

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"**

**DIVISION DE AGRONOMIA**

**DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA**



**EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LODO RESIDUAL COMO MEJORADOR DE SUELOS AGRÍCOLAS.**

**Por:**

**EFRÉN CARMONA PEINADO**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

**BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. NOVIEMBRE DEL 2006**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**DIVISION DE AGRONOMIA**

**DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA**

**EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LODO RESIDUAL COMO MEJORADOR DE  
SUELOS AGRÍCOLAS.**

**POR:**

**EFRÉN CARMONA PEINADO**

**TESIS**

**QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACION DEL H. JURADO EXAMINADOR  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

**APROBADA POR:**

---

**Biol. SOFÍA COMPARÁN S.  
PRESIDENTE**

---

**Dr. EDMUNDO PEÑA CERVANTES  
1er SINODAL**

---

**M.C. IDALIA HERNÁNDEZ T.  
2do SINODAL**

---

**Biol. JOEL LUNA MARTÍNEZ  
3er SINODAL**

**COORDINADOR DE LA DIVISION DE AGRONOMIA**

---

**M.C. ARNOLDO OYERVIDES GARCÍA**

**BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A NOVIEMBRE DEL 2006**

## **DEDICATORIA**

A MI MADRE (†): Primeramente por haberme dado la vida, por los buenos consejos que siempre me supo dar y por haber hecho de mí lo que ahora soy, siempre la llevo en mi mente y en mi corazón.

A MI PADRE: Por todos los consejos que me ha dado y que estoy seguro me seguirá dando a lo largo de mi vida, puesto que uno como hijo, nunca termina de aprender de su padre.

Sra. Aurora Peinado R. (†)

Sr. Valentín Carmona L

A todos y cada uno de mis hermanos, ya que con su gran apoyo y confianza que siempre depositaron en mí, he logrado terminar una etapa mas de mi vida.

Como olvidarme de mis sobrinos, esos pequeños que me han regalado tantos momentos felices y que donde quiera que ando siempre los recuerdo, los quiero mucho a todos.

A todos mis compañeros de la generación, en especial a mis buenos amigos Edhy, Sergio (chegue), Daniel, Nora, Paulina, ya que con ellos siempre pase buenos momentos y siempre hicieron lo posible por apoyarme en momentos difíciles.

A la persona que durante ya dos años ha compartido momentos buenos y difíciles conmigo, a quien ha sido más que mi novia, ha sido compañera y amiga, Diana López, que con el gran amor que me ha brindado ha hecho que el trabajo que hoy concluye haya sido más fácil debido al gran apoyo que me ha dado en todo momento, ¡Chaparrita, te amo!

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MI ALMA TERRA MATER.....**

A todos los profesores – investigadores de la UAAAN que de una u otra manera contribuyeron en mi formación como profesionista, brindándome sus conocimientos y consejos.

BIOL. SOFÍA COMPARÁN S. Por el apoyo que siempre me ha brindado, no solo en la elaboración y revisión de mi tesis, sino también durante toda mi carrera, ¡Gracias!.

M. C IDALIA HERNÁNDEZ TORRES: No solo por formar parte del jurado de mi tesis, sino también por haber sido la directora del trabajo de laboratorio, además por apoyarme en la revisión de la misma ¡Muchas gracias!.

Dr. EDMUNDO PEÑA C. Por el apoyo brindado en la realización de la presente tesis, además también por la participación en la revisión de la misma ¡Gracias!.

Biol. JOEL LUNA MARTÍNEZ. Por haber aceptado ser parte del jurado examinador de mi tesis, además también por haber participado de manera entusiasta en la revisión de la misma ¡Gracias!

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los profesores – investigadores del Dpto. de Botánica, en especial al Biol. Andrés Rodríguez Gámez y al Dr. Jesús Valdez Reyna, no solo por compartir un poco de sus muchos conocimientos conmigo, sino también por haberme brindado su amistad durante toda mi carrera

A T. L. Q. Patricia Herrera Gaytán por todo el apoyo que me brindó en obtención de resultados en el laboratorio de Pedología del departamento de ciencias del suelo de la UAAAN.

A T. A Blanca E. Rodríguez Pérez por el apoyo brindado en el laboratorio de Servicios y Vinculación del departamento de ciencias del suelo de la UAAAN.

A la Familia González Hernández que durante todos estos años de mi formación profesional me abrieron las puertas de su casa brindándome en todo momento su amistad y apoyo, haciéndome sentir como parte de su familia. ¡Siempre les estaré agradecido!.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de esta tesis, y además que durante toda mi carrera me han brindado su apoyo de manera incondicional, ¡Gracias!

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
INDICE DE CUADROS .....	viii
INDICE DE FIGURAS .....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos .....	3
Hipótesis .....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Proceso de desertificación en México .....	4
2.2 Situación mundial .....	4
2.3 Erosión de suelos en México .....	5
2.4 Lodo residual y biosólidos .....	9
2.5 Disposición del lodo .....	9
2.5.1 Aplicación de lodo a los suelos.....	9
2.5.1.1 Aplicación de lodo a los suelos agrícolas.....	10
2.5.1.2 Métodos de aplicación .....	12
2.5.1.3 Época de aplicación .....	12
2.6 Características del lodo residual.....	12
2.6.1 Cantidad de lodo residual.....	14
2.6.2 Contenido de sólidos totales .....	14
2.6.3 Contenido de sólidos volátiles .....	15
2.6.4 pH.....	15
2.6.5 Materia orgánica.....	16
2.6.6 Patógenos .....	16
2.6.7 Nutrientes .....	17
2.6.7.1 Nitrógeno.....	18
2.6.7.2 Fósforo, potasio y otros nutrientes .....	20
2.6.8 Metales .....	20
2.6.9 Químicos orgánicos.....	23
2.6.10 Contaminantes peligrosos .....	23
2.7 Legislación para el uso de los lodos residuales .....	24
2.8 Selección y evaluación del lugar de aplicación .....	25
2.9 Características de los sitios de aplicación .....	26
2.9.1 Suelo y Topografía .....	26
2.9.2 Permeabilidad .....	27
2.9.3 Profundidad del acuífero .....	28
2.9.4 Distancia de los sitios de aplicación a los cuerpos de agua superficiales .....	29
2.10 Limitaciones estacionales.....	30
2.11 Uso y disponibilidad del suelo .....	30
2.12 Selección del cultivo y requerimiento de nutrientes.....	30
2.13 Evaluación de riesgos para la aplicación.....	31
2.14 Efecto de los lodos sobre propiedades físicas y químicas del suelo	

(casos de estudio).....	33
2.14.1 Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero ( <i>Sorghum vulgare Pers</i> ).....	33
2.14.2 Efecto residual del lodo en trigo ( <i>Triticum spp. L.</i> ) .....	34
2.14.3 Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas .....	35
III.    MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1 MATERIALES.....	37
3.1.1 Descripción del lodo utilizado en la investigación.....	37
3.1.2 Suelo .....	39
3.1.3 Descripción de los Tratamientos .....	40
3.1.4 Parámetros a evaluar en la mezcla lodo – suelo y suelo.....	40
3.1.5 Localización del Área donde se realizó la Investigación.....	40
3.2 METODOLOGÍA.....	41
IV.    RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	43
4.1.1 TEXTURA.....	43
4.1.2 DENSIDAD APARENTE.....	44
4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	45
4.2.1 MATERIA ORGÁNICA .....	45
4.2.2 pH.....	46
4.2.3 SALINIDAD .....	47
4.2.4 NITRÓGENO TOTAL .....	48
4.2.5 FÓSFORO .....	49
4.2.6 POTASIO .....	51
4.2.7 CARBON TOTAL .....	52
V.    CONCLUSIONES.....	53
VI.    RECOMENDACIONES.....	56
VII.   LITERATURA CITADA .....	57
VIII.  APÉNDICE.....	62

## INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página.
2.1 Tipos de degradación y superficie afectada en México.....	6
2.2 Degradación de suelos en 1999.....	7
2.3 Niveles típicos de nutrientes identificados en el lodo (Sommers, 1977; Furr et al., 1976) .....	18
2.4 Concentraciones promedio de metales en el lodo comparado con los límites máximos de concentración (adaptado de U. S. EPA, 1990) .....	21
2.5 Clasificación de los sitios de aplicación de lodos de acuerdo a sus características del suelo, topografía y geología .....	23
2.6 Límites de aplicación de lodos al suelo en base a la permeabilidad. Ante – proy. NOM – 004 – ECOL – 1998.....	28
2.7 Criterios de profundidad del acuífero en diferentes sitios .....	28
2.8 Recomendaciones relacionadas con la pendiente .....	29
3.1 Características químicas de los lodos residuales de la empresa embotelladora el Carmen S. A de C. V.....	38
3.2 Parámetros Físico - químicos del lodo Utilizado en la Investigación.....	38
3.3 Parámetros Físico – Químicos del suelo utilizado en la investigación.....	39
4.1 Determinación de textura para los diferentes tratamientos .....	43
4.2 Grado de Salinidad de los diferentes tratamientos analizados en la investigación.....	47

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Página.
2.1 Fertilidad de los suelos agrícolas en 1996.....	8
3.1 Composición Física del lodo de la empresa embotelladora el Carmen S. A de C. V.....	37
4.1 Densidad aparente de los análisis de las muestras de cada tratamiento .....	44
4.2 Materia Orgánica para los diferentes tratamientos analizados en la investigación.....	45
4.3 Índice de acidez o alcalinidad de los análisis hechos a cada tratamiento .....	47
4.4 Nitrógeno Total encontrado en cada uno de los tratamientos .....	48

<b>4.5</b>	Fósforo encontrado en los análisis realizados a los diferentes tratamientos.....	50
<b>4.6</b>	Potasio encontrado en los análisis hechos a cada uno de los tratamientos, con sus respectivas repeticiones.....	51
<b>4.7</b>	Carbón Total encontrado en los diferentes tratamientos en la presente investigación.....	52

## I. INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos es un proceso natural o inducido por el hombre que disminuye la capacidad actual y / o futura de este recurso para sostener la vida en todas sus formas sobre la tierra.

Estimaciones hechas por la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (Semarnap, 1999), con base en información cartográfica, indican que la erosión hídrica afecta a 37% de los suelos de la República Mexicana, éste se descompone en 25% que afecta sólo a la capa superficial del suelo y 12% que produce deformación del terreno. Con relación a erosión eólica, la Semarnap indica que ésta afecta al 15% de los suelos del país, porcentaje que casi en su totalidad corresponde a erosión con pérdida de la capa superficial.

Una alternativa para evitar este problema y que se está dando resultados en el ámbito mundial es el uso de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en suelos agrícolas, evitando así el costo de confinamiento. Esta práctica representa la oportunidad de darle un valor agregado al residuo que se está generando en la planta tratadora de aguas residuales, al aprovecharse como fertilizante y/o acondicionador de suelo.

La aplicación de lodos residuales a suelos agrícolas es una práctica habitual en países desarrollados por razones prácticas y económicas (Ottaviani et al., 1991). Los lodos residuales tienen valor fertilizante y mejoran también las propiedades físicas de los suelos (Tester, 1990). La dosis de aplicación se suele fijar en función de los requerimientos del cultivo en N y P. La productividad del suelo aumenta frecuentemente, a causa del llamado efecto de la materia orgánica que se produce después de la aplicación de lodos residuales.

La evacuación final de los residuos sólidos, semisólidos (lodos) y contaminantes concentrados separados del agua residual mediante los diversos

procesos de tratamiento, ha sido y continúa siendo uno de los problemas más complejos y costosos en el ámbito de la ingeniería de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1991).

La aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional del lodo. La luz solar, los microorganismos del suelo y la desecación, se combinan para destruir los organismos patógenos y muchas de las sustancias presentes en el lodo. Los metales traza quedan atrapados en la matriz del suelo, y los nutrientes los consumen las plantas y los convierten en biomasa útil, los lodos tratados se pueden utilizar como un sustituto parcial de fertilizantes químicos costosos y pueden actuar como mejoradores o acondicionadores del suelo para facilitar el transporte de nutrimentos, aumentar la retención del agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo. (Pissani, 1990; Metcalf y Eddy, 1991.)

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es utilizar los lodos generados en la planta tratadora de aguas residuales de una empresa refresquera en la recuperación de suelos agrícolas, evitando de esta manera el vertido de los lodos a otros medios y puedan causar contaminación.

## **OBJETIVOS:**

- Utilizar lodos residuales de una planta de tratamiento de una empresa refresquera como mejoradores del suelo para evitar el vertido de éstos a algún otro medio.
- Destacar la importancia que tiene el uso de los lodos residuales como mejoradores de suelos agrícolas.
- Promover el uso de los lodos residuales en prácticas agrícolas disminuyendo de esta manera el deterioro de los suelos y mantener un desarrollo sostenible para evitar la contaminación ambiental y el desequilibrio ecológico.

## **HIPÓTESIS:**

Al aplicar lodo residual al suelo se incrementará la concentración de macro y micro nutrientes y se modificarán algunas características físicas y químicas del mismo.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 PROCESO DE DESERTIFICACIÓN EN MÉXICO**

El suelo se puede definir como el conjunto de cuerpos naturales originados a partir de materiales minerales y orgánicos que contienen materia viva, y que pueden soportar vegetación en forma natural. Cuando un suelo es fértil tiene la capacidad de suministrar a las plantas agua y nutrimentos esenciales para su crecimiento y desarrollo. La fertilidad de suelo que da la capacidad de sostener el crecimiento de las plantas, a menudo se refiere en particular, a la presencia de las cantidades adecuadas de los nutrimentos, pero también comprende su capacidad de satisfacer todas las otras necesidades de las plantas.

La degradación de la cubierta vegetal se refiere a la remoción o destrucción que ésta sufre, principalmente, por la acción del hombre, tal es el caso de la destrucción de vegetación que acompaña el proceso de ganaderización en varias regiones del país. La erosión hídrica se refiere a la remoción del suelo por la acción del agua ( Challenger, 1998 )

### **2.2 SITUACION MUNDIAL.**

El suelo fértil es la base del crecimiento vegetal y la producción de alimentos. Sin embargo, en todo el mundo la erosión degrada los suelos, los pastizales se convierten en desiertos y las tierras de regadío se vuelven demasiado salinas para los cultivos. Actualmente, el suelo tiene una elevada tasa de degradación. Entre los factores responsables se encuentran el crecimiento poblacional, la deforestación, el uso de tierras de poca aptitud agrícola y el mal manejo de los recursos naturales. Según investigaciones, aproximadamente las dos terceras partes de la tierra de cultivo han sido parcial o totalmente destruidas por la erosión o por el agotamiento del suelo causado por el hombre ( Turk y Amos, 1973).

En todo el mundo la erosión, la formación de sales en la tierra y otros problemas vienen degradando los suelos agrícolas de una manera que socavarán mucho la productividad en el futuro. Durante los últimos cuarenta años, un tercio de las tierras de labrantío del mundo (1, 500 millones de hectáreas) han sido abandonadas por semejante degradación. Los alimentos del mundo provienen del 90% de los sistemas agrícolas basados en las tierras de cultivo, y este porcentaje crece conforme se agota la pesca y los ecosistemas oceánicos naturales. Proteger y nutrir las tierras de cultivo, es la piedra angular de la producción de alimentos.

### **2.3 EROSION DE SUELOS EN MÉXICO**

Estimaciones hechas por la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (Semarnap, 1999), con base en información cartográfica, indican que la erosión hídrica afecta a 37% de los suelos del país, porcentaje que se descompone en 25% que afecta sólo a la capa superficial del suelo y 12% que produce deformación del terreno. Con relación a erosión eólica, la Semarnap indica que ésta afecta al 15% de los suelos del país, porcentaje que casi en su totalidad corresponde a erosión con pérdida de la capa superficial.

Respecto a la degradación física (compactación y encostramiento), el 30% de los suelos del país presentan problemas de este tipo debido a la excesiva utilización de maquinaria agrícola y pisoteo del ganado. De acuerdo con la Comisión Nacional de Zonas Áridas, en 1985 en el 85% de las zonas áridas de 10 estados del país había sobrepastoreo y, derivado de esta actividad, en casi la mitad de la superficie total se presentaba invasión de plantas arbustivas indeseables, en donde sólo el 27% de las comunidades vegetales dedicadas a la ganadería se encontraban en buenas condiciones. En 1999, la Semarnap estimó en 1.8% la superficie del país afectada por degradación física, cantidad que se debe principalmente a aridificación (0.6%) e inundaciones (0.6%).

Existen también problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión, entre ellos se incluyen a los derivados por el uso de agroquímicos

(fertilizantes y pesticidas), así como a los provocados por derrames y fugas de combustibles, lo mismo que los ligados a actividades mineras.

**Cuadro 2.1 Tipos de degradación y superficie afectada en México.**

<b>TIPOS DE DEGRADACIÓN</b>	<b>SUPERFICIE AFECTADA EN KM<sup>2</sup></b>
Erosión Hídrica por	724 651.44
Pérdida de la capa superficial	495 668.85
Deformación del terreno	227 760.40
Sedimentaciones	1 222.19
Erosión eólica con	291 711.40
Pérdida de la capa superficial	285 856.25
Deforestación del terreno	5 855.15
Degradación química por	132 549.50
Pérdida de nutrientes	31 171.91
Gleyzación	12 989.26
Salinidad	62 421.15
Contaminación	25 967.18
Degradación física por	34 877.66
Urbanización	7 469.16
Aridificación	10 789.66
Compactación	5 473.20
Inundaciones	11 145.64
Degradación biológica	70 817.45
<b>TOTAL</b>	<b>1 254 607.45</b>

El total de la superficie afectada representa el 64 % de la superficie continental del país, estimada en 1 254 608 Km. Los datos fueron elaborados por el INEGI en 1996.

## **Cuadro 2.2 DEGRADACIÓN DE SUELOS EN 1999.**

Los porcentajes se refieren al total de la superficie afectada, 1 254 607.45 km<sup>2</sup>, la cual representa el 64% de la superficie continental del país, estimada en 1 959 248 km<sup>2</sup>, (INEGI, 1999).

<b>Tipo de Degradación</b>	<b>%</b>
Erosión Hídrica	57.8
Erosión eólica	23.3
Degradación química	10.6
Degradación física	2.8
Degradación biológica	5.6

Actualmente la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, establece que para el uso, la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, debe ser compatible con su vocación natural y que además deben incluirse acciones para su regeneración, recuperación y establecimiento. Pero estas regulaciones en materia de remediación, prevención y control de contaminación en el suelo, se aborda de manera muy general y sin proporcionar sustento para las acciones de control y limpieza.

**Fig. 2. 1.- FERTILIDAD DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS EN 1996.**



La fertilidad de suelos se basa en la medición de diversas características químicas, resumidas en un índice de fertilidad (IF), con base en el cual, se clasificó según los siguientes valores del mismo:

- Muy alta = IF mayor a 20
- Alta = IF de 15 a 20 inclusive
- Media = IF de 10 a 15 inclusive
- Baja = IF de 5 a 10 inclusive
- Muy baja = IF de 0 a 5 inclusive

## **2.4 Lodo residual y biosólidos**

El lodo residual se define como los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, removidos en los procesos de tratamiento primario, secundario o avanzados del agua residual. El lodo incluye escorias o sólidos removidos en los procesos de tratamiento y cualquier material derivado del lodo (por ejemplo, una mezcla de lodo fertilizante) pero no incluye a los granitos de arena, cribados y cenizas generadas por la combustión del lodo en un incinerador (U. S. EPA, 1995<sub>a</sub>).

El término biosólido se originó dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos residuales generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Actualmente es utilizado para describir a los lodos que contienen principalmente productos orgánicos con altos contenidos de nutrimentos esenciales para las plantas que pueden ser benéficamente reciclados como fertilizantes y mejoradores de suelo (Pissani, 1998).

Según Sorber (1994) el término lodo difiere de biosólido, éste último se refiere a un producto tratado que es cuidadosamente verificado y periódicamente reutilizado a través de aplicaciones innovativas.

## **2.5 Disposición del lodo**

Los métodos de disposición del lodo más usados en la actualidad son: confinamiento en relleno sanitario, incineración y aplicación al suelo, éste último ha ido incrementando interés en los últimos años por su accesibilidad y factibilidad en comparación con los otros métodos de disposición (Metcalf y Eddy, 1991).

### **2.5.1 Aplicación de lodo a los suelos.**

El método de aplicación de lodo al suelo ofrece diferentes alternativas o prácticas de aplicación: 1) aplicación del lodo a terrenos agrícolas; 2) aplicación de

lodo a terrenos forestales; 3) recuperación de terrenos marginales y 4) aplicación de lodo a sitios de contacto público, jardines, etc.

Cada una de las prácticas tiene ventajas y desventajas en términos de la calidad y cantidad del lodo que puede utilizarse y de los requerimientos para el sitio de aplicación.

### **2.5.1.1 Aplicación de lodo a los suelos agrícolas**

La aplicación de lodo a los suelos agrícolas es practicada en la mayoría de los países desarrollados, en E. U. A. Se practica casi en todos los estados, y es especialmente común en Colorado, New Jersey, Pennsylvania, Ohio, Illinois, Michigan, Missouri, Wisconsin, Oregon y Minesota. Cientos de comunidades grandes y pequeñas tienen desarrollados programas exitosos de aplicación de lodo a los suelos agrícolas. Esos programas benefician la municipalidad generando el lodo para una aceptabilidad ambiental actual, y para mejores costos en el control de los lodos, los agricultores se benefician también ya que reciben los nutrientes en el lodo para la producción de cultivos, generalmente a costos menores que con los fertilizantes convencionales.

El lodo aplicado a los suelos agrícolas puede aplicarse en dosis iguales o mayores que las dosis agronómicas. La cantidad de nitrógeno disponible o asimilable (ó fósforo) aplicada a un lugar está basada en los requerimientos del cultivo. Esta cantidad de N puede de otro modo aplicarse a un lugar como fertilizante comercial por el agricultor. Para limitar las cargas de N a las recomendaciones de fertilización, el impacto sobre el agua subterránea no debe ser mayor que las operaciones agrícolas usando fertilizantes comerciales o estiércol.

#### **2.5.1.1.1 Ventajas de la aplicación de lodo a los suelos agrícolas.**

El lodo contiene varios macro nutrientes indispensables para las plantas, principalmente N, P y K, y en muchos casos, variadas cantidades de micro

nutrimentos tales como boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

El lodo también puede ser un valioso acondicionador de los suelos. La adición de materiales orgánicos como el lodo a un suelo arcilloso de textura fina, puede ayudar a que el suelo sea más friable y puede incrementar la cantidad del espacio poroso disponible para el crecimiento de las raíces y para la entrada del agua y aire dentro del suelo. En los suelos arenosos de textura granulosa, los residuos orgánicos como el lodo, pueden incrementar la capacidad de retención del agua en el suelo, suministrar y situar químicos para el intercambio y adsorción de nutrientes. El agua agregada al suelo durante la aplicación del lodo también es un recurso valioso.

Los trabajos de tratamiento para la generación del lodo, pueden ser benéficos, porque en muchos casos la aplicación a los suelos agrícolas es menos costosa que otros métodos alternativos de uso o disposición del lodo. El público en general puede beneficiarse ahorrando costos, resultado de la aplicación del lodo a los suelos agrícolas, y el reciclaje de nutrientes, es atractivo a la preocupación ciudadana con la conservación de recursos y el medio ambiente.

Otra ventaja de la aplicación a los suelos agrícolas es que usualmente las plantas de tratamiento no tienen que adquirir terrenos. Usualmente se toman lugares con un marco relativamente rural donde las aplicaciones de lodo son similares a las operaciones convencionales, tales como el esparcido del estiércol animal y probablemente no llega a ser una molestia pública si es manejado apropiadamente (Pissani y Guzmán, 1999).

#### **2.5.1.1.2 Limitaciones de la aplicación de lodo a los suelos agrícolas**

Las dosis de aplicación de lodo para los suelos agrícolas (unidad peso seco del lodo aplicada por unidad de área) son relativamente bajas usualmente. De esta manera, pueden requerirse grandes extensiones de suelo, requiriendo la cooperación individual de muchos propietarios de tierras. Además, el transporte del lodo, debe ser tan eficiente como la calendarización de aplicación, requiriendo que sea compatible

con la siembra agrícola, la cosecha y posibles condiciones climáticas adversas; además se requiere de manejos cautelosos. Si los agricultores que aceptan el lodo son numerosos y están mal distribuidos, un sistema de distribución caro y complicado puede requerirse.

#### **2.5.1.2 Métodos de aplicación.**

La selección del método de aplicación del lodo dependerá de las características físicas del lodo (líquido o deshidratado), la topografía del terreno y del tipo de vegetación presente (cultivos anuales, cultivos de forraje existentes, árboles o terrenos sembrados).

#### **2.5.1.3 Época de aplicación**

El periodo de aplicación del lodo deberá calendarizarse cerca de la labranza, siembra y operaciones de cosecha, y también puede estar influenciada por el cultivo, clima y propiedades del suelo. El lodo no puede aplicarse durante periodos de mal tiempo.

La aplicación del lodo a los suelos agrícolas que están inundados, congelados o cubiertos por nieve está prohibida si no se asegura que el lodo no entra a las tierras húmedas o agua superficial. La humedad del suelo es una consideración importante, afectando el periodo de aplicación. La circulación sobre suelos húmedos durante o inmediatamente de precipitaciones pesadas puede resultar en compactación y puede dejar hendiduras profundas en el suelo, haciendo difícil la producción del cultivo y reduciendo la producción.

### **2.6 Características del lodo residual**

Determinar la conveniencia del lodo para aplicarlo al suelo, por la caracterización de sus propiedades, es el primer paso indispensable en la planeación y diseño de un sistema de aplicación de lodo (U. S. EPA, 1995). La composición del lodo será fundamentalmente en las siguientes decisiones de diseño:

- Si el lodo puede ser aplicado al suelo a bajos costos.
- Cuál práctica de aplicación es la más factible técnicamente.
- La cantidad de lodo que se aplicará por unidad de área, ya sea anualmente o acumulativamente.
- El grado de control de regularidad y los sistemas de monitoreo requeridos.

Las propiedades más importantes del lodo que se necesitan caracterizar son:

- |                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| ○ Cantidad                       | ○ Nutrientos                    |
| ○ Contenido de sólidos totales   | ○ Metales                       |
| ○ Contenido de sólidos volátiles | ○ Químicos orgánicos sintéticos |
| ○ pH                             | ○ Contaminantes peligrosos      |
| ○ Materia orgánica               |                                 |
| ○ Patógenos                      |                                 |

La composición del lodo depende principalmente de las características del influente del agua residual que entra a las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos de tratamiento usados. Entre más industrializada esté una ciudad, tendrá mayores posibilidades de tener un contenido de metales pesados mayor, y será un problema para la aplicación del lodo al suelo.

Los requerimientos para los pretratamientos industriales y los programas de prevención de contaminantes, así como los procesos avanzados de tratamiento en las aguas residuales y lodos, generalmente tenderán a reducir los niveles de contaminantes del lodo final que sale de las plantas de tratamiento.

La composición química del lodo puede variar grandemente entre las plantas de tratamiento y también en el tiempo. Esta variabilidad en la composición del lodo, subraya la necesidad de un programa de muestreo firme que aporte una composición estimada confiable del lodo ( Ostergaad, 1997).

### **2.6.1 Cantidad de lodo residual**

La cantidad de lodo que se aplicará al suelo, afectará la evaluación del terreno y el diseño en varios aspectos importantes, incluyendo la superficie de suelo necesaria, tamaño de equipo de transportación, instalaciones de almacenamiento y costos. La cantidad de lodo disponible, también afectará la selección de las prácticas de aplicación (p.e. aplicación a suelos agrícolas, forestales, sitios de contacto público o recuperación de terrenos), así como la dosis de aplicación y la agenda de operación.

La cantidad del lodo puede medirse en dos formas: en volumen del lodo húmedo, el cual incluye el contenido de agua y el contenido de sólidos, o en masa de los sólidos secos del lodo. El volumen del lodo es expresado en galones, litros o en metros cúbicos, mientras que la masa usualmente se expresa en términos de peso, en unidades de toneladas métricas. Debido a que el contenido de agua puede ser alto y muy variado, la masa de los sólidos secos del lodo, es usada a menudo para comparar el lodo con las diferentes proporciones de agua (U. S. EPA, 1984).

Los factores importantes que afectan el volumen del lodo, son las fuentes del agua residual y los procesos de tratamiento del agua y lodo residual. Por ejemplo, las contribuciones industriales en las corrientes del agua residual, pueden incrementar significativamente la cantidad de lodo generado de una cantidad dada de agua residual. También, al incrementar el grado de tratamiento del agua residual generalmente incrementa el volumen del lodo residual. Además, algunos procesos de tratamiento reducen el volumen del lodo, algunos reducen la masa del lodo y algunos incrementan la masa del lodo mientras mejoran otras características del lodo (U. S. EPA, 1984).

### **2.6.2 Contenido de sólidos totales.**

El contenido de sólidos totales (ST) del lodo residual, incluye a los sólidos suspendidos y sólidos disueltos y usualmente es expresado como el porcentaje de los sólidos totales presentes en un lodo residual.

En general, es menos costoso transportar el lodo con un alto contenido de sólidos (lodo deshidratado) que transportarlo con un bajo contenido de sólidos (lodo líquido). Estos costos ahorrados en transporte deben compararse contra los costos de deshidratación de lodos. Típicamente, el lodo líquido tiene un contenido de sólidos de 2 a 12% de sólidos, mientras el lodo deshidratado tiene un contenido de sólidos de 12 a 40% (incluyendo aditivos químicos). El lodo seco o composteado tiene un contenido de sólidos encima del 50%.

### **2.6.3 Contenido de sólidos volátiles**

Los sólidos volátiles del lodo (SV), son compuestos orgánicos que son reducidos cuando el lodo es calentado a 550 °C (1,022 °F) bajo condiciones de oxidación. El contenido de sólidos volátiles del lodo, da una estimación del contenido del material orgánico. El contenido de sólidos volátiles es comúnmente expresado como el porcentaje de los sólidos totales que son sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son un determinante importante de problemas potenciales de olores para los sitios de aplicación. La reducción de los sólidos volátiles es una opción para satisfacer los requerimientos de reducción de atracción de vectores, en E. U. A., muchos lodos desestabilizados contienen de 75 a 85% de sólidos volátiles base peso seco. Varios procesos de tratamiento, incluyendo digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización con cal y composteo, pueden usarse para reducir el contenido de sólidos volátiles, y así el potencial de olores. Una digestión aerobia, el método más común para estabilización de lodos, generalmente biodegrada cerca del 50% de los sólidos volátiles en un lodo residual.

### **2.6.4 pH**

El pH del lodo puede afectar la producción de los cultivos en los sitios donde es aplicado el lodo, ya que altera el pH del suelo e influye en la asimilación de metales por la planta. Los niveles de patógenos y el control de vectores, son las mayores razones para ajustar el pH del lodo. Un pH bajo en el lodo (menos de 6.5) promueve lixiviación de metales, mientras un pH alto del lodo (mayor de 11) mata muchas bacterias y, en conjunción con el pH neutro o alto del suelo, puede inhibir el

movimiento de metales pesados a través del suelo, algunas alternativas para la reducción de patógenos incluyen el incremento de los niveles de pH.

### **2.6.5 Materia orgánica**

El nivel relativamente alto de materia orgánica en el lodo, permite al lodo ser usado como un acondicionador de suelos, mejorando las propiedades físicas del suelo (p.e. incrementa la filtración y la capacidad de retención del agua.). Las propiedades del lodo para acondicionar suelos son especialmente útiles para la recuperación de terrenos, por ejemplo, para las minas estropeadas.

### **2.6.6 Patógenos**

Los microorganismos causantes de enfermedades conocidos como patógenos, incluyen a las bacterias, virus, protozoos, y huevecillos de helmintos, frecuentemente están presentes en las aguas residuales municipales y en el lodo crudo. Los patógenos pueden representar un peligro para la salud pública, si éstos son transferidos a los cultivos alimenticios sobre los suelos en el cual el lodo es aplicado, contenido en los escurrimientos de los sitios de aplicación a las aguas superficiales, o transportado lejos de los sitios por los vectores tales como insectos, roedores y aves. Por esta razón, EPA especifica los requerimientos para la reducción de patógenos y atracción de vectores que deben cumplirse para el lodo que es aplicado al suelo.

Generalmente, el lodo proyectado para aplicarlo al suelo, es estabilizado por los procesos químicos y biológicos. La estabilización reduce grandemente el número de patógenos en el lodo, incluyendo bacterias, parásitos, protozoos y virus (Sagik et al., 1979), así como el potencial de olores. Sin embargo, aún el lodo estabilizado, usualmente contendrá algunos patógenos; así, EPA exige que especifiquen los procesos que reducen los niveles de patógenos que serán emprendidos antes de la aplicación al suelo y que las restricciones a los sitios para algunos tipos de lodos deben continuarse. Los requerimientos de EPA también están diseñados para

asegurar que el crecimiento de bacterias no ocurra previo al uso o disposición (U. S. EPA, 1992<sub>a</sub>, 1994).

Generalmente ninguno de los microorganismos se lixiviará a través del sistema del suelo para contaminar las aguas subterráneas (Edmonds, 1979), pero en su lugar permanecerá en la superficie del suelo para completar su periodo de supervivencia. Donde ocurre escurrimiento superficial, pueden usarse amortiguadores para filtrar la salida de patógenos y prevenir la entrada dentro de los cuerpos que reciben agua.

### **2.6.7 Nutrimientos**

Los nutrientes presentes en los lodos tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), entre otros, son esenciales para el crecimiento de las plantas. El nivel de nutrientes es importante para determinar las dosis de aplicación de lodo. Niveles excesivos de nutrientes debido a las altas dosis de aplicación, puede resultar en una contaminación ambiental del agua subterránea y superficial y debe ser evitado. (EPA, 1995) recomienda que los lodos a granel sean aplicados al suelo en dosis agronómicas para nitrógeno al sitio de aplicación.

El cuadro 2.3 muestra los niveles típicos de nutrientes presentes en el lodo. Los niveles de nutrientes, particularmente los niveles de nitrógeno, pueden variar significativamente, por esta razón los análisis deben realizarse con el lodo actual que será aplicado al suelo. Típicamente, los niveles de nutrientes en el lodo son considerablemente más bajos los de los fertilizantes comerciales. Especialmente potasio, el cual está usualmente a menos del 0.5%

**Cuadro 2.3.-** Niveles típicos de nutrientes identificados en el lodo (Sommers, 1977; Furr et al., 1976)<sup>a</sup>.

Nutriente	Número de muestreos	Porcentaje <sup>b</sup>		
		Rango	Mediana	Punto medio
N Total	191	<0.1 – 17.6	3.30	3.90 <sup>c</sup>
NH <sub>4</sub>	103	5 x 10 <sup>-4</sup> – 6.76	0.09	0.65
NO <sub>3</sub>	43	2 x 10 <sup>-4</sup> - 0.49	0.01	0.05
P	189	<0.1 – 14.3	2.30	2.50
K	192	0.02 – 2.64	0.30	0.40
Na	176	0.01 – 3.07	0.24	0.57
Ca	193	0.1 – 25.0	3.9	4.9
Fe	165	<0.1 – 15.3	1.1	1.3

<sup>a</sup> Los datos son de numerosos tipos de lodo en 15 estados de E.U.A.

<sup>b</sup> Base sólidos secos.

<sup>c</sup> Se asume que el 82% del nitrógeno total es nitrógeno orgánico. Así: N orgánico + NH<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub> = NT, ó 3.2 + .065 + 0.05 = 3.90.

De esta manera, es indispensable el uso de fertilizantes complementarios con el lodo, para sostener un crecimiento vegetativo óptimo.

### 2.6.7.1 Nitrógeno

El nitrógeno puede estar presente en el lodo en forma inorgánica, ya sea en forma de amonio (NH<sub>4</sub>) o en forma de nitrato (NO<sub>3</sub>), o en forma orgánica. La forma en que el N está presente en el lodo es un factor importante en la determinación de cuanto nitrógeno está disponible para las plantas, así como el potencial de contaminación de N a las aguas subterráneas. Generalmente, el nitrógeno inorgánico en forma de NO<sub>3</sub>, es la forma más soluble en el agua, y por lo tanto es la forma de más preocupación para la contaminación del agua subterránea debido a su alta movilidad en muchos tipos de suelos.

El nitrógeno inorgánico en forma de  $\text{NH}_4$ , puede fácilmente volatilizarse como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), cuando el lodo es aplicado a la superficie del suelo, ya sea incorporado o inyectado, y de esta manera no puede estar disponible para las plantas. El N orgánico puede descomponerse debido a los microorganismos del suelo, o mineralizado a nitrógeno inorgánico, en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3$ , ya en esta forma el N está disponible para las plantas. Por lo tanto, el N orgánico puede considerarse como una forma de nitrógeno de liberación lenta.

Las concentraciones de nitrógeno orgánico e inorgánico en el lodo son afectadas por el tipo de tratamiento del lodo y los procesos de manejo usados. La mayoría del nitrógeno orgánico en el lodo está asociado con los sólidos del lodo, y así, los niveles del N orgánico no son alterados sensiblemente por los procesos de deshidratación y secado del lodo. En contraste, las formas inorgánicas del N solubles en agua y sus concentraciones, decrecerán drásticamente durante la deshidratación (camas de secado, centrifugadoras y prensas). Algunos procesos de secado por calor, aire o tratamientos de cal, reducirán el  $\text{NH}_4$  debido a la volatilización del  $\text{NH}_3$ , pero no afectarán los niveles de  $\text{NO}_3$ .

Las condiciones aerobias facilitan la conversión microbial de otras especies de nitrógeno a la forma móvil ( $\text{NO}_3$ ); inversamente, las condiciones anaerobias inhabilitan la conversión de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_3$  debido a la oxidación. Usualmente, cerca del 90% de nitrógeno inorgánico contenido en el lodo está en forma de  $\text{NH}_4$ , a menos que las condiciones aerobias prevalezcan durante el tratamiento del lodo. Para la mayoría de los lodos líquidos colectados en un digestor anaerobio, la mayoría del nitrógeno inorgánico, estará presente como  $\text{NH}_4$  constituyendo del 25 al 50% del nitrógeno total. La concentración de  $\text{NH}_4$  en la fase líquida del lodo es relativamente constante para una planta de tratamiento específica, aunque los procesos de tratamiento tales como la deshidratación pueden reducir substancialmente el contenido de  $\text{NH}_4$ , a menos del 10% del nitrógeno total.

### **2.6.7.2 Fósforo, potasio y otros nutrimentos.**

El lodo contiene concentraciones variadas de otros macro y micro nutrimentos requeridos para el crecimiento de las plantas, algunos constituyentes del lodo, tales como fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y fierro (Fe), fácilmente forman compuestos insolubles con los sólidos del lodo y permanecen así en los niveles relativamente altos en el lodo.

Otros constituyentes del lodo, tales como el potasio (K) y el sodio (Na), están solubles en el agua y son descargados con las aguas residuales tratadas, a menos que un proceso especial de tratamiento avanzado, sea usado para removerlos. De los constituyentes solubles en el agua que permanecen en el lodo, se reducirán más sus concentraciones, si el lodo es deshidratado (por centrifugadoras o prensas), mientras que el secado con calor o aire resultará en un incremento de los niveles debido a que esos constituyentes no son volátiles.

### **2.6.8 Metales**

El lodo puede contener cantidades variadas de metales; en concentraciones bajas en el suelo, algunos de esos metales son utilizados como nutrimentos o para el crecimiento de las plantas y frecuentemente son agregados por fertilizantes inorgánicos comerciales, tales como el Co, Cu, Fe, Mo y Zn. Pero en altas concentraciones, algunos metales pueden ser tóxicos para los humanos, animales y las plantas (U. S. EPA, 1995). Basándose en evaluaciones extensivas del riesgo de los metales del lodo, EPA regula 10 metales en el lodo que será aplicado al suelo, éstos son:

- Arsénico
- Molibdeno
- Cadmio
- Níquel
- Cobre
- Plomo
- Cromo
- Selenio
- Mercurio
- Zinc

EPA encontró que otros metales no representan riesgos para la salud y al medio ambiente al aplicarse al suelo de un lugar. La inspección nacional del lodo residual de EPA en 1990 (NSSS) analizó muestreos de 412 contaminantes o análisis de 177 plantas de tratamiento usando por lo menos procesos de tratamiento secundario, incluyendo los 10 metales regulados por la 40 CFR parte 503 para la aplicación al suelo mostrados en el cuadro 2.4.

Basándose en la NSSS, EPA estima que sólo aproximadamente del 2% (130 plantas de tratamiento) de las 6, 300 en Estados Unidos, no cumplirían la regulación de las máximas concentraciones para los metales, el requerimiento mínimo para la aplicación al suelo (U. S. EPA, 1994).

**Cuadro 2.4.-** Concentraciones promedio de metales en el lodo comparado con los límites máximos de concentración (adaptado de U. S. EPA, 1990).

<b>Metal</b>	<b>Concentración promedio (mg/kg, peso seco)</b>	<b>Límites máximos de concentración para metales pesados, Parte 503 (mg/kg, peso seco)</b>
Arsénico	9.9	75
Cadmio	6.94	85
Cobre	741	4, 300
Cromo	119	3, 000
Mercurio	5.2	57
Molibdeno	9.2	75
Níquel	42.7	520
Plomo	134.4	840
Selenio	5.2	100
Zinc	1, 202	7, 500

Las concentraciones de metal en el lodo en gran parte dependen del tipo y cantidad de los residuos industriales descargados dentro de los sistemas de tratamiento del agua residual. Debido a que los metales generalmente son insolubles, éstos generalmente están presentes en el lodo en concentraciones más altas, que en las aguas residuales, y la deshidratación del lodo tiene un impacto

mínimo en la reducción de las concentraciones de metal en el lodo que es destinado para aplicaciones al suelo. El pretratamiento del agua residual industrial descargada dentro de los sistemas residuales han sido efectivos para reducir el contenido de metales, en el lodo generado de una planta de tratamiento (U. S. EPA, 1995).

Según Hue (1996) el contenido de metales pesados es el factor más importante para determinar el uso de los lodos.

Existen diversas teorías para explicar los mecanismos de retención de metales por el suelo, fundamentalmente referidas a Zn, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Co y Hg. Estos mecanismos pueden ser reacciones simples o complejas, y las principales son: precipitación, oclusión en otros precipitados, asociación con la superficie del suelo, incorporación a los biosistemas y unión a los vertidos residuales; por otra parte, pueden estar presentes los propios metales de los minerales del suelo.

Existen, como es natural, bastantes diferencias entre los mecanismos químicos de asimilación de metales por el suelo, pues muchos factores influyen en ellos, como son el tipo de suelo, el volumen de los vertido, etc. Ello hace que los procesos de sorción, precipitación, disolución y, en general, cualquier mecanismo de retención, sean complicados y de difícil control.

La acumulación de metales en determinados tejidos u órganos es variable, algunos como por ejemplo el Cr y Pb son bloqueados a nivel radicular, otros, como Cd y Hg son más zootóxico – fitotóxicos, es decir, pueden acumularse en tejido vegetal hasta concentraciones tóxicas para animales, sin efecto adverso para la planta, por lo contrario la elevada fitotoxicidad del Cu, Ni y Zn hacen que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la cadena trófica. En general, las hortalizas tienden a asimilarlos con mayor facilidad que las gramíneas, siendo al mismo tiempo más sensibles a la toxicidad las primeras y más tolerantes las segundas.

Con respecto a la preocupación de la salud humana acerca del uso de los lodos tratados sobre los cultivos, el cadmio es el metal considerado de mayor preocupación, debido a que se le considera como agente cancerígeno.

### **2.6.9 Químicos orgánicos**

El lodo puede contener también químicos orgánicos sintéticos de las aguas residuales industriales, productos domésticos y pesticidas. La mayoría de los lodos contiene bajos niveles de esos químicos y no representan amenaza significativa para la salud humana y el medio ambiente. EPA (40 CFR Parte 503) no regula los químicos orgánicos en el lodo debido a que los químicos orgánicos de preocupación potencial han sido prohibidos o restringidos para el uso en los E. U. A; no son fabricados en los E. U. Están presentes en los lodos en niveles muy bajos, basados en datos de la NSSS de la EPA en 1990; o debido a que el límite para un contaminante orgánico identificado en la evaluación de riesgos, no se espera que sea excedido en el lodo que es usado o confinado (U. S. EPA, 1992b).

Los químicos orgánicos, cuando son agregados al suelo pueden volatilizarse, descomponerse o ser adsorbido. Consecuentemente, sólo esos que no son volátiles y son relativamente resistentes a la descomposición se acumularán en el suelo.

Se ha mencionado que la mayoría de los compuestos orgánicos tóxicos en los E. U. A., están presentes en los lodos en concentraciones menores de 10.0 mg/kg (Jacobs et al., 1987). Por lo tanto cuando los lodos son aplicados al suelo en dosis que satisfagan las necesidades del N o P y mezclados en la superficie del suelo, las concentraciones de los químicos orgánicos tóxicos en la profundidad 0 – 15 cm del suelo normalmente no excederá los 0.10 mg/kg.

### **2.6.10 Contaminantes peligrosos**

El lodo no está incluido en una lista de residuos específicos denominados peligrosos por EPA, ni los datos disponibles sugieren que el lodo manifiesta características de un residuo peligroso, la cual incluye corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad. La naturaleza no peligrosa del lodo, de cualquier modo, no puede ser asumida.

Aunque el lodo concebiblemente puede manifestar explosividad o reactividad, la mayoría de las preocupaciones acerca del lodo están enfocadas en la toxicidad. Poca, si es que la hubiera, el lodo manifiesta características de toxicidad. Sí, de cualquier modo, los factores están presentes indicando un posible problema de toxicidad (p.e., las plantas de tratamiento reciben cargas importantes de contaminantes respaldados por las pruebas de toxicidad) y las plantas de tratamiento no han actualizado los datos que demuestren que el lodo no es peligroso, es aconsejable para las plantas de tratamiento analizar el lodo en el aspecto tóxico (U. S. EPA, 1990).

En México, la toxicidad se determina mediante la prueba de extracción para toxicidad (PECT). En la NOM-052-ECOL-1993, se enlistan los compuestos orgánico e inorgánicos de mayor preocupación y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, lo cual se determina mediante el PECT.

## **2.7 Legislación para el uso de los lodos residuales.**

En la actualidad existe una tendencia mundial en las exigencias para la normalización, de mayores niveles de calidad del lodo para el reciclaje agrícola, que se refleje en una mejoría de la calidad de los biosólidos o lodos producidos. La reglamentación para disponer adecuadamente los lodos debe ser específica de acuerdo con las condiciones ambientales, sociales y económicas de cada región o país. Los parámetros internacionales deben servir de referencia, sin embargo, deben ser validados a través de los resultados experimentales que consideren las peculiaridades regionales, tales como el nivel y el tipo de industrialización, o perfiles sanitarios de la población y las características edafológicas regionales.

En México en el Artículo 139 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, se menciona que toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga la ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto se expida.

La normatividad establece las cargas máximas anuales, así como cargas máximas acumuladas, en función del uso de terrenos para fines agrícolas. Las medidas encaminadas a la reducción de la presencia de patógenos y de la atracción de vectores también deben ser establecidas por la legislación. Por lo tanto, antes de realizar la aplicación del lodo al terreno agrícola se deberá revisar la normatividad vigente. Además se encuentra estipulado cuales metales y compuestos orgánicos no debe contener el lodo. Las normas pueden exigir análisis detallado del lodo para la identificación y caracterización de sus constituyentes y para determinar su aptitud para la aplicación al suelo. Para este caso, se deberán considerar varios niveles de control de patógenos mediante diferentes métodos de estabilización. El lodo aplicado a la superficie del suelo o incorporado al mismo se debe tratar mediante procesos que reduzcan notablemente la presencia de patógenos.

Los pasos a adaptar en el sistema de aplicación se incluyen:

1. Caracterización de la calidad y cantidad del lodo.
2. Revisión de las normas locales y federales aplicadas.
3. Evaluación y elección de la opción de evacuación.
4. Determinación de los parámetros de diseño del proceso (cargas, superficies del terreno necesarias, métodos y calendarios de aplicación).

## **2.8 Selección y evaluación del lugar de aplicación**

Cuando las operaciones de incorporación y dispersión del lodo no son ejecutadas de manera adecuada, los biosólidos se concentran en la superficie del suelo y con las lluvias pueden ser transportadas hasta los escurrimientos, además si estos no están bien higienizados el problema se hace más grave. Para evitar estos problemas la legislación de muchos países establecen restricciones en cuanto al área de aplicación.

Los aspectos críticos en la aplicación del lodo al suelo es la localización de un lugar adecuado para el vertido. Las características del lugar determinarán el diseño final y se incluirán en la efectividad global del sistema de aplicación al suelo. Los lugares que hay que considerar como adecuados dependerán de la opción u opciones de aplicación consideradas (aplicación de terrenos de cultivo, bosques, etc.). Se deberán estudiar a fondo los factores, teniendo en cuenta las técnicas de explotación y los efectos ambientales, también es necesario disponer de una estimación inicial de la superficie del terreno necesario para cada una de las opciones de aplicación consideradas. La determinación final de la superficie del terreno necesario se debe basar en las tasas de aplicación de proyectos y se debe tener en cuenta la superficie ocupada por la zona de amortiguación necesaria, así como la correspondiente a otras necesidades del sistema.

## **2.9 Características de los sitios de aplicación**

Las características físicas del lugar que merecen especial atención son la topografía, la permeabilidad del suelo, el drenaje, la profundidad hasta el nivel freático, la geología superficial, la cercanía a zonas críticas y la accesibilidad. Antes de iniciar cualquier aplicación de lodos residuales se deberán hacer los estudios antes mencionados a en los sitios seleccionados.

### **2.9.1 Suelo y Topografía.**

La topografía es importante por cuanto afecta el potencial de erosión y escorrentía superficial del lodo aplicado, lo cual afecta el funcionamiento de los equipos. Los suelos más indicados para la aplicación al terreno son: suelos con permeabilidad relativamente bajas, 0.5 a 1.5 cm/h; suelos entre moderadamente bien y bien drenados; Suelos alcalinos o neutros ( $\text{pH} > 6.5$ ), que permitan el control de la solubilidad de los metales y estratos profundos de textura relativamente fina, que permitan gran capacidad de almacenamiento de humedad y de nutrimentos.

**Cuadro 2.5.-** Clasificación de los sitios de aplicación de lodos de acuerdo a sus características del suelo, topografía y geología.

Parámetro	Disponible para aplicación de lodos			No disponible para la aplicación de lodos
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
pH	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5	Mayor o igual de 6.5
Textura	Lar, MarL, ML, L, ArL, L	Ar, ArP	AM, MA	Arena y grava
Pendiente	0 - 2	2 - 5	5 - 9	Mayor de 9
Profundidad del acuífero (m)	Mayor de 5	3 - 5	2 - 3	Menor de 2

### 2.9.2 Permeabilidad

La permeabilidad se refiere a la capacidad que tiene el suelo para drenar el agua a través de los poros en dirección de las fuerzas de gravedad. Este factor depende de la textura del suelo, es muy importante ya que si el grado de permeabilidad es muy alto podrían ocurrir pérdidas de nutrimentos hacia los mantos freáticos.

**Cuadro 2.6.-** Límites de aplicación de lodos al suelo en base a la permeabilidad.  
 Ante – proy. NOM – 004 – ECOL – 1998.

Permeabilidad (cm/hr)	Grado de limitación
Menor de 0.08	Severa
00.08 – 0.24	Moderada
0.24 – 0.8	Ligera
0.8 – 2.4	Moderada
Mayor de 2.4	Severa

### 2.9.3 Profundidad del acuífero

Las consideraciones sobre la profundidad del acuífero evitan que la aplicación del lodo se puede controlar mejor sin provocar contaminación. En los Estados Unidos en 1987, 24 estados establecían restricciones de profundidad del acuífero para la aplicación del lodo en el suelo. La distancia variaba de 1 – 12 metros. En la actualidad la EPA considera los siguientes criterios de aplicación para los diferentes sitios; agrícolas, forestales y tierras erosionadas.

**Cuadro 2.7.-** Criterios de profundidad del acuífero en diferentes sitios.

Sitio	Acuífero para agua de Consumo humano	Acuíferos que no son Para consumo humano
Agrícola	1 – 2 metros	0.5 metros
Forestal	2 metros	0.7 metros
Tierras erosionadas	1 – 2 metros	0.5 metros

Para lograr una protección adicional, si el acuífero está inmediatamente bajo el sitio de aplicación se deberá considerar un programa de monitoreo por lo menos anual. De acuerdo con las normas oficiales se requiere que los lodos no contaminen con:

- Nitratos en concentraciones iguales o mayores de 10 mg/L.
- Sólidos disueltos mayores de 10, 000mg L.

#### **2.9.4 Distancia de los sitios de aplicación a los cuerpos de agua superficiales.**

Para proteger las aguas superficiales de la contaminación que pudiera ocasionar la aplicación del lodo al suelo la legislación formuló los siguientes reglamentos.

**Cuadro2.8.-** Recomendaciones relacionadas con la pendiente.

Pendiente	Observaciones
0 – 3	Es ideal, porque no es propicia para escurrimientos o erosión del lodo líquido o con un porcentaje de sólidos mayor.
3 – 6	Aceptable, los riesgos de erosión son ligeros.
6 – 12	Se requiere que el lodo sea inyectado al suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Lo más recomendable es aplicar lodo deshidratado.
12 – 15	No se recomienda la aplicación de lodo líquido sin un control del escurrimiento, es recomendable la aplicación de lodo deshidratado
Mayor de 15	Pendientes mayores del 15% son recomendables solo cuando el suelo tiene una buena permeabilidad (como los bosques), donde la longitud de la pendiente es corta y constituye la menor parte del área total de aplicación.

Para evitar el escurrimiento del lodo hacia el agua superficial se requiere de un área amortiguadora entre el área de aplicación del lodo y los cuerpos de agua, con el propósito de: promover en factor de seguridad contra errores durante la aplicación del lodo, y además, proveer de un tratamiento y filtrado de lodo y/o escurrimiento del lodo que ha sido aplicado en la superficie. El tipo de suelo del área amortiguadora es un factor de determinación del tamaño del área. Un suelo erosionado no es un buen filtro amortiguador, mientras que un bosque no perturbado

ofrece un excelente tratamiento. La zona de amortiguamiento se puede construir sembrando alrededor de los sitios árboles, arbustos y pastos.

### **2.10 Limitaciones estacionales**

La legislación recomienda que la aplicación del lodo no deberá llevarse a cabo durante los eventos de tormenta cuando la precipitación sea igual o excede un cuarto de pulgada por hora (0.63 cm). También deberá suspenderse las aplicaciones cuando los suelos estén congelados o cubiertos por nieve.

### **2.11 Uso y disponibilidad del suelo.**

El uso del suelo prevaleciente frecuentemente ejerce una influencia significativa sobre la selección del terreno, así como en la aprobación de una práctica de aplicación de lodo. Es necesario determinar el uso actual y el uso futuro en la evaluación del área requerida y disponible para la aplicación del lodo.

El patrón del uso actual del suelo ayudará a identificar las áreas donde la aplicación del lodo al suelo puede aceptarse. En el caso de los terrenos agrícolas, a una mayor área, las prácticas agrícolas prevalecientes determinan la aceptabilidad de la aplicación a suelos agrícolas. Pequeñas propiedades de terrenos en una comunidad agrícola pueden limitar la aplicación a este tipo de terrenos. Un área dedicada casi exclusivamente a la producción de cultivos para consumo humano, restringe los periodos cuando el lodo es aplicado al suelo. Las áreas con una mezcla de cultivos en hilera, pequeños granos, cultivos de heno y pastos pueden permitir la aplicación del lodo a través de muchos años, dependiendo de los sitios agrícolas.

### **2.12 Selección del cultivo y requerimiento de nutrimentos.**

Los cultivos producidos en un área influenciarán la calendarización y los métodos de aplicación del lodo. Utilizando los sistemas de producción ya existentes usualmente será una ventaja, ya que esos cultivos se han desarrollado debido a las condiciones del suelo, clima y económicas. Debido a que las aplicaciones del lodo

típicamente están limitadas por los requerimientos del N en el cultivo, los cultivos que usan mucho nitrógeno, tales como los forrajes, maíz y soya, minimizarán las cantidades de suelo necesario y los costos asociados con la transportación y aplicación de lodo.

De cualquier modo, aplicando lodo para satisfacer las necesidades de los cultivos agregará excesos de fósforo, y eventualmente las dosis pueden reducirse para manejar los excesos de las adiciones de fósforo. Por lo tanto, no sólo es buena práctica campos con una mezcla de cultivos, sino el prudente manejo de un programa de aplicación de lodo que continuamente identificará áreas adicionales de suelo que puedan estar disponibles en reserva.

Las recomendaciones de fertilización para los cultivos están basadas en los nutrientes requeridos para lograr una producción deseada del cultivo que se producirá y la capacidad del suelo para suministrar los nutrientes recomendados a las plantas. Las cantidades de fertilizantes de N, P y K requeridos para lograr una producción determinada del cultivo, generalmente se determinan experimentalmente. La respuesta del cultivo de acuerdo con los nutrientes del fertilizante agregado, ha sido relacionada con los niveles de P, K, Mg y varios de los elementos pesados esenciales (Zn, Cu, Fe y Mn) del suelo analizado. La medición exacta del N disponible en el suelo es difícil y también dependiente del clima.

### **2.13 Evaluación de riesgos para la aplicación**

Con objeto de evaluar adecuadamente el riesgo por la utilización de los lodos residuales con fines agrícolas y forestales, se debe tener en cuenta el conjunto de factores que determinan la movilidad de los metales pesados en el suelo al que serán aplicados.

Es necesario poner cuidado en las fluctuaciones de pH ya que a menor pH (suelos ácidos) mayor solubilidad de los metales, y por lo tanto mayor movilidad de éstos, con lo que se incrementa la toxicidad para las plantas.

La materia orgánica desempeña un papel fundamental en la retención de metales. Suelos que presentan contenidos de materia orgánica superiores al 5%, hacen que las plantas retengan mayor cantidad de metales pesados, debido a la alta capacidad de las moléculas orgánicas para formar complejos o agregados. A medida que la materia orgánica se degrada, las formas moleculares resultan ser más sencillas, con lo que el proceso de retención de metales disminuye, favoreciendo la lixiviación de los mismos y permitiendo su movilización. Se ha verificado la tendencia a formar complejos con la materia orgánica en Cu y Ni. La retención del Cd, Cr, Hg y Pb aumenta con el contenido de materia orgánica en el suelo.

Cuando existe la presencia de aguas subterráneas, es necesario conocer el grado de lixiviación de éstos y la capacidad de los suelos para formar complejos.

La presencia de apatito y de hidroxiapatito [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ] en los suelos tratados con los lodos mejora la inmovilización de los metales por lo siguiente combinación de factores: el elevado contenido de calcio que permite el intercambio iónico de éste con los metales presentes, a la formación de fosfatos metálicos extremadamente insolubles, mostrándose altamente efectivo para Pb, y en menor medida, para Cd y Zn, y al incremento de la alcalinidad en el caso del hidroxiapatito.

## **2.14 EFECTO DE LOS LODOS SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO (CASOS DE ESTUDIO)**

En trabajos realizados por el CINVESTAV en Irapuato se demostró la capacidad fertilizante de los lodos. Se experimentó con maíz “H – 220” a los cuales se les aplicó tanto lodos irradiados como lodos crudos en varios porcentajes y se les comparó con una aplicación de 20 kg de N/ha de sulfato de amonio. Al momento de la cosecha se determinó que existió una clara respuesta del cultivo del maíz a la aplicación de nitrógeno en cualquiera de sus formas. Esta respuesta fue en algunos casos hasta de un incremento del 100% cuando se aplicó lodo y cuando se aplicó fertilizante. Así mismo la aplicación de lodos irradiados y crudos fue similar. La aplicación del nitrógeno en forma de lodo fue más eficiente que el fertilizante comercial; posiblemente por la lenta liberación del nitrógeno del material orgánico, así como la presencia de otros macro y micro nutrientes y factores biológicos.

De manera resumida se puede decir que según los datos obtenidos, se puede obtener el mismo rendimiento de maíz cuando se aplica fertilizante comercial que cuando se aplica lodo al 50% de la dosis recomendada para el maíz en la región.

### **2.14.1 Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers*)**

En este estudio se aplicó lodo residual, fertilizante químico y estiércol de bovino en un suelo típico del suroeste de la ciudad de Durango, México, para estimar y comparar la posible mejora en la producción de sorgo forrajero. Se cuantificó la concentración de metales pesados en la parte aérea de la planta y en su raíz para estimar si la planta los absorbe, ya que éstos no pueden degradarse en el suelo. El lodo residual proviene de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango y no es impactada por la industria ya que sólo se tratan aguas residuales domésticas. Los resultados indican que la producción de materia seca vegetal es mayor en los tratamientos que utilizan lodos residuales y estiércol bovino y que la producción vegetal es menor en los tratamientos con fertilizante químico y el testigo.

Esta investigación se realizó en el Centro Interdisciplinario y de Investigación para el Desarrollo Integral de la Región (CIIDIR – IPN – Unidad Durango). El cultivo indicador fue el sorgo forrajero, que se colocó en contenedores de polietileno (40 cm de profundidad y 20 cm de ancho): en cada contenedor se sembraron tres semillas y a los 15 días se deshijó dejando una sola planta por contenedor. Los tratamientos fueron los siguientes: T1 = Testigo, sin aplicación, T2 = 4ton ha<sup>-1</sup> de lodo residual, T3 = 8 ton ha<sup>-1</sup> de lodo residual, T4 = 4 ton ha<sup>-1</sup> de estiércol bovino, T5 = fertilizante químico con la fórmula 120 – 60 – 00. Las fuentes de fertilizante químico fueron: sulfato de amonio (20.5 % de N) y superfosfato de calcio triple (46 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ), aplicando la totalidad del fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra, la otra mitad de nitrógeno se aplicó en Julio. Los lodos en forma semisólida se mezclaron con el suelo un mes antes de la siembra que se realizó de manera manual el 28 de Abril del 2001. Utilizando la variedad Silo Sugar. Se aplicaron riegos ligeros cada vez que la planta lo requirió. Las muestras de plantas para su análisis se colectaron cuando el grano de sorgo se encontraba en estado lechoso asoso; se tomaron muestras de la parte aérea (tallo, hoja y panícula) y de la raíz. Los lodos provenientes de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango fueron analizados para su caracterización fisicoquímica con base en las técnicas descritas por Rodríguez y Rodríguez (2002).

#### **2.14.2 Efecto residual del lodo en trigo (*Triticum spp.* L.)**

La investigación se efectuó en la Planta de Tratamiento de Agua Residual “Dulces Nombres” en el municipio de Pesquería N.L., México. Se estudió el efecto residual del lodo sobre el rendimiento de trigo y en la concentración de metales pesados en grano. Los tratamientos consistieron en la aplicación de lodo residual en forma líquida (8 t ha<sup>-1</sup>) y deshidratada (4 y 8 t ha<sup>-1</sup>) aplicados en el ciclo anterior sobre el cultivo de maíz, se compararon con un tratamiento de fertilización inorgánica (113-70-00) y testigo bajo un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. Después de dos ciclos de siembra el rendimiento de grano fue igual entre fertilizante inorgánico y lodo residual líquido y deshidratado (8 t ha<sup>-1</sup>). El rendimiento de forraje fue superior con el tratamiento de lodo líquido (8 t ha<sup>-1</sup>) y

fertilizante inorgánico. La concentración de metales pesados en el grano se encontró por debajo del límite de tolerancia permitido en todos los tratamientos.

### **2.14.3 Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas**

El objetivo principal de este estudio es evaluar, además de las características fisicoquímicas del lodo residual, el efecto directo que produce la aplicación de seis tasas diferentes de este lodo sobre el suelo, así como su efecto sobre el crecimiento de las plantas. Para tal fin, se efectuó un ensayo de invernadero, desarrollando un cultivo de maíz (*Zea Mays L.*). Se tomaron muestras de suelo y lodo residual, se secaron al aire, homogeneizaron y tamizaron. Se usaron muestras representativas de lodo residual proveniente de la Planta de Tratamiento de aguas Servidas del Centro de Refinación Paraguaná -Cardón-(PDVSA) y éste fue tratado de igual forma que el suelo. Se prepararon mezclas con los siguientes tratamientos: 20,40,60,80,120 y 200 toneladas de lodo por hectárea de suelo (T1, T2, T3, T4, T5 y T6 respectivamente). Se hicieron también dos tratamientos adicionales con un fertilizante comercial (TF) de composición: 18N-16P- 12K, y un Control (T0) con suelo solo. Se sembraron 10 semillas certificadas de maíz en los recipientes conteniendo los tratamientos y se dejaron crecer por un período de 35 días, al final de los cuales las plantas fueron cosechadas y divididas en tallos y hojas y analizadas químicamente. Al cabo de 35 días se encontró que los valores de pH son muy similares en todos los tratamientos practicados al suelo, con excepción de T0 y TF. El lodo residual tendió a aumentar el pH del suelo haciendo menor la disponibilidad de algunos metales pesados potencialmente dañinos para las plantas. El valor de la conductividad eléctrica de T0 y TF fueron bajos, lo que en el caso del suelo solo representa la poca cantidad de sustancias solubles presentes en el mismo.

El contenido de materia orgánica aumentó entre un tratamiento y otro a medida que se incrementó la relación suelo-lodo. Los valores de las concentraciones de los cationes disponibles obtenidos fueron bajos y los de TF resultaron ser similares a los de las mezclas suelo-lodo. Por otro lado se observó que existe una

correlación directa entre la disponibilidad del calcio y el aumento de pH, indicando esto que el lodo residual no sólo actúa como un fertilizante organomineral, sino que también juega el papel de un material encalador. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (C.I.C.E), reportó valores para T1,T2,T3,T4,T5,T6,T0 y TF de 17.7,16,15.7,13.5,16.2,16.5,15.9 y 15.4, mostrando un aumento relativo con respecto al suelo solo y al fertilizante comercial. Las concentraciones presentes de los diferentes metales tóxicos para las plantas animales y humanos tales como Cd, Ni, Pb y V no aparentaron ser significativas al ser evaluadas en las plantas en los diferentes tratamientos. Los tratamientos 2 y 3 presentaron valores, para casi todos los parámetros, dentro de los rangos considerados bajos, medios y/o altos, según lo reportado por la literatura, dependiendo del parámetro. En consecuencia, la aplicación del lodo residual en las proporciones antes mencionadas podría cubrir las deficiencias mínimas de estos parámetros en suelos de esta naturaleza, favoreciendo el crecimiento de las plantas, significando también una alternativa de solución al problema ambiental que representa su almacenamiento y disposición (Acosta et al., 1995).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIALES

##### 3.1.1 Descripción del lodo utilizado en la investigación.

La empresa Embotelladora El Carmen, S. A de C. V es una empresa que se dedica a la elaboración y distribución de bebidas no alcohólicas, el agua residual que se genera en su proceso se le da un tratamiento Fisicoquímico y Biológico con el fin de que cumpla con la normatividad vigente para la descarga de dicha agua.

Durante este proceso se generan lodos, los cuales son sólidos arcillosos de color café marrón con ligero olor a putrefacto. El olor putrefacto se debe al proceso aerobio incompleto con la generación de sólidos volátiles con contenido de  $\text{NH}_4$  motivo por el cual se presentó un problema de gusanos al inicio de la investigación. El residuo se localiza dentro del área de secado dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento sobre la tolva de almacenamiento temporal debajo del filtro prensa.



**Fig. 3.1.-** Composición Física del lodo de la empresa embotelladora el Carmen S. A de C. V.

**Cuadro 3.1.-** Características químicas de los lodos residuales de la empresa embotelladora el Carmen S. A de C. V.

PARÁMETRO	MÉTODO	RESULTADO	UNIDADES
pH muestra sólidas	EPA 9045C	8.13	pH
Corrosividad al acero	EPA 1110	N/A	mm/año
Punto de Inflamabilidad	EPA 1110	N/A	°C
Reactividad con el Agua	NOM - 052- SEMARNAT - 93	Negativa	*
Explosividad	NOM - 052- SEMARNAT - 93	Negativa	*
Lixiviado	NOM - 053- SEMARNAT - 93	Realizado	N.A
Arsénico	USEPA 7062 A	0.0052	mg/l
Plomo	USEPA 7420	<0.20	mg/l
Zinc	NMX - AA- 051-2001	<0.11	mg/l

Datos proporcionados por la empresa refresquera el Carmen S. A de C. V.

De acuerdo a las normas NOM - 052- SEMARNAT – 93 y NOM - 053- SEMARNAT – 93, las cuales establecen las características de los Residuos Peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a una residuo peligroso por su toxicidad al ambiente y tomando en cuenta los resultados parciales del CRETI mostrados en el cuadro anterior, se establece que los lodos generados en la planta tratadora de la empresa en mención, son considerados como residuos no peligrosos.

**Cuadro 3.2.-** Parámetros Físico y químicos del lodo Utilizado en la Investigación.

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
pH	6.8	pH	Potenciómetro
C. E	16.12	dS/m	Conductivímetro
Carbón total	26.295	%	Calcinación
Densidad aparente	.745	gr/cm <sup>3</sup>	Método de la Probeta
Nitrógeno Total	3.408	%	KJELDALL
Potasio (K)	20.51	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Sodio (Na)	91.30	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Calcio (Ca)	20	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Magnesio (Mg)	12.5	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*

Laboratorios de Química de Suelos, Pedología y Servicios y Vinculación del Dpto. de Suelos de la UAAAN (2006).

A. A\* = Absorción Atómica

### 3.1.2 Suelo

El suelo utilizado en la presente investigación, es proveniente del ejido conocido como los Lirios del municipio de Arteaga Coahuila, que se encuentra ubicado en las coordenadas 100.58731 W y 25.39477 N a una altitud de 2350 msnm, con vegetación de bosque de pino y pino – encino, erosión eólica moderada (50 a 100 ton / Ha /año), y un clima tipo BS 1K (x"), según la carta G14C35, el muestreo se hizo a una profundidad de 0 – 30 cm de profundidad, es un suelo muy trabajado, ya que durante muchos años se estuvo sembrando papa y por lo tanto se tenía que usar productos químicos, principalmente insecticidas.

**Cuadro 3.3.-** Parámetros Físico y Químicos del suelo utilizado en la investigación

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
pH	7.3	pH	Potenciómetro
C. E	0.806	dS/m	Conductivímetro
Carbón total	10.698	%	Calcinación
Densidad aparente	0.9986	g/cm <sup>3</sup>	Método de la Probeta
Materia Orgánica	3.66	%	Walkey and Black
Nitrógeno Total	.2321	%	Kjeldall
Fósforo (P)	92.2	Mg/g	Espectrofotómetro de A. A*
Potasio (K)	1.102	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Sodio (Na)	8.69	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Calcio (Ca)	10	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Magnesio (Mg)	3.58	Meq/litro	Espectrofotómetro de A. A*
Clase textural	Arcilla		Bouyoucos

Laboratorios de Química de Suelos, Pedología y Servicios y Vinculación del Dpto. de Suelos de la UAAAN (2006)

A. A\* = Absorción Atómica

### 3.1.3 Descripción de los Tratamientos

T1 = Suelo (3000 gr de Suelo).

T2 = Suelo + 5% de lodo ( 2850 gr. de suelo + 150 gr. de lodo).

T3 = Suelo + 10% de lodo (2700 gr. de suelo + 300 gr. de lodo).

T4 = Suelo + 15% de lodo (2550 gr. de suelo + 450 gr. de lodo).

T5 = Suelo + 20% de lodo (2400 gr. de suelo + 600 gr. de lodo).

### 3.1.4 Parámetros a evaluar en la mezcla lodo – suelo y suelo.

Parámetro	Método	Unidades
Nitrógeno Total	kjeldall	%
Fósforo	Colorimetría	mg/g
Potasio	Espectrofotómetro de A. A*	mg/g
Calcio	Espectrofotómetro de A. A*	Meq/litro
Na	Espectrofotómetro de A. A*	Meq/litro
Magnesio	Espectrofotómetro de A. A*	Meq/litro
M.O	Walkey and Black	%
p.H	Potenciometría (2:1)	pH
C. E	Conductivímetro	dS/m
C .T	Calcinación	%
Clase Textural	Bouyoucos	%
Densidad Aparente	Probeta	g/cm <sup>3</sup>

\*A. A = Absorción Atómica

### 3.1.5 Localización del Área donde se realizó la Investigación

El presente trabajo se llevó a cabo en el invernadero No. 4 de la dirección de investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, con localización geográfica de 25<sup>o</sup> 23" N y 101<sup>o</sup> 00" W y a una altitud de 1600 msnm. Además también en los laboratorios de Química de Suelos, Pedología y el laboratorio de Servicios y Vinculación del departamento de suelos de la misma universidad.

### 3.2.- METODOLOGÍA

Lo primero que se hizo fue transportar el lodo que se utilizó en la investigación de la empresa a la Universidad, es importante mencionar que el tiempo aproximado que tardó en deshidratarse el lodo fue de un mes, durante este tiempo se le estuvo dando vueltas para que el secado fuera más rápido, una vez deshidratado el lodo se procedió a la molienda del mismo ya que presentaba un aspecto como de piedra, muy duro, de manera que para poder molerlo se tuvo que hacer uso de un molino eléctrico con una malla de 4 mm, el suelo utilizado se pasó por una malla de cribar, de manera que al momento de hacer las combinaciones, todas las unidades experimentales fueran homogéneas, se utilizaron macetas de polietileno de 5 kg, donde se pusieron 3 kg de las mezclas, es decir, para el T1 suelo, solamente, para T2 suelo + 5% de lodo (2850 g de suelo + 150 g de lodo), para T3 suelo + 10% de lodo (2700 g de suelo + 300 g de lodo), para T4 suelo + 15% de lodo (2550 g de suelo + 450 g de lodo) y por último, para el T5 suelo + 20% de lodo (2400 g de suelo + 600 g de lodo), cabe mencionar que para cada tratamiento se consideraron tres repeticiones, de manera que nos dio un total de 15 unidades experimentales.

Una vez preparadas las macetas se procedió a la siembra del Ryegrass perenne (*Lolium perenne* L.), la decisión de sembrar el Ryegrass como planta testigo obedece principalmente a que, según estudios realizados en la aplicación de lodos residuales en el rendimiento de algunos cultivos, las gramíneas son las que mejor respuesta han dado, de manera que por pertenecer a esta familia, además también por algunas otras características como son; alto potencial de producción, rápido establecimiento y adaptabilidad en suelos pesados con poco drenaje, el Ryegrass fue la planta que se utilizó en la realización de la presente investigación.

La siembra se hizo el día 27 de Marzo del 2006, tomando para esto 1.5 g de semilla la cual fue colocada en cada una de las unidades experimentales, de manera que se utilizó un total de 22.5 g de semilla. Cabe mencionar que la planta únicamente sirvió como testigo para evaluar la respuesta de ésta al lodo aplicado, los análisis de laboratorio se hicieron solo al suelo y a la mezcla lodo – suelo.

Las macetas se tuvieron durante un mes en el invernadero No. 4 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, regándose cuando se consideraba necesario, esto con el fin de ver el desarrollo del Ryegrass, después de pasado el mes se procedió al corte de la planta, para posteriormente realizar los análisis del suelo y de la mezcla lodo – suelo, para esto se dejó durante un tiempo las muestras de suelo y lodo – suelo expuestas a temperatura ambiente para que se secaran y poder prepararlas, después de esto, se pasaron por un tamiz de 2 mm.

Los análisis de las muestras de suelo, lodo y mezcla lodo – suelo se hicieron en los laboratorios de Química de Suelos, Pedología y el laboratorio de Servicios y Vinculación del departamento de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con la metodología expuesta en el cuadro 3.4.

El diseño usado para el análisis de los resultados fue el completamente al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, utilizando para esto el paquete de diseños experimentales de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Versión 2.5, para el análisis de la comparación de medias, fue utilizado el mismo paquete (olivares,1994 )

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se exponen y discuten en función de cada variable (Propiedades Físicas y Químicas). La información que se presenta corresponde a los análisis de laboratorio que se realizaron a los diferentes tratamientos. Para cada variable evaluada se hizo el análisis de varianza, tabla de medias y en casos donde fue necesario la comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 0.01%, coeficiente de variación y la gráfica correspondiente. Los cuadros de concentración de datos, análisis de varianza, tablas de medias, se encuentran en el apéndice del documento.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

#### 4.1.1 TEXTURA

**Cuadro 4.1.-** Determinación de textura para los diferentes tratamientos.

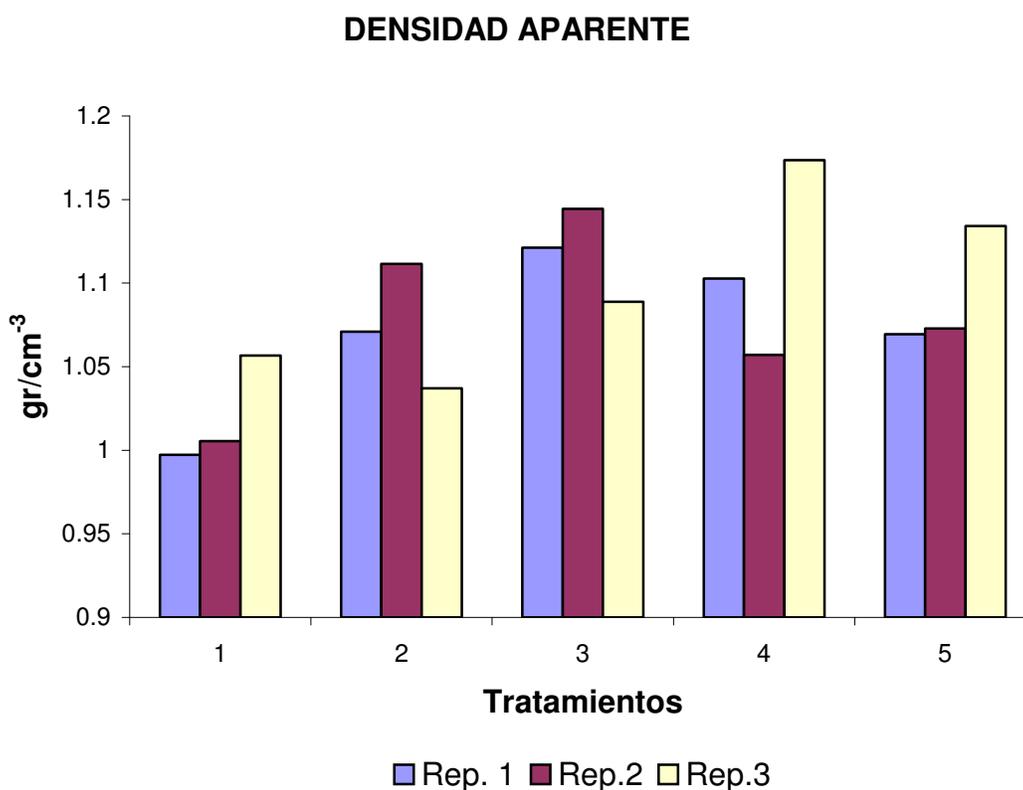
TRATAMIENTO	REPETICIÓN	ARENA %	ARCILLA %	LIMO %	CLASE TEXTURAL
1	1	14	54	32	ARCILLA
	2	16	52	32	ARCILLA
	3	14	52	34	ARCILLA
2	1	20	54	26	ARCILLA
	2	22	50	28	ARCILLA
	3	26	44	30	ARCILLA
3	1	22	54	24	ARCILLA
	2	24	50	26	ARCILLA
	3	28	44	28	ARCILLA
4	1	24	56	20	ARCILLA
	2	20	50	30	ARCILLA
	3	22	52	26	ARCILLA
5	1	18	56	26	ARCILLA
	2	24	52	24	ARCILLA
	3	20	54	26	ARCILLA

T1 = SUELO, T2 = SUELO + 5% DE LODO, T3 = SUELO + 10% DE LODO, T4 = SUELO + 15% DE LODO, T5 = SUELO + 20% DE LODO.

Como puede observarse en el cuadro 4.1, para todos los tratamientos nos da una clase textural arcillosa; en cada una de las unidades experimentales tenemos valores arriba del 40% de arcilla, lo que nos indica que es un suelo que fácilmente puede ser compactado y por consecuencia limita fuertemente la productividad del mismo. Para esta característica la aplicación del lodo no tuvo influencia, pues en todos los tratamientos se comportó de manera semejante, no alterando los resultados de manera significativa.

Gavande (1979), menciona que la estructura y la compactación son funciones de tiempos y cambios constantes; hay cambios estacionales y permanentes como consecuencia de las prácticas de laboreo del suelo, crecimiento de las plantas, irrigación, lluvia, prácticas de manejo y otras.

#### 4.1.2 DENSIDAD APARENTE



**Fig. 4.1** Densidad aparente de los análisis de las muestras de cada tratamiento.

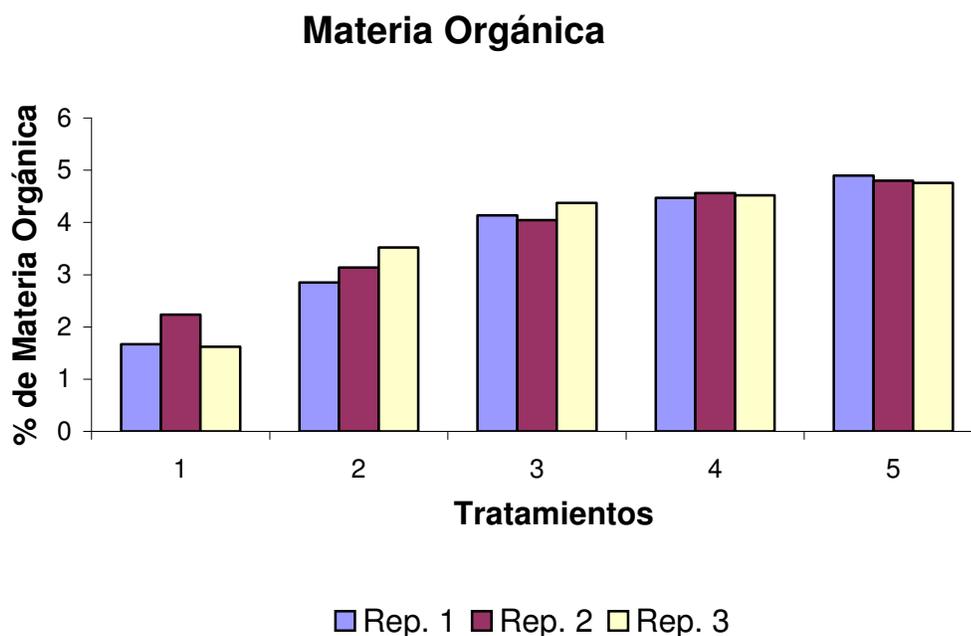
En la figura 4.1, para la densidad aparente de los tratamientos realizados en la investigación, se puede apreciar que no existe diferencia significativa, es decir, el agregar lodo residual no ayudó a modificar esta característica del suelo. Se puede observar que los tratamientos 3 y 4 respectivamente muestran los valores mas altos en este caso.

Vehimeyer y Hendrickson (1948) mencionan que una densidad aparente máxima del suelo sobre la cual las raíces no penetran, no es la misma para todos los suelos sino que varía alrededor de  $1.75 \text{ g/cm}^3$ .

## 4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

### 4.2.1 MATERIA ORGÁNICA

Para el caso de la materia orgánica si existe diferencia significativa de acuerdo a la comparación de medias de Tukey a un nivel de significancia del 0.01 que se muestra en el apéndice (A – 7)



**Fig. 4.2** Materia Orgánica para los diferentes tratamientos analizados en la investigación.

De acuerdo a la comparación de medias de Tukey y a la Fig. 4.2 que se presenta, los tratamientos 3, 4 y 5 son los que mayor contenido de materia orgánica contienen, es decir, los tres tratamientos a los que se les aplicó mas lodo.

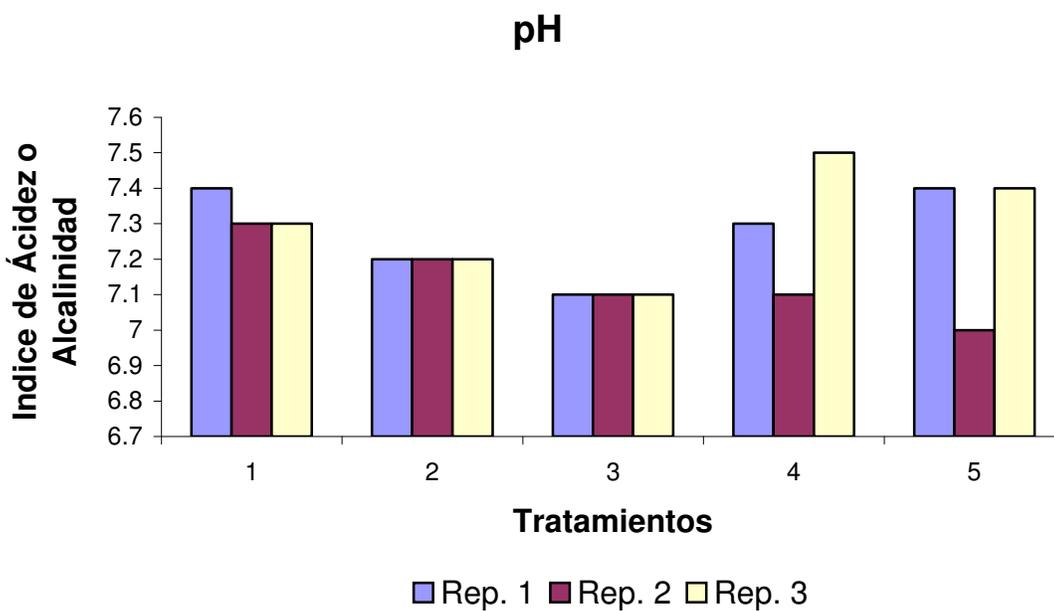
El contenido de materia orgánica se va incrementando gradualmente, a medida que se incrementa la cantidad de lodo aplicado al suelo, resultado del gran contenido de materia orgánica que contiene el lodo por sí solo.

Se puede apreciar en la fig 4.2 que en el tratamiento No. 1 que corresponde al suelo solo, los niveles de M.O son relativamente bajos en comparación con los que sí se les aplicó lodo, en los tratamientos 3, 4 y 5, dentro de la clasificación para este parámetro, corresponde al de altamente rico, ya que sobrepasan el 4% que se indica como máximo.

La diferencia que existe entre el tratamiento que resultó ser mejor al tratamiento donde solo se tiene el suelo es de aproximadamente 3%

#### **4.2.2 pH**

Como se puede observar en la Fig 4.3 los tratamientos donde se muestra un valor de pH mayor, es en los tratamientos 1 y 3, respectivamente, aunque la diferencia con los tres restantes no es estadísticamente significativa.



**Fig. 4.3** Índice de acidez o alcalinidad de los análisis hechos a cada tratamiento.

Juárez et al 1987, expresaron que para no afectar negativamente el suelo y el crecimiento de las plantas, el pH del lodo residual debe estar próximo a la neutralidad, requisito que en este caso se cumple, dado que el lodo utilizado en la presente investigación es de 6.8, además, en la gráfica se observa claramente que en cualquiera de los tratamientos, el pH se encuentra en un rango de 7.1 a 7.3 cercano a la neutralidad.

#### 4.2.3 SALINIDAD

**Cuadro 4.2** Grado de Salinidad de los diferentes tratamientos analizados en la investigación.

Tratamiento	C. E (dS/m)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Na (meq/l)	K (meq/l)
1	2.95	10	3.58	8.69	1.102
2	10.9	40	10.41	11.73	3.076
3	19.3	37.5	12.5	43.47	5.846
4	10.86	15	7.08	30.43	4.076
5	9.2	10	5.25	13.91	2.353

Laboratorios de Química de Suelos, Pedología y Servicios y Vinculación del Dpto. de Suelos de la UAAAN (2006)

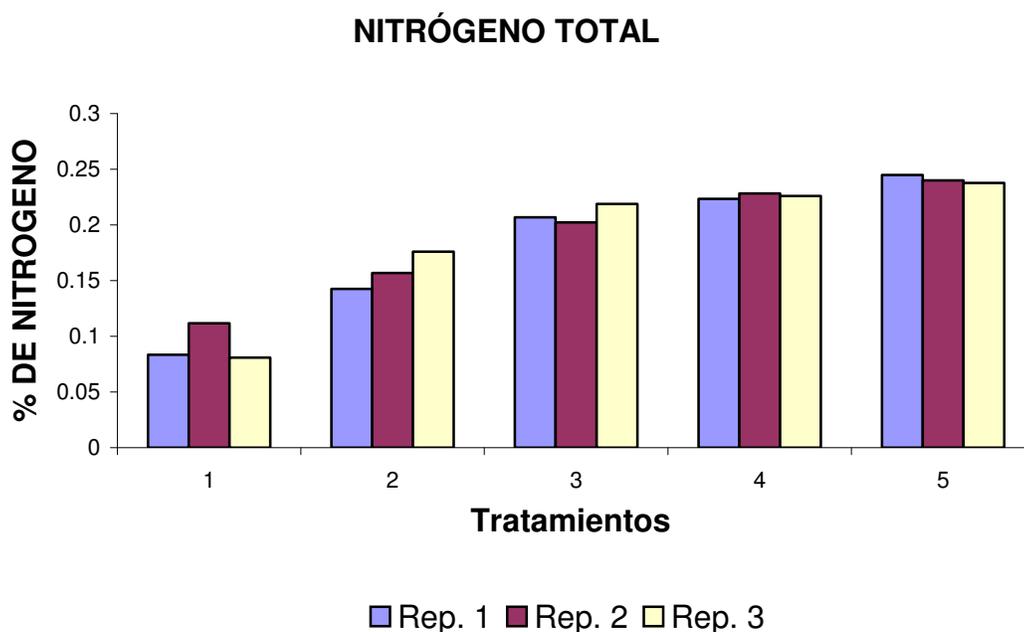
En el cuadro 4.5 se muestran los valores de los cationes que dan la característica de la salinidad a los suelos, al igual que la conductividad eléctrica.

Al aplicar lodo se observan valores muy elevados en comparación con el testigo y lo establecido como estándar para un suelo o sustrato normal motivo por el cual hubo poca germinación de las semillas del Ryegrass.

Martínez (1998), cita que es recomendable tomar en cuenta la salinidad del lodo, sobre todo en las regiones áridas o de poca precipitación, ya que ésta al encontrarse en grandes cantidades en los suelos puede impedir la germinación y el óptimo desarrollo de los cultivos, además puede causar la dispersión del suelo, reducir la velocidad de infiltración y aireación del suelo causando cambios en su estructura que hacen más difícil su labranza.

#### 4.2.4 NITROGENO TOTAL

Existe diferencia altamente significativa para los valores de nitrógeno encontrados en los análisis hechos a los diferentes tratamientos de la investigación.



**Fig. 4.4** Nitrógeno Total encontrado en cada uno de los tratamientos.

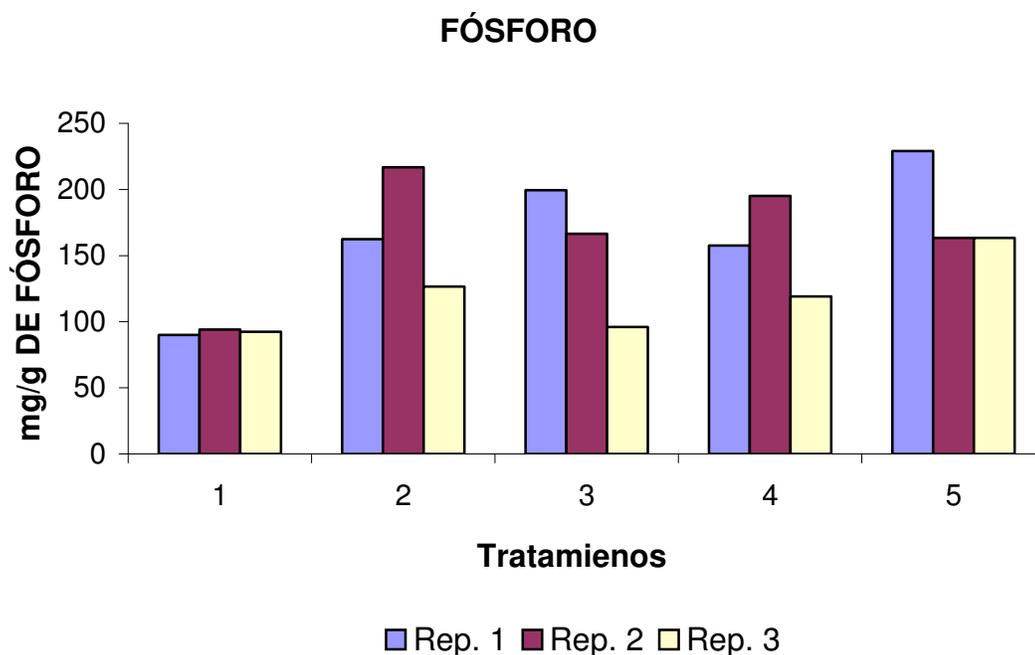
En la Fig. 4.4 se puede observar un incremento gradual conforme la cantidad de lodo aplicado al suelo va siendo mayor, existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, con un nivel de significancia del 0.01% el mejor de los tratamientos es el 5, siguiéndole el 4, es decir, los tratamientos donde mayor cantidad de lodo se aplicó (20 y 15% respectivamente).

El hecho de que el contenido de N vaya aumentando gradualmente se debe a la gran cantidad de N que el lodo por sí solo trae, de manera que al ir agregándose al suelo a las diferentes concentraciones, la concentración de N en las diferentes repeticiones va aumentando.

(Ryan et al., 1973; Sommers et al., 1972) mencionan que el contenido de N orgánico del lodo puede variar del 1 al 10% en base peso seco. Los componentes orgánicos encontrados en el lodo principalmente son aminoácidos, que indican la presencia de materiales proteínicos. Después de la aplicación al suelo, los microbios del suelo descompondrán a los componentes del nitrógeno orgánico del lodo, resultando una liberación de  $\text{NH}_4$ , el cual puede ser asimilado por los cultivos o la vegetación

#### **4.2.5 FOSFORO**

En este caso no existe diferencia estadísticamente significativa, es decir, no hay variación en los tratamientos evaluados, todos se comportan de manera semejante.

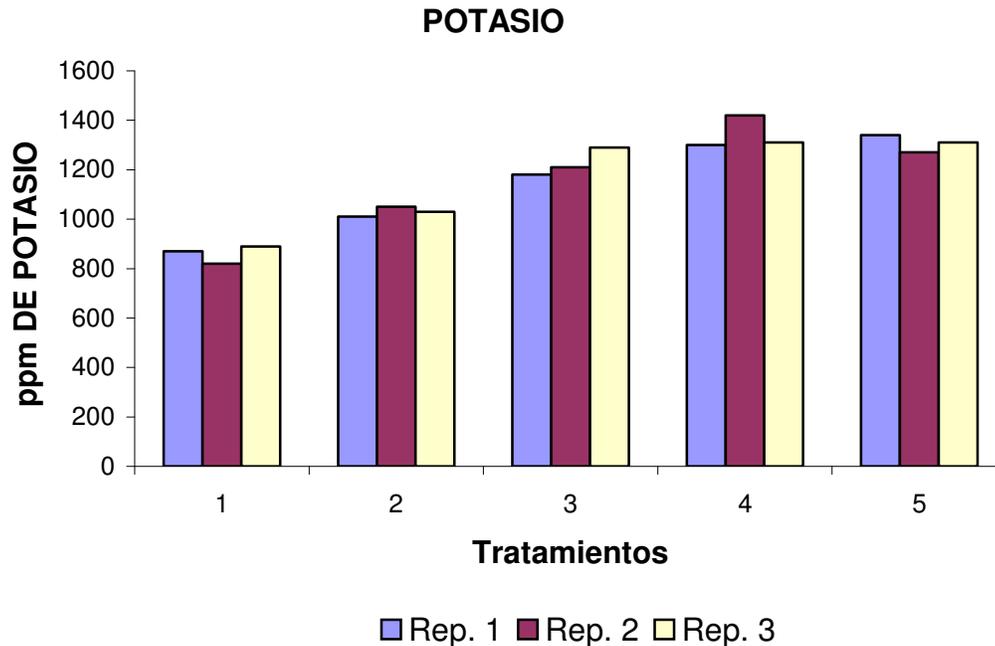


**Fig. 4.5** Fósforo encontrado en los análisis realizados a los diferentes tratamientos.

Como se muestra en la fig 4.5, los mejores tratamiento en cuanto a Fósforo se refiere, fueron los tratamientos 5, 2 y 4, respectivamente, aunque la diferencia no es estadísticamente significativa.

El Fósforo, al igual que el Nitrógeno tiene funciones en el desarrollo vegetativo como en la germinación de la semilla, desarrollo de la raíz, maduración temprana y en las actividades del protoplasma, además es parte importante en los procesos químicos que se efectúan en el interior de las mismas, (Ortiz, 1972).

## 4.2.6 POTASIO

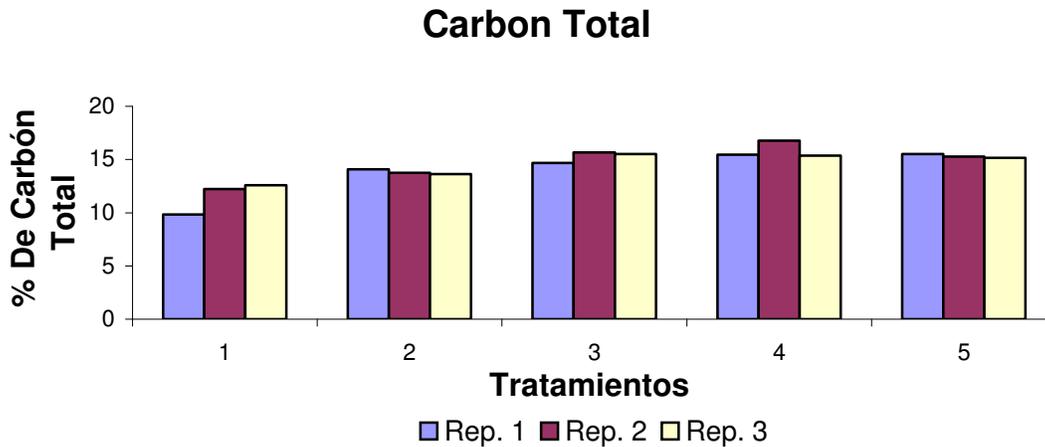


**Fig 4.6** Potasio encontrado en los diferentes tratamientos al final del experimento.

Como se puede apreciar en la Fig 4.6, existe un incremento significativo de Potasio (K) a medida que se incrementa la cantidad de lodo aplicado al suelo, de acuerdo a la comparación de medias de Tukey al 0.01%, los tratamientos que presentan una mayor concentración de Potasio, son 4, 5 y 3 respectivamente.

El Potasio es uno de los tres nutrimentos principales junto con el N y el P. Los cultivos contienen aproximadamente la misma cantidad de N que de P, pero más K que P. El Potasio es absorbido por las plantas en forma iónica  $K^+$ . A diferencia del N y el P, el K no forma compuestos orgánicos en la planta (INFOPOS, 1997).

#### 4.2.7 CARBON TOTAL



**Fig. 4.7** Carbón Total encontrado en los diferentes tratamientos en la presente investigación.

Para el caso de Carbón Total, existe diferencia significativa entre los diferentes tratamiento, aunque de manera numérica no se logre apreciar dicha diferencia, ya que, como se muestra en la fig 4.7, los tratamientos se comportaron casi de manera similar.

Aunque el contenido de Carbón Total en el lodo fue mediano, con un valor de 26%, al momento de combinarlo con el suelo, éste fue disminuyendo, aunque conforme mayor fue la cantidad de lodo aplicado al suelo, el % de Carbón Total fue aumentando en cada uno de los tratamientos, tal y como se muestra en la fig 4.7.

Se puede observar que los tratamientos en los que hubo mayor concentración de Carbón Total fueron en el 4, 5 y 3, respectivamente, aunque en ninguno de los casos pasó de ser un nivel bajo de acuerdo a la clasificación dada para Carbón Total.

## V. CONCLUSIONES

Basado en los objetivos planteados y los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye lo siguiente:

### **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:**

La aplicación del lodo al suelo no ayudó a que éste modificara sus características físicas, ya que tanto la textura y la densidad aparente, que fueron los parámetros evaluados, se comportaron de manera similar, es decir, la clase textural fue la misma para los diferentes tratamientos (arcillosa), en tanto que la densidad aparente, se mantuvo uniforme.

### **CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

- El pH se mantuvo en el rango de la neutralidad, la adición del lodo residual al suelo no tuvo ninguna influencia en cuanto a este parámetro se refiere, solamente varió algunas centésimas, pero esto no fue significativo.
- Al evaluar materia orgánica en los diferentes tratamientos, se observó que en este parámetro la adición del lodo residual, si tuvo una gran influencia, ya que al realizar el análisis de varianza correspondiente, se presentó una diferencia altamente significativa entre los tratamientos, siendo los mejores, aquellos en los que la concentración de lodo aplicado al suelo fue mayor.
- La salinidad fue la que presentó valores muy elevados y debido a eso, hubo poca germinación de las semillas del Ryegrass, ésto se debió a la Conductividad Eléctrica que el lodo por sí solo tiene( 16.12 dS/m ).
- En cuanto al Nitrógeno Total se refiere, se encontró que al aplicar lodo residual al suelo, se incrementa de manera significativa la concentración de este elemento en el mismo, ya que en las diferentes unidades experimentales

con las que se trabajó en la presente investigación el % de NT se fue incrementando a medida que se iba incrementando la concentración de lodo aplicado al suelo.

- El Fósforo es un elemento que no mostró cambios significativos al aplicar lodo al suelo, al hacer los análisis para este parámetro, no hubo diferencia significativa entre los diferentes tratamientos.
- Cuando se realizó el análisis de varianza para el Potasio en cada uno de los tratamientos, se observó que si hay diferencia altamente significativa entre éstos, es decir, el lodo si influyó de manera importante
- El Carbón Total es otro de los parámetros en los que hubo diferencia altamente significativa, en este caso los mejores tratamientos fueron el 4, 5 y 3, respectivamente.

De manera general se puede concluir que el hecho de aplicar lodo residual a suelos agrícolas evidentemente tiene grandes ventajas; le proporciona materia orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio entre otras cosas, aunque si se deben de cuidar algunas otras cuestiones para que no se vayan a generar problemas con la aplicación del lodo al suelo.

El tratamiento que mejor respuesta tuvo en cuanto a germinación se refiere, fue el tratamiento No. 3, es decir, el tratamiento al cual se le agregó 10 % de lodo al suelo, por lo que, al menos para este caso, se considera como la concentración óptima de aplicación al suelo.

Tres cosas que se deben tener bien monitoreadas al momento de aplicar lodo al suelo son: el pH , la Salinidad, la concentración de metales que el lodo pueda traer, y una cuarta, que son los patógenos que lodo, por su misma naturaleza pueda contener.

Si se tienen bien monitoreados estos cuatro factores, no habrá ningún problema a la hora de aplicar los lodos al suelo.

## VI. RECOMENDACIONES

- Antes de aplicar lodo residual al suelo, se le deben de hacer los análisis CRETl, para saber si es apto para la aplicación.
- Como precaución debe evitarse aplicar el lodo sobre materiales consolidados de caliza o roca fracturada ya que estos materiales tienen capacidad para permitir lixiviaciones, lo cual podría ocasionar una contaminación de las aguas subterráneas, además dichos materiales por lo general se encuentran formando lomeríos y tienen suelos con poco espesor.
- También es recomendable no aplicar lodo cerca de los cuerpos de agua superficiales para evitar la contaminación de éstas.
- La mineralización del Nitrógeno orgánico depende principalmente de la temperatura, humedad y actividad microbiana que se tenga en los suelo, por lo tanto se recomienda que el lodo sea composteado antes de ser aplicado al suelo para que el nitrógeno ya se haya mineralizado y esté disponible para las plantas lo antes posible.

## VII. LITERATURA CITADA

- Acosta G. Y., Ramírez E., Gutierrez E. 1995. Efectos de la Aplicación de lodo residual sobre suelos y planta. Universidad de Zulia Venezuela.
- Ante proyecto NOM – 004 – ECOL – 1998. Tratamiento y Disposición de Lodos Residuales. Expedido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Challenger, A. 1998. utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO – IB – UNAM – SIERRRA MADRE. 813 p.
- Edmonds, R. 1979. Microbiological Characteristics of dewatered sludge following application to forest soils and clear cut areas. In: Sopper, W., and S. Kerr, eds. Application of municipal sewage effluent and biosolids on forest and disturbed land. University Park, PA: Pennsylvania State University Press.
- Furr, A., A. Lawrence, S. Tong, M. Grandolfo, R. Hofstader, C. Bache, W. Gutenmann, and D. Lisk. 1976. Multi-element and chlorinated hydrocarbon analisis of municipal sewages of American cities. Environ. Sci. TECHNOL. 10:683-687.
- Gavande S. A. 1979. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Ed. Limusa. México. 208 – 210 p.
- Hernández H. J.M., Olivares S. E., Villanueva F. I., 2004. Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo

forrajero (*Sorghum vulgare Pers*). Instituto Tecnológico Agropecuario No. 1. Villa Montemorelos, Durango, México.

Hue, N. V. 1996. Land application of biosolids. Environmental Soil Chemistry, University of Hawaii. Sludge. Htm at agrss. Sherman. Hawaii. Edu.

Instituto de la Potasa y del Fósforo. Manual Internacional de la Fertilidad de Suelos. México. 1997.

Jacobs, L., S. Carr, S. Bohm, and J. Stukenberg. 1987. Document longterm experince of biosolids land application programs. Project 91 . isp – 4, Water Environment Research Foundation, Alexan – dria, VA.

Martínez R. E. 1998. Estudio para determinar el uso de lodos sobre los suelos agrícolas de cuatro municipios de Nuevo León. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila. 187 p.

Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater engineering treatment and disposal reuse. Third edition. Mc. Graw Hill.

Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Olivares S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N.L

Ortiz. V. B. 1973. Edafología. Ed. Limusa. Mèxico

Ostergaad H. Birgitte. 1997. Sewage sludge amended soils and heavy metals. Birgitpr.htm at weber.u.Washington.edu. 8 p.

- Ottaviani M.; Santarsiero A.; De Fulvio S. (1991). Hygienic, technical and legislative aspects of agricultural sewage sludge usage. *Acta Chim. Hung.* 128 (4 - 5), 535-543.
- Pissani, Z. J. F. 1990. Tratamiento y Aprovechamiento Agrícola de las Aguas y Lodos Residuales. Apuntes de clase, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín N. L.
- Pissani, Z. J. F. 1998. Tratamiento y Aprovechamiento agrícola de las aguas residuales. Postgrado, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L.
- Pissani, Z. J. F., Guzmán, R. J. L. 1999. Evaluación preliminar de la aplicación de lodos en el rendimiento del cultivo del maíz (*Zea mays* L.). FAUANL – DYCUUSA – SADM. Marín N. L. México. 46 p.
- Quinteiro Rodríguez, M. P.; Andrade Couce, M. L.; De Blas Varela, E. 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo. Apartado 874. Vigo-36200. España.
- Ryan, J., D. Keeney, and L. Walsh. 1973. Nitrogen transformations and availability of an anaerobically digested sewage sludge in soil. *J. Environ. Quality* 2: 489 – 492.
- Sagik, B., B. Moore, and C. Forber. 1979. Public health aspects related to the land application of municipal sewage effluents and sludges. In: Sopper, W. E., and S. M. Kerr, eds. *Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land*. University Park, PA: Pennsylvania State University Press. Pp 241 – 263.
- Semarnap/INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997/Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al

Ambiente, 1995-1996, INEGI, México, 1998.  
Semarnap, Subsecretaría de Recursos Naturales, 1999.

Sommers, L., D. Nelson, J. Yanher, and J, Mannering. 1972 Chemical composition of sewage sludge from selected Indiana cities. *Oroc. Indiana Acad. Sci.* 82:424 – 432.

Sorber, A. Charles. 1994. Biosolids, a blue Print for public acceptance water Environment and Techcology. *Water Environment Federation.* 6: 5: 61.

Tester C.F. (1990). Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54(3), 827-831.

Turk J. y A. Turk. 1973. *Ecología – Contaminación – Medio Ambiente.* Nueva Editorial Interamericana S. A de C. V. D.F., México.

U. S. EPA. 1980. National sewage sludge survey: Availability of information and data, and anticipated impacts on proposed regulations. *Fed. Reg.* 55 (218).

U. S. EPA. 1984. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA/625/10 – 84/003. Cincinnati:, OH.

U. S. EPA. 1990. National Sewage Sludge Survey: Availability of information and data, and anticipated impacts on proposed regulations. *Fed. Reg.* 55 (218).

U. S. EPA. 1992<sub>a</sub>. Control of Pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R – 92/013. Cincinnati, OH.

U. S. EPA. 1992<sub>b</sub>. Technical support document for land application of sewage sludge, Vol. I. EPA/822/12 – 93900/9 (NTIS PB93110583). Washington, D. C.

- U. S. EPA. 1994. A plain English guide to the EPA Parte 503 biosolids rule. EPA/ 832/ R – 93/003. Washington, D. C.
- U. S. EPA. 1995<sub>a</sub>. Process desing manual: Land Application of sewage sludge and Domestic Septage EPA/ 625/R – 95/001. Cincinnati, OH.
- U. S. EPA. 1995b. A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule. 1995. EPA/63 – B93 – 005. Washington, D. C.

## VIII. APÉNDICE

A -1 Cuadro de concentración de datos para el parámetro Densidad Aparente. (gr/cm<sup>3</sup>)

TRATA / REP.	1	2	3
1	0.9972	1.0054	1.0567
2	1.0710	1.1114	1.0371
3	1.1212	1.1444	1.0888
4	1.1028	1.0571	1.1735
5	1.0694	1.0729	1.1342

A - 2 Análisis de Varianza para el parámetro densidad aparente (gr/cm<sup>3</sup>)

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	0.018618	0.004654	2.9200	0.077
ERROR	10	0.015940	0.001594		
TOTAL	14	0.034557			

A - 2 Tabla de Medias para el parámetro Densidad Aparente (gr/cm<sup>3</sup>)

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	1.019767
2	3	1.073167
3	3	1.118133
4	3	1.111133
5	3	1.092167

A – 4 Cuadro de concentración de datos para el parámetro Materia Orgánica (%)

TRATA / REP	1	2	3
1	1.6660	2.2360	1.6190
2	2.8500	3.1400	3.5200
3	4.1380	4.0430	4.3750
4	4.4700	4.5650	4.5180
5	4.8980	4.8030	4.7560

A - 5 Análisis de Varianza para el parámetro materia orgánica. (%)

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	17.685989	4.421497	82.6183	0.000
ERROR	10	0.535172	0.053517		
TOTAL	14	18.221161			

A – 6 Tabla de Medias para el parámetro Materia Orgánica (%)

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	1.840333
2	3	3.170000
3	3	4.185333
4	3	4.517666
5	3	4.819000

A – 7 Comparación de Medias de Tukey para el parámetro Materia Orgánica (%)

TRATAMIENTO	MEDIA
5	4.8190 A
4	4.5177 A
3	4.1853 A
2	3.1700 B
1	1.8403 C

NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.01

A – 8 Cuadro de concentración de datos para el parámetro pH.

TRATA / REP	1	2	3
1	7.4000	7.3000	7.3000
2	7.2000	7.2000	7.2000
3	7.1000	7.1000	7.1000
4	7.3000	7.1000	7.5000
5	7.4000	7.0000	7.4000

A - 9 Análisis de Varianza para el parámetro pH

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	0.102478	0.025620	1.3246	0.326
ERROR	10	0.193420	0.019342		
TOTAL	14	0.295898			

A – 10 Tabla de Medias para el parámetro pH

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	7.333333
2	3	7.199999
3	3	7.100000
4	3	7.300000
5	3	7.266666

A – 11 Cuadro de concentración de datos para el parámetro Nitrógeno Total (%)

TRATA / REP.	1	2	3
1	0.0833	0.1118	0.0809
2	0.1425	0.1570	0.1760
3	0.2069	0.2022	0.2188
4	0.2235	0.2282	0.2259
5	0.2448	0.2401	0.2378

A – 12 Análisis de Varianza para el parámetro de Nitrógeno Total (%)

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	0.0442	0.011052	82.5740	0.000
ERROR	10	0.0013	0.000134		
TOTAL	14	0.0455			

A – 13 Tabla de Medias para el parámetro Nitrógeno Total (%)

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	0.092000
2	3	0.158500
3	3	0.209267
4	3	0.225883
5	3	0.240900

A - 14 Resultados de la comparación de medias Tukey para el parámetro Nitrógeno Total (%)

TRATAMIENTO	MEDIA
5	0.2409 A
4	0.2259 AB
3	0.2093 B
2	0.1585 C
1	0.0920 D

NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.01

A – 15 Cuadro de concentración de datos para el parámetro Potasio (Ppm)

TRATA / REP.	1	2	3
1	870.0000	820.0000	890.0000
2	1010.0000	1050.0000	1030.0000
3	1180.0000	1210.0000	1290.0000
4	1300.0000	1420.0000	1310.0000
5	1340.0000	1270.0000	1310.0000

A – 16 Análisis de Varianza para el parámetro Potasio (Ppm).

---

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	498734	124683.5	58.81	0.000
ERROR	10	21200	2120		
TOTAL	14	519934			

---

A – 17 Tabla de Medias para el parámetro Potasio (Ppm)

---

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	860
2	3	1030
3	3	1226.666626
4	3	1343.333374
5	3	1306.666626

---

A – 18 Resultados de la comparación de medias Tukey para el parámetro Potasio (Ppm)

---

TRATAMIENTO	MEDIA
4	1343.3334 A
5	1306.6666 A
3	1226.6666 A
2	1030.0000 B
1	860.0000 C

---

NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.01

A – 19 Cuadro de concentración de datos del parámetro Fósforo (Ppm)

TRATA / REP.	1	2	3
1	90.0000	94.1000	92.5000
2	162.5000	216.9000	126.5000
3	199.5000	166.5000	95.9000
4	157.7000	195.1000	119.0000
5	229.1000	163.4000	163.4000

A – 20 Análisis de Varianza para los niveles de Fósforo encontrados en los diferentes tratamientos.

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRAT	4	14975.47	3743.87	2.4112	0.118
ERROR	10	15526.72	1552.61		
TOTAL	14	30502.19			

A – 21 Tabla de Medias del parámetro Fósforo (Ppm)

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	92.200005
2	3	168.633331
3	3	153.966660
4	3	157.266663
5	3	185.300003

A – 22 Cuadro de concentración de datos para el parámetro Carbón Total (%)

TRAT / REP.	1	2	3
1	9.8500	12.2420	12.5760
2	14.0700	13.7640	13.6420
3	14.6680	15.6780	15.5080
4	15.4540	16.7720	15.3720
5	15.5220	15.2880	15.1560

A - 23 Análisis de Varianza para parámetro Carbón Total (%).

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATA	4	36.588867	9.147217	14.27	0.001
ERROR	10	6.406494	0.640649		
TOTAL	14	42.995361			

A – 24 Tabla de Medias para el parámetro Carbón Total (%)

TRATA.	REP.	MEDIA
1	3	11.556000
2	3	13.825333
3	3	15.284667
4	3	15.866000
5	3	15.322001

A – 25 Resultados de la comparación de medias para el parámetro Carbón Total (%)

TRATAMIENTO	MEDIA
4	15.8660 A
5	15.3220 A
3	15.2847 A
2	13.8253 A
1	11.5560 B

NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.01

A – 26 Resultados del Peso Seco de las muestras del Ryegrass obtenidos en los diferentes tratamientos analizados en la investigación.

TRATAMIENTO	REPETICIÓN	Peso Seco (gr)
1	1	2.84
	2	4.61
	3	2.38
2	1	1.42
	2	0.54
	3	1.29
3	1	0.45
	2	0.03
	3	0.83
4	1	1.65
	2	0.93
	3	2.59
5	1	0.29
	2	0.37
	3	1.04