilización del Ensayo N° 3.

Se observó un notable incremento del espesor en el tratamiento 5 (2.07cm) logrando el mayor valor, seguido por el tratamiento 3 (1.98cm) y 4 (1.85cm). Queda indicado que estos tratamientos contenían 100 y 50% de lodo compostado respectivamente. En tanto, el tratamiento 2 (1.51cm) y 7 (1.21cm) mostraron los valores más bajos, el tratamiento 1 (0.63cm) sin abono, contenía plantas raquíticas. Esta evaluación concluyó en cuanto al espesor del tallo de la planta, que el lodo compostado ofreció mejores resultados (tallos más robustos), comparado con el fertilizante NPK.

5. EMERGENCIA DE LAS SEMILLAS DEL MAIZ (28.12.2007 = 21.01.2008)

Emergencia máxima: 5 plántulas (tratamiento 7)

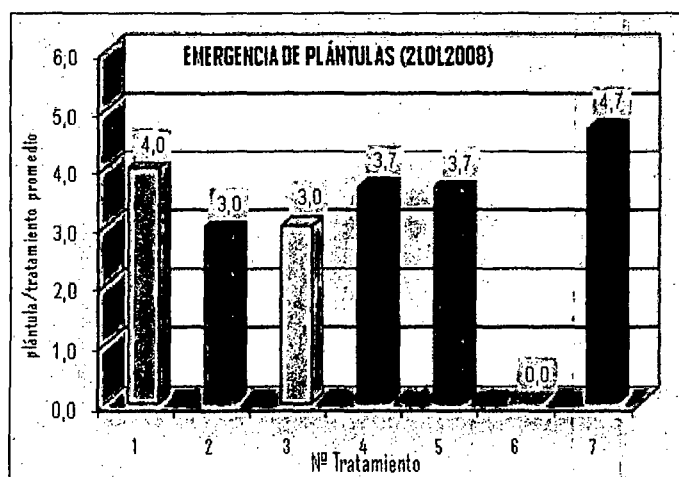
Emergencia mínima: 2 plántulas (tratamiento 2)

Emergencia promedio: 3.14 plántulas

El ANVA para la variable Emergencia de las plántulas con $P_r > F$.0030 y nivel de significancia 5%, mostró evidencia significativa que a diferentes niveles de dosis de lodo existieron diferencias altamente significativas de la variable para aceptar H_1 . El Coeff. Var. 34.01% mostró un buen grado de homogeneidad de los resultados del experimento cercano al límite de confiabilidad para el análisis.

La Prueba Tukey con $\alpha = 0.05$, proporciona los siguientes resultados. Gráfico N° 34.

GRÁFICO N° 34



El tratamiento 7 (4.7 plantas) mostró el máximo promedio de las plántulas, seguido del tratamiento 1 (4.0 plantas), 4 (3.7 plantas), 5 (3.7 plantas), 2 (3.0 plantas), y 3 (3.0 plantas), en ese orden, todos estadísticamente iguales y mostraron la misma cantidad de plantas aproximadamente.

Se concluyó que el tratamiento 7 (NPK) contó con la mayor cantidad de plantas, ya que los nutrientes disponibles desde el momento de la siembra favorecieron la germinación, emergencia y crecimiento. Mientras, el tratamiento 1, sin fertilización, presentó buena respuesta a la germinación inicial y emergencia, aunque no contribuyó en el crecimiento, resultando plantas raquíticas hasta el final de la fertilización. En tanto, los tratamientos con dosis de lodo mostraron dificultades iniciales en la germinación y emergencia con casi el 39% de fallas (marchitas), se dedujo que este efecto probablemente se debió a una alta sensibilidad de la planta al proceso de lenta mineralización que sufre el lodo, afectándolo directamente en su desarrollo.

6. PESO SECO DE LA PARTE AÉREA DEL FOLIAR DEL MAIZ (21.01.2008)

Peso seco máximo : 136g (tratamiento 5)

Peso seco mínimo : 9.0 g (tratamiento 1)

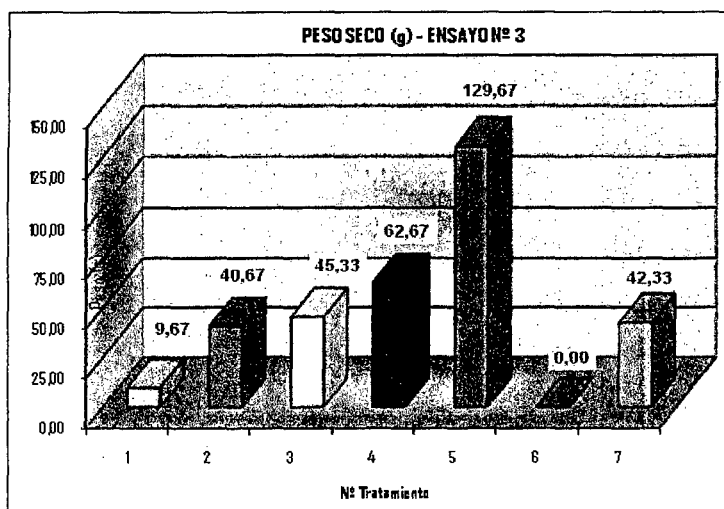
Peso seco promedio: 55.1g

El análisis estadístico ANVA de la variable Peso Seco de la planta con $P_r > F < 0.0001$ y nivel de significación 5%, mostró que a diferentes niveles de dosis de lodo existe diferencias significativas de esta variable dependiente para aceptar H_1 . El Coeff. Var. 17.31% mostró un alto grado de homogeneidad de los resultados del experimento y buena confiabilidad de la investigación.

La Prueba Tukey a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, para el peso seco de la parte aérea de la planta, proporcionó la siguiente información:

GRÁFICO N° 35

Prueba de Tukey para peso seco – Ensayo N° 3



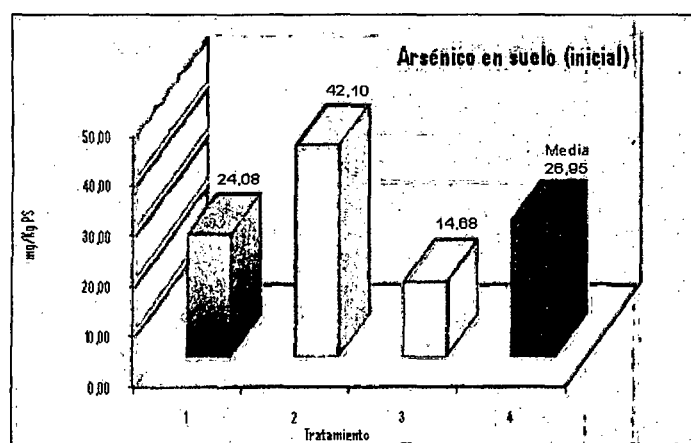
El análisis estadístico determinó que el tratamiento 5 (129.67g) registró el máximo promedio del peso seco de la planta, mostrando diferencia altamente significativa con los tratamientos 4 (62.67g), 3 (45.33g), 7 (42.33g) y 2 (40.67g) sin diferencia significativa entre ellos. En tanto, el tratamiento 1 (9.67g) registró el valor más bajo de peso seco promedio. Este resultado probablemente se debió al mayor aporte y disponibilidad nutricional del lodo en la mezcla. Reiterando lo indicado por Alva (1999), la incorporación de materia orgánica con el lodo compostado aporta nutrientes, incrementa la retención de humedad y mejora la actividad biológica, e incrementa la productividad del suelo e influye en el nivel de fertilidad y disponibilidad de adecuada de nutrientes.

7.4.2 Evaluación estadística de los metales pesados en el Ensayo N° 3

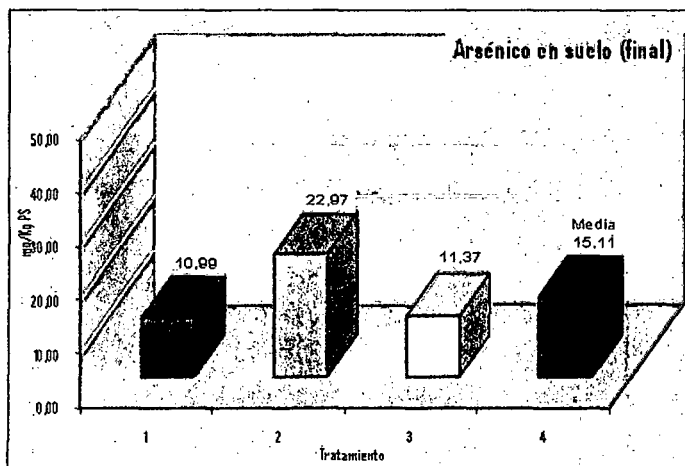
Los valores se refieren a las concentraciones de metales totales Hg, Pb, Cd, Cr y As en las muestras de suelo antes y después de la fertilización, así como en la parte aérea (tallos y hojas) del maíz, como se indican a continuación: tratamiento 1 (Testigo puro), tratamiento 4 (100% lodo compostado), tratamiento 7 (Ctrl NPK) y en la mezcla de hojas y tallo del maíz.

Los gráficos N° 36 (a,b y c) muestran los resultados obtenidos en la medición de Arsénico en el suelo antes y después del ensayo y en la planta de maíz.

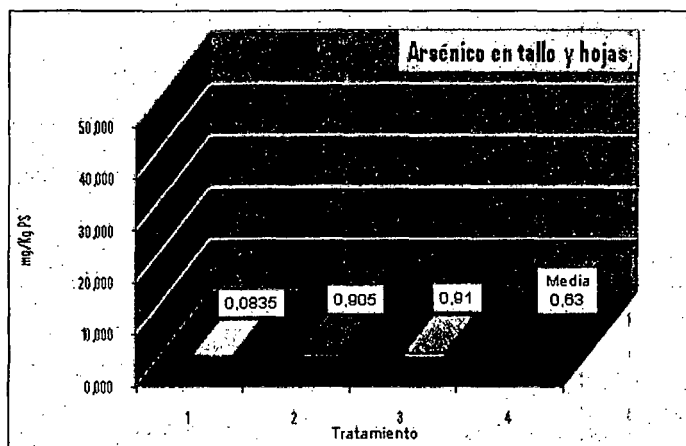
GRÁFICO N° 36



35-A: Contenido de Arsénico en el suelo antes de la fertilización. El Tto 5 contiene 42,10 mg/Kg PS del metal, dentro del rango crítico (20 - 50), con riesgo de fitotoxicidad (Alloway, 1993).



35-B: Contenido de Arsénico en el suelo después de la fertilización. El Tto 5 contiene 22,97 mg/Kg PS, menor al valor inicial. Según Alloway, este valor se encuentra dentro del rango crítico (20 - 50) con riesgo de

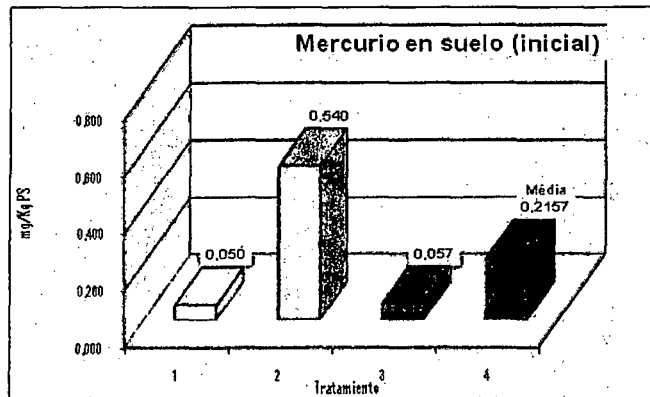


35-C: Contenido de Arsénico en la planta de maíz. El Tto 5 contiene 0,905 mg/Kg PS. Alloway (1993) ha establecido como rango normal (0,02 - 7).

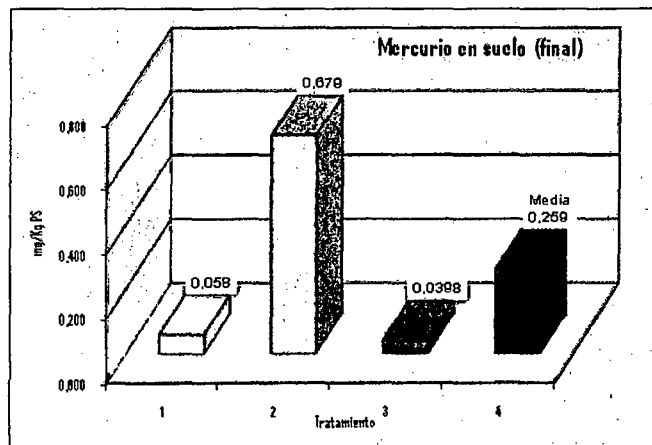
La media y la desviación estándar para el arsénico en el suelo antes y después de la fertilización, mostraron alta dispersión de los datos, siendo el tratamiento 5 el de mayor alejamiento. En la planta, se observó que el tratamiento 1 mostró un alejamiento respecto de la media. En cuanto a la concentración de arsénico del tratamiento 5 en el suelo, antes y después de la fertilización, mostró valores dentro del rango crítico (20-50), con riesgo de toxicidad, en tanto, la planta mostró valores normales. Según Alloway (1993), el comportamiento de los datos podría deberse a la propiedad de los suelos arenosos, en el cual, el fosfato puede desplazar los ligandos de arseniato adsorbidos, dejando libre el arsénico para ser absorbidos por las raíces de la planta; y considera que la disposición de lodo al suelo agrícola no es la causa del incremento significativo de arsénico en los cultivos.

Los gráficos N° 37 (a, b y c) muestran los siguientes resultados obtenidos en la medición de Mercurio en el suelo antes y después del ensayo y en la planta de maíz.

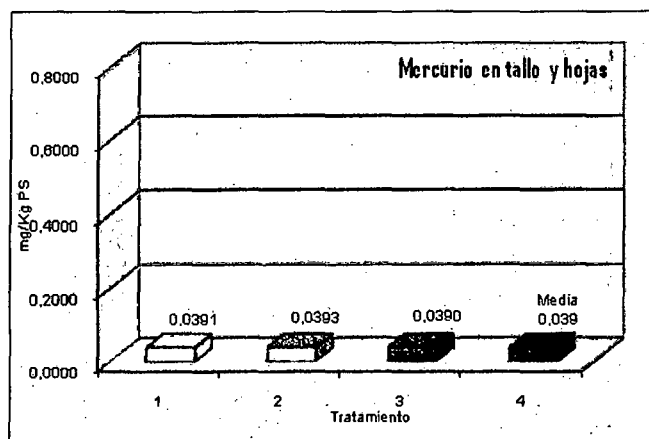
GRÁFICO N° 37



36-A: Contenido de Mercurio en el suelo antes de la fertilización. El Tto 5 contiene 0,540 mg/Kg PS, en el límite inferior del rango crítico (0,3 - 5,0) con riesgo de toxicidad. El rango normal es (0,01 - 0,5). (Alloway, 1993).



36-B: Contenido de Mercurio en el suelo después de la fertilización. El Tto 5 contiene 0,679 mg/Kg PS. Según Alloway, este valor se encuentra dentro del rango crítico (0,3 - 5,0) de fitotoxicidad.

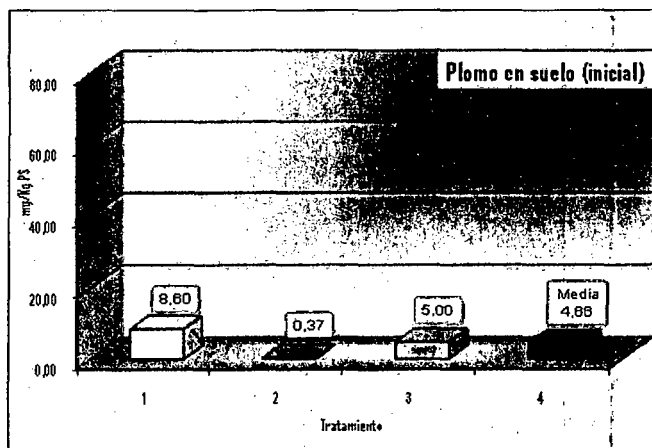


36-C: Contenido de Mercurio en la planta de maíz. El Tto 5 contiene 0,0393 mg/Kg PS, dentro del establecido como rango normal (0,005 - 0,17).

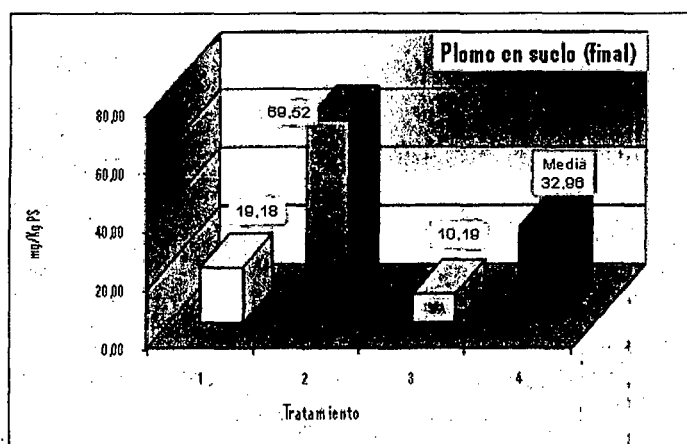
El análisis estadístico del mercurio antes y después de la fertilización del suelo, mostró que el tratamiento 5 presentaba el valor más alto y alejado de la media, y alta desviación estándar. En la planta, los datos mostraron una dispersión normal respecto de la media y la desviación estándar con tendencia a cero. En tanto, la concentración de mercurio del tratamiento 5 (0.54 y 0.6791) mg/Kg en el suelo antes y después de la fertilización mostró valores en el rango crítico (0.3 – 5.0), establecido por Alloway (1993), con riesgo de toxicidad. Se sabe que el Hg^{2+} a pH ligeramente alcalino, es fuertemente fijado a la materia orgánica del suelo (adsorción del complejo suelo-metal), pero el carácter de estos compuestos no es muy conocido.

Los gráficos N° 38 (a,b y c) muestran los resultados obtenidos en la medición de Plomo en el suelo y planta.al inicio y al final del ensayo.

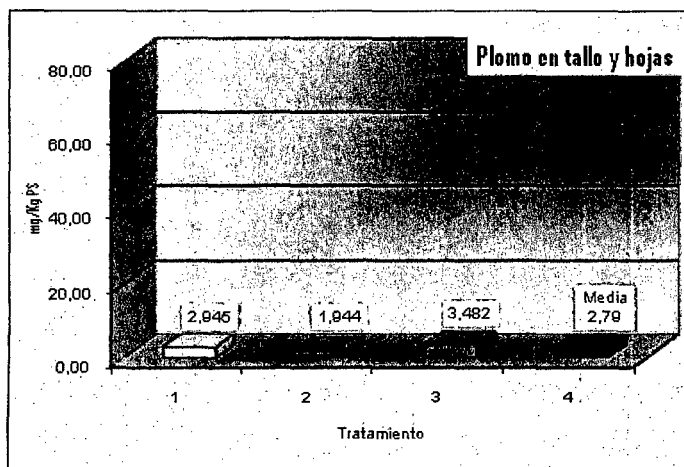
GRÁFICO N° 38



37-A: Contenido de Plomo en el suelo antes de la fertilización. El Tto 5 contiene 0,370 mg/Kg PS, en el límite inferior del rango normal (2,0 - 300)(Alloway, 1993).



37-B: Contenido de Plomo en el suelo después de la fertilización. El Tto 5 contiene 69,52 mg/Kg PS, muy alto comparado al valor inicial, y se encuentra dentro del rango normal (2 - 300) sin riesgo de toxicidad.



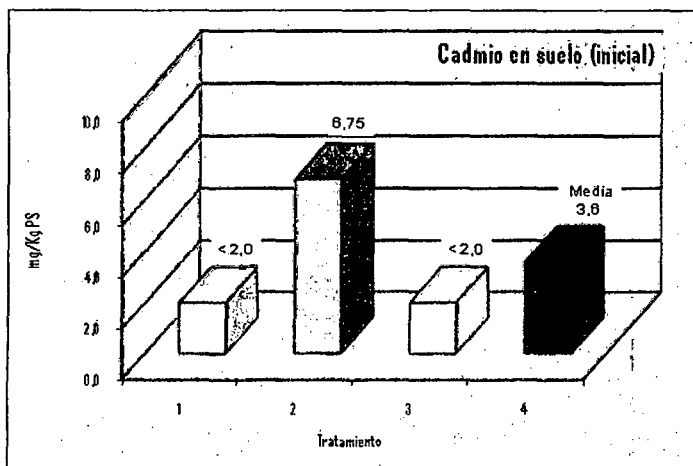
37-C: Contenido de Plomo en la planta de maíz. El Tto 5 contiene 1,944 mg/Kg PS, dentro del establecido como rango normal (0,2 - 20,0).

El análisis estadístico para el plomo en el suelo antes de la fertilización, mostró una ligera dispersión de los datos. El tratamiento 5 (0.37) presentó un valor menor al límite inferior del rango normal y el tratamiento 1 (8.60) con un valor mayor a la media, y la desviación estándar también fue alta. Los datos en el suelo después de la fertilización, mostraron una anomalía en el tratamiento 5 (69.52), un incremento del valor mayor al doble de la media, y una desviación estándar (31.97) muy elevada, produciendo una alta dispersión de los datos. Este comportamiento de los datos no favorecería a la hipótesis, y por el cual el aprovechamiento del lodo en el suelo agrícola no sería recomendado. Sin embargo, el análisis de plomo en la planta mostró valores normales menor al de la media y una desviación estándar normal.

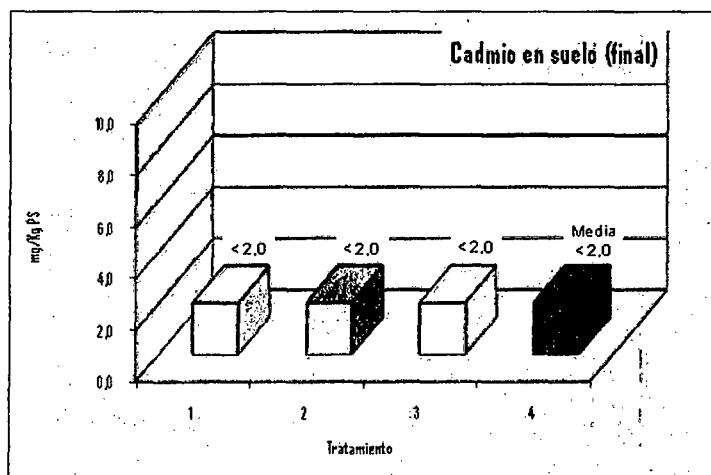
En tanto, la concentración de plomo en el suelo y en la planta, estuvieron dentro de los rangos normales establecidos por Alloway (1992). Un óptimo estado fisiológico y período de crecimiento activo de la planta transfiere el metal al suelo (translocación) como precipitado de fosfato de plomo. Se conoce muy poco acerca de los factores que controlan la disponibilidad de plomo en la relación suelo-raíz.

Los gráficos N° 39 (a,b y c) muestran los resultados obtenidos en la medición de Cadmio en el suelo y en la planta al inicio y al final del ensayo.

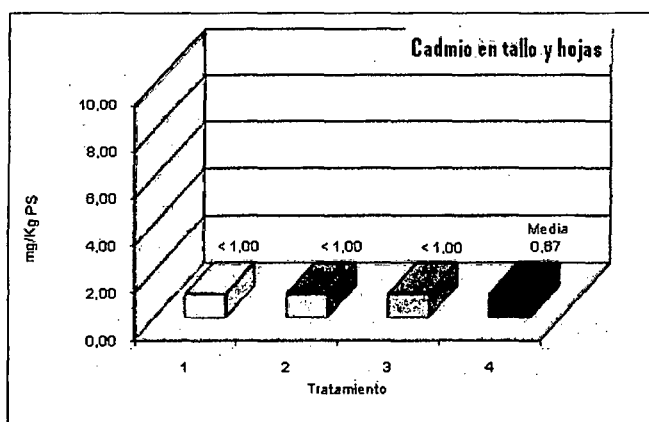
GRÁFICO N° 39



38-A: Contenido de Cadmio en el suelo antes de la fertilización. El Tto 5 contiene 6,75 mg/Kg PS, en el rango crítico (3,0 - 8,0) con riesgo de toxicidad. (Alloway, 1993).



38-B: Contenido de Cadmio en el suelo después de la fertilización. El Tto 5 contiene <2,0 mg/Kg PS, menor al valor inicial. Según Alloway, este valor se encuentra dentro del rango normal (0,01 - 2,0) sin riesgo

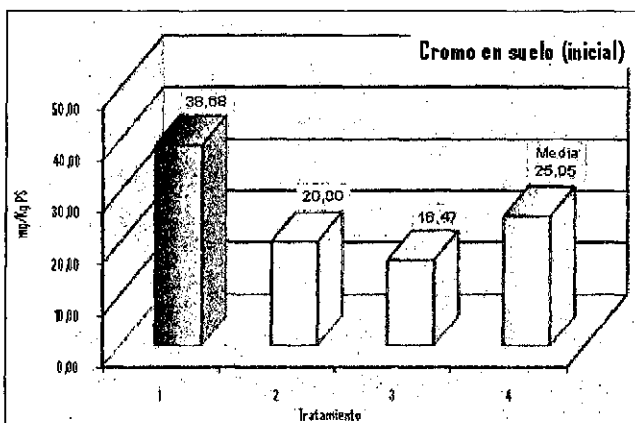


38-C: Contenido de Cadmio en la planta de maíz. El Tto 5 contiene <1,00 mg/Kg, dentro del establecido como rango normal (0,1 - 2,4).

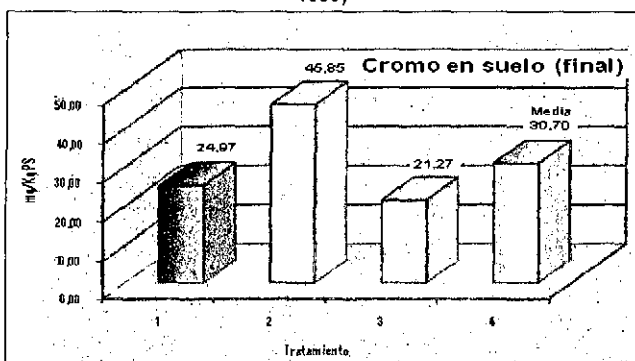
Estadísticamente, el tratamiento 5 en el suelo antes de la fertilización, mostró el valor más alto comparado con la media, y desviación estándar también alta. Al final del ensayo, los valores de todos los tratamientos y la media fueron bajos e idénticos (<2 mg/Kg PS), y la desviación estándar con dispersión normal, inclusive los de la planta. En cuanto a la concentración del metal, el tratamiento 5 (100% lodo compostado) al inicio del ensayo mostró una alta concentración de cadmio (6.75mg/Kg PS) en el rango crítico con riesgo de toxicidad, disminuyendo al final del según Alloway (1993), que disminuyó al final de la fertilización. Se sabe que el cadmio se encuentra en la naturaleza asociado al fosfato en concentración variada. Así también, algunas investigaciones han determinado que la presencia de lodo en el suelo, disminuye la absorción de cadmio en la planta.

Los gráficos N° 40 (a, b y c) muestran los resultados de las mediciones de Cromo en suelo y planta al inicio y final del ensayo.

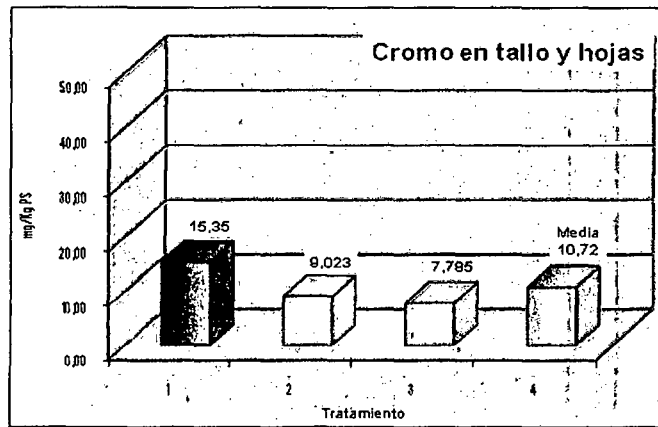
GRÁFICO N° 40



39-A: Contenido de Cromo en el suelo antes de la fertilización. El Tto 5 contiene 20,0 mg/Kg PS, dentro del rango normal (5,0 -1 500). (Alloway, 1993)



39-B: Contenido de Cromo en el suelo después de la fertilización. El Tto 5 contiene 45,85 mg/Kg PS, mayor al valor inicial. Según Alloway, este valor se encuentra dentro del rango normal (5 - 1500), sin riesgo de toxicidad.



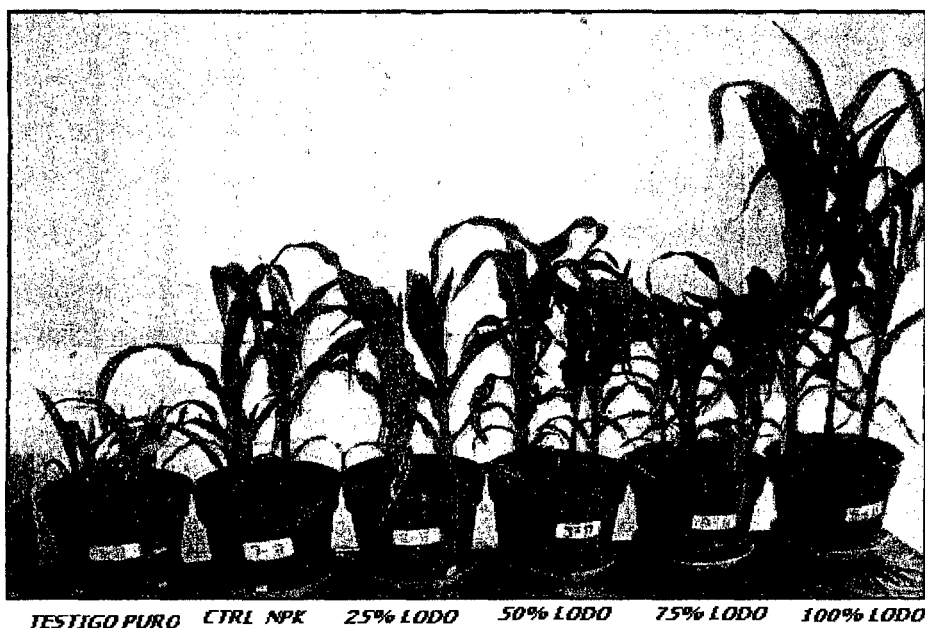
39-C: Contenido de Cromo en la planta de maíz. El Tto 5 contiene 9,023 mg/Kg PS, dentro del establecido como rango normal (0,03 - 14).

Estadísticamente, el tratamiento 1 del suelo al inicio del ensayo mostró una ligera desviación de la dispersión normal de los datos, con la media y la desviación estándar ligeramente altas. En tanto, al final del ensayo se observó incremento del valor en los tratamientos 5 y 7, la media y la desviación estándar aumentadas, mientras la planta mostró valores dentro de los rangos normales de la media y desviación estándar. Esta anomalía en el comportamiento del cromo similar al del plomo no contribuiría a la hipótesis, y limita el aprovechamiento agrícola del lodo,

En cuanto a la concentración del metal en el suelo, todos los datos mostraron valores dentro del rango normal establecido. En tanto, el tratamiento 1 en la planta de maíz, (15.35 mg/Kg) mostró su valor en el rango crítico (2 - 18), pudiendo ocasionar el 10% de depresión en el campo (Alloway, 1993). Algunos cultivos que crecen en suelos con lodo de desagüe conteniendo cromo, absorben el metal apenas sobre el límite. Se considera que Cr^{3+} se absorben en las raíces y puede inhibir el crecimiento de los brotes y raíces de la planta.

GRÁFICO N° 41

Imagen de los tratamientos del Ensayo N° 3



El gráfico N° 41 muestra la emergencia y velocidad de crecimiento de la planta de maíz de los tratamientos del Ensayo N° 3, antes del corte de la planta (60 días desde la siembra). El testigo puro es el tratamiento 1 que contiene sólo arena de río, el Control NPK o fertilizante inorgánico (formulación 300-400-200) corresponde al tratamiento 7, En tanto, 100% lodo compostado corresponde al tratamiento 5.

7.5 Resumen de los Ensayos N° 2 y N° 3**7.5.1 Variables biométricas de la planta de maíz**

Los resultados para las variables altura y espesor del tallo de la planta fueron mayores en todos los tratamientos del Ensayo N° 3 comparados con los del Ensayo N° 2. Se observó que a dosis altas de lodo compostado se aumentaron los valores de las variables, siendo el tratamientos 5 el más alto, favoreciendo el aumento del peso, volumen, longitud, crecimiento de la planta indicadora de maíz, entre otros. El lodo compostado es un compuesto mineralizado, estabilizado, y presenta mayor concentración de nutrientes disponibles y de fácil absorción por la planta de maíz.

En cuanto a la emergencia a los 60 días de la siembra tanto en los Ensayos N° 2 y N° 3 mostraron pérdidas de plántulas en ambos ensayos, observándose 36.5% de

pérdidas en el primer caso y 47.6% en el segundo. Este resultado nos mostró que es necesario realizar más evaluaciones de estabilidad del lodo antes de aplicarlo al suelo. El peso seco mostró una diferencia estadística altamente significativa para el tratamiento 5 del Ensayo N° 3 con el valor más alto, comparado con los NPK inclusive. Se observó que el lodo compostado en diferentes dosis favoreció a la planta en su aporte de sustancias nutritivas disponibles y desarrollo del foliar del maíz.

Este resultado puede significar un adecuado proceso de mineralización y una mejor disponibilidad de los elementos nutritivos del lodo en su forma compostada en el suelo influyendo en la solubilidad de algunos nutrientes como el P y K y en la absorción de la planta, favoreciendo el desarrollo radicular. La presencia de materia orgánica del lodo favorece su acción fertilizante como estimulante de las sustancias húmicas (Alva, 1999).

CUADRO N° 39

Resumen de los resultados de las pruebas estadísticas de las variables biométricas del maíz

ENSAYO 2: Mezcla de lodo y arena (reformulación)			
Variable morfológica	Pruebas estadísticas		
	ANVA	CV (%)	Tukey
1. Altura del tallo (26 d)	**	11,9	*
2. Altura del tallo (60 d)	**	38,59	*
3. Espesor del tallo (60 d)	**	56,67	*
4. Emergencia de semillas (26 d)	*	19,78	**
5. Emergencia de semillas (60 d)	*	28,06	*
6. Peso seco de la parte aérea (60 d)	*	33,85	*
ENSAYO 3: Mezcla de lodo compostado y arena			
Variable morfológica	Pruebas estadísticas		
	ANVA	CV (%)	Tukey
1. Altura del tallo (37 d)	**	14,59	**
2. Altura del tallo (60 d)	**	7,37	**
3. Espesor del tallo (37 d)	*	22,35	**
4. Espesor del tallo (60 d)	*	13,82	**
5. Emergencia de semillas (60 d)	**	34,01	*
6. Peso seco de la parte aérea (60 d)	*	17,31	**

*: Significativa; **: altamente significativa; ANVA: análisis de variancia; CV: coeficiente de variabilidad

7.5.2 Variable metales pesados en suelo antes y después de la fertilización y en el maíz

Arsénico: en el Ensayo N° 2 todos los valores encontraron dentro del rango normal. En el Ensayo 3, el Tto 5 del suelo antes de la fertilización mostró el valor más alto y concentración en el rango crítico. Las concentraciones de todos los demás Ttos., en el rango normal.

Mercurio: en el Ensayo N° 2, estadísticamente la media y desviación estándar con dispersión normal de los datos y concentración de los Ttos., en el rango normal. En el Ensayo N° 3, el Tto 5 del suelo antes y después de la fertilización mostró dispersión alta y concentración en el rango crítico. Los demás valores de los Ttos., en el rango normal.

Plomo: La estadística del Ensayo N° 2 mostró ligera dispersión de los datos por el aumento del valor del Tto. 1 del suelo después de la fertilización, todos los demás valores se encontraron dentro del rango normal, En el Ensayo 3, todos los Ttos., después de la fertilización aumentaron su valor, mostrando estadísticamente alta dispersión de los datos. La planta mostró los datos en el rango normal de concentración.

Cadmio: Ensayo N° 2 estadísticamente con dispersión normal y en el rango normal de concentración. En el suelo antes de la fertilización del Ensayo N° 3, el Tto 5 antes de la fertilización, mostró dispersión de los datos y concentración del metal más alto en el rango crítico. Los demás valores de los Ttos., en suelo y planta en el rango normal.

Cromo: La estadística del Ensayo N° 2 mostró ligera dispersión de los datos; el Tto. 7 del suelo después de la fertilización aumentó su valor, todos los demás se encontraron dentro del rango normal, En el Ensayo 3, el Tto. 5 en el suelo después de la fertilización aumentó su valor, mostrando estadísticamente alta dispersión de los datos. El Tto. 1 de la planta mostró ligera dispersión de los datos y concentración en el rango crítico con riesgo de toxicidad según Alloway (1993).

Vega (2004), indico que los principales metales que pueden ser peligrosos son el Cd, Pb y Hg. El Pb y Hg no se absorben en absoluto en los cultivos, y por tanto no plantean riesgo en la ingestión de productos alimenticios cultivados en suelos a los

que se han aplicado lodos. Por su parte, el Cd atraviesa la barrera suelo – planta y puede acumularse en los cultivos en concentraciones que podrían ser potencialmente peligrosas. La información científica disponible apoya la conclusión de que es improbable que se produzcan efectos perjudiciales para la salud humana derivados de la utilización de los lodos en la agricultura.

CUADRO N° 40

Resumen de los resultados de la prueba estadística de los metales pesados en el suelo (inicial), suelo (final) y en la plantas de maíz

	ENSAYO N° 2		RANGO	ENSAYO N° 3	
	\bar{X}	DS		\bar{X}	DS
As					
Suelo (inicial)	17.95	5.31269	0.10 - 40	26.95	13.934
Suelo (final)	9.61	4.6192		15.11	6.809
Planta (aérea)	1.88	0.5992	0.02 - 7	0.634	0.477
Hg					
Suelo (inicial)	0.75	0.0373	0.01 - 0.5	0.216	0.2808
Suelo (final)	0.525	0.0108		0.259	0.3638
Planta (aérea)	0.02	0.00	0.005 - 0.17	0.0391	0.000
Pb					
Suelo (inicial)	7.77	2.458	2.0 - 300	4.66	4.1257
Suelo (final)	9.727	8.1868		32.96	31.976
Planta (aérea)	2.45	2.1898	0.2 - 20	2.79	0.7806
Cd					
Suelo (inicial)	2.0	0.0	0.01 - 2.0	3.6	3
Suelo (final)	2.0	0.0		2.0	0
Planta (aérea)	0.67	0.577	0.10 - 2.4	1.0	0
Cr					
Suelo (inicial)	22.59	14.067	5.0 - 1500	32.45	10.785
Suelo (final)	19.24	6.435		30.70	13.253
Planta (aérea)	2.54	2.473	0.03 - 14	10.72	4.059

\bar{X} : valor promedio de los datos de metales totales (mg/Kg PS)

DS : Desviación Estándar.

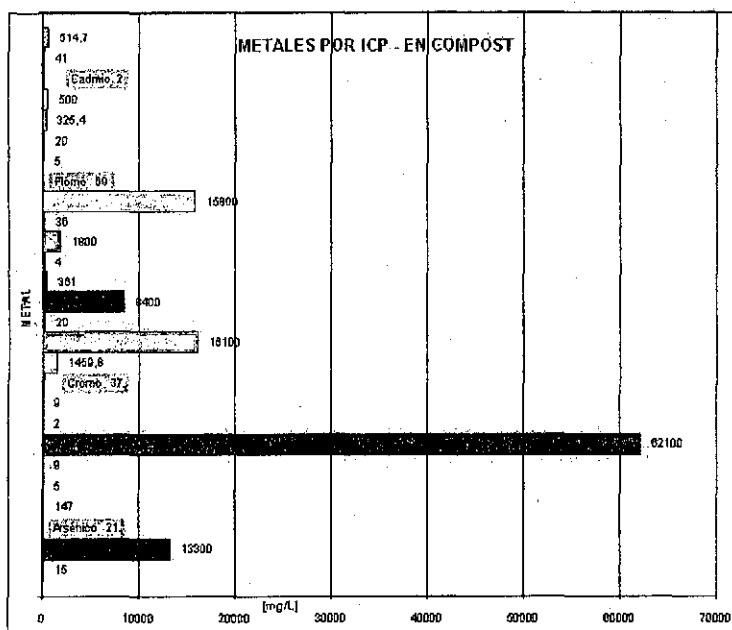
Leyenda: suelo (inicial) es el suelo antes de la fertilización; suelo (final) es el suelo después de la fertilización.

El suelo con lodo compostado (estabilizado) mostró resultados más favorables de las variables agronómicas evaluadas, con buena disponibilidad de materia orgánica conteniendo sustancias nutritivas que serán absorbidas por la raíz de la planta favoreciendo su crecimiento y desarrollo.

Así mismo, se observó, aunque dentro de los rangos normales de concentración establecidos por Alloway (1993) para la mayoría de los casos, la presencia de los metales pesados en la parte aérea de la planta, mostrando ligera variabilidad estadística en los tratamientos de los Ensayos N° 2 y N° 3. Este comportamiento de los metales que son elementos tóxicos a la planta, los animales y el ser humano limitan el aprovechamiento del lodo como fertilizante. Queda por investigar las fuentes de variabilidad de estos elementos, que son algunos de los factores que limitan el aprovechamiento de los lodos en el suelo agrícola.

7.5.3 Análisis de los metales pesados en el lodo compostado, aplicando el método ICP para metales totales (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission spectrometric Method for Trace Element Analysis for Water and Wastes).

GRÁFICO N° 42
Medición de metales por ICP



Legenda: La medición de la concentración de los metales por el método de ICP en el lodo compostado después de la fertilización mostrando sus valores aproximadamente similares a los realizados por El método de Absorción Atómica.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

1. La evaluación de los diferentes ensayos preliminares realizados con el lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra, permitieron determinar que este lodo cumple las exigencias sanitarias y ambientales para ser utilizadas con fines agrícolas.
2. En cuanto a los resultados de las variables agronómicas se encontró que el Ensayo N° 2 mostró resultados significativos a bajas tasas de contenido de lodo seco, 2%, 4% y 6% inclusive. En tanto, el Ensayo N° 3 mostró resultados altamente significativos a dosis de 100% de lodo compostado.
3. En cuanto a la presencia de metales Hg, Pb, Cd, Cr y As, en la caracterización preliminar del lodo, así como las concentraciones antes y después de la fertilización, y en la planta indicadora de maíz, los valores estuvieron dentro de los rangos normales establecidos en la norma técnica de aplicación de lodo en suelo recomendado por la US-EPA Part 503 y la Directiva 86/278/EEC, aunque el Pb y Cr mostraron aumento en el suelo sin afectar los límites permisibles. indicando que no habría riesgo de toxicidad. Encuadrándose su clasificación en el lodo tipo B. Investigaciones científicas indican que las raíces son buenas barreras a esta absorción.
4. El lodo compostado resultó ser un producto que ofrece mejores resultados para las variables agronómicas de la planta de maíz y sin efecto de toxicidad.
5. Se reitera que el tema es novedoso en el Perú, y la primera realizada en lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de lodos activados con el sistema Sequencing Batch Reactor (SBR).

8.2 RECOMENDACIONES

1. Se requiere un registro de los afluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, que garantice un control del ingreso de las sustancias tóxicas contaminantes y la calidad del lodo final generado.
2. El resultado del Ensayo N° 1, exige recomendar que se tome en cuenta el grado de madurez del lodo antes de aplicarlo al suelo, para asegurar la viabilidad de su aplicación.
3. Las experiencias a nivel mundial recomiendan su aplicación en plantaciones de especies forestales, como el pino y otros árboles, con muy buenos resultados en el aumento de altura, diámetro y productividad en casi 40% comparado con las parcelas testigo. Esta investigación se inclina a recomendar que esta alternativa podría replicarse en la forestación en suelos arenosos del país.
4. Así también, se recomienda realizar investigación de opinión pública referente a la aplicación de lodos de las PTAR en los suelos agrícolas, con el objetivo de documentar el impacto de su utilización en la productividad, en los modos de vida y en la salud, de los agricultores y consumidores, y tomar las acciones pertinentes; sobre todo ahora que se ha programado construir más de 20 PTAR del tipo biológico aerobio en todo el país, donde con ensayos previos como este y estableciendo el escalamiento, se podría aprovechar el lodo de las PTAR y reducir su disposición final directamente al relleno sanitario, escaso en nuestro país, y con el costo que esto involucra.

X. BIBLIOGRAFÍA

1. Alva E. (1999). Estudio del empleo del humus de lombriz con fines agrícolas, procedentes de lodos residuales de depuradora en Cajamarca Tesis de maestría en Ciencias Ambientales, UNALM - Perú.
2. Alloway, B. (1993). Heavy metals in soil. U. of London. John Wiley & Sons, Inc.
3. Andrade, M., (2000). Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. Edafología, Volumen 7-3, España. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01082e21.pdf>
4. Azabache, A. (2003). Fertilidad de suelos para una agricultura sostenible. Huancayo - Perú.
5. Bettiol, W. et al. (2008). Lodo de esgoto na agricultura: potencial de uso e problemas. Embrapa meio ambiente, CP 69; 13820-000 Jaguariúna, sp.
6. Carrasco A., Castillo, G. (2007). Evaluación de toxicidad de lodos de aguas servidas. Simposio Residuos Orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. XXV Jornadas Chilenas de Química. Comportamiento de algunos metales pesados en suelos agrícolas tratados con lodo estabilizado de origen domiciliario.
7. Chicon, L. (1997) Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelo. Trabajo de investigación del Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad de Málaga, España. <http://usuarios.lycos.es/ambiental/lodos.html>
8. Cszys (1994). Manual de disposición de aguas residuales. Edición alemana. CEPIS
9. Dellepere, A. (2008). Caracterización y disposición final de lodos provenientes de las estaciones de depuración de líquidos residuales. España.
10. Directiva 86/278/CEE (2001), 12/06/86. Directiva del Consejo de la UE sobre límites máximo permisibles de metales pesados en lodos que se disponen al suelo.
11. Directiva 91/271/EEC, (2005). Directiva del Consejo de la UE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas.
12. EPA 832-F-99-073 (1999) Wastewater Technology Fact Sheet Package Plants - Office of Water Washington, D.C. United States Environmental Protection Agency. http://www.epa.gov/owm/mtb/cs_99_073.pdf
13. EPA 832-F-00-064 (2000). Biosolids Technology Fact Sheet. Office of Water Washington, D.C. EPA - United States Environmental Protection Agency http://www.epa.gov/owm/mtb/cs_00_064.pdf
14. Environmental Protection Agency U.S. (1993). EPA 625/10-84-003. Standard for the use or disposal of sewage sludge (40CFR Parts 257, 403 and 503) Final Rule and Phased-IN submission of Sewage Sludge Permit Application (Revision to 40 CFR Parts 122, 123 and 501) Final Rule . Excerpted from the Federal Register. Vol. 58 9248-9415. Water Environment Federation. pp 1-157

15. Eyzaguirre, R. (2003). Métodos estadísticos para la investigación I. Dpto. Estadística e Informática UNALM.
16. Falcón E. (2005). Producción de compost a partir de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti de SEDALIB S:A: Trujillo. Tesis de Ing. Agrícola. UNALM, Lima Perú.
17. Fassbender, H., Bornemisza, E. (1982) Introducción a la química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Monografía N° 25. OEA
18. Ferreira, A., Andreoli, C. (1999). Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Companhia de Saneamento do Paraná SANEPAR. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico PROSAB. Curitiba Brasil.
19. Goldstein, N. (2007). Invest in the social aspects of biosolids management. North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA), pag. 881-887. P.O.Box 422, Tamworth, NH 03886. USA.
20. Granato, Thomas and Col. (2004). "Trace element concentrations in soil, corn leaves, and grain after cessation of biosolids applications". Journal of environmental quality. Vol.33 part 6, pág 2078–2089. American Society of Agronomy
21. Guerrero, J. (2001) Curso de abonos orgánicos. Fac. Agronomía, UNALM Lima – Perú.
22. Hernandez, A. (1994). Depuración de aguas residuales. Paraninfo S. A. España
23. Lenom J. (1977). Química de Suelos con un enfoque agrícola. Chapingo México.
24. León, G., Moscoso, J. (1996). Curso de tratamiento y uso de aguas residuales. CEPIS <http://www.cepis.ops-oms.org/cdrom-repi86/titulo.html>
25. León, O., (2008). Evaluación técnico – económica de los lodos albañales de la PTAR "María del Carmen" para su posible uso en la agricultura. Tesis de Maestría, U. La Habana – Cuba.
26. Leppe Z., Arodys. (2002). Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS México.
27. Ley General de Residuos Sólidos. Ley N° 27314. Normas Legales El Peruano, 21-07-2000. Año XVIII – N° 7333, pág. 190739-190748. <http://www.editoraperu.com.pe>
28. Liew, A. et al., (2004) Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization. Waste Management & Research. ISSN 0734-242X. Department of Chemical and Environmental Engineering, Universiti Putra Malaysia.
29. Lothat, M. (2008). Reducción y disposición final de lodos, incineración, relleno, disposición en el terreno. Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Basico e de Defesa do Meio Ambiente – CETESB. São Paulo, Brasil.
30. Ministerio do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resol. N° 375. 29.08.2006. Critérios e procedimentos para o uso em áreas agrícolas, de lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, visando benefícios á agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente.

31. Miralles de Imperial, R. (2002). Emergencia de seis cultivos tratados con lodo fresco y compostado, de estaciones depuradoras. Revista Int. Contaminación Ambiental. 18 (3) 139-146, 2002. España.
32. Moscoso, J., Alfaro, T. (2008). "Panorama de experiencias de tratamiento y uso de aguas residuales en Lima Metropolitana y el Callao". Publicación IPES. Lima Perú.
33. Municipio Metropolitano de Quito, Ecuador. Dirección de Medio Ambiente (1999). Manejo ambientalmente adecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento.
34. O'Brien, J. (2008). Que son los metales pesados. Boletín de Nutrición Vegetal ALBIÓN. Volumen 9, N° 3. <http://www.aapftco.org/metals.htm>
35. PROSAB Programa de Pesquisa en Saneamiento Básico (2001). Manual pratico para compostagem de biossólido. Brazil.
36. Quipuzco U. Lawrence. (2004). Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol 7 N.º 13 64-72. UNM SM – Lima. Perú.
37. Ramírez, F. (2006). Consumo de Fertilizantes en el Perú. Corporación Misti S.A. Perú.
38. Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en en sector agrario. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (BOE nº 262 de 1/11/1990). http://www.boe.es/t/es/bases_datos/doc.php?coleccion=iberlex&id=1990/26490&codmap=
39. Reglamento Nacional de Construcciones Norma S.090. (1997). Plantas de tratamiento de aguas residuales. Viceministerio de Vivienda y Construcción – MTC-Perú.
40. Rodrigues L. (2004). A vermicompostagem do lodo de lagoas de tratamento de efluentes industriais consorciada com pomposto de lixo urbano. Eng. Sanit. Ambient. Vol. 9 – N° 3 – jul/set 2004, 218 –224
41. (a) SEDAPAL, (2006). Tratamiento de aguas residuales. http://www.sedapal.com.pe/nuestra_empresa/tratresiduales.php (2006)
(b) Sedapal. Informe Anafítico. http://www.sedapal.com.pe/erdf/resumen_df.htm (2006)
42. Tomoyuki M. (2004). Metais pesados: O principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Pags. 753 – 761.
43. Tomoyuki M.(1999). Tecnologías emergentes para a disposição final de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Pags. 762 – 770.
44. Torres, E. (2005). Reutilización de aguas y lodos residuales. Universida Politécnica de Madrid - España.
45. Vega, Miguel (2004). Tratamiento de las aguas residuales urbana en Europa: El problema de los lodos. Revista Ingeniería Municipal.

ANEXOS

- A.1 El pH y la conductividad eléctrica de las muestras experimentales
- A.2 Fertilización de la planta indicadora utilizando la mezcla de lodo N° 1 y arena
- A.3 Fertilización de la planta indicadora utilizando la mezcla de lodo compostado y arena
- A.4 Peso de foliar de la planta indicadora, del Ensayo N° 2
- A.5 Peso de foliar de la planta indicadora, del Ensayo N° 3
- A.6 Resultados de los análisis de metales pesados
- A.7 Método de ensayo utilizado en los análisis de lodos
- A.8 Resultados del análisis ANVA del maíz en el Ensayo N° 2
- A.9 Estadística de los metales en los Ensayos N° 2 inicial – final - planta
- A.10 Resultados del análisis ANVA del maíz en el Ensayo N° 3
- A.11 Estadística de los metales en los Ensayos N° 3 inicial – final - planta
- B.1 Resultado de los análisis de Metales por ICP – Compost.
- C.1 Protocolo de muestreo de suelo (Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes – UNALM)
- C.2 Tabla de Interpretación (Informe de análisis especial en suelo - Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes - UNALM)
- C.3 Referencia de las normas técnicas internacionales que establecen características y criterios de aplicación para los lodos de desagües en el suelo agrícola
- D.1 Cálculo de los nutrientes que se aplicaron en la fertilización inorgánica del Control NPK (maceta N° 7) en los Ensayos N° 1 y N° 2
- D.2 Balance de materiales para la producción de compost
- D.3 Datos Técnicos de la Planta de Puente Piedra
- D.4 Estimación de costos del lodo compostado y de la disposición final de los lodos residuales en un relleno sanitario
- E.1 Inventario de Plantas de Tratamiento de aguas Residuales en Lima
- F.1 Panel fotográfico

A.1

El pH y la conductividad eléctrica de las muestras experimentales

Nº	Muestra	pH (1:1)	CE (1:1) µS/cm
1	Arena (i)	7,38	510
2	Arena (f)	7,48	960
3	Lodo Nº 1	6,97	4690
4	Lodo Nº 2	6,82	3650
5	Maceta 4	6,82	750
6	Compost	7,86	330
7	NPK	7,11	2030

A.2

FERTILIZACIÓN DE LA PLANTA INDICADORA UTILIZANDO LA MEZCLA DE LODO Nº 1 Y ARENA

Datos de medición de la altura máxima H (cm), espesor de la planta (D cm) y cantidad de semillas emergentes (s) de la planta indicadora de maíz en el Ensayo Nº 2

Instalación del Sistema: 21 de Marzo de 2007

TRATAM	H-16AB07	S-16AB07
1A	29,2	6
1B	32,2	5
1C	34,6	6
2A	67,0	5
2B	61,5	5
2C	59,2	6
3A	54,2	6
3B	60,3	3
3C	56,7	6
4A	25,3	4
4B	33,5	5
4C	42,7	6
5A	30,0	3
5B	23,3	4
5C	24,0	3
6A	10,5	2
6B	11,9	4
6C	12,0	4
7A	52,0	6
7B	62,9	6
7C	62,5	6

Desinstalación del Sistema: 21 de Mayo de 2007

TRATAM	H-21MY07	Espesor planta D-21MY07	S-21MY07
1A	39,8	0,3	6
1B	43,8	0,29	5
1C	39,8	0,2	6
2A	90,2	1,0	5
2B	92,4	0,9	5
2C	77,8	0,8	6
3A	68,5	1,0	6
3B	122,0	1,6	3
3C	98,8	1,1	6
4A	105,5	2,1	2
4B	101,2	1,44	5
4C	92,0	1,5	5
5A	98,0	1,9	2
5B	0	0	0
5C	0,0	0,0	0
6A	0,0	0,0	0
6B	0	0	0
6C	0,0	0,0	0
7A	73,5	0,9	6
7B	92,8	1,1	6
7C	88,0	0,9	6

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la investigación experimental. Marzo - Mayo 2007

A.3

FERTILIZACIÓN DE LA PLANTA INDICADORA UTILIZANDO LA MEZCLA DE LODO COMPOSTADO Y ARENA

Datos de medición de la altura máxima H (cm), espesor de la planta (D cm) y cantidad de semillas emergentes (s) de la planta indicadora de maíz en el Ensayo N° 3

Instalación del Sistema: 24 de Noviembre de 2007

TRAT.	H-28DIC07	S-28DIC07
1A	36,5	4
1B	34,5	5
1C	34,5	3
2A	57,5	2
2B	60,0	2
2C	69,0	5
3A	66,0	2
3B	60,0	4
3C	55,0	3
4A	47,5	2
4B	42,0	5
4C	66,0	4
5A	79,0	4
5B	86,0	4
5C	66,0	3
6A	0,0	0
6B	0,0	0
6C	0,0	0
7A	57,0	5
7B	67,5	4
7C	57,0	5

Desinstalación del Sistema: 21 de Enero de 2008

TRAT.	H-21ENE08	Espesor planta 21ENE08	S-21ENE08
1A	46,0	0,58	4
1B	44,0	0,58	5
1C	48,0	0,74	3
2A	126,0	1,40	2
2B	130,0	1,77	2
2C	115,0	1,37	5
3A	137,0	2,20	2
3B	141,0	1,79	4
3C	134,0	1,96	3
4A	150,0	2,00	2
4B	130,0	1,68	5
4C	148,0	1,87	4
5A	125,0	1,72	4
5B	133,0	2,13	4
5C	148,0	2,35	3
6A	0,0	0,00	0
6B	0,0	0,00	0
6C	0,0	0,00	0
7A	83,0	1,15	5
7B	87,0	1,29	4
7C	91,0	1,19	5

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la investigación experimental. Noviembre 2007 a Enero 2008

A.4

Peso de foliar de la planta indicadora, del Ensayo N° 2

Tto	PESO DEL FOLIAR			Cantidad semilla(s)	PCFo	PCFf	Agua
	Fo	Ff	% H				
1A	33	15,0	54,5	6	33,0	15,0	18,0
1B	26	11,0	57,7	5	29,6	12,5	17,1
1C	27	11,0	59,3	6	27,0	11,0	16,0
2A	171	41	76,0	5	194,9	46,7	148,2
2B	164	38	76,8	5	187,0	43,3	143,6
2C	138	38	72,5	6	138,0	38,0	100,0
3A	82	25,0	69,5	6	82,0	25,0	57,0
3B	234	46,0	80,3	3	397,8	78,2	319,6
3C	184	43,0	76,6	6	184,0	43,0	141,0
4A	173	34	80,3	2	415,2	81,6	333,6
4B	225	46	79,6	5	256,5	52,4	204,1
4C	208	44	78,8	5	237,1	50,2	187,0
5A	184	32,0	82,6	2	441,6	76,8	364,8
5B	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
5C	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6A	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6B	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6C	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
7A	175	42,0	76,0	6	175,0	42,0	133,0
7B	199	54,0	72,9	6	199,0	54,0	145,0
7C	178	41,0	77,0	6	178,0	41,0	137,0

Leyenda

F _o	=	Peso del foliar fresco
W _{bolsa}	=	4 g
F _f	=	peso del foliar seco
PCFo	=	Peso corregido por fallas - inicial
PCFf	=	Peso corregido por fallas - final
M	=	6 Número de plántulas con población perfecta
N	=	número de plantas que se marchitaron

Nota: El término "Foliar" se refiere al conjunto de tallo y hojas de la planta.

A.5

Peso de foliar de la planta indicadora, del Ensayo N° 3

Trto	PESO DEL FOLIAR			Cantidad semilla(s)	PCFo	PCFf	Agua
	Fo	Ff	% H				
1A	23,0	9,0	60,9	4	31,1	12,2	18,9
1B	30,0	11,0	63,3	5	34,2	12,5	21,7
1C	25,0	9,0	64,0	3	42,5	15,3	27,2
2A	94,0	36,0	61,7	2	225,6	86,4	139,2
2B	163,0	45,0	72,4	2	391,2	108,0	283,2
2C	161,0	41,0	74,5	5	183,5	46,7	136,8
3A	258,0	37,0	85,7	2	619,2	88,8	530,4
3B	263,0	53,0	79,8	4	355,1	71,6	283,5
3C	244,0	46,0	81,1	3	414,8	78,2	336,6
4A	297,0	41,0	86,2	2	712,8	98,4	614,4
4B	335,0	76,0	77,3	5	381,9	86,6	295,3
4C	352,0	71,0	79,8	4	475,2	95,9	379,4
5A	407,0	124,0	69,5	4	549,5	167,4	382,1
5B	462,0	136,0	70,6	4	623,7	183,6	440,1
5C	456,0	129,0	71,7	3	775,2	219,3	555,9
6A	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6B	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6C	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
7A	130,0	43,0	66,9	5	148,2	49,0	99,2
7B	151,0	50,0	66,9	4	203,9	67,5	136,4
7C	110,0	34,0	69,1	5	125,4	38,8	86,6

Leyenda

Fecha = 26 de Enero de 2008

F _o	=	Peso del foliar fresco
W _{bolsa}	=	4 g
F _f	=	peso del foliar seco
PCFo	=	Peso corregido por fallas - inicial
PCFf	=	Peso corregido por fallas - final
M	=	6 Número de plántulas con población perfecta,
N	=	número de plantas que se marchitaron

A.6

Resultados de los análisis de Metales Pesados

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN - APROVECHAMIENTO CON FINES AGRÍCOLAS DEL LODO GENERADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGÜES DE PUENTE PIEDRA

PRIMERA FASE DE LA ETAPA EXPERIMENTAL : FORMULACION F1

Cantidad de lodo	30	kg
Cantidad de arena	45	kg
Capacidad por maceta	4,00	Kg
Planta Indicadora	Semillas de Maíz	
Nº réplicas	3	

Resultados de los análisis de laboratorio preliminares

METALES	Lodo	Arena
Arsénico (As) mg/Kg	16,00	24,08
Mercurio (Hg) mg/Kg	0,7250	0,050
Plomo (Pb) mg/Kg	49,60	8,60
Cadmio (Cd) mg/Kg	< 2,00	< 2,00
Cromo (Cr) mg/Kg	12,40	38,68

Formulación: Se utilizaron porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100% lodo y el control con fertilizante inorgánico NPK.

Cantidad material/Nº Maceta	1	2	3	4	5	7
Porcentaje de lodo (%)	0	25	50	75	100	NPK
Proporción de lodo (g)	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00
Proporción de arena (g)	4,00	3,00	2,00	1,00	0,00	4,00

Nota: la fertilización F1 no produjo los resultados esperados, y se desinstala el sistema.

SEGUNDA FASE DE LA ETAPA EXPERIMENTAL : REFORMULACION F2

Cantidad de lodo	4,00	kg
Cantidad de arena	81,00	kg
Capacidad por maceta	4,00	Kg
Planta Indicadora	Semillas de Maíz	
Nº réplicas	3	

Formulación: Se utilizaron porcentajes de 0, 2, 4, 6, 8 y 10% lodo y otro control con fertilizante inorgánico NPK.

Cantidad material/Nº Maceta	1	2	3	4	5	6	7
Porcentaje de lodo (%)	0	2	4	6	8	10	NPK
Proporción de lodo (g)	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,00
Proporción de arena (g)	4,00	3,92	3,84	3,76	3,68	3,60	4,00

NOTA: Se utilizaron los resultados preliminares de metales de F1.

Cuadro de Resultados de los Análisis de Laboratorio para la Etapa Inicial y Final de Suelos y Foliar en la Fase F2

METALES	Inicial 21/03/2007			Final 26/06/2007			FOLIAR DEL MAÍZ		
	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 4	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 4	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 4
Arsénico (As) mg/Kg	24,08	14,68	15,09	10,99	13,39	4,464	1,20	2,09	2,34
Mercurio (Hg) mg/Kg	0,0500	0,0572	0,1179	0,0583	< 0,040	0,0592	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Plomo (Pb) mg/Kg	8,60	< 5,00	9,70	19,18	< 5,00	< 5,00	3,15	0,00	4,21
Cadmio (Cd) mg/Kg	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 1,00	0,00	< 1,0
Cromo (Cr) mg/Kg	38,68	16,47	12,62	24,97	20,48	12,28	4,94	0,00	2,68

1.- Instalación del Sistema F2: Miércoles, 21-03-2007. Desinstalación: 25-05-2007

TERCERA FASE DE LA ETAPA EXPERIMENTAL : LODO COMPOSTADO

Cantidad de lodo	30	kg
Cantidad de arena	45	kg
Capacidad por maceta	4,00	Kg
Planta Indicadora	Semillas de Maíz	
Nº réplicas	3	

Formulación: Se utilizaron porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100% lodo y el control NPK. Se obvió la maceta Nº 6

Cantidad material/Nº Maceta	1	2	3	4	5	6	7
Porcentaje de lodo (%)	0	25	50	75	100	0	NPK
Proporción de lodo (g)	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00	0,00
Proporción de arena (g)	4,00	3,00	2,00	1,00	0,00	4,00	4,00

Resultados de los análisis de laboratorio preliminares para los metales

METALES	Lodo	Arena
Arsénico (As) mg/Kg	11,40	24,08
Mercurio (Hg) mg/Kg	0,81	0,050
Plomo (Pb) mg/Kg	48,49	8,60
Cadmio (Cd) mg/Kg	< 2,00	< 2,00
Cromo (Cr) mg/Kg	22,59	38,68

Resultados de los análisis de laboratorio para la etapa inicial y final de los suelos y del foliar en la Fase de Lodo Compostado - LC

METALES	Inicial 02/10/2007			Final 23/01/2008			FOLIAR DEL MAÍZ		
	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 5	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 5	Testigo	Ctrl NPK	Maceta Nº 5
Arsénico mg/Kg	24,08	14,68	42,10	10,99	11,37	22,97	0,08351	0,9143	0,9055
Mercurio mg/Kg	0,0500	0,0572	0,540	0,0583	0,0398	0,6791	0,0391	0,0390	0,0393
Plomo mg/Kg	8,60	< 5,00	0,37	19,18	10,19	69,52	2,945	3,482	1,944
Cadmio mg/Kg	< 2,00	< 2,00	6,75	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 1,00	< 1,00	< 1,0
Cromo mg/Kg	38,68	38,68	20,00	24,97	21,27	45,85	15,35	7,785	9,023

1.- Instalación de las composteras el viernes 16 de Marzo de 2007. Desinstalación de la etapa de compostaje, 07 de Noviembre de 2007

2.- Instalación del sistema de fertilización con el lodo compostado: Miércoles, 21 de Noviembre de 2007.

3.- Desinstalación del sistema de fertilización, Lunes, 21 de Enero de 2008.

4.- Maceta Nº 5 contiene Lodo Compostado únicamente, es la muestra para la presente fase.

A.7

Método de ensayo utilizado en los análisis de lodos

Ensayo	Símbol	Unidad	Referencia y Año	MÉTODO DE ENSAYO
FISICOQUÍMICOS⁽¹⁾				
pH	pH	-	Nepec Guideline on Laboratory Analysis of Potentially contaminated soil. 1999	Method 103 pág. 41.
Conductividad eléctrica	C.E.	mS/cm		Method 104. pág. 44, 1999
Materia Orgánica	M.O.	g/100g	Norma Mexicana NMX - AA -	021 - 1985.
Densidad	ρ	Kg/L	G. Lotti, C Galoppini, Análisis de suelo. 1ºEd. España 1986	Cap. 14. Determinac. densidad aparente, pág. 286
Humedad	% H	g/100g		Capitulo 14. Determinac. de humedad Pág. 279
METALES⁽²⁾				
Arsénico	As	(mg/kg)	SMEWW 21th Ed. 2005 Part. 3114 C. APHA -AWWA-WEF.	Arsenic and Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption spectrometry.
Mercurio	Hg	(mg/kg)	SMEWW 21th Ed. 2005 Part. 3112 B. APHA - AWWA - WEF.	Metals y cold - vapor atomic absorption Spectrometry method.
Cadmio *	Cd	(mg/kg)	SMEWW 20th Ed. 1998 Part. 3112 B. APHA-AWWA-WEF	
Plomo	Pb	(mg/kg)	SMEWW 20th Ed. 1998 Part. 3111 B pág. 3 - 17. APHA-AWWA-WEF (Approved by Standard Methods committee 1999).	Metals by flame atomic absorption spectrometry. Direct Air - Acetylene flame Method.
Cromo	Cr	(mg/kg)	EPA Method 218.1 1986	A.A Direct Aspiration.
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS⁽³⁾				
Coliformes fecales	CF	NMP/g	APHA/AWWA/WEF Standard Methods. 9221 E. 2005	Num. de Coliformes fecales.
Escherichia coli	E. coli	NMP/g		Num. de E. coli.
Salmonella sp		NMP/g	APHA/AWWA/WEF Standard Methods. 9260B. 2005	Num. Salmonella
ANÁLISIS PARASITOLÓGICO⁽⁴⁾				
Giardia lamblia, quistes		Nº/g	EPA. 6.700 - 73 - 01	Método de Sedimentación rápida
Uncinaria. huevos				
Uncinaria, larvas				

Fuente: Laboratorio de División Ambiental - Certificaciones del Perú -CERPER SA. Análisis fisicoquímico y de metales pesados. 2007 - 2008
Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos y Aguas de la Facultad de Ciencias Biológicas, UNMSM. Análisis microbiológico de lodo. 2007

A.8

Resultados del análisis ANVA del maíz en el Ensayo N° 2

THE ANOVA PROCEDURE - ALTURA DEL FOLIAR F2: 16 DE ABRIL DE 2007

Obs	TRAT	ALT
1	1	29.2
2	1	34.6
3	1	32.2
4	2	67.0
5	2	61.5
6	2	59.2
7	3	54.2
8	3	60.3
9	3	56.7
10	4	25.3
11	4	33.5
12	4	42.7
13	5	30.0
14	5	23.3
15	5	24.0
16	6	10.5
17	6	11.8
18	6	12.0
19	7	52.0
20	7	62.8
21	7	62.5

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations		21

Dependent Variable: ALT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	6856.679048	1142.779841	49.80	<.0001
Error	14	321.233333	22.945238		
Corrected Total	20	7177.912381			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ALT Mean
0.955247	11.90021	4.790119	40.25238

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	6856.679048	1142.779841	49.80	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for ALT

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 22.94524
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 13.355
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING

	MEAN	N	TRAT
A	62.567	3	2
A			
A	59.100	3	7
A			
A	57.067	3	3
B	33.833	3	4
B			
B	32.000	3	1
B			
B	25.767	3	5
C	11.433	3	6

THE ANOVA PROCEDURE - ALTURA DEL FOLIAR F2: 21 DE MAYO DE 2007

OBS	TRAT	ALT
1	1	39.8
2	1	43.8
3	1	39.8
4	2	90.2
5	2	92.4
6	2	77.8
7	3	68.5
8	3	122.0
9	3	98.8
10	4	101.5
11	4	101.2
12	4	92.0
13	5	98.0
14	5	0.0
15	5	0.0
16	6	0.0
17	6	0.0
18	6	0.0
19	7	73.5
20	7	92.8
21	7	88.0

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: ALT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	26299.59619	4383.26603	7.45	0.0010
Error	14	8237.03333	588.35952		
Corrected Total	20	34536.62952			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ALT Mean
0.761499	38.58636	24.25612	62.86190

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	26299.59619	4383.26603	7.45	0.0010

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for ALT

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 588.3595
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 67.626
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING

	MEAN	N	TRAT
A	98.23	3	4
A			
A	96.43	3	3
A			
A	86.80	3	2
A			
A	84.77	3	7
A			
B	41.13	3	1
B			
B	32.67	3	5
B			
B	0.00	3	6

THE ANOVA PROCEDURE - FOLIAR F2: ESPESOR 21 MAYO 2007

OBS	TRAT	ESP
1	1	0.33
2	1	0.29
3	1	0.21
4	2	1.02
5	2	0.90
6	2	0.82
7	3	1.00
8	3	1.62
9	3	1.08
10	4	2.10
11	4	1.44
12	4	1.47
13	5	1.91
14	5	0.00
15	5	0.00
16	6	0.00
17	6	0.00
18	6	0.00
19	7	0.92
20	7	1.10
21	7	0.91

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: ESP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	5.78299048	0.96383175	4.52	0.0095
Error	14	2.98793333	0.21342381		
Corrected Total	20	8.77092381			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ESP Mean
0.659337	56.66788	0.461978	0.815238

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	5.78299048	0.96383175	4.52	0.0095

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for ESP

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05

Error Degrees of Freedom 14

Error Mean Square 0.213424

Critical Value of Studentized Range 4.82895

Minimum Significant Difference 1.288

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING (21 MAYO 2007)

	MEAN	N	TRAT
A	1.6700	3	4
A			
B A	1.2333	3	3
B A			
B A	0.9767	3	7
B A			
B A	0.9133	3	2
B A			
B A	0.6367	3	5
B			
B	0.2767	3	1
B			
B	0.0000	3	6

THE ANOVA PROCEDURE - EMERGE SEMILLAS FOLIAR F2: 16 DE ABRIL DE 2007

OBS	TRAT	EMERGE
1	1	6
2	1	5
3	1	6
4	2	5
5	2	5
6	2	6
7	3	6
8	3	3
9	3	6
10	4	4
11	4	5
12	4	6
13	5	3
14	5	4
15	5	3
16	6	2
17	6	4
18	6	4
19	7	6
20	7	6
21	7	6

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: EMERGE

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	20.57142857	3.42857143	3.79	0.0187
Error	14	12.66666667	0.90476190		
Corrected Total	20	33.23809524			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EMERGE Mean
0.618911	19.77721	0.951190	4.809524

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	20.57142857	3.42857143	3.79	0.0187

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for EMERGE

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 0.904762
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 2.6519

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING (16 DE ABRIL DE 2007)

	MEAN	N	TRAT
A	6.0000	3	7
A			
B A	5.6667	3	1
B A			
B A	5.3333	3	2
B A			
B A	5.0000	3	4
B A			
B A	5.0000	3	3
B			
B	3.3333	3	6
B			
B	3.3333	3	5

THE ANOVA PROCEDURE - EMERGE SEMILLAS FOLIAR F2: 21 de Mayo de 2007

OBS	TRAT	EMERGE
1	1	6
2	1	5
3	1	6
4	2	5
5	2	5
6	2	6
7	3	6
8	3	3
9	3	6
10	4	2
11	4	5
12	4	5
13	5	2
14	5	0
15	5	0
16	6	0
17	6	0
18	6	0
19	7	6
20	7	6
21	7	6

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: EMERGE

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	109.2380952	18.2063492	15.93	<.0001
Error	14	16.0000000	1.1428571		
Corrected Total	20	125.2380952			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EMERGE Mean
0.872243	28.06243	1.069045	3.809524

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	109.2380952	18.2063492	15.93	<.0001

The ANOVA Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for EMERGE

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 1.142857
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 2.9805
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING (21 de Mayo de 2007)

	Mean	N	TRAT
A	6.0000	3	7
A			
A	5.6667	3	1
A			
A	5.3333	3	2
A			
A	5.0000	3	3
A			
A	4.0000	3	4
B	0.6667	3	5
B			
B	0.0000	3	6

THE ANOVA PROCEDURE - PESO FRESCO DEL FOLIAR F2

OBS	TRAT	PFRESCO
1	1	33
2	1	26
3	1	27
4	2	171
5	2	164
6	2	138
7	3	82
8	3	234
9	3	184
10	4	173
11	4	225
12	4	208
13	5	184
14	5	0
15	5	0
16	6	0
17	6	0
18	6	0
19	7	175
20	7	199
21	7	178

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: PESOFRESCO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	121126.0000	20187.6667	7.65	0.0009
Error	14	36954.6667	2639.6190		
Corrected Total	20	158080.6667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PFRESCO Mean
0.766229	44.93635	51.37722	114.3333

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	121126.0000	20187.6667	7.65	0.0009

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for PESOI

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 2639.619
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 143.24

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING PESO DEL FOLIAR FRESCO

	Mean	N	TRAT
A	202.00	3	4
A			
A	184.00	3	7
A			
B	166.67	3	3
B			
B	157.67	3	2
B			
B			
B	A	C	61.33
B		C	
B		C	28.67
B		C	
B		C	0.00
B		C	

THE ANOVA PROCEDURE - PESO SECO DEL FOLIAR-F2

OBS	TRAT	PESOSECO
1	1	15
2	1	11
3	1	11
4	2	41
5	2	38
6	2	38
7	3	25
8	3	46
9	3	43
10	4	34
11	4	46
12	4	44
13	5	32
14	5	0
15	5	0
16	6	0
17	6	0
18	6	0
19	7	42
20	7	54
21	7	41

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: PESOSECO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	6087.619048	1014.603175	12.41	<.0001
Error	14	1144.666667	81.761905		
Corrected Total	20	7232.285714			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PESOSECO Mean
0.841728	33.84792	9.042229	26.71429

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	6087.619048	1014.603175	12.41	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for PESOSECO

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 81.7619
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 25.21
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING PESO SECO DEL FOLIAR F2

	MEAN	N	TRAT
A	45.667	3	7
A			
A	41.333	3	4
A			
A	39.000	3	2
A			
A	38.000	3	3
B	12.333	3	1
B			
B	10.667	3	5
B			

A.9

Estadística de los metales en los Ensayos N° 2 inicial – final - planta

THE UNIVARIATE PROCEDURE METALES F2 INICIAL

Obs	As	Hg	Pb	Cd	Cr
1	24.08	0.0500	8.6	2	38.68
2	14.68	0.0572	5.0	2	16.47
3	15.09	0.1179	9.7	2	12.62

I. VARIABLE: AS

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	17.95	Sum Observations	53.85
Std Deviation	5.31269235	Variance	28.2247
Skewness	1.72045284	Kurtosis	.
Uncorrected SS	1023.0569	Corrected SS	56.4494
Coeff Variation	29.5971719	Std Error Mean	3.06728436

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	17.95000	Std Deviation	5.31269
Median	15.09000	Variance	28.22470
Mode	.	Range	9.40000
		Interquartile Range	9.40000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 5.852082	Pr > t 0.0280
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

QUANTILE	ESTIMATE
100% Max	24.08
99%	24.08
95%	24.08
90%	24.08
75% Q3	24.08
50% Median	15.09
25% Q1	14.68
10%	14.68
5%	14.68
1%	14.68
0% Min	14.68

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
14.68	2	14.68	2
15.09	3	15.09	3
24.08	1	24.08	1

II. VARIABLE: Hg

MOMENTS			
N	3	SUM WEIGHTS	3
Mean	0.07503333	Sum Observations	0.2251
Std Deviation	0.03729777	Variance	0.00139112
Skewness	1.6597206	Kurtosis	.
Uncorrected SS	0.01967225	Corrected SS	0.00278225
Coeff Variation	49.7082618	Std Error Mean	0.02153388

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.075033	Std Deviation	0.03730
Median	0.057200	Variance	0.00139
Mode	.	Range	0.06790
		Interquartile Range	0.06790

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 3.484432	Pr > t 0.0734
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.1179
99%	0.1179
95%	0.1179
90%	0.1179
75% Q3	0.1179
50% Median	0.0572
25% Q1	0.0500
10%	0.0500
5%	0.0500
1%	0.0500
0% Min	0.0500

EXTREME OBSERVATIONS

-----LOWEST-----		-----HIGHEST--	
Value	Obs	Value	Obs
0.0500	1	0.0500	1
0.0572	2	0.0572	2
0.1179	3	0.1179	3

III. VARIABLE: Pb

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	7.7666667	Sum Observations	23.3
Std Deviation	2.45831921	Variance	6.04333333
Skewness	-1.3501438	Kurtosis	.
Uncorrected SS	193.05	Corrected SS	12.0866667
Coeff Variation	31.6521787	Std Error Mean	1.41931126

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	7.766667	Std Deviation	2.45832
Median	8.600000	Variance	6.04333
Mode	.	Range	4.70000
		Interquartile Range	4.70000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 5.472138	Pr > t	0.0318
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	9.7
99%	9.7
95%	9.7
90%	9.7
75% Q3	9.7
50% Median	8.6
25% Q1	5.0
10%	5.0
5%	5.0
1%	5.0
0% Min	5.0

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		----HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
5.0	2	5.0	2
8.6	1	8.6	1
9.7	3	9.7	3

IV. VARIABLE: Cd

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	2	Sum Observations	6
Std Deviation	0	Variance	0
Skewness	.	Kurtosis	.
Uncorrected SS	12	Corrected SS	0
Coeff Variation	0	Std Error Mean	0

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	2.000000	Std Deviation	0
Median	2.000000	Variance	0
Mode	2.000000	Range	0
		Interquartile Range	0

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t	Pr > t	.
Sign	M	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	2
99%	2
95%	2
90%	2
75% Q3	2
50% Median	2
25% Q1	2
10%	2
5%	2
1%	2
0% Min	2

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST--		----HIGHEST---	
Value	Obs	Value	Obs
2	3	2	1
2	2	2	2
2	1	2	3

V. VARIABLE: Cr

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	22.59	Sum Observations	67.77
Std Deviation	14.0666876	Variance	197.8717
Skewness	1.58722908	Kurtosis	.
Uncorrected SS	1926.6677	Corrected SS	395.7434
Coeff Variation	62.2695334	Std Error Mean	8.12140587

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	22.59000	Std Deviation	14.06669
Median	16.47000	Variance	197.87170
Mode	.	Range	26.06000
		Interquartile Range	26.06000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 2.781538	Pr > t	0.1086
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	38.68
99%	38.68
95%	38.68
90%	38.68
75% Q3	38.68
50% Median	16.47
25% Q1	12.62
10%	12.62
5%	12.62
1%	12.62
0% Min	12.62

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		----HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
12.62	3	12.62	3
16.47	2	16.47	2
38.68	1	38.68	1

THE UNIVARIATE PROCEDURE FOR METALES F2 FINAL

Obs	As	Hg	Pb	Cd	Cr
1	10.990	0.0583	19.18	2	24.97
2	13.390	0.0400	5.00	2	20.48
3	4.464	0.0592	5.00	2	12.28

I. VARIABLE: As

MOMENTS					
N	3	Sum Weights		3	
Mean	9.61466667	Sum Observations		28.844	
Std Deviation	4.61920181	Variance		21.3370253	
Skewness	-1.221064	Kurtosis		.	
Uncorrected SS	319.999496	Corrected SS		42.6740507	
Coeff Variation	48.043286	Std Error Mean		2.66689741	

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	9.61467	Std Deviation	4.61920
Median	10.99000	Variance	21.33703
Mode	.	Range	8.92600
		Interquartile Range	8.92600

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 3.605188	Pr > t 0.0691
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	13.390
99%	13.390
95%	13.390
90%	13.390
75% Q3	13.390
50% Median	10.990
25% Q1	4.464
10%	4.464
5%	4.464
1%	4.464
0% Min	4.464

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		-----HIGHEST	
Value	Obs	Value	Obs
4.464	3	4.464	3
10.990	1	10.990	1
13.390	2	13.390	2

II. VARIABLE: Hg

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.0525	Sum Observations	0.1575
Std Deviation	0.01083467	Variance	0.00011739
Skewness	-1.7186153	Kurtosis	.
Uncorrected SS	0.00850353	Corrected SS	0.00023478
Coeff Variation	20.6374602	Std Error Mean	0.0062554

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.052500	Std Deviation	0.01083
Median	0.058300	Variance	0.0001174
Mode	.	Range	0.01920
		Interquartile Range	0.01920

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 8.392752	Pr > t 0.0139
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.0592
99%	0.0592
95%	0.0592
90%	0.0592
75% Q3	0.0592
50% Median	0.0583
25% Q1	0.0400
10%	0.0400
5%	0.0400
1%	0.0400
0% Min	0.0400

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
Value	Obs	Value	Obs
0.0400	2	0.0400	2
0.0583	1	0.0583	1
0.0592	3	0.0592	3

III. VARIABLE: Pb

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	9.7266667	Sum Observations	29.18
Std Deviation	8.18682682	Variance	67.0241333
Skewness	1.73205081	Kurtosis	.
Uncorrected SS	417.8724	Corrected SS	134.048267
Coeff Variation	84.1688843	Std Error Mean	4.72666667

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	9.726667	Std Deviation	8.18683
Median	5.000000	Variance	67.02413
Mode	5.000000	Range	14.18000
		Interquartile Range	14.18000

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 2.057828	Pr > t 0.1759
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	19.18
99%	19.18
95%	19.18
90%	19.18
75% Q3	19.18
50% Median	5.00
25% Q1	5.00
10%	5.00
5%	5.00
1%	5.00
0% Min	5.00

EXTREME OBSERVATIONS

-----LOWEST-----		----HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
5.00	3	5.00	2
5.00	2	5.00	3
19.18	1	19.18	1

IV. VARIABLE: Cd

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	2	Sum Observations	6
Std Deviation	0	Variance	0
Skewness	.	Kurtosis	.
Uncorrected SS	12	Corrected SS	0
Coeff Variation	0	Std Error Mean	0

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	2.000000	Std Deviation	0
Median	2.000000	Variance	0
Mode	2.000000	Range	0
		Interquartile Range	0

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t	Pr > t	.
Sign	M	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	2
99%	2
95%	2
90%	2
75% Q3	2
50% Median	2
25% Q1	2
10%	2
5%	2
1%	2
0% Min	2

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		--HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
2	3	2	1
2	2	2	2
2	1	2	3

V. VARIABLE: Cr

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	19.243333	Sum Observations	57.73
Std Deviation	6.434752	Variance	41.4060333
Skewness	-0.8328922	Kurtosis	.
Uncorrected SS	1193.7297	Corrected SS	82.8120667
Coeff Variation	33.4388637	Std Error Mean	3.7151058

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	19.24333	Std Deviation	6.43475
Median	20.48000	Variance	41.40603
Mode	.	Range	12.69000
		Interquartile Range	12.69000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 5.179754	Pr > t 0.0353
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	24.97
99%	24.97
95%	24.97
90%	24.97
75% Q3	24.97
50% Median	20.48
25% Q1	12.28
10%	12.28
5%	12.28
1%	12.28
0% Min	12.28

EXTREME OBSERVATIONS

-----LOWEST-----		---HIGHEST---	
Value	Obs	Value	Obs
12.28	3	12.28	3
20.48	2	20.48	2
24.97	1	24.97	1

THE UNIVARIATE PROCEDURE FOR METALES F2 FOLIAR

Obs	As	Hg	Pb	Cd	Cr
1	1.20	0.02	3.15	1	4.94
2	2.09	0.02	0.00	0	0.00
3	2.34	0.02	4.21	1	2.68

I. VARIABLE: As

MOMENTS					
N	3	Sum Weights		3	
Mean	1.8766667	Sum Observations		5.63	
Std Deviation	0.5991939	Variance		0.35903333	
Skewness	-1.3990634	Kurtosis		.	
Uncorrected SS	11.2837	Corrected SS		0.71806667	
Coeff Variation	31.9286272	Std Error Mean		0.34594476	

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	1.876667	Std Deviation	0.59919
Median	2.090000	Variance	0.35903
Mode	.	Range	1.14000
		Interquartile Range	1.14000

TESTS FOR LOCATION: Mu0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 5.424758	Pr > t 0.0323
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	2.34
99%	2.34
95%	2.34
90%	2.34
75% Q3	2.34
50% Median	2.09
25% Q1	1.20
10%	1.20
5%	1.20
1%	1.20
0% Min	1.20

EXTREME OBSERVATIOIS			
--LOWEST----		---HIGHEST---	
Value	Obs	Value	Obs
1.20	1	1.20	1
2.09	2	2.09	2
2.34	3	2.34	3

II. VARIABLE: Hg

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.02	Sum Observations	0.06
Std Deviation	0	Variance	0
Skewness	.	Kurtosis	.
Uncorrected SS	0.0012	Corrected SS	0
Coeff Variation	0	Std Error Mean	0

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.020000	Std Deviation	0
Median	0.020000	Variance	0
Mode	0.020000	Range	0
		Interquartile Range	0

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t	Pr > t	.
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.02
99%	0.02
95%	0.02
90%	0.02
75% Q3	0.02
50% Median	0.02
25% Q1	0.02
10%	0.02
5%	0.02
1%	0.02
0% Min	0.02

EXTREME OBSERVATIONS			
---Lowest---		-Highest---	
Value	Obs	Value	Obs
0.02	3	0.02	1
0.02	2	0.02	2
0.02	1	0.02	3

III. VARIABLE: Pb

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	2.45333333	Sum Observations	7.36
Std Deviation	2.18975646	Variance	4.79503333
Skewness	-1.2867555	Kurtosis	.
Uncorrected SS	27.6466	Corrected SS	9.59006667
Coeff Variation	89.2563773	Std Error Mean	1.26425648

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	2.453333	Std Deviation	2.18976
Median	3.150000	Variance	4.79503
Mode	.	Range	4.21000
		Interquartile Range	4.21000

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 1.940535	Pr > t	0.1918
Sign	M 1	Pr >= M	0.5000
Signed Rank	S 1.5	Pr >= S	0.5000

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	4.21
99%	4.21
95%	4.21
90%	4.21
75% Q3	4.21
50% Median	3.15
25% Q1	0.00
10%	0.00
5%	0.00
1%	0.00
0% Min	0.00

EXTREME OBSERVATIONS

---Lowest---		Highest---	
Value	Obs	Value	Obs
0.00	2	0.00	2
3.15	1	3.15	1
4.21	3	4.21	3

IV. VARIABLE: Cd

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.66666667	Sum Observations	2
Std Deviation	0.57735027	Variance	0.33333333
Skewness	-1.7320508	Kurtosis	.
Uncorrected SS	2	Corrected SS	0.66666667
Coeff Variation	86.6025404	Std Error Mean	0.33333333

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.666667	Std Deviation	0.57735
Median	1.000000	Variance	0.33333
Mode	1.000000	Range	1.00000
		Interquartile Range	1.00000

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-		-----p Value-----
Student's t	t	2	Pr > t 0.1835
Sign	M	1	Pr >= M 0.5000
Signed Rank	S	1.5	Pr >= S 0.5000

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	1
99%	1
95%	1
90%	1
75% Q3	1
50% Median	1
25% Q1	0
10%	0
5%	0
1%	0
0% Min	0

EXTREME OBSERVATIONS			
----Lowest----		---Highest---	
Value	Obs	Value	Obs
0	2	0	2
1	3	1	1
1	1	1	3

V. VARIABLE: Cr

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	2.54	Sum Observations	7.62
Std Deviation	2.47297392	Variance	6.1156
Skewness	-0.2539375	Kurtosis	.
Uncorrected SS	31.586	Corrected SS	12.2312
Coeff Variation	97.3611779	Std Error Mean	1.42777216

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	2.540000	Std Deviation	2.47297
Median	2.680000	Variance	6.11560
Mode	.	Range	4.94000
		Interquartile Range	4.94000

TESTS FOR LOCATION: Mu0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 1.778995	Pr > t	0.2172
Sign	M 1	Pr >= M	0.5000
Signed Rank	S 1.5	Pr >= S	0.5000

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	4.94
99%	4.94
95%	4.94
90%	4.94
75% Q3	4.94
50% Median	2.68
25% Q1	0.00
10%	0.00
5%	0.00
1%	0.00
0% Min	0.00

EXTREME OBSERVATIONS			
---LOWEST---		----HIGHEST---	
Value	Obs	Value	Obs
0.00	2	0.00	2
2.68	3	2.68	3
4.94	1	4.94	1

A.10

Resultados del análisis ANVA del foliar del maíz en el Ensayo N° 3

THE ANOVA PROCEDURE - ALTURA MÁXIMA DEL FOLIAR LC: 28 DE DICIEMBRE DE 2007

OBS	TRAT	ALTMAX
1	1	36.5
2	1	34.5
3	1	34.5
4	2	57.5
5	2	60.0
6	2	69.0
7	3	66.0
8	3	60.0
9	3	55.0
10	4	47.5
11	4	42.0
12	4	66.0
13	5	79.0
14	5	86.0
15	5	66.0
16	0	0.0
17	0	0.0
18	0	0.0
19	7	57.0
20	7	67.5
21	7	57.0

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	0 1 2 3 4 5 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: ALTMAX

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	11448.47619	1908.07937	36.49	<.0001
Error	14	732.16667	52.29762		
Corrected Total	20	12180.64286			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ALTMAX Mean
0.939891	14.58846	7.231709	49.57143

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	11448.47619	1908.07937	36.49	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for ALTMAX

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 52.29762
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 20.162
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING (ALTURA MÁXIMA 28 de Diciembre de 2007)

	MEAN	H	TRAT
A	77.000	3	5
A			
B	62.167	3	2
B			
B	60.500	3	7
B			
B	60.333	3	3
B			
B	51.833	3	4
C			
C	35.167	3	1
D	0.000	3	0

THE ANOVA PROCEDURE - ALTURA MÁXIMA DEL FOLIAR LC: 21 DE ENERO DE 2008

OBS	TRAT	ALTMAX
1	1	46
2	1	44
3	1	48
4	2	126
5	2	130
6	2	115
7	3	137
8	3	141
9	3	134
10	4	150
11	4	130
12	4	148
13	5	125
14	5	133
15	5	148
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	7	83
20	7	87
21	7	91

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	0 1 2 3 4 5 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: ALTMAX

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	53987.33333	8997.88889	179.79	<.0001
Error	14	700.66667	50.04762		
Corrected Total	20	54688.00000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ALTMAX Mean
0.987188	7.369202	7.074434	96.00000

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	53987.33333	8997.88889	179.79	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for ALTMAX

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05

Error Degrees of Freedom 14

Error Mean Square 50.04762

Critical Value of Studentized Range 4.82895

Minimum Significant Difference 19.724

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING - 21 de Enero de 2008

	Mean	N	TRAT
A	142.667	3	4
A			
A	137.333	3	3
A			
A	135.333	3	5
A			
A	123.667	3	2
B	87.000	3	7
C	46.000	3	1
D	0.000	3	0

THE ANOVA PROCEDURE -ESPESOR DEL MAÍZ- FOLIAR LC: 28 DE DICIEMBRE DE 2007

OBS	TRAT	EPRDM
1	1	0.39
2	1	0.34
3	1	0.68
4	2	0.98
5	2	1.36
6	2	1.09
7	3	1.15
8	3	0.94
9	3	0.98
10	4	0.89
11	4	0.67
12	4	0.99
13	5	1.13
14	5	1.74
15	5	1.23
16	0	0.00
17	0	0.00
18	0	0.00
19	7	1.04
20	7	1.00
21	7	0.77

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	0 1 2 3 4 5 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: EPRDM

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	3.76136190	0.62689365	18.33	<.0001
Error	14	0.47886667	0.03420476		
Corrected Total	20	4.24022857			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EPRDM Mean
0.887066	22.35953	0.184945	0.827143

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	3.76136190	0.62689365	18.33	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for EPRDM

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 0.034205
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 0.5156

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING (ESPESOR DEL MAÍZ 28 DE DICIEMBRE DE 2007)

	MEAN	N	TRAT
A	1.3667	3	5
A			
B	1.1433	3	2
B			
B	1.0233	3	3
B			
B	A	C	7
B		C	
B	C	3	4
B		C	
D	C	3	1
D			
D	0.0000	3	0

THE ANOVA PROCEDURE -ESPESOR DEL MAÍZ- FOLIAR LC. 21 DE ENERO DE 2008

OBS	TRAT	EPR0M
1	1	0.58
2	1	0.58
3	1	0.74
4	2	1.40
5	2	1.77
6	2	1.37
7	3	2.20
8	3	1.79
9	3	1.96
10	4	2.00
11	4	1.68
12	4	1.87
13	5	1.72
14	5	2.13
15	5	2.35
16	0	0.00
17	0	0.00
18	0	0.00
19	7	1.15
20	7	1.29
21	7	1.19

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	0 1 2 3 4 5 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: EPR0M

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	10.62531429	1.77088571	52.99	<.0001
Error	14	0.46786667	0.03341905		
Corrected Total	20	11.09318095			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EPR0M Mean
0.957824	13.82421	0.182809	1.322381

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	10.62531429	1.77088571	52.99	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for EPR0M

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 0.033419
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 0.5097

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING

	MEAN	N	TRAT
A	2.0667	3	5
A			
B	1.9833	3	3
B			
B	1.8500	3	4
B			
B	1.5133	3	2
B			
C	1.2100	3	7
D	0.6333	3	1
E	0.0000	3	0

THE ANOVA PROCEDURE - EMERGENCIA DE SEMILLAS DE MAÍZ - FOLIAR LC: 21 DE ENERO 2008

OBS	TRAT	SEMILLA
1	1	4
2	1	5
3	1	3
4	2	2
5	2	2
6	2	5
7	3	2
8	3	4
9	3	3
10	4	2
11	4	5
12	4	4
13	5	4
14	5	4
15	5	3
16	6	0
17	6	0
18	6	0
19	7	5
20	7	4
21	7	5

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	7	1 2 3 4 5 6 7
Number of observations	21	

Dependent Variable: SEMILLA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	40.57142857	6.76190476	5.92	0.0030
Error	14	16.00000000	1.14285714		
Corrected Total	20	56.57142857			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	SEMILLA Mean
0.717172	34.01507	1.069045	3.142857

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	6	40.57142857	6.76190476	5.92	0.0030

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for SEMILLA

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 14
 Error Mean Square 1.142857
 Critical Value of Studentized Range 4.82895
 Minimum Significant Difference 2.9805
 Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING - EMERGENCIA DE SEMILLAS

	MEAN	N	TRAT
A	4.6667	3	7
A			
A	4.0000	3	1
A			
A	3.6667	3	4
A			
A	3.6667	3	5
A			
A	3.0000	3	2
A			
A	3.0000	3	3
B	0.0000	3	6

THE ANOVA PROCEDURE - FOLIAR IC: PESO FRESCO

OBS	TRAT	PFRESCO
1	1	23
2	1	30
3	1	25
4	2	94
5	2	163
6	2	161
7	3	258
8	3	263
9	3	244
10	4	297
11	4	335
12	4	352
13	5	407
14	5	462
15	5	456
16	7	130
17	7	151
18	7	110

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	6	1 2 3 4 5 7
Number of observations	18	

Dependent Variable: PFRESCO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	342624.9444	68524.9889	108.89	<.0001
Error	12	7552.0000	629.3333		
Corrected Total	17	350176.9444			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PFRESCO Mean
0.978434	11.40008	25.08652	220.0556

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	342624.9444	68524.9889	108.89	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for PFRESCO

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05

Error Degrees of Freedom 12

Error Mean Square 629.3333

Critical Value of Studentized Range 4.74775

Minimum Significant Difference 68.765

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING

	MEAN	N	TRAT
A	441.67	3	5
B	328.00	3	4
C	255.00	3	3
D	139.33	3	2
D	130.33	3	7
E	26.00	3	1

THE ANOVA PROCEDURE -- FOLIAR LG: PESO SECO

OBS	TRAT	PSECO
1	1	9
2	1	11
3	1	9
4	2	36
5	2	45
6	2	41
7	3	37
8	3	53
9	3	46
10	4	41
11	4	76
12	4	71
13	5	124
14	5	136
15	5	129
16	7	43
17	7	50
18	7	34

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	6	1 2 3 4 5 7
Number of observations	18	

Dependent Variable: PSECO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	24444.94444	4888.98889	53.82	<.0001
Error	12	1090.00000	90.83333		
Corrected Total	17	25534.94444			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PSECO Mean
0.957313	17.31097	9.530652	55.05556

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	24444.94444	4888.98889	53.82	<.0001

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for PSECO

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha 0.05

Error Degrees of Freedom 12

Error Mean Square 90.83333

Critical Value of Studentized Range 4.74775

Minimum Significant Difference 26.125

Means with the same letter are not significantly different.

TUKEY GROUPING			
	MEAN	N	TRAT
A	129.667	3	5
B	62.667	3	4
B	45.333	3	3
B	42.333	3	7
B	40.667	3	2
C	9.667	3	1

A.11.

Estadística de los metales en los Ensayos N° 3 inicial – final - planta

THE UNIVARIATE PROCEDURE FOR METALES LC INI

Obs	As	Hg	Pb	Cd	Cr
1	24.08	0.0500	8.60	2.00	38.68
2	14.68	0.0572	5.00	2.00	38.68
3	42.10	0.5400	0.37	6.75	20.00

I. VARIABLE: As

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	26.953333	Sum Observations	80.86
Std Deviation	13.933992	Variance	194.156133
Skewness	0.88848776	Kurtosis	.
Uncorrected SS	2567.7588	Corrected SS	388.312267
Coeff Variation	51.6967302	Std Error Mean	8.04479404

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	26.95333	Std Deviation	13.93399
Median	24.08000	Variance	194.15613
Mode	.	Range	27.42000
		Interquartile Range	27.42000

TESTS FOR LOCATION: Mu0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 3.350407	Pr > t 0.0787
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	42.10
99%	42.10
95%	42.10
90%	42.10
75% Q3	42.10
50% Median	24.08
25% Q1	14.68
10%	14.68
5%	14.68
1%	14.68
0% Min	14.68

EXTREME OBSERVATIONS

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		----HIGHEST--	
Value	Obs	Value	Obs
14.68	2	14.68	2
24.08	1	24.08	1
42.10	3	42.10	3

II. VARIABLE: Hg

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.21573333	Sum Observations	0.6472
Std Deviation	0.28084625	Variance	0.07887461
Skewness	1.73077021	Kurtosis	.
Uncorrected SS	0.29737184	Corrected SS	0.15774923
Coeff Variation	130.182128	Std Error Mean	0.16214666

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.215733	Std Deviation	0.28085
Median	0.057200	Variance	0.07887
Mode	.	Range	0.49000
		Interquartile Range	0.49000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 1.330483	Pr > t	0.3148
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.5400
99%	0.5400
95%	0.5400
90%	0.5400
75% Q3	0.5400
50% Median	0.0572
25% Q1	0.0500
10%	0.0500
5%	0.0500
1%	0.0500
0% Min	0.0500

EXTREME OBSERVATIONS

-----LOWEST-----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
0.0500	1	0.0500	1
0.0572	2	0.0572	2
0.5400	3	0.5400	3

III. VARIABLE: Pb

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	4.6566667	Sum Observations	13.97
Std Deviation	4.12572822	Variance	17.0216333
Skewness	-0.371886	Kurtosis	.
Uncorrected SS	99.0969	Corrected SS	34.0432667
Coeff Variation	88.5983154	Std Error Mean	2.3819903

BASIC STATISTICAL MEASURES			
LOCATION		VARIABILITY	
Mean	4.656667	Std Deviation	4.12573
Median	5.000000	Variance	17.02163
Mode	.	Range	8.23000
		Interquartile Range	8.23000

TESTS FOR LOCATION: MU0=0				
Test		-Statistic-		-----p Value-----
Student's t	t	1.954948	Pr > t	0.1898
Sign	M	1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S	3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	8.60
99%	8.60
95%	8.60
90%	8.60
75% Q3	8.60
50% Median	5.00
25% Q1	0.37
10%	0.37
5%	0.37
1%	0.37
0% Min	0.37

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		----HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
0.37	3	0.37	3
5.00	2	5.00	2
8.60	1	8.60	1

IV. VARIABLE: Cd

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	3.58333333	Sum Observations	10.75
Std Deviation	2.74241378	Variance	7.52083333
Skewness	1.73205081	Kurtosis	.
Uncorrected SS	53.5625	Corrected SS	15.0416667
Coeff Variation	76.5324775	Std Error Mean	1.58333333

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	3.583333	Std Deviation	2.74241
Median	2.000000	Variance	7.52083
Mode	2.000000	Range	4.75000
		Interquartile Range	4.75000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 2.263158	Pr > t	0.1520
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	6.75
99%	6.75
95%	6.75
90%	6.75
75% Q3	6.75
50% Median	2.00
25% Q1	2.00
10%	2.00
5%	2.00
1%	2.00
0% Min	2.00

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
2.00	2	2.00	1
2.00	1	2.00	2
6.75	3	6.75	3

V. Variable: Cr

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	32.453333	Sum Observations	97.36
Std Deviation	10.784903	Variance	116.314133
Skewness	-1.7320508	Kurtosis	.
Uncorrected SS	3392.2848	Corrected SS	232.628267
Coeff Variation	33.2320348	Std Error Mean	6.22666667

Basic Statistical Measures

Location		Variability	
Mean	32.45333	Std Deviation	10.78490
Median	38.68000	Variance	116.31413
Mode	38.68000	Range	18.68000
		Interquartile Range	18.68000

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 5.211991	Pr > t	0.0349
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	38.68
99%	38.68
95%	38.68
90%	38.68
75% Q3	38.68
50% Median	38.68
25% Q1	20.00
10%	20.00
5%	20.00
1%	20.00
0% Min	20.00

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		---HIGHEST---	
Value	Obs	Value	Obs
20.00	3	20.00	3
38.68	2	38.68	1
38.68	1	38.68	2

THE UNIVARIATE PROCEDURE FOR METALES LC FOLIAR (TALLO + HOJAS)

Obs	As	Hg	Pb	Cd	Cr
1	0.08351	0.0391	2.945	1	15.350
2	0.91430	0.0390	3.482	1	7.785
3	0.90550	0.0393	1.944	1	9.023

I. VARIABLE: As

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.63443667	Sum Observations	1.90331
Std Deviation	0.47713678	Variance	0.2276595
Skewness	-1.731388	Kurtosis	.
Uncorrected SS	1.66284866	Corrected SS	0.45531901
Coeff Variation	75.2063684	Std Error Mean	0.27547505

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.634437	Std Deviation	0.47714
Median	0.905500	Variance	0.22766
Mode	.	Range	0.83079
		Interquartile Range	0.83079

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 2.303064	Pr > t	0.1478
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.91430
99%	0.91430
95%	0.91430
90%	0.91430
75% Q3	0.91430
50% Median	0.90550
25% Q1	0.08351
10%	0.08351
5%	0.08351
1%	0.08351
0% Min	0.08351

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
0.08351	1	0.08351	1
0.90550	3	0.90550	3
0.91430	2	0.91430	2

II. VARIABLE: Hg

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	0.03913333	Sum Observations	0.1174
Std Deviation	0.00015275	Variance	2.33333E-8
Skewness	0.93521953	Kurtosis	.
Uncorrected SS	0.0045943	Corrected SS	4.66667E-8
Coeff Variation	0.39033865	Std Error Mean	0.00008819

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	0.039133	Std Deviation	0.0001528
Median	0.039100	Variance	2.33333E-8
Mode	.	Range	0.0003000
		Interquartile Range	0.0003000

TESTS FOR LOCATION: Mu0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 443.7303	Pr > t	<.0001
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	0.0393
99%	0.0393
95%	0.0393
90%	0.0393
75% Q3	0.0393
50% Median	0.0391
25% Q1	0.0390
10%	0.0390
5%	0.0390
1%	0.0390
0% Min	0.0390

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
0.0390	2	0.0390	2
0.0391	1	0.0391	1
0.0393	3	0.0393	3

III. VARIABLE: Pb

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	2.7903333	Sum Observations	8.371
Std Deviation	0.7805782	Variance	0.60930233
Skewness	-0.8566398	Kurtosis	.
Uncorrected SS	24.576485	Corrected SS	1.21860467
Coeff Variation	27.9743712	Std Error Mean	0.45066704

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	2.790333	Std Deviation	0.78058
Median	2.945000	Variance	0.60930
Mode	.	Range	1.53800
		Interquartile Range	1.53800

TESTS FOR LOCATION: MU0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----	
Student's t	t 6.191563	Pr > t	0.0251
Sign	M 1.5	Pr >= M	0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S	0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	3.482
99%	3.482
95%	3.482
90%	3.482
75% Q3	3.482
50% Median	2.945
25% Q1	1.944
10%	1.944
5%	1.944
1%	1.944
0% Min	1.944

EXTREME OBSERVATIONS

EXTREME OBSERVATIONS			
----LOWEST----		--HIGHEST----	
Value	Obs	Value	Obs
1.944	3	1.944	3
2.945	1	2.945	1
3.482	2	3.482	2

IV. Variable: Cd

Moments			
N	3	Sum Weights	3
Mean	1	Sum Observations	3
Std Deviation	0	Variance	0
Skewness	.	Kurtosis	.
Uncorrected SS	3	Corrected SS	0
Coeff Variation	0	Std Error Mean	0

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	1.000000	Std Deviation	0
Median	1.000000	Variance	0
Mode	1.000000	Range	0
		Interquartile Range	0

TESTS FOR LOCATION: $\mu_0=0$

Test	-Statistic-		-----p Value-----
Student's t	t	.	Pr > t
Sign	M	1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S	3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	1
99%	1
95%	1
90%	1
75% Q3	1
50% Median	1
25% Q1	1
10%	1
5%	1
1%	1
0% Min	1

EXTREME OBSERVATIONS

---LOWEST---		----HIGHEST--	
Value	Obs	Value	Obs
1	3	1	1
1	2	1	2
1	1	1	3

V. VARIABLE: Cr

MOMENTS			
N	3	Sum Weights	3
Mean	10.7193333	Sum Observations	32.158
Std Deviation	4.05776618	Variance	16.4654663
Skewness	1.55244286	Kurtosis	.
Uncorrected SS	377.643254	Corrected SS	32.9309327
Coeff Variation	37.8546506	Std Error Mean	2.34275239

BASIC STATISTICAL MEASURES

LOCATION		VARIABILITY	
Mean	10.71933	Std Deviation	4.05777
Median	9.02300	Variance	16.46547
Mode	.	Range	7.56500
		Interquartile Range	7.56500

TESTS FOR LOCATION: Mu0=0

Test	-Statistic-	-----p Value-----
Student's t	t 4.57553	Pr > t 0.0446
Sign	M 1.5	Pr >= M 0.2500
Signed Rank	S 3	Pr >= S 0.2500

QUANTILES (DEFINITION 5)

Quantile	Estimate
100% Max	15.350
99%	15.350
95%	15.350
90%	15.350
75% Q3	15.350
50% Median	9.023
25% Q1	7.785
10%	7.785
5%	7.785
1%	7.785
0% Min	7.785

EXTREME OBSERVATIONS			
-----LOWEST-----		-----HIGHEST-----	
Value	Obs	Value	Obs
7.785	2	7.785	2
9.023	3	9.023	3
15.350	1	15.350	1

Resultados de los análisis de metales en las muestras de suelo, compost y planta



INFORME DE ENSAYO N° 3-01040/07

Pág. 1/1

Solicitante	FRANCISCO ATENCIO JENNY
Domicilio	AV. Venezuela 1317, Bellavista - Callao
Proceso	SEDIMENTO (LODO DE DESAGUE)
Cantidad de muestra	1 muestra x 2.3 kg. aprox.
Identificación de la muestra	002 - 07
Presentación	En bolsa cerrada y conservada a temperatura ambiente
Fecha de recepción	2007 - 02 - 05
Fecha de inicio del ensayo	2007 - 02 - 05
Fecha de término del ensayo	2007 - 02 - 14
Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental
Identificada con	N/S 070301014 - (2253)
	Muestra proporcionada por el solicitante.

Ensayos	Resultados
Arsénico (mg/kg)	10.00
Mercurio (mg/kg)	0.725
pH	6.97
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	4.60
Materia Orgánica (g/100g)	41.84
Ploomo (mg/kg)	49.0
Cadmio (mg/kg) (Límite de Detección 2.00 mg/kg)	< 2.00
Cromo (mg/kg)	12.4

Métodos:

Arsénico: SMEWW 21 in Ed. 2005 Part. 3114 C. APHA - AWWA - WEF. Arsenic and Selenium by Hydride Generation / Atomic Absorption Spectrometry.
 Mercurio: SMEWW 21 in Ed. 2005 Part. 3112 B. APHA - AWWA - WEF. Metals by Cold - Vapor Atomic Absorption Spectrometry method.
 pH: Naceo: 9.0 Índice de Laboratorio Analysis of potentially contaminated soil. Method 104, pag. 44, 1896.
 Materia Orgánica: Osmia Agrícola, Nuevo Fertilizantes E. Pireo Yotera pag. 201.
 Ploomo: SMEWW20 in Ed. 1998 Part. 3111 B pág. 3 - 17. APHA - AWWA - WEF (Approved by Standard Methods committee 1995) Metals by Flame atomic absorption spectrometry - Direct AAS - Acetylene Flame Method.
 Cadmio: SMEWW 21 in Ed. 2005 Part. 3112 B. APHA - AWWA - WEF. Metals by cold - vapor atomic absorption Spectrometry method.
 Cromo: EPA Method 218.1 (1988) (AAS Direct Absorption).

OBSERVACIONES:

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, en la ausencia de autorización de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una declaración de conformidad con normas de producto o como certificación del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 15 de Febrero del 2007

S.A.

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 601 - La Peña
 Telf: 420-1143
 Fax: 420-4128
 Av. Alameda Perú 271 - Callao 4
 E-mail: info@cerper.com

SAN ISIDRO:
 Av. Javier Prado Este
 571 07 05 - San Isidro
 Telf: 422-8626 / 440-7349
 Telefax: 422-6136
 E-mail: info@cerper.com

PAITA:
 Playa Boca - Puerto Puyasa
 Compañía Peruana de Paños
 Teléfono: 073-611435
 E-mail: info@cerper.com

A.C.:
 Mariano Lazo Universidad 741
 Teléfono: 053-762161
 E-mail: cerper@telcel.com.pe

CHORRO:
 Av. José Carlos Mariátegui 80
 Centro Cívico Urb. Surco 0505
 Telf: 423-311025
 Fax: 043-311177
 E-mail: cerper@telcel.com.pe

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY POR LA AUTORIDAD COMPETENTE.



INFORME DE ENSAYO N° 3-07836/08

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bañavista - Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad de muestra : 01 muestra x 1,8 Kg
 Identificación de la muestra : Según se indica
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno cerrada y conservada a temperatura ambiente
 Fecha de recepción : 2008 - 07 - 18
 Fecha de inicio del ensayo : 2008 - 07 - 18
 Fecha de término del ensayo : 2008 - 07 - 21
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : IWS 080306883 (10082)
 Muestra proporcionada por el solicitante

Ensayos	Muestras / Resultados
	MUESTRA N° 1
Mercurio (mg/kg)	0,050
Arsénico (mg/kg)	24,08

Métodos:

Mercurio: SAEWW 21 St Ed. 2005 Part 3112 B, APHA-AWWA-WEF Metal by cold-vapor atomic absorption Spectrometry method.
 Arsénico: SAEWW 21 St Ed. 2005 Part 3114 C, APHA-AWWA-WEF Arsenic and Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 30 de Julio del 2008
 /s/

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.
 ING. HUMA AVALOS ESQUIVEL
 COORDINADORA DE LABORATORIOS

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 801 - La Perra
 Tlf: 318-8000
 Fax: 318-3123
 Acordado Postal 271 - Callao (4)
 E-mail: info@cerper.com
 Web Site: www.cerper.com
 GL-IN-ES

PATTA:
 Playa Seca - Punta Puntas 8th
 Teléfax: 073 - 211438
 E-mail: cerper@terra.com.pe

S/O:
 Mariano Lina Liqueñas 741
 Teléfax: 052 - 482181
 E-mail: cerper@terra.com.pe

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Montegut 4th
 Centro Chabo 190 - Buzos Anzo
 Tlf: 043-311043
 E-mail: cerper@terra.com.pe

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



INFORME DE ENSAYO N° 3-07727/08

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317 - Bellavista - Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad recibida : 01 muestra x 1,8 kg
 Identificación de la muestra : Muestra N° 1
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno cerrada y conservada a temperatura ambiente.
 Fecha de Recepción : 2008 - 07 - 17
 Fecha de Inicio del ensayo : 2008 - 07 - 23
 Fecha de Término del ensayo : 2008 - 07 - 23
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : HS 080306083 (10135)
 Muestra proporcionada por el solicitante.

Ensayos	Resultados
Cadmio (mg/kg) (límite de emisión: 2,00 mg/kg)	< 2,00
Piomo (mg/kg)	8,60
Cromo (mg/kg)	38,68

Métodos:

Cadmio y Plomo: SIAEWV 21 et Ed. 2005. Part 3111B. APHA-AMWA-WEF. Metals by flame atomic absorption spectrometry. Direct air. Acetylene flame method.
 Cromo: EPA Method 218 1988. Chromium (A. A. Direct aspiration).

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 25 de Julio del 2008
 CA

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.
 ING. HUMA AVALOS ESQUIVEL
 CIP. N° 28887
 COORDINADORA DE LABORATORIOS

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 501 - La Perla
 Telf: 5154220
 Fax: 4234128
 Apartado Postal 273 - Callao (1)
 E-mail: info@cerper.com

PUNTA:
 Playa Santa - Punta Florida s/n

LIMA:
 Miraflores Lino Liguera 741

CHIRIQUETE:
 Av. José Carlos Mariátegui s/n
 Centro Cívico s/n. Buzón Aéreo
 Telf: 445 0118

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"


INFORME DE ENSAYO N° 3-09234/08

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bellavista, Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad recibida : 01 muestra x 200 g.
 Identificación de la muestra : Muestra N° 4
 Forma de Presentación : En bolsa de papel, cerrada y conservada a temperatura ambiente
 Fecha de Recepción : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Inicio del ensayo : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Término del ensayo : 2008 - 09 - 18
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : H/S 080308408 (12396)
 Muestra proporcionada por el solicitante.

Ensayos	Resultados
Arsénico (mg/kg)	15.09
Cadmio (mg/kg) (Límite de detección: 2.00 mg/kg)	<2.00
Plomo (mg/kg)	8.70
Cromo (mg/kg)	12.62
Mercurio (mg/kg)	0.1179

Métodos:

Arsénico: SMEWW 21 st Ed. 2006 Part 3114 C, APHA-AWWA-WEF, Arsenic and selenium by hydride generation / atomic absorption spectrometry.
 Cadmio: SMEWW 21 st Ed. 2005, Part 3111B, APHA-AWWA-WEF, Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Plomo: SMEWW 21 st Ed. 2005, Part 3111B, APHA-AWWA-WEF, Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Cromo: EPA Method 218.1 1986, Chromium (A.A. Direct Aspiration)
 Mercurio: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part. 3112 B, APHA-AWWA-WEF, Metal by cold-vapor atomic absorption spectrometry Method.

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

 Callao, 19 de Setiembre del 2008
 NS

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

 Ing. Rosa Palomino Loo
 Coordinadora de Laboratorio
 C.I.P. 48392

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 601 - La Perla
 Tel: 420-4143
 Fax: 420-4128
 Apartado Postal 271 - Callao (4)
 E-mail: info@cerper.com

PAITA:
 Playa Socca - Punta Puntilla s/n
 Teléfono: 071 - 211470

ILO:
 Mariño Lino Urcosía 741
 Teléfono: 051 - 482181

GHIMBOYE:
 Av. José Carlos Mariátegui s/n
 Cerros Ciudad Uno, Buzos Aysa
 Tel: 043-311048

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"


INFORME DE ENSAYO N° 3-09248/08

Pág.: 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENGIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bellavista, Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad recibida : 01 muestra x 300 g.
 Identificación de la muestra : NPK 1
 Forma de Presentación : En bolsa de papel, cerrada y conservada a temperatura ambiente
 Fecha de Recepción : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Inicio del ensayo : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Término del ensayo : 2008 - 09 - 18
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : H/S 080308408 (12396)
 Muestra proporcionada por el solicitante.

Ensayos	Resultados
Arsénico (mg/kg)	14,68
Cadmio (mg/kg) (Límite de detección: 2,00 mg/kg)	< 2,00
Piomo (mg/kg) (Límite de detección: 5,00 mg/kg)	< 5,00
Cromo (mg/kg)	16,47
Mercurio (mg/kg)	0,0572

Métodos:

Arsénico: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part 3114 C. APHA-AWWA-WEF. Arsenic and selenium by hydride generation / atomic absorption spectrometry.
 Cadmio: SMEWW 21 st Ed. 2005. Part 3111B. APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Plomo: SMEWW 21 st Ed. 2005. Part 3111B. APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Cromo: EPA Method 218.1 1998. Chromium (A.A Direct Aspiration)
 Mercurio: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part. 3112 B. APHA-AWWA-WEF. Metal by cold-vapor atomic absorption spectrometry Method.

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce

Callao, 10 de Setiembre del 2008
NS

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.
 Ing. Róger Palomino Loo
 Coordinación de Laboratorio
 C.I.P. 46302

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 601 - La Perla
 Telf: 420-4145
 Fax: 420-4125
 Apartado Postal 2711 - Callao (4)
 E-mail: info@cerper.com

PAITA:
 Playa Seca - Punta Purulliz s/n

ILO:
 Manzano Uno Urquieta 741

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Menátegui s/n
 Centro Cívico Urb. Brancos Aires

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUIVE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



INFORME DE ENSAYO N° 3-09249/08

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bellavista, Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad recibida : 01 muestra x 300 g.
 Identificación de la muestra : NPK 2
 Forma de Presentación : En bolsa de papel, cerrada y conservada a temperatura ambiente
 Fecha de Recepción : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Inicio del ensayo : 2008 - 09 - 08
 Fecha de Término del ensayo : 2008 - 09 - 18
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : H/S 080308408 (12396)
 Muestra proporcionada por el solicitante.

Ensayos	Resultados
Arsénico (mg/kg)	13,39
Cadmio (mg/kg) (Límite de detección: 2,00 mg/kg)	< 2,00
Plomo (mg/kg) (Límite de detección: 5,00 mg/kg)	< 5,00
Cromo (mg/kg)	20,48
Mercurio (mg/kg) (Límite de detección: 0,040 mg/kg)	< 0,040

Métodos:

Arsénico: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part 3114 C. APHA-AWWA-WEF. Arsenic and selenium by hydride generation / atomic absorption spectrometry.
 Cadmio: SMEWW 21 st Ed. 2005. Part 3111B. APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Plomo: SMEWW 21 st Ed. 2005. Part 3111B. APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption spectrometry direct air acetylene flame method.
 Cromo: EPA Method 218.1 1988. Chromium (A.A Direct Aspiration)
 Mercurio: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part. 3112 B. APHA-AWWA-WEF. Metal by cold-vapor atomic absorption spectrometry Method

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 19 de Setiembre del 2008
 NS

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A

Ing. Rosa Palomino Leo
 Coordinadora de Laboratorio
 C.P. 49382

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 601 - La Pera
 Tel: 420-4135
 Fax: 420-4128
 Apartado Postal 271 - Callao (4)

PAITA:
 Playa Seca - Punta Pucúla s/n

ILO:
 Manzano Lino Urquiza 741

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Mariátegui s/n
 Casco Cívico Urb. Guadalupe Arellano

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY POR LA AUTORIDAD COMPETENTE."



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : JENNY FRANCISCO
 PROCEDENCIA : LIMA
 REFERENCIA : H.R. 13645
 BOLETA : 4275
 FECHA : 12/02/07

Nº LAB	CLAVES	pH 1:1	CE _(1:1) dS/m	CaCO ₃ %
0406		7.38	0.51	0.0



Rubén Bazán Tapia
 Jefe del Laboratorio

ndf



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE ALIMENTOS Y AGUAS

INFORME N° 028-2007

ESTUDIO REALIZADO : A. Análisis Microbiológico.
B. Análisis Parasitológico.

MUESTRA : LODO DE DESAGUE. Planta de Tratamiento
de Aguas residuales- Puente Piedra.

PRESENTACION : En bolsa de 1.8 Kg aprox.

FECHA DE RECEPCIÓN : 05 de Febrero de 2007. HORA: 12.00

FECHA DE ANALISIS : 05 de Febrero de 2007. HORA: 16.00

SOLICITANTE : JENNY FRANCISCO

I. RESULTADO.-

A. ANALISIS MICROBIOLÓGICO.-

- Numeración de Coliformes Fecales : 14x10 NMP/g
- Numeración de *Escherichia coli* : 14x10 NMP/g
- Numeración de *Salmonella* : 6 NMP/g

1. Num. de Coliformes fecales. APHA/AWWA/WEF. Standard Methods. 9221 E. 2005.
2. Num. de *E. coli*. APHA/AWWA/WEF. Standard Methods. 9221 F. 2005.
3. Num. *Salmonella*. APHA/AWWA/WEF. Standard Methods. 9260B. 2005.

B. ANALISIS PARASITOLÓGICO.-

- Método de Sedimentación rápida: Quiste de *Giardia lamblia* : 2 /gramo.
Huevo de Uncinarias : 1/ gramo.
Larvas de Uncinarias : 4/gramo.

Lima, 20 de Febrero de 2007.

UN. P. S. S. S. S.
Lab. Control de Calidad Alimentos y Aguas

Dña. Jenny Francisca
N° de Identificación



INFORME DE ENSAYO N° 3-07871/07

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio : Av. Venezuela 1317, Bellavista - Callao
 Producto : COMPOST
 Cantidad de muestra : 01 Muestra x 600 g
 Presentación : En bolsa de polietileno cerrada y conservada a temperatura ambiente
 Fecha de recepción : 2007 - 10 - 02
 Fecha de inicio del ensayo : 2007 - 10 - 03
 Fecha de término del ensayo : 2007 - 10 - 09
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : H/S 070308686 (20239)
 Muestra proporcionada por el Solicitante

Ensayos	Resultados
Arsénico (mg/kg)	42,10
Mercurio (mg/kg)	0,540

Métodos:

Arsénico: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part 3114 C APHA - AWWA - WEF Arsenic and selenium by hydride generation / atomic absorption spectrometric method.

Mercurio: SMEWW 21 st Ed. 2005 Part 3112 B APHA - AWWA - WEF Metals by cold - vapor atomic absorption spectrometry method.

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 10 de Octubre del 2007
 b29

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

ING. NUMA AVALOS ESQUIVEL
 COORDINADOR DE LABORATORIOS

*muestra de compost,
 antes de la siembra
 para analisis de metales.*

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 601 - La Paris
 Telf: 420-4145
 Fax: 420-4128
 Apartado Postal 271 - Callao (I)
 E-mail: info@cerper.com

OF. SAN ISIDRO:
 Av. Javier Prado Este
 897 Of. 52
 Telf: 422-6656 / 440-2349
 Telfax: 422-6236

PISTA:
 Plaza de Armas 220
 Telfax: 073-611436 / 073-611554
 073-611776

ILO:
 Mariano Lino Urduneta 741
 Telfax: 051-201100

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Mariátegui s/n
 Casero Chivo Urb. Buenos Aires
 Telf: 043-311648
 Telfax: 043-311649

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : JENNY FRANCISCO
 PROCEDENCIA : LIMALIMA/LA MOLINA
 REFERENCIA : H.R. 16811
 FECHA : 18-12-07

Compartido con la Srta. Jenny

Número Muestra		pH	CE _(1:1)	CaCO ₃
Lab	Claves	f:1	dS/m	%
7541		7.86	0.33	0.2

Número Muestra		Pb	Cd	Cr
Lab	Claves	ppm	ppm	ppm
7541		0.37	6.75	20.0



Ing. Braulio La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio

Indf


INFORME DE ENSAYO N° 3-01237/08

Pág. 1/1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bailevista - Callao
 Producto Declarado : SUELO
 Cantidad de muestra : 03 muestras x 600 g. c/u
 Identificación de la muestra : Según se indica
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno sellada.
 Fecha de recepción : 2008 - 01 - 23
 Fecha de inicio del ensayo : 2008 - 01 - 24
 Fecha de término del ensayo : 2008 - 01 - 31
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : NIS 060300698 (00967)
 Muestra proporcionada por el solicitante

Ensayos	Muestras / Resultados		
	M1	M5	M7
Mercurio (mg/L)	0,0583	0,6791	0,0398
Cadmio (mg/L) (Límite de detección: 2,00 mg/L)	< 2,00	< 2,00	< 2,00
Plomo (mg/L)	19,18	69,52	10,19
Cromo (mg/L)	24,97	45,85	21,27
Arsénico (mg/L)	10,99	22,97	11,37

Métodos:

Mercurio: SMEWW 21 SI Ed. 2005 Part 3112 B, APHA-AWWA-WEF. Metals by cold-vapor atomic absorption Spectrometry Method
 Cadmio: SMEWW 21 SI Ed. 2005 Part 3111 B, APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption Spectrometry, Direct Air-Acetylene Flame method.
 Plomo: SMEWW 21 SI Ed. 2005 Part 3111 B, APHA-AWWA-WEF. Metals by flame atomic absorption Spectrometry, Direct Air-Acetylene Flame method.
 Cromo: EPA METHOD 218.1.1988. CHROMIUM (AA DIRECT ASPIRATION)
 Arsénico: SMEWW 21 SI Ed. 2005 Part 3114 C, APHA-AWWA-WEF Arsenic and Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method.

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 17 de Febrero del 2008
NS

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

FRANCISCO ATENCIO JENNY

CALLAO:
 Av. Garza Rivas 801 - La Poma
 Tel: 420-2143
 Fax: 420-4123
 Apartado Postal 271 - Callao (4)
 Email: info@cerper.com
 Website: www.cerper.com

PATTA:
 Playa Seca - Punta Purvillá s/n
 Teléfono: 073 - 211438

ILO:
 Av. Antonio Lina Urdaneta 741
 Teléfono: 063 - 422181

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Montenegro s/n
 Centro Chico (Chico), Buzos Azules
 Tel: 543-311648

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEC, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE


INFORME DE ENSAYO N° 3-01238/08

Pág. 1 / 1

Solicitante : FRANCISCO ATENCIO, JENNY
 Domicilio Legal : Av. Venezuela 1317, Bellavista - Callao
 Producto Declarado : HOJAS DE MAIZ (FOLIAR)
 Cantidad de muestra : 03 muestras x 30 g c/u
 Identificación de la muestra : Según se indica.
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno sellada.
 Fecha de recepción : 2008 - 01 - 23
 Fecha de inicio del ensayo : 2008 - 01 - 24
 Fecha de término del ensayo : 2008 - 01 - 31
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificada con : N/S 080300698 (00966)
 Muestra proporcionada por el Solicitante

Ensayos	Muestras / Resultados		
	M1	M5	M7
Arsénico (mg/L)	0,08351	0,9055	0,9143
Cadmio (mg/L) <small>(límite de detección: 1,00 mg/L)</small>	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Piombo (mg/L)	2,945	1,944	3,482
Mercurio (mg/L)	0,0391	0,0393	0,0390
Cromo (mg/L)	15,35	9,023	7,785

Métodos:

Arsénico: SMEWV 21 TH ED. 2005 PART 3114 C APHA AWWA-WEP Arsenic and Selenium by Hydride Generation/ Atomic Absorption Spectrometry, Method
 Cadmio: EPA METHOD 213.1 1999 CADMIUM (AA, DIRECT ASPIRATION)
 Cromo: EPA METHOD 218.1.1996. CHROMIUM (AA DIRECT ASPIRATION)
 Plomo: EPA METHOD 239.1 1999 LEAD (AA DIRECT ASPIRATION)
 Mercurio: SMEWV 21 TH ED. 2005 PART 3112 B , APHA AWWA-WE METALS BY COLD-VAPOR ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 17 de Febrero del 2008
NS

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

Dirección de Laboratorio
 Calle 10 de Julio 1000
 Callao - Perú

CALLAO:
 Av. Santa Rosa 821 - La Perla
 Telf: 425-4145
 Fax: 425-4143
 Sucursal Pisco 271 - Callao (4)
 E-mail: info@cerper.com

PATA:
 Plaza Seca - Punta Pucallpa s/n
 Telfax: 073 - 211435

ILO:
 Mariano Lino Utegui 741
 Telfax: 053 - 482181

CHIMBOTE:
 Av. José Carlos Mariátegui s/n
 Centro Cívico Lto. Blancos Arenas
 Telf: 043-311033

"EL USO IRREGULAR DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

B.1

RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DE METALES POR ICP - COMPOST-

Los siguientes resultados de metales pertenecen al análisis del compost producido en la fase experimental del presente trabajo de investigación. El método aplicado fue The Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes – EPA - US.

Resultados de metales para el Compost

Metal	mg/L
Plata	15
Aluminio	13300
Arsénico	21
Bario	147
Berilio	< 5,0
Bismuto	9
Calcio	62100
Cadmio	2
Cobalto	9
Cromo	37
Cobre	1459,8
Hierro	16100
Litio	20
Magnesio	8400

Metal	mg/L
Manganeso	361
Molibdeno	4
Sodio	1800
Níquel	36
Fósforo	15800
Plomo	69
Antimonio	< 5,0
Estaño	20
Estroncio	325,4
Titanio	500
Talio	< 2,0
Vanadio	41
Zinc	514,7

C.1

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUA Y
FERTILIZANTES

PROTOCOLO DE MUESTREO DE SUELO

1. Elabore un plano o croquis del terreno en donde va a muestrear.
2. Señale en el plano los lotes que muestren condiciones semejantes de suelo: igual manejo, igual pendiente, color, vegetación, drenaje, etc.
3. En cada área no mayor de 3 has, tomar de 15 a 20 submuestras siguiendo un camino en zigzag, a fin de abarcar todo el lote, luego mezcle cuidadosamente las submuestras de suelo en un balde limpio y tome aproximadamente 1 Kg de la mezcla. Esta muestra compuesta será la que se enviará al laboratorio como representativa de un lote.
4. Se emitirán al laboratorio un número de muestras igual a los diferentes lotes que haya en el terreno.

C.2

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**FACULTAD FR AGRONOMÍA**

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUASY FERTILIZANTES

INFORME DE ANÁLISIS ESPECIAL EN SUELO**TABLA DE INTERPRETACIÓN**

Salinidad		Reacción o pH	
Clasificación del Suelo	CE (es)	Clasificación del Suelo	pH
muy ligeramente salino	<2	Fuertemente ácido	<5.5
ligeramente salino	2 – 4	Moderadamente ácido	5.6 - 6.0
moderadamente salino	4 – 8	Ligeramente ácido	6.1 – 6.5
Fuertemente salino	>8	Neutro	7.0
		Ligeramente alcalino	7.1 – 7.8
		Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4
		Fuertemente alcalino	>8.5

Clasificación	Materia Orgánica %	Fósforo disponible pm P	Potasio disponible ppm K
*bajo	<2.0	<7.0	<100
*medio	2 – 4	7.0 – 14.0	100 – 240
*alto	>4.0	>14.0	>240

Relaciones Catiónicas			Distribución de Cationes %		
Clasificación	K/Mg	ca/Mg			
*Normal	0.2 -0.3	5	Ca ⁺²	=	60 – 75
*defc. Mg	>0.5		Mg ⁺²	=	15 – 20
*defc. K	<0.2		K ⁺	=	3 - 7
* defc. Mg		>10	Na ⁺	=	<15

C.3

REFERENCIA DE LAS NORMAS TÉCNICAS INTERNACIONALES QUE ESTABLECEN CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE APLICACIÓN PARA LOS LODOS DE DESAGÜES EN EL SUELO AGRÍCOLA

ALLOWAY (1993)

METALES PESADOS EN LODOS DE DESAGÜE

Concentración de metales pesados en lodos de desagüe y el máximo valor para metales en lodos aplicados al suelo, cargas anuales de metales, y concentraciones en suelos enmendados con lodo.

Elemento	Lodo de desagüe (mg/Kg)	Carga anual máxima		UK	Conc. suelo enlodado [mg/Kg]		Fr	D
		Conc. en el lodo [mg/Kg]	Cargas en el suelo [kg/ha]		EC			
					R	M		
ARSÉNICO	3 - 30	10 - 75	0,02 - 0,33	10	-	-		
CADMIO	< 1 - 3410	8 - 30	0,01 - 0,17	3,3	1	3	2	3
CROMO	8 - 40600	200 - 1200	0,4 - 33	600	50	-	150	100
MERCURIO	0,1 - 55	5 - 25	0,008 - 1,2	1	2	-	1	2
PLOMO	29 - 3600	300 - 1200	0,3 - 33	550	50	100	100	100

Los rangos de valores para las concentraciones máxima aceptable en el lodo de desagüe y máxima carga en lodo aplicado al suelo indica los valores más lto y más bajo que se utilizan en diferentes países. Se muestran datos del máximo aceptable de concentraciones de metales en suelo enmendado con lodo en el Reino Unido, Comunidad Europea, Francia y República Federal Alemana. R = recomendado, M = mandatorio.

CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN SUELOS Y PLANTAS

Elemento	Rango normal en suelo ⁽¹⁾	Conc. total crítica en suelo ⁽²⁾ [mg/Kg]	Rango normal en las plantas ⁽¹⁾	Conc. crítica en plantas ⁽³⁾ [mg/Kg]	
				a	b
ARSÉNICO	0,1 - 40	20 - 50	0,02 - 7	5 - 20	1 - 20
CADMIO	0,01 - 2,0	3 - 8	0,1 - 2,4	5 - 30	4 - 200
CROMO	5 - 1500	75 - 100	0,03 - 14	5 - 30	2 - 18
MERCURIO	0,01 - 0,5	0,3 - 5	0,005 - 0,17	1 - 3	1 - 8
PLOMO	2 - 300	100 - 400	0,2 - 20	30 - 300	-

(1) Bowen: Environmental Chemistry of the elements. Academic Press, London (1979)

(2) The critical soil total concentration is the range of values above which toxicity is considered to be possible. Kabata-Pendias. Trace Elements in soil and Plants. (1984)

(3) The critical concentration in the level above which toxicity effects are likely. a. Kabata-Pendias. (1984). b, values likely to cause 10% depression in yield. Plant and Soil (1984).

Fuente: ALLOWAY B. (1993). HEAVY METALS IN SOIL.

Valores límite para metales pesados - real decreto /310/190 – España

Metal	Valor Límite de Concentración de Metales Pesados en Suelo (mg/kg)		Valor Límite de Concentración de Metales Pesados en Lodos (mg/kg)		Valor Límite para las cantidades de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de 10 años (kg/ha/año)
	Suelos con pH < 7	Suelos con pH > 7	Suelos con pH < 7	Suelos con pH > 7	
Cd	1	3	20	40	0,15
Pb	50	300	750	1200	15
Hg	1	1,5	16	25	0,1
Cr	100	150	1000	1500	3

Fuente: (Alva, 1999)

Elemento	Rangos comunes		
	C.E.E.	EPA	JAPON
Humedad	50 – 87	-	80.5
M.O.	-	-	-
pH	6,8 – 10.3	6,5 – 8,0	6,1

Metales pesados (mg/Kg)

Metal	Lodo 1	Lodo 2	Valor de Referencia	
			C.E.E.	E.P.A.
Arsénico			-	9
Cadmio			6,3	87
Cromo			-	1800
Mercurio			1,84	7
Plomo			396	1940

Análisis fisicoquímico del lodo
Normas en materia de lodos y metales pesados

Concentraciones límites de metales en lodos de plantas depuradoras

Metal	Alemania	Suiza	Francia	España	C.E.E.	U.S.A.	Chile *
Arsénico	-	-	-	-		75	20
Cadmio	10	5	40	40	20 – 40	85	8
Cromo	900	500	2000	1500	-	3000	-
Mercurio	8	5	20	25	16 – 25	57	4
Plomo	900	500	1600	1200	750 - 1200	840	300

* A partir de resultados de investigación realizados en un número determinado de plantas de tratamiento, Chile plantea sus normas, y están siendo propuestas para regir en este país, para las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Cargas máximas de metales - Análisis Norma EPA

Metal	NORMA EPA			CONC. U.S.A. Media EPA Mg/Kg	TASA DE APLICACIÓN DE LODOS Ton/Há año		Superficie de suelo Hás/1000 Ton		Vida útil terreno años	
	Conc. Máx. permisible Mg/Kg	Carga máx acumulada Kg/há	Carga máx. anual Kg/há		Para concentración máxima	Para concentración media	Para carga máxima	Para carga media	Para carga máxima	Para carga media
Ársenico	75	41	2.0	9	26.7	222.22	37.5	4.5	20	
Cadmio	85	39	1.9	87	22.35	21.83	44.7	45.9	20	
Cromo	3000	3000	150	1800	50	83.3	20.0	12.0	20	
Mercurio	57	17	0.85	7	15	121	66.7	8.3	20	
Plomo	840	300	15	1940	17.85	7.7	56.0	129.5	20	

Cargas máximas de metales - Análisis Norma CEE

Metal	NORMA C.E.E.			CONC. MEDIA. Europa Mg/Kg	TASA DE APLICACIÓN DE LODOS Ton/Há año		Superficie de suelo Hás/1000 Ton		Vida útil terreno años	
	Conc. Máx. permisible Mg/Kg	Carga máx acumulada Kg/há	Carga máx año Kg/há		Para conc. Máx.	Para conc. media	Para carga máxima	Para carga media	Para carga máxima	Para carga media
Ársenico	-									
Cadmio	40	15,75	0,15	6,3	3,75	23,8	266,7	42	105	
Mercurio	25	7,88	0.1	1,84	4	54.3	250	18,4	79	
Plomo	1200	157,5	15	396	12,5	37,9	80	26,4	105	

Análisis comparativo capacidad de disposición Hás/1000 Ton lodos

Metales	EPA		C.E.E.	
	Para carga máx.	Para carga media	Para carga máx.	Para carga media
Arsénico	10,0	1,1		
Cadmio	4,3	0,6	53,2	7,7
Cromo		0,3		
Mercurio	4,7	0,4	40	3,4
Plomo	20,0	1,0	20	1,0

Valores límites de la directiva alemana para el lodo activado
Dr. Balzer, Alemania 2007

Elemento	Suelo (mg/kg)	Lodo activado (mg/kg)
Pb	100	900
Cd	1,5 (1)	10 (5)
Cr	100	900
Cu	60	600
Ni	50	200
Hg	1	8
Zn	200 (150)	2500 (2000)

(valor límite para suelo ligero)

Características de muestras de compost procedente del tratamiento de mezclas de lodos de depuradora y restos vegetales (Paulet, 2000)

Muestra	5a	5b	5c	5d	5e
pH	7,60	7,53	7,75	6,76	7,9
CE dS/m	12,52	4,10	6,27	3,99	19,0
%Humedad	34,11	16,96	20,57	13,75	21,70
ppm N-NH ₄ Soluble	4538	3028	5069	<2	4745
ppm N-NO ₃	17	21	20	1936	Nd
%M.O.	42,83	62,14	61,55	30,74	40,90
% N org	1,48	2,53	2,86	1,27	3,54
C/N	14,50	12,27	10,76	12,1	5,8
%MOR	20,12	26,38	25,09	16,24	16,8
%GE (MOR/MOT)	46,97	42,45	40,76	52,83	41,00
%NnH (Nresistente)	0,78	1,00	0,98	0,87	1,53
%NnH/Norg	52,49	39,44	34,23	68,44	43,22
%P	1,49	2,33	2,46	2,67	1,80
%K	1,58	0,42	0,42	0,58	3,16
%Ca	9,56	5,96	5,89	11,20	9,48
%Mg	1,39	0,96	1,56	0,87	1,81
%Na	1,00	0,25	0,33	0,17	0,90
%Fe	1,05	1,12	0,73	1,21	0,73
ppm Zn	493	1087	644	260	2886
ppm Mn	235	143	104	208	705
ppm Cu	171	338	237	55	220
ppm Ni	123	54	26	33	62
ppm Cr	31	95	18	27	81
ppm Pb	16	110	86	59	462
ppm Cd	0,40	1,5	1,20	0,48	5,66

D.1

Cálculo de los nutrientes que se aplicaron en la fertilización inorgánica del Control NPK (maceta N° 7) en los Ensayos N° 1 y N° 2

DOSES (ppm) DE LA FERTILIZACIÓN DE LA MACETA CONTROL NPK (N° 7):

	Nitrógeno	Oxido fosfórico	Oxido de Potasio
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
ppm:	300	400	200
	↓	↓	↓
	Úrea	Super fosfato Triple de Calcio	Cloruro de Potasio
1 ^{ra} dosis: día 1	100 ppm	400 ppm	50 ppm
2 ^a dosis: día 8	100 ppm	-	50 ppm
3 ^a dosis: día 14	100 ppm	-	100 ppm

Cálculo del fosfato, (dosis única)

$$100 \text{ ppm P} \rightarrow 100 \text{ mg P / Kg}$$

$$\text{En una maceta de 4 Kg} \rightarrow 400 \text{ mg N / Maceta}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuente de Nitrógeno: Úrea} \quad 100 \text{ mg Úrea} &\rightarrow 46 \text{ mg N} \\ x &\rightarrow 400 \text{ mg N} \end{aligned}$$

$$x = 870 \text{ mg Úrea / maceta 4 Kg}$$

$$\text{Se preparan las macetas por triplicado:} \quad 870 * 3 = 2608.7 \text{ mg Úrea}$$

Se diluye con 300 ml de agua, luego:

Cálculo del Nitrógeno, para cada una de las tres dosis

$$100 \text{ ppm N} \rightarrow 100 \text{ mg N / Kg}$$

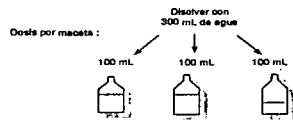
$$\text{En una maceta de 4 Kg} \rightarrow 400 \text{ mg N / Maceta}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuente de Nitrógeno: Úrea} \quad 100 \text{ mg Úrea} &\rightarrow 46 \text{ mg N} \\ x &\rightarrow 400 \text{ mg N} \end{aligned}$$

$$x = 870 \text{ mg Úrea / maceta 4 Kg}$$

$$\text{Se preparan las macetas por triplicado:} \quad 870 * 3 = 2608.7 \text{ mg Úrea}$$

Se diluye con 300 ml de agua, luego:



Cálculo del "KCl" para la primera y segunda dosis

Cálculo de 50 ppm de K_2O :

$50 \text{ ppm } K_2O \rightarrow 50 \text{ mg } K_2O / Kg$

En una maceta de 4 Kg $\rightarrow 200 \text{ mg } K_2O / Maceta$

Fuente de K_2O : KCl $100 \text{ mg KCl} \rightarrow 60 \text{ mg } K_2O$

$x \rightarrow 200 \text{ mg } K_2O$

$x = 333.3 \text{ mg KCl / maceta } 4 \text{ Kg}$

Se preparan las macetas por triplicado : $333.3 * 3 = 999.9 \text{ mg KCl / 3 Macetas}$

$\Rightarrow 1000 \text{ mg KCl / 3 Macetas}$

Se pesa 1000 mg de KCl y se diluye con 300 ml de agua, luego,

Cálculo del "KCl" para la tercera dosis

Cálculo de 100 ppm de K_2O :

$100 \text{ ppm } K_2O \rightarrow 100 \text{ mg } K_2O / Kg$

En una maceta de 4 Kg $\rightarrow 400 \text{ mg } K_2O / Maceta$

Fuente de K_2O : KCl $100 \text{ mg KCl} \rightarrow 60 \text{ mg } K_2O$

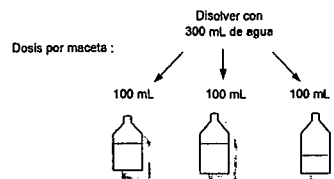
$x \rightarrow 400 \text{ mg } K_2O$

$x = 666.6 \text{ mg KCl / maceta } 4 \text{ Kg}$

Se preparan las macetas por triplicado : $666.6 * 3 = 1999.9 \text{ mg KCl / 3 Macetas}$

$\Rightarrow 2000 \text{ mg KCl / 3 Macetas}$

Se pesa 2000 mg de KCl y se diluye con 300 ml de agua, luego,



D.2

BALANCE DE MATERIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPOST

Se ha considerado las proporciones del 50% de cada componente del compost (sugerido por Falcón, 2005) como la más adecuada para producir un bio-abono con las mejores características

Cálculo de la cantidad de Lodo

$$50\% \text{ Lodo} = 50\% \text{ Maleza}$$

$$m_L = 50 \text{ Kg}$$

$$50 \text{ Kg Lodo} * \frac{0.00822 \text{ Kg H}_2\text{O}}{0.10 \text{ Kg Lodo}} = 4.11 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

$$\%H = 8.22 \text{ g}/100\text{g}$$

$$50 - 4.11 = 45.89 \text{ Kg } L_S$$

$$P = 0.756 \text{ Kg}/l$$

$$50 \text{ Kg Lodo} \text{ ----- } 45.89 \text{ Kg } L_S$$

$$L_S = \text{Lodo seco}$$

$$X \text{ ----- } 50 \text{ Kg } L_S$$

$$X = 54.478 \text{ Kg Lodo (cantidad de Lodo)}$$

$$V_L = \text{Volumen de lodo}$$

$$V_L = 54.478 \text{ Kg L} \frac{l}{0.756 \text{ Kg}} * \frac{m^3}{10^3 l}$$

$$V_L = 0.0721 m^3$$

Cálculo de la cantidad de Maleza

$$54.478 \text{ Kg Lodo} = 54.478 \text{ Kg Maleza}$$

$$\rho = 0.55 \text{ Kg}/l$$

$$\%H = 55.1 \text{ g}/100\text{g}$$

$$54.478 \text{ Kg Maleza} * \frac{0.0551 \text{ Kg H}_2\text{O}}{0.10 \text{ Kg Maleza}} = 30.017 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

$$54.478 - 30.017 = 24.46 \text{ Kg } L_S$$

$$54.478 \text{ Kg Maleza} \text{ ----- } 24.46 \text{ Kg } M_S$$

$M_S = \text{Maleza seca}$

X ----- 50 Kg M_S

X = 111.35 Kg Maleza (cantidad de Maleza)

$V_L = \text{Volumen de Maleza}$

$$V_L = 111.36 \text{ Kg Maleza} \frac{l}{0.55 \text{ Kg}} * \frac{m^3}{10^3 l}$$

$$V_L = 0.2025 m^3 \text{ Maleza}$$

$V_T = \text{Volumen de la mezcla total}$

$$V_T = V_{\text{Lodo}} + V_{\text{Maleza}}$$

$$V_T = (0.0721 + 0.2025) m^3$$

$$V_T = 0.2746 m^3$$

Volumen de la Unidad de Compostaje (V_{UC})

A = 0.6 m

B = 0.5 m

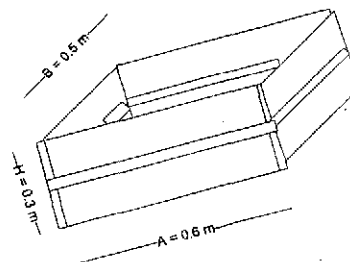
H = 0.3 m

$$V_{UC} = 0.6 * 0.5 * 0.3$$

$$V_{UC} = 0.09 m^3$$

$$\#UC = \frac{V_T}{V_{UC}} = \frac{0.2746}{0.09} = 3.054$$

UNIDAD DE
COMPOSTAJE (UC)



Se requieren

$$\#UC = 4$$

D.3

DATOS TECNICOS DE LA PLANTA DE PUENTE PIEDRA

Capacidad nominal de Diseño (l/s) 420
 Capacidad real de Diseño (l/s) 420

Periodo 2006 - 2007

Mes	Caudal (l/s)		Vol miles de m ³	
	2006	2007	2006	2007
Enero	190	242	509	649
Febrero	208	248	503	600
Marzo	232	277	620	743
Abril	236	300	611	777
Mayo	210	266	563	713
Junio	202	255	524	662
Julio	205	247	550	662
Agosto	220	240	590	643
Setiembre	223	235	577	609
Octubre	222	240	594	642
Noviembre	223	253	577	655
Diciembre	218	256	585	686
Total miles de m ³			6803	8041

Evolución anual del caudal tratado en PTAR 1996 - 2007 (l/s)

Año	2003	2004	2005	2006	2007
Caudal (l/s)	137	157	177	216	255

Parámetros de control de calidad en la PTAR Puente Piedra

Año	Q (l/s)	DBO ₅ (mg/L prom)			COA KgDBO ₅	SS (mg/L prom)			CTT (Nmp/100 mL prom)		
		EP	SP	% R		EP	SP	% R	EP	SP	% R
2006	216	331	19	94,3	6161	289	11	96,4	9.8 E+07	1.4 E+03	99,999
2007	255	338	24	92,9	7447	316	14	95,7	2.1 E+08	1.2 E+04	99,994

SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA PTAR Puente Piedra 2003 - 2007 (mg/L)

Año	2003	2004	2005	2006	2007
EP	252,5	320,1	272	289	316
SP	6,5	3,9	6	11	14
% Eficiencia	97,4	98,8	97,8	96,2	95,7

Leyenda

EP Entrada a la planta - Afluente
 SP Salida de la planta - Efluente
 % R capacidad de remoción o de reducción de patógenos del sistema
 DBO₅ (mg/L prom) demanda bioquímica de oxígeno
 CTT Coliformes termotolerantes
 SS Sólidos suspendidos

Fuente: Anuario Estadístico 2006 - 2007. Gerencia de Desarrollo e investigación.
 Equipo Planeamiento Operativo y Financiero (EPOF)

D.4

Estimación de costos del lodo compostado y de la disposición final de los lodos residuales en un relleno sanitario

Precio de venta de compost en el mercado (Agosto 2007)

Cantidad	Precio (S/.)		
	Universidad Nacional Agraria La Molina	En el Mercado de Lima	Precio sugerido
01 TM	250.00	350.00	300.00
01 Saco (50 Kg)	15.00	25.00	10.00
01 Bolsa (5Kg)	2.50	5.00	1.00

Estimación de costos para la disposición final de los lodos residuales en un relleno sanitario

Para la estimación de costos para la disposición final de lodos residuales en un relleno sanitario se considera de las siguientes actividades

- i. Contratar a la Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos (EPS-RS), autorizada en brindar el servicio de transporte y disposición final de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- ii. La disposición del lodo en la laguna de lodos
- iii. La disposición del lodo al relleno sanitario
- iv. El secado del lodo antes de su disposición al Relleno Sanitario Portillo Grande, ya que no se permite disponer el lodo directamente, por su elevado contenido de humedad.

Recolección y transporte del lodo hasta el relleno sanitario.

Los lodos acumulados en la laguna de lodos se trasladan al lecho de secado y permanecen en él por varias semanas hasta lograr que pierdan humedad, luego la EPS-RS, realiza el carguío, transporte y disposición final del lodo seco al relleno sanitario por medio de cargadores frontales, dumpers y volquetes.

E.1

Inventario de Plantas de Tratamiento de aguas Residuales en Lima

NOMBRE	INSTITUCIONALES Y NORMATIVOS				TÉCNICO				
	AMBITO	RESPONS. RATAMIENTO	RESPONS. REUSO	ÁREA REUSO HA	REUSO	CAUDAL REUSO FS	CAUDAL TRATADO FS	TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	
Zona Norte de Lima									
1	Áreas verde de Miramar-Ancón	Peri-urbano	SEDAPAL	Casa de Retiro	10	Área verde	30	60	Laguna de Estabilización
2	Áreas verdes Club La Unión	Intra-urbano	SEDAPAL	Club La Unión	8	Área verde	10	10	Filtro Percolador
3	Áreas verdes de Jerusalem y Piedras Gordas	Peri-urbano	Ministerio d Defensa	Ministerio de Defensa	8	Área verde	18	18	Laguna de Estabilización
4	Zona agroecológica Ventanilla	Peri-urbano	SEDAPAL	Agricultores	50	Agricultura	220	220	Lag. Estabilización
5	Zona agrícola d Chuquitanta	Peri-urbano	SEDAPAL	Comisión de Regantes	40	Agricultura	60	137	Lodo Activado SBR
6	Zona agrícola d Oquendo	Peri-urbano	Agricultors	Comisión de Regantes	2	Agricultura	2	2	Humedal Artificial
7	Zona agrícola d San Agustín	Peri-urbano	-	Comisión de Regantes	456	Agricultura	700	700	No hay
8	8 Verma central Av. Universitaria	Intra-urbano	Mun. Lima	Mun. de Carabaylo	5	Área verde	4	4	Lodos Activados
9	UNITRAR- Univ. Nacional de Ingeniería	Intra-urbano	UNI	Uni-Municipio	13	Área verde acuicultura	7.5	7.5	RAFA, Lag. Estabilización
Zona Centro de Lima									
10	Áreas verdes de U. Católica	Intra-urbano	No hay	P.U.C.P.	4	Área verde	6		No hay
11	Golf de Lima	Intra-urbano	Golf de Lima	Golf de Lima	30	Área verde	20	20	Lag. Aireadas
12	Áreas de Miraflores-Costa Verde	Intra-urbano	Municip. Miraflores	Municip. Miraflores	4	Área verde acuicultura	1.5	1.5	Filtro percolador
13	Áreas Verdes de Surco	Intra-urbano	Municip. Surco	Mun. Surco	50	Área verde	17.5	17.5	Lodos activados
14	Colegio Inmaculada	Intra-urbano	Colegio Inmaculad	Colegio Inmaculada	13	Área verde	15	15	Lag. Estabilización
Zona Este de Lima									
15	Áreas verdes colegio 1265	Intra-urbano			0.002		0.1	0.25	Humedal artificial
16	Reuso agua gris domiciliario de Nievería	Intra-urbano			0.002		0.2	0.2	ECOSAN/ Humedal artificial
17	Zona agrícola d Huachipa	Peri-urbano			0.65		0.6	0.6	Imhoff reservorio
18	Sede Atarjea	Peri-urbano			1		1	1	Lodos activados
19	Jardinez de la Paz	Intra-urbano			10		5.25	5.25	Lodos activados
20	Club Golf de la Planicie	Intra-urbano			20		15	15	Lag. Aireadas

Zona Sur de Lima									
21	Huerto comunal Villa María del Triunfo	Intra-urbano	Mun. VMT	Comunidad	3	Agricultura	2	2	Lodos activados
22	Zona agropecuaria de San Juan de Miraflores	Peri-Urbano	SEDAPAL	Agricultores	12	Agricultura	20	424	Lag. Aireada
23	Parque 23	Peri-urbano	SEDAPAL	SERPAR	10	Área verde	20	*424	Lag. Aireada
24	Parque zonal Huayna Capac	Peri-urbano	SEDAPAL	SERPAR	15	Área verde	20	*424	Lag. Aireada
25	Zona agrícola de Jose Galvez	Peri-urbano	SEDAPAL	Agricultores	10		35	53	Laguna de Estabilización
26	Alameda de la Solidaridad Villa El Salvador VES	Intra-urbano	Mun. VES	Mun. VES	3.45	Área verde	6	6	Lodos activado
27	Alameda de la Juventud	Intra-urbano	Mun. VES	Mun. VES	2.5	Área verde	5	5	Lodos activado
28	Parque 26	Peri-urbano	SEDAPAL	MVCS	15	Área verde acuicultura agricultura	19	73	Laguna Aireadas-Maduración
29	Comité regantes CP1-VES	Peri-urbano	SEDAPAL	SEDAPAL	30	Agricultura	30	*73	Laguna Aireada
30	Comité regantes CP2-VES	Peri-urbano	SEDAPAL	Comité de regantes	100	Agricultura	120	*424	Laguna Aireada
31	Parque zonal Huascar	Peri-urbano	SEDAPAL	MVES/SERPAR	24	Área verde agricultura	24	*73	Laguna Aireada
32	Oasis de Villa		Mun. VES	Población	0.76	Área verde	3	3	Humedal artificial
33	Zona agrícola de Chorrillos	Peri-urbano	-	Comité de regantes	8	Agricultura	10	No hay	No hay
34	Zona agrícola San Pedro-Lurín	Peri-urbano	SEDAPAL	Comité de Regantes	20	Agricultura	17	17	Anaeróbico-Lag. Aireada
35	Zona agrícola Nuevo Lurín	Peri-urbano	SEDAPAL	Agricultores	3	Agricultura	5	5	Laguna de Estabilización
36	Punta Hermosa	Peri-urbano	SEDAPAL	Mun. P. H.	2	Área verde	3	3	Laguna de Estabilización
37	Zona agrícola de Pucusana	Peri-urbano	SEDAPAL	Agricultores	2	Agricultura	5	5	Laguna de Estabilización

Fuente: Inventario de Experiencia Intraurbanas en la Ciudad de Lima. Moscoso et al. (2008)

F.1 Panel fotográfico

TESIS

"APROVECHAMIENTO CON FINES AGRÍCOLAS DEL LODO GENERADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGUES DE PUENTE PIEDRA"

PANEL FOTOGRAFICO



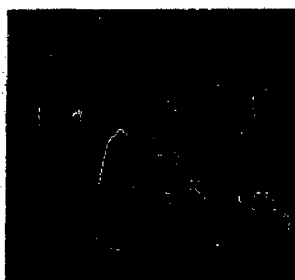
Estructura del lodo en la cancha de secado de lodos



Semillas de maíz utilizadas en la investigación



Lodo pulverizado



Laboratorio de Fertilización de Suelos, UNALM (Feb. 2007)



Estación de Invernadero – UNALM. (Mayo 2007)



Mezcla lodo seco + arena



Cama de compostaje (abril 2007)



Tratamiento con lodo compostado