

00361 23  
2eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARACTERIZACION Y PROPUESTA DE MANEJO DE LOS LODOS  
RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CIVAC,  
ESTADO DE MORELOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS  
(BIOLOGIA)

P R E S E N T A

MA. LAURA ORTIZ HERNANDEZ

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. MARGARITA EUGENIA GUTIERREZ RUIZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1994



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y a la Secretaría de Educación Pública, por otorgarme los medios económicos necesarios para la realización de este trabajo.

Quiero agradecer especialmente a la M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz, por la valiosa dirección de este trabajo, su paciencia, su incondicional apoyo en todos los aspectos y por creer en mí.

A la Dra. Teresa Reina Trujillo, por la revisión de esta tesis, por todo el apoyo e interés demostrado en mí, por sus palabras de aliento y por su gran calidad humana.

A la Dra. Carmen Duran Dominguez, por la revisión de esta tesis y por sus atinadas sugerencias.

Al Dr. Victor Luna Pabello, por la revisión y comentarios de este trabajo y por brindarme su amistad.

Al Dr. Adalberto Noyola, por sus valiosas sugerencias para este trabajo.

Al M. en C. William Gandoy, por el apoyo brindado durante la revisión de esta tesis.

Al Dr. José Lugo, por su ayuda y apoyo al revisar esta tesis.

Al Biol. Enrique Sánchez Salinas, por su valioso trabajo de los esquemas de esta tesis.

A la Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de Civac, por las facilidades y todo el apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

Al Instituto de Geografía, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

A todo el personal del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, del Instituto de Geografía de la UNAM .

Al personal del Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, por ayudarme, aguantarme y creer en mí.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para hacer posible este trabajo.

**A ENRIQUE,  
POR COMPARTIR SU VIDA CONMIGO  
Y A MIS PEQUEÑAS KATIA Y TANIA,  
LAS RAZONES MÁS  
HERMOSAS DE MI VIDA**

## INDICE

### 1. INTRODUCCIÓN, 1

### 2. ÁREA DE ESTUDIO, 7

#### 2.1. Descripción del área de experimentación, 7

##### 2.1.1. Aspectos geográficos, 7

##### 2.1.2. Uso del suelo, 7

##### 2.1.3. Población, 10

##### 2.1.4. Geología/Geomorfología, 10

#### 2.2. Características de la planta de tratamiento, 11

### 3. ESTRATEGIA Y FUNDAMENTOS, 18

#### 3.1. Estrategia de trabajo, 18

#### 3.2. Lodos residuales, 24

##### 3.2.1. Producción y composición, 24

##### 3.2.2. Formas y disponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos, 25

##### 3.2.3. Tratamiento y/o disposición final de lodos residuales, 26

###### 3.2.3.1. Incineración, 27

###### 3.2.3.2. Rellenos sanitarios, 27

###### 3.2.3.3. Utilización para fines agrícolas, 28

###### a) Factores que intervienen en la forma de los elementos potencialmente tóxicos en el suelos, 29

###### b) Cambios de los elementos en el suelo después de adicionarle lodos residuales, 34

###### 3.2.3.4. Composteo, 36

###### 3.2.5. Legislación, 38

### 4. PARTE EXPERIMENTAL, 40

#### 4.1. Composición de los lodos, 40

##### 4.1.1. Muestreo y pretratamiento, 40

##### 4.1.2. Análisis cualitativos, 40

##### 4.1.3. Análisis físicos y químicos, 41

###### 4.1.3.1. Parámetros de rutina, 41

###### 4.1.3.2. Determinación de "metales pesados", 41

###### a) Concentración total de "metales pesados", 41

###### b) "Metales pesados" disponibles, 44

###### c) Especiación de "metales pesados", 44

##### 4.1.4 Análisis microbiológicos, 45

#### 4.2. Métodos de estabilización, 47

##### 4.2.1. Incineración, 47

##### 4.2.2. Composteo, 49

##### 4.2.3. Pruebas en suelos agrícolas, 50

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN, 53

- 5.1. Análisis cualitativos, 53
- 5.2. Parámetros de rutina, 53
  - 5.2.1. Porcentaje de humedad y sólidos, 53
  - 5.2.2. Densidad aparente, 53
  - 5.2.3. Sales solubles y conductividad eléctrica, 53
  - 5.2.4. pH, 55
  - 5.2.5. Materia orgánica, 55
  - 5.2.6. Nitrógeno, 56
  - 5.2.7. Fósforo, 57
  - 5.2.8. Calcio, magnesio, sodio y potasio, 58
  - 5.2.9. Capacidad de intercambio catiónico, 61
  - 5.2.10. Aluminio, 61
- 5.3. Elementos potencialmente tóxicos, 63
  - 5.3.1. Concentración total, 63
  - 5.3.2. Disponibles, 64
- 5.4. Especiación de "metales pesados", 66
- 5.5. Análisis microbiológicos, 71
- 5.6. Resultados de los métodos de estabilización, 71
  - 5.6.1. Pruebas en suelos agrícolas, 71
    - 5.6.1.1. Resultados de suelos, 71
    - 5.6.1.2. Resultados de tejidos vegetales, 77
  - 5.6.2. Composteo, 81
  - 5.6.3. Análisis de cenizas, 85

## 6. CONCLUSIONES, 88

- 6.1. Caracterización del lodo residual, 88
- 6.2. Experimento agrícola, 88
- 6.3. Composteo, 89

## 7. RECOMENDACIONES

## 8. BIBLIOGRAFÍA, 92

## APÉNDICE A, 99

### A.1. DESCRIPCIÓN HISTÓRICA DEL PROBLEMA, 100

### A.2. ASPECTOS AMBIENTALES, 105

#### A.2.1. Generalidades sobre contaminación del agua, 105

##### A.2.1.1. Características, 105

- A.2.1.2. Toxicología, 106
- A.2.2. Tratamiento de aguas residuales, 108
  - A.2.2.1. Tratamiento primario, 108
  - A.2.2.2. Tratamiento secundario, 109
  - A.2.2.3. Tratamiento terciario, 111
- A.2.3. Información sobre elementos potencialmente tóxicos y nutrientes del lodo, 112
- A.2.4. Nitrógeno y fósforo, 114
- A.2.5. Microorganismos patógenos, 115
- A.2.6. Compuestos orgánicos, 118
- A.2.7. Información adicional sobre tratamiento y disposición final de lodos residuales, 120
  - A.2.7.1. Tratamiento anaerobio, 120
  - A.2.7.2. Tratamiento aerobio, 121
  - A.2.7.3. Termólisis, 121
- A.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE DOCE MUESTRAS COMPUESTAS DE LODOS RESIDUALES, 124
- A.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES, 3 TRATAMIENTOS, 2 CICLOS Y 3 REPETICIONES, 128
- A.5. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PARÁMETROS DEL EXPERIMENTO DE CAMPO, 132
- A.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE TEJIDOS VEGETALES DEL MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES, 138
- A.7. RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES, 143
- A.8. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS COMPOSTAS DE LODO CON DIFERENTES MATERIALES ORGÁNICOS, 143

## RELACIÓN DE CUADROS

### 2. ÁREA DE ESTUDIO

Cuadro 2.1. Industrias de Civac que utilizan los servicios de la planta *Eccaciv*

### 3. ESTRATEGIA Y FUNDAMENTOS

Cuadro 3.1. Factores que influyen en la supervivencia de bacterias y virus en el suelo

Cuadro 3.2. Condiciones fijadas en diferentes países para la adición de lodo al suelo

Cuadro 3.3. Guía para la adición de elementos potencialmente tóxicos en lodos aplicados a suelos agrícolas

Cuadro 3.4. Concentraciones máximas permitidas de elementos potencialmente tóxicos en lodos residuales para su uso en agricultura, propuesto por la CEE

### 4. PARTE EXPERIMENTAL

Cuadro 4.1. Condiciones de operación y límites de detección del equipo de espectrofotometría de absorción atómica

Cuadro 4.2. Concentración de las curvas de calibración para el análisis de "metales pesados" y coeficiente de correlación de Pearson

### 5. RESULTADOS Y DISCUSION

Cuadro 5.1. Resultados de los análisis cualitativos aplicados a los lodos residuales de la planta *Eccaciv*

Cuadro 5.2. Resultados de los análisis físicos y químicos de rutina de lodos residuales

Cuadro 5.3. Materia orgánica, nitrógeno y fósforo en lodos residuales

Cuadro 5.4. Comparación del contenido nutricional en abonos comunes con el lodo residual de la *Eccaciv*

Cuadro 5.5. Calcio, magnesio, sodio, potasio y capacidad de intercambio catiónico de lodos residuales de *Eccaciv*

Cuadro 5.6. Contenido total de elementos potencialmente tóxicos

Cuadro 5.7. Proporción media/mediana de las concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos

Cuadro 5.8. Resultados de la concentración de elementos potencialmente tóxicos extraídos con EDTA 0.05 M en los lodos residuales de la planta *Eccaciv*

Cuadro 5.9. Resultados de la especiación de "metales pesados" en lodos residuales de la planta *Eccaciv*

Cuadro 5.10. Porcentaje de recuperación de "metales pesados" por extracción secuencial, con respecto a la concentración total

Cuadro 5.11. Porcentaje de extracción con cada uno de los reactivos, con respecto a la concentración total

- Cuadro 5.12. Concentración y porcentaje de "metales pesados" disponibles para las plantas, con el método de especiación secuencial
- Cuadro 5.13 Comparación de concentraciones de elementos potencialmente tóxicos de la planta *Eccaciv*, con la de otros países
- Cuadro 5.14. Comparación de las concentraciones máximas permitidas de "metales pesados" en lodos residuales para uso en agricultura propuesto por la CEE y Estados Unidos de América y resultados de la planta *Eccaciv*
- Cuadro 5.15. Resultados de los análisis microbiológicos de los lodos residuales de la planta *Eccaciv*
- Cuadro 5.16. Resultados de los análisis del suelo sin lodo y del lodo adicionado al suelo en el primero y segundo ciclo
- Cuadro 5.17. Intervalo normal de la concentración total de "metales pesados" en suelos agrícolas y valores del suelo donde se realizó el experimento
- Cuadro 5.18. Clasificación de suelos según su contenido de materia orgánica y nutrimentos
- Cuadro 5.19. Resultados de los análisis físicos y químicos de suelos con lodos residuales de las parcelas agrícolas
- Cuadro 5.20. Resultados de los metales totales y disponibles de lodos residuales y parcelas agrícolas
- Cuadro 5.21. Intervalo de concentración normal para los elementos comúnmente encontrados en suelos, en su forma disponible
- Cuadro 5.22. Rendimiento en kg/ha del maíz de las tres parcelas bajo estudio
- Cuadro 5.23. Resultados de nutrimentos y "metales pesados" de la raíz del maíz cultivado con lodos residuales (1o. y 2o. ciclo)
- Cuadro 5.24. Resultados de nutrimentos y "metales pesados" en las hojas del maíz cultivado con lodos residuales (1o. y 2o. ciclo)
- Cuadro 5.25. Resultados de nutrimentos y "metales pesados" en grano del maíz cultivado con lodos residuales (1o. y 2o. ciclo)
- Cuadro 5.26. Concentraciones de diferentes elementos en tejidos vegetales
- Cuadro 5.27. Resultados de los análisis microbiológicos de las parcelas agrícolas, después del segundo ciclo
- Cuadro 5.28. Análisis microbiológicos de lodos y compostas
- Cuadro 5.29. Resultados de los análisis físicos y químicos de lodos residuales, materiales originales y compostas
- Cuadro 5.30. Resultados de los análisis de iones solubles y metales disponibles de lodos residuales, materiales originales y compostas
- Cuadro 5.31. Comparación entre los intervalos de concentración normal para los elementos comúnmente encontrados en suelos en su forma disponible y los resultados de las compostas con lodo residual
- Cuadro 5.32. Resultados de los análisis del lodo incinerado (cenizas)

## APÉNDICE A.2

- Cuadro A.2.1. Categorías de los contaminantes mayores y sus principales fuentes

Cuadro A.2.2. Concentración de metales pesados en lodos de 2,400 muestras de lodos de 193 plantas de tratamiento en Inglaterra

Cuadro A.2.3. Concentraciones de metales pesados en 250 muestras de lodos de 150 plantas de tratamiento localizadas en seis estados de los Estados Unidos de América

Cuadro A.2.4. Microorganismos encontrados en los lodos residuales

Cuadro A.2.5. Resumen de compuestos orgánicos en lodos residuales

### **APÉNDICE A.3**

Cuadro A.3.1. Resultados de los análisis físicos y químicos de rutina de lodos residuales (12 muestras compuestas)

Cuadro A.3.2. Cationes y aniones solubles

Cuadro A.3.3. Cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico

Cuadro A.3.4. Materia orgánica, nitrógeno y fósforo

Cuadro A.3.5. Contenido total de elementos mayores

Cuadro A.3.6. Contenido total de elementos potencialmente tóxicos

Cuadro A.3.7. Concentración disponible de metales pesados

### **APÉNDICE A.6**

Cuadro A.6.1. Resultados de los análisis de la raíz

Cuadro A.6.2. Resultados de los análisis de las hojas

Cuadro A.6.3. Resultados de los análisis del grano

### **APÉNDICE A.7**

Cuadro A.7.1. Resultados del rendimiento del maíz

Cuadro A.7.2. Análisis de varianza para el rendimiento del maíz

### **APÉNDICE A.8**

Cuadro A.8.1. Temperaturas promedio de las compostas con lodos residuales

Cuadro A.8.2. Resultados de los análisis físicos y químicos de las compostas de lodos residuales con suelos orgánicos

## RELACIÓN DE FIGURAS

### INTRODUCCIÓN

Fig. 1.1. Proporción de aguas residuales que llegan a la planta Eccaciv

Fig. 1.2. Localización del relleno sanitario en el Ejido Tetlama, al oeste del estado de Morelos

### ÁREA DE ESTUDIO

Fig. 2.1. División municipal del estado de Morelos y localización del municipio de Jiutepec

Fig. 2.2. Ubicación de la planta Eccaciv y localización de los arroyos de la zona industrial del Valle de Cuernavaca

Fig. 2.3. Esquema del proceso de tratamiento de la planta Eccaciv

Fig. 2.4. Hidrogeología del estado de Morelos (Jáimes, 1991)

### ESTRATEGIA Y FUNDAMENTOS

Fig. 3.1. Clasificación de las sustancias que se encuentran en el agua residual antes y después del tratamiento

Fig. 3.2. Interacción de una especie contaminante constituyente de un residuo, con el medio

Fig. 3.3. Interacción de los compuestos orgánicos constituyentes de un residuo, con el medio

Fig. 3.4. Disposición de lodos residuales en los Estados Unidos de América y en la Comunidad Económica Europea

Fig. 3.5. Formación de una doble capa difusa

Fig. 3.6. Efecto del pH sobre la disponibilidad de los elementos

Fig. 3.7. Efecto de la presencia de sales sobre el pH y en general sobre el equilibrio

### PARTE EXPERIMENTAL

Fig. 4.1. Esquema de la campana utilizada para la digestión de la muestra con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HClO}_4$

Fig. 4.2. Procedimiento para la determinación del NMP de coliformes totales y fecales

Fig. 4.3. Procedimiento para la determinación de Salmonella sp

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fig. 5.1. % de humedad y sólidos de 12 muestras compuestas de lodos residuales

Fig. 5.2. Comportamiento de la conductividad eléctrica y sales solubles

Fig. 5.3. Relación de la concentración total de sodio y potasio con la conductividad eléctrica

- Fig. 5.4. Concentración de materia orgánica  
Fig. 5.5. Concentración total de Ca, Mg, Na y K  
Fig. 5.6. Comparación entre las concentraciones total, intercambiable y soluble de Ca, Mg, Na y K  
Fig. 5.7. Esquema hipotético de la composición de la materia orgánica  
Fig. 5.8. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica de los lodos residuales de la planta Eccaciv  
Fig. 5.9. Concentración total de aluminio, hierro y zinc  
Fig. 5.10. Concentración total de Cu, Mn, Cr y Pb  
Fig. 5.11. Comparación entre la concentración total y disponible de metales pesados  
Fig. 5.12. Proporción entre la concentración total, extraíble y disponible de metales pesados  
Fig. 5.13. Extractabilidad de metales con diferentes soluciones utilizadas  
Fig. 5.14. Porcentaje de extracción de "metales pesados"  
Fig. 5.15. Concentración máxima permitida de metales pesados en suelos agrícolas y contenido en suelos del experimento, antes y después de la adición de lodos residuales  
Fig. 5.16. Rendimiento del grano de maíz, cultivado en parcelas con lodos residuales durante dos ciclos  
Fig. 5.17. Temperaturas alcanzadas por las mezclas, durante el proceso de composteo  
Fig. 5.18. Comparación entre la concentración de "metales pesados" en lodos incinerados y del filtro-prensa

## **APÉNDICE A.1**

- Fig. A.1.1. Propuesta para la ubicación de la zona industrial del valle de Cuernavaca (Jáuregui, 1961)  
Fig. A.1.2. Zona conurbada del valle de Cuernavaca

## **APÉNDICE A.2**

- Fig. A.2.1 Bacterias que intervienen en la descomposición anaerobia

## RESUMEN

La Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Eccaciv), aplica un tratamiento biológico a una parte de las aguas industriales y domésticas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca. Las aguas tratadas se descargan a un arroyo de donde se utilizan para riego agrícola. Se producen 20 ton/día de lodos residuales, con un 20% de sólidos, lo cuales anteriormente se depositaban a cielo abierto en terrenos cercanos a la planta, sin recubrimiento del suelo y sin diques de contención. Posteriormente la empresa diseñó un incinerador piloto para quemar los lodos, el cual fue clausurado por la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (Sedue) por emitir abundantes gases a la atmósfera y malos olores. Actualmente se transportan a un sitio ubicado al oeste del estado y se cubren con tierra extraída de un cerro calizo.

El relleno sanitario actualmente en uso, no cumple con los requerimientos de estructura, administración y operación que exige la legislación vigente, por lo que se presentan malos olores y flujo de lixiviados hacia los cuerpos de agua superficiales cercanos al relleno y, probablemente hacia las aguas subsuperficiales, ya que este sitio se encuentra ubicado sobre una estructura geológica permeable.

Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de caracterizar inorgánicamente a los lodos residuales y, con base en los resultados, discutir y proponer las opciones de manejo y disposición final más adecuados para las condiciones de la planta de tratamiento biológico de aguas residuales denominada Eccaciv.

Se colectaron un total de 84 muestras individuales de las cuales se formaron 12 muestras compuestas (de acuerdo a EPA, 1988). Se llevó a cabo la caracterización inorgánica por medio de las siguientes técnicas: fluorescencia de rayos X, espectroscopia de emisión, microscopía electrónica y espectrofotometrías de absorción atómica, flama y UV-visible. Los resultados revelan un promedio de 50% de materia orgánica, 3.96% de N total, 1.20% de P, una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 62.66 meq/100 g y una relación C/N de 12.63. También se encontraron cantidades apreciables de elementos mayores (Ca, Mg, Na, K, Fe y Al), así como los siguientes elementos potencialmente tóxicos (valores promedio en ppm): Zn, 1540; Cu, 537.50; Ni, 95.94; Cr, 378.33; Pb, 432.80; Cd y Co no se detectaron. Adicionalmente se realizaron análisis de disponibilidad y especiación de los elementos potencialmente tóxicos, los cuales mostraron que sólo entre 1 y 10% del total, se encuentran en forma soluble. Los resultados microbiológicos muestran la presencia de Salmonella sp. y  $18.2 \times 10^6$  de número más probable por gramo (NMP/g) de coliformes totales.

Se llevó a cabo un experimento de campo con aplicación directa de lodo sobre el suelo (homogeneizado sobre la capa arable, dentro de los primeros 20 cm de profundidad),

en parcelas que posteriormente fueron cultivadas con maíz, durante dos ciclos consecutivos (una vez por año). Los resultados mostraron un aumento estadísticamente significativo de materia orgánica (de 3.33% a 4.66% después del 2o. ciclo), así como del nitrógeno total y orgánico (de 0.19% a 0.49% del total y de 0.17% a 0.48% de N orgánico) en el suelo. El pH presentó una disminución al final del segundo ciclo (de 7.42 a 6.87) y la conductividad eléctrica aumentó, aunque no significativamente (de 0.15 a 0.23 mmhos/cm). Los elementos potencialmente tóxicos que se encontraron en el suelo, aumentaron en su concentración total después de la adición de lodo, sin rebasar el límite máximo permisible para suelos, aceptado internacionalmente. El aumento de la disponibilidad para las plantas, después de analizar los suelos al final del experimento, no fue significativo: los elementos que se detectaron como disponibles, fueron los micronutrientes y no rebasaron las concentraciones máximas permisibles. También se presentaron aumentos significativos en el rendimiento del grano de maíz (de 2097 kg/ha en la parcela testigo del primer ciclo, a 2350 kg/ha en la parcela con 5 ton/ha del segundo ciclo).

Durante el crecimiento de las plantas de maíz, no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad. Adicionalmente se realizaron análisis de hojas, raíz y grano del maíz cultivado con lodos residuales, durante los dos ciclos de cultivo. Los resultados mostraron que los elementos esenciales analizados (N, P, Ca, Mg, K, Fe, Zn y Mn), se presentaron en las concentraciones normales requeridas para el maíz, sólo el hierro se detectó en concentraciones más altas.

Asimismo se llevó a cabo el composteo de lodos con otros suelos orgánicos, como una alternativa de estabilización, antes de ser adicionados al suelo. El proceso de composteo comprendió un periodo de 18 días y los resultados mostraron un aumento del pH (de 6.23 en el lodo original a 7.50 en el lodo sometido a composteo y 7.80, 7.05 y 7.70 en las mezclas de las compostas de lodo con tierra de monte, tierra de hoja y con ambos materiales, respectivamente). La conductividad eléctrica sólo fue alta en el lodo aireado, no así en las mezclas con los suelos orgánicos (4.69 mmhos/cm en el lodo original, 4.10 en el lodo aireado y 0.46, 0.35 y 0.46 mmhos/cm en las mezclas mencionadas anteriormente). La materia orgánica del lodo aireado fue significativamente menor que el lodo original (de 78.32% a 44.16%), lo que indica que se presentó una mineralización por la acción de los microorganismos durante el composteo. Este fenómeno ocurrió también con las mezclas de lodo:suelos orgánicos. Los niveles de N total disminuyeron (de 5.74% a 2.79%), lo que coincide con lo reportado con la EPA (1985); las mezclas se clasificaron como extremadamente ricas en macronutrientes. Los elementos potencialmente tóxicos disminuyeron su concentración en su forma disponible, debido a la dilución y al aumento de pH. Adicionalmente se presentó la destrucción de microorganismos patógenos, principalmente por el incremento de las temperaturas durante el proceso de composteo.

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se propone estudiar y evaluar más detalladamente esta opción, que consiste en el composteo de

los lodos y/o su aplicación directa al suelo para aprovechar su valor nutrimental. Para ello se requiere de una dosificación previa de los mismos y mantener el pH ligeramente alcalino, con la finalidad de no rebasar los límites máximos permisibles de los elementos potencialmente tóxicos y evitar su disponibilidad para las plantas. De esta manera se previene también su lixiviación hacia los mantos acuíferos.

Como otra opción adicional para estudiarse a futuro, se proporciona información sobre una técnica utilizada en otros países: la termólisis reductora de los lodos junto con otros residuos peligrosos, lo cual podría permitir la cogeneración de energía eléctrica. Esta técnica también pudiera ser la solución para tratar la basura doméstica e industrial de toda la región, mediante un proceso limpio y económicamente viable.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las inmediaciones de Cuernavaca, capital del estado de Morelos, se encuentra la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Civac), la cual fue fundada en 1963 por la Sociedad de Profesionales del Estado de Morelos, en coordinación con el Gobierno del Estado, con el nombre de Pro-Ciudades Industriales Completas, S.A. (PROCICSA). Este organismo actualmente se administra a través de un fideicomiso creado por el Gobierno del Estado.

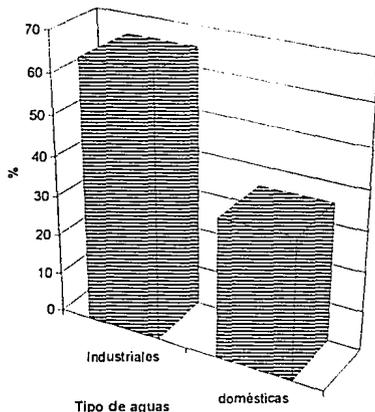
La Civac cuenta con un área habitacional, comercial y de servicios, y en ella se han establecido empresas fabricantes de productos químicos, farmacéuticos y de tocador, artículos de plásticos, maquinaria y herramientas metálicas, aparatos eléctricos y electrónicos, textiles, instrumental médico, placas presensibilizadas para la industria gráfica, muebles, zapatos deportivos y la industria de la rama automotriz (terminal y auxiliar), entre otras.

Con el objeto de controlar la contaminación causada por las aguas residuales procedentes de las plantas industriales, se organizó una empresa mixta (gobierno e industria) que es la encargada del manejo y tratamiento de las mismas. Esta empresa llamada Eccaciv (Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca) construyó a principios de la década de los 70's, una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Jiutepec, que opera con los recursos económicos generados por el cobro del tratamiento del agua de la industria (para mayor información, referirse al apéndice A.1).

De acuerdo con la información recabada en la planta Eccaciv, el 65% de las aguas residuales que le llegan, provienen de los procesos industriales y un 35% son de origen doméstico, incluyendo las aportaciones sanitarias de las propias industrias (fig. 1.1). Sin embargo, el diseño de los colectores generales provoca que en época de lluvias las aguas pluviales se mezclen con las residuales, aumentando así la cantidad de agua que llega a la planta de tratamiento. Se diseñó para operar eficientemente con una variación en el caudal a tratar de 140 a 570 L/seg, considerando que la calidad de las aguas tratadas permitiera utilizarlas totalmente para riego agrícola. Sin embargo, la capacidad instalada no ha sido suficiente para tratar de manera eficaz los volúmenes de aguas mezcladas que se reciben, por lo que parte de ellas se desvía sin tratamiento hacia el arroyo Puente Blanco, antes de recibir las aguas tratadas.

La planta utiliza un proceso denominado "lodos activados", que básicamente se lleva a cabo en dos fases: en la primera, el agua recibe un tratamiento biológico (microorganismos aerobios), durante el cual se oxidan los compuestos orgánicos disueltos o suspendidos del agua residual y se convierten a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y material celular, con lo que se producen partículas sólidas. En la segunda, se realiza la separación de la fase acuosa (agua parcialmente tratada) de las partículas sólidas.

**Fig. 1.1. Proporción de aguas residuales que llegan a la planta Eccaciv**



A estos residuos sólidos, remanentes del proceso de tratamiento de aguas de desecho, se les llaman "lodos residuales", los cuales están compuestos por la materia orgánica residual no convertida, microorganismos, elementos no biodegradables y/o potencialmente tóxicos y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas que se han removido durante el tratamiento.

La composición específica de los lodos depende de las características particulares del tipo de agua residual que se somete al tratamiento. Presentan una apariencia desagradable (color grisáceo) y mal olor. Además son putrescibles ya que entre otros componentes, contienen fragmentos de desperdicios sólidos y fecales.

Esta planta produce aproximadamente 20 ton/día de lodo, con un contenido de sólidos de aproximadamente 20% (4 ton/día en base seca). Originalmente se había pensado disponer los lodos ya secos en terrenos aledaños, para lo cual se construyeron lechos de secado con un fondo de grava y arena. No obstante, nunca se logró que los lodos se secaran por evaporación solar, pues durante la operación de la planta de tratamiento, se adicionaban sales de aluminio para favorecer la floculación de los lodos. Con el agua se formaba hidróxido de aluminio, el cual no solamente adsorbía los contaminantes sino también las moléculas de agua, evitando la evaporación de las mismas.

Cuando la cantidad de lodos húmedos acumulada en los patios fue muy grande, la empresa los envió a depositar (a cielo abierto) sin ningún tratamiento previo, a tiraderos cercanos. Durante las épocas de lluvias, los escurrimientos de los depósitos se encausaban hacia los campos de cultivo cercanos, causando el enojo de los

ejidatarios. Además, los lodos provocaban malos olores, y la presencia de grandes cantidades de moscas y otros organismos nocivos en el área, afectando la calidad de vida de los vecinos. Después de un tiempo se presentaron diversas quejas ante las autoridades municipales, estatales y federales, para que se resolviera el problema, por lo que la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (Sedue) exigió a la Eccaciv la búsqueda de mejores alternativas para la disposición final de los lodos residuales, de tal forma que evitara dañar al ambiente y a la población.

Posteriormente se consideró a la incineración como la solución más viable, pues en los alrededores se encuentra asentada una planta productora de cal que cuenta con hornos de alta temperatura donde podían incinerarse los lodos residuales. Se esperaba que el aluminio, presente en los lodos, mejoraría la propiedad hidráulica del producto, aumentando su precio. Sin embargo, a las temperaturas de operación de los hornos, los compuestos orgánicos pueden formar compuestos gaseosos que contaminan la atmósfera como NOx, SOx, dioxinas, entre otros y la planta no cuenta con filtros para este tipo de gases. Además, la cal que se produce se utiliza también para la elaboración de tortillas, por lo que no era posible quemar un material residual potencialmente tóxico junto con el óxido de calcio que posteriormente podría ser utilizado en la alimentación humana.

Para poder tratar térmicamente los lodos, era necesario comprar un incinerador especial, pero el costo del equipo incluyendo los filtros para el control de las emisiones atmosféricas, así como la obligación de depositar en un confinamiento controlado las cenizas (norma oficial NOM-CRP-001-ECOL/93 de fecha 22 de octubre de 1993), fueron factores suficientes para desechar esta opción.

Esperando resolver el problema, la empresa Eccaciv solamente recolectó sus lodos de los tiraderos y los transportó a un basurero a cielo abierto que estaba ubicado a mucho mayor distancia de la planta de tratamiento, en el ejido Tetlama al oeste del estado de Morelos (fig. 1.2). No obstante, los lodos formaron acumulaciones pantanosas que dificultaban las labores de los pepenadores y fueron causa de que varios animales se hundieran. Asimismo, en forma análoga a lo que sucedía en los anteriores sitios de disposición, se originaron escurrimientos que afectaban a los terrenos aledaños y a un arroyo cercano. Como la problemática continuaba, así como la presión de las autoridades, desde hace aproximadamente tres años, en lugar de depositar los lodos a cielo abierto, se empezaron a cubrir con tierra que se obtiene del mismo sitio de disposición (relleno sanitario).

La vegetación del sitio de disposición es selva baja caducifolia, la cual se está destruyendo porque van excavando hacia la parte superior del cerro Colotepec (lugar donde se encuentra ubicado el relleno sanitario), donde se localiza la vegetación natural. El transporte no cumple con las normas técnicas ecológicas vigentes, por lo que se diseminan lodos biológico-infecciosos (peligrosos de acuerdo a la norma oficial NOM-CRP-001-ECOL/93), contaminando carreteras y poblados. Los lodos no se

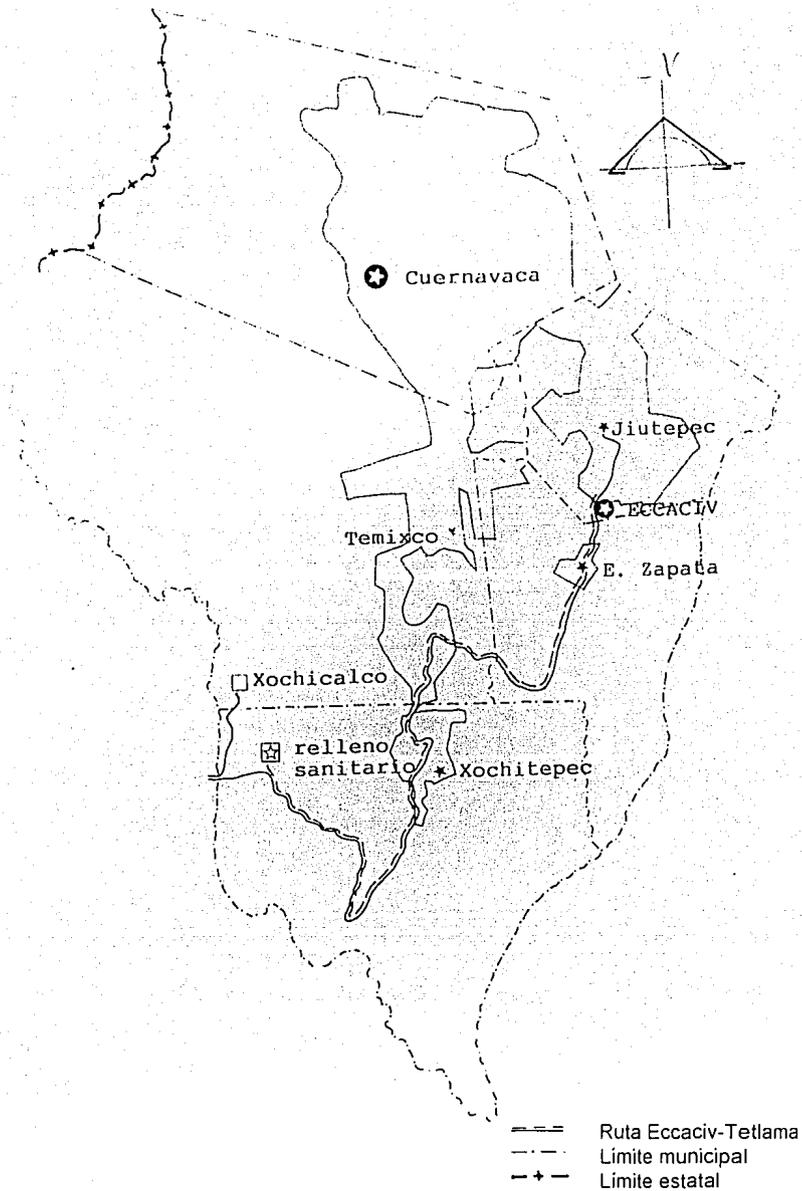


Fig. 1.2. Localización del relleno sanitario al oeste del estado de Morelos

cubren adecuadamente (se pueden observar a simple vista después de haber sido cubiertos), por lo que proliferan moscas y otros organismos.

Además de la contaminación del subsuelo y cuerpos de agua superficiales, aunado a los problemas sanitarios, hay que considerar los costos de transporte y renta del terreno que se paga a los ejidatarios de Tetlama, los cuales encarecen el proceso de disposición.

Estos problemas no son exclusivos de esta planta de tratamiento, sino que con algunas variaciones se repiten en casi todas las plantas que se han instalado a lo largo de la República Mexicana, por lo que el estudio de la problemática y el planteamiento de soluciones resultan de gran importancia. En el país se cuenta con 403 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad total instalada de 30 m<sup>3</sup>/seg, de los cuales se envían 18 m<sup>3</sup>/seg a 226 plantas que tratan aguas residuales municipales y 12 m<sup>3</sup>/seg a 177 que depuran aguas residuales industriales. No obstante, sólo se tiene capacidad para tratar el 5.54% del total de las aguas residuales generadas (Arroyo y Molina, 1990).

De acuerdo a DGACSH-SARH (1985) las principales plantas de tratamiento (cuatro municipales y tres industriales) generaban en ese año 222,176 ton/año de lodos. Sin embargo, no existe información disponible sobre la cantidad de lodos producidos en todo el territorio nacional, por lo que de acuerdo a un cálculo aproximado, realizado con base en la cantidad de agua tratada diariamente, en el promedio nacional de la concentración de los sólidos disueltos y suspendidos totales; y en el intervalo de la eficiencia de remoción de las plantas de tratamiento, se estima que se generan entre 28,013,428 a 84,040,286 ton/año.

A pesar de que la normatividad ambiental vigente considera a los lodos como residuos peligrosos (NOM-CRP-001-ECOL/93, Diario Oficial de la Federación del 23 de octubre de 1993) y obliga a transportarlos, manejarlos y disponerlos adecuadamente; en México, ninguna planta depuradora de efluentes cuenta con sistemas para el tratamiento, estabilización y disposición de los sólidos generados sino que principalmente se disponen a cielo abierto, se envían a basureros o se descargan en barrancas o alcantarillado. Estas prácticas inadecuadas se realizan posiblemente porque las empresas que instalan los tratamientos de aguas residuales no han informado sobre la magnitud de la contaminación que generan los lodos, o simplemente por el deseo de ahorrar

costos en la inversión y en el mantenimiento (de acuerdo a Lester, 1987b aproximadamente el 60% del costo de inversión total, corresponde a la operación del manejo de los lodos)

A futuro según se aumente la capacidad de tratamiento de las aguas residuales, y a pesar de efectuar compras de tecnología avanzada, se resolverá el problema de las aguas residuales, pero, de no lograr la aplicación de la normatividad y contar con

sistemas para el manejo adecuado de los lodos, se producirá una severa contaminación del ambiente, incluyendo suelos y aguas superficiales y subsuperficiales.

Este estudio se planeó para coadyuvar en el esfuerzo de resolver la problemática nacional, aunque su principal objetivo fue el de:

Proponer opciones viables para el manejo y disposición de los lodos residuales de la Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de Civac, considerando las condiciones geográficas, socioeconómicas y políticas actuales. Principalmente se buscó establecer opciones que contemplaran su uso, minimizando los impactos negativos sobre el ambiente.

Para el logro de dicho objetivo, se consideraron las siguientes metas y actividades:

- realizar una investigación documental sobre técnicas para la disposición de lodos
- seleccionar las tecnologías de menor impacto y que sean adecuadas a las condiciones de la planta en estudio
- muestrear periódicamente los lodos residuales generados en la planta de tratamiento
- caracterizar los lodos mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos,
- plantear la(s) solución(es) acorde(s) con la composición de los lodos
- realizar experimentos para fundamentar la opción de solución seleccionada
- establecer condiciones de operación de la tecnología experimentada

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1. Descripción del área de experimentación

#### 2.1.1. Aspectos geográficos

La planta de tratamiento y los sitios de los experimentos de este estudio se localizan en el municipio de Jiutepec, estado de Morelos, con 49.028 km<sup>2</sup>, que representan el 0.99% del total estatal. Se encuentra localizado entre las coordenadas 18° 51' de latitud norte y 99° 11' de longitud oeste. Su altitud es de 1355 msnm. Colinda al norte con los municipios de Cuernavaca y Tepoztlán; al sur con el municipio de Emiliano Zapata; al este con el municipio de Yautepec y al oeste con el municipio de Cuernavaca (SARH, 1987) (fig. 2.1). Tiene una temperatura media anual de 21°C, mínima de 10°C y máxima de 39°C. La precipitación pluvial se concentra de mayo a octubre y oscila entre 720 y 820 mm, que representa el 90% de la precipitación media anual (Guerrero, 1993).

Este municipio es atravesado por una corriente que nace dentro de Tepoztlán, que recoge aguas del manantial "Las Fuentes" y se une con arroyos de caudal permanente (arroyo de "Las Fuentes" y arroyo "Puente Blanco"); manantiales de "San Gaspar" y "Guauchiles"; laguna de "Ahuayapan" y laguna de "Tejalpa" (fig. 2.2).

Los principales recursos no renovables de la zona centro-sur de Jiutepec, son los agregados pétreos tales como la caliza, arena, grava y tezontle.

De las actividades primarias, la principal es la agricultura. Se dedican a esta actividad 7,922 hectáreas, de las cuales 1,631 son tierra de labor, 523 de pastos, 2951 de bosques y el resto a otros usos no debidamente especificados.

#### 2.1.2. Uso del suelo

Los suelos utilizados para la agricultura, en 1988 ocuparon 1,430 hectáreas, esto es, el 29% de la superficie del municipio. Se identifican tres combinaciones edáficas, mismas que se describen a continuación (Guerrero, 1993):

- a) Vertisol pélico + feozem háplico con textura fina, que ocupa el 87.4 % de los suelos de uso agrícola-pastizal. Son suelos gris oscuro, muy arcillosos; presentan una capa superficial de tono oscuro rica en materia orgánica y nutrimentos. La textura fina de esta combinación edáfica, presenta acumulación de arcilla, propicia un mal drenaje, una baja aireación y una deficiente circulación de fertilizantes; sin embargo, retiene la humedad mejor que otras texturas. La carencia de una fase física (pedregoso, lítico, etc.), permite el empleo de maquinaria agrícola.
- b) En el 12.6% de los suelos de uso agrícola-pastizal, se tienen dos combinaciones edáficas, integradas por suelos de rendzina que son poco profundos, subyacen

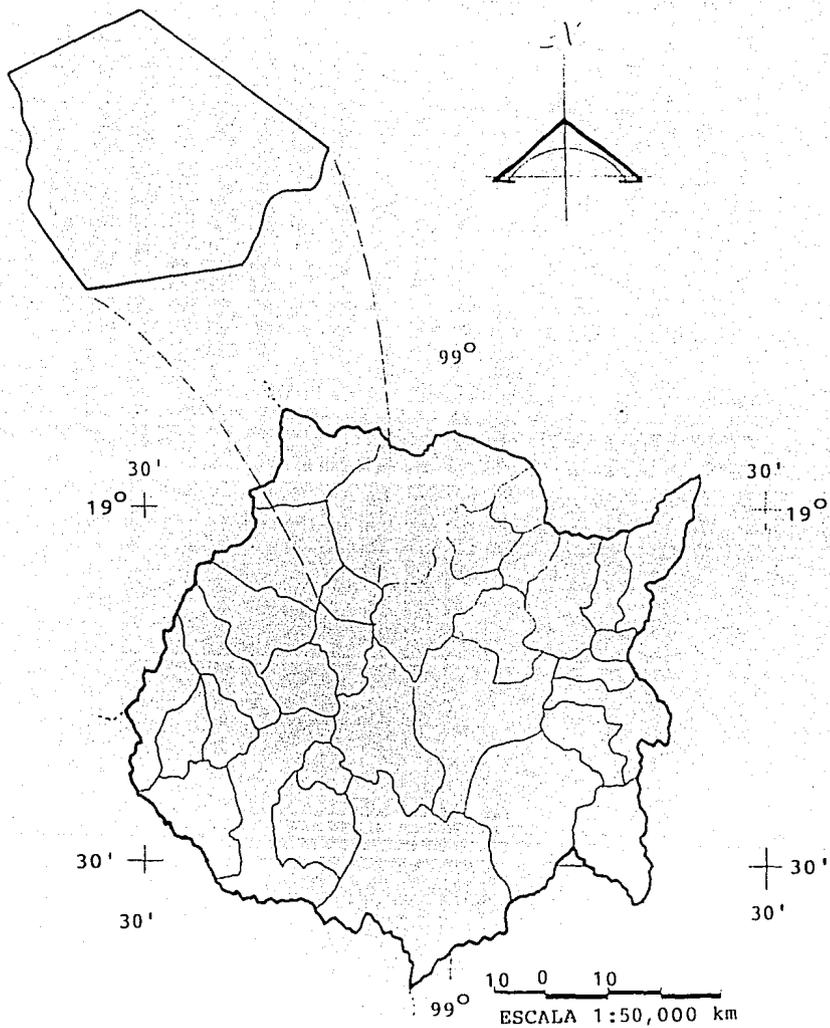


Fig. 2.1. División municipal del estado de Morelos y localización del municipio de Jiutepec

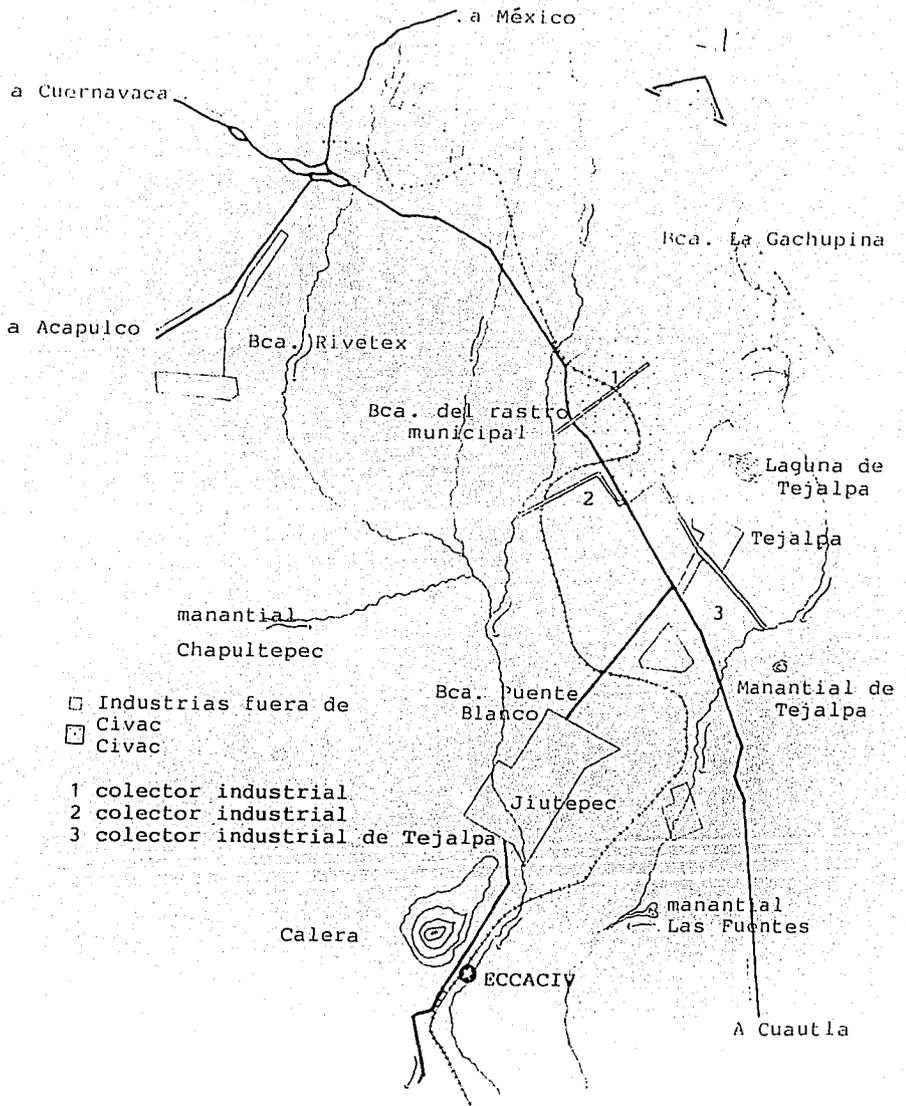


Fig. 2.2. Ubicación de la planta Eccaciv y localización de los arroyos de la zona industrial del valle de Cuernavaca

sobre material calcáreo, fértiles, con abundante humus. Como suelos secundarios se tiene un litosol de escasa significación local en la actividad agropecuaria, su textura fina, origina que sean suelos arcillosos difíciles de laborar. Adicionalmente la fase lítica que se aprecia por la presencia de fragmentos de roca en los horizontes superiores del suelo, limita el empleo de maquinaria agrícola.

- c) La tercera combinación, feozem háplico + vertisol pélico, fueron expuestos en la combinación a), pero en otro orden. Por su textura media y carencia de fases físicas, es la combinación más positiva para la agricultura con riego.

El 10.74% de la superficie del municipio, presenta problemas de erosión fuerte. En pastizales y terrenos de temporal con pendientes de más de 15%, existe erosión acelerada; el 48.35% presenta erosión moderada. Está constituido por terrenos de riego degradados por pérdida de nutrimentos y por salinización provocada por la utilización de aguas de riego de baja calidad. Existe contaminación del agua tanto superficial como subterránea por desechos industriales, por la invasión de áreas de recarga de acuíferos por asentamientos humanos y por las descargas de los desechos de las áreas urbanas. Más del 30% de la superficie agrícola presenta problemas de contaminación de suelo por irrigación de aguas residuales industriales y por basureros a cielo abierto (INEGI, 1990).

La zona del valle se caracterizaba por una agricultura comercial, bastante dinámica de flores, arroz, maíz, caña de azúcar, cacahuete y hortalizas, principalmente. Actualmente sólo se cultiva maíz y caña de azúcar. También es importante la explotación de calizas y otros materiales para construcción. Resulta interesante hacer notar, que la expansión de fraccionamientos para unidades residenciales, a expensas de buenos terrenos de cultivo (por ejemplo, San Gaspar y Las Fuentes), está afectando en buena medida la estructura agraria tradicional.

### **2.1.3. Población**

La población del municipio para 1989, era de 214,541 habitantes y de subsistir los factores de crecimiento observado a la fecha, la perspectiva de población para el año 2,000 es de 1,174,612 habitantes.

### **2.1.4. Geología/Geomorfología (Aguilar 1990 e INEGI, 1990)**

Desde el punto de vista de la estructura geológica, el valle corresponde a un sinclinal (depresión tectónica) y las estructuras montañosas vecinas a dos anticlinales (bloque elevado tectónico), originados en los inicios del terciario.

Las rocas sedimentarias son calizas y lutita-areniscas, todas del cretácico. Ambas estructuras montañosas se presentan muy fracturadas y erosionadas. La erosión ha afectado especialmente a la unidad de lutitas, relativamente menos resistentes que las calizas.

El valle y el anticlinal del occidente fueron parcialmente cubiertos por coladas lávicas y presenta una morfología de plana a ligeramente ondulada, con una pendiente de norte a sur muy suave (aproximadamente 2% o bien 1 grado). Esta morfología está asociada básicamente a las coladas basálticas que, pese a su juventud, están bastante alteradas.

En la actualidad, el valle está siendo re TRABAJADO por algunas corrientes fluviales que están cortando la lava cuaternaria y han depositado algunas terrazas de material fino (arenas, limos, arcillas), de no más de un metro de espesor.

Del anticlinal del occidente, los elementos distintivos del relieve, que no fueron sepultados por las lavas, son dos cerros calizados, actualmente explotados como canteras. El anticlinal del oriente presente una típica fisonomía de sierra y las dos unidades de roca (caliza y lutita-arenisca) que la componen, están en contacto mediante una falla regional que se evidencia en el terreno por un escape de gran magnitud.

## **2.2. Características de la planta de tratamiento (Salazar, 1991)**

La planta de tratamiento de las aguas residuales de Civac, se localiza a unos 500 m al sur de la localidad de Jiutepec, estado de Morelos y unos 100 m al este de la carretera a Emiliano Zapata, entre las vías del ferrocarril a Zacatepec y un pequeño curso de agua que escurre de norte a sur (fig. 2.2).

La planta está ubicada sobre un antiguo valle precuaternario orientado de noreste a sursuroeste, que luego fue ocupado por coladas de lava basáltica fluida del cuaternario y reciente. Estas lavas ocuparon la depresión y se desplazaron aproximadamente de norte a sur, siguiendo la disposición del valle. Este valle así modificado, tiene a la altura de la planta, un ancho de aproximadamente 2 km, está flanqueado por estructuras montañosas de rocas sedimentarias marinas, básicamente cretácicas, que también guardan una alineación aproximada de norte a sur. La altitud media del valle es de unos 1300 msnm., mientras que en las montañas vecinas se alcanzan los 1700 m al oriente y los 1500 m al occidente, en promedio.

Las empresas que utilizan los servicios de la Eccaciv se encuentran descritas en el cuadro 2.1 así como el giro al que se dedican. Todas ellas se encuentran conectadas a la planta tratadora por medio de intersiduales y un colector general (fig. 2.2), para enviar sus aguas contaminadas hasta las compuertas que controlan la entrada de líquido a la planta. Estas compuertas también pueden modificar el curso de las aguas desviándolas sin tratamiento hacia la barranca Puente Blanco.

Como ya se mencionó, la composición de las aguas residuales que llegan a través del emisor a la planta de tratamiento, son en un 65% de origen industrial y un 35% de origen doméstico, considerando en estas últimas las aportaciones sanitarias de las propias industrias, además de que en época de lluvias las aguas pluviales se mezclan

con las residuales, aumentando así la cantidad de agua que llega a la planta de tratamiento (no se tiene el dato de la cantidad que aumenta, ya que dependerá de la cantidad de agua de lluvia que precipita).

El tratamiento se inicia (fig. 2.3), con el paso de las aguas por rejillas de aproximadamente tres centímetros por lado para retener los residuos sólidos flotantes (de acuerdo a Salazar, 1990, estos residuos se mezclan con el resto de los sólidos para formar parte de los lodos residuales).

Enseguida el agua pasa por los desarenadores que funcionan alternadamente; de aquí pasa a los tanques de sedimentación primaria, donde se separa por gravedad la fracción sedimentable de los sólidos que contienen dichas aguas (70% materia inorgánica y 30% orgánica), los que se acumulan en tolvas colocadas en los extremos de los tanques, por la acción mecánica de rastras de madera.

Los lodos crudos así depositados, se extraen de los tanques por gravedad y carga hidráulica, y se conducen al tanque digestor de lodos para su tratamiento. El agua efluente de los sedimentadores primarios pasa a los tanques de regulación, los cuales funcionan como reguladores de flujo, con un gasto de 215 litros por segundo y con una tolerancia de más o menos 20 litros por segundo.

Asimismo, las rastras de madera remueven la materia flotante, como grasas y aceites, las que son recolectadas en unas canaletas al final de cada unidad. La eficiencia de remoción de materia orgánica es del 20 % aproximadamente y de 80 % en grasas y aceites (no se cuantificó la cantidad de grasas y aceites).

En los tanques amortiguadores, para "precipitar" el material disuelto biodegradable, se inicia la aireación del agua y se realiza la inoculación de microorganismos mediante la recirculación de lodos biológicos activados. El tratamiento biológico de las aguas ocurre esencialmente en el tanque de aireación y en esta etapa se reduce la materia orgánica biodegradable disuelta, generalmente medida como demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ). En menor proporción ocurre la oxidación directa de compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que reduce la demanda química de oxígeno (DQO), que es una medida global de toda la materia orgánica e inorgánica biodegradable o no, disuelta en el agua residual.

Por medios mecánicos se propicia la transferencia de oxígeno entre el aire y el agua. Esta aireación es necesaria para la supervivencia de los microorganismos aerobios y su actuación sobre la materia orgánica contenida en el agua residual. Además, proporciona el mezclado del reactor.

**Cuadro 2.1. Industrias que utilizan los servicios de la Eccaciv (CNA, 1993).**

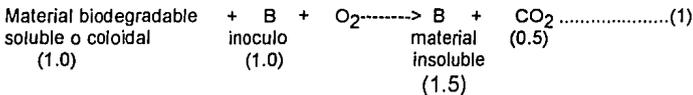
Industria	Giro	Gasto L/seg
ASINEC S.A.	Planta de tratamiento de aguas	0.18
ABEM CONTROLES S.A	elaboración de alambres	0.05
ACABADORA DE GASA S.A.	blanqueado de fibras textiles	---
ALUCAPS MEXICANA S.A.	fabricación de material de artículos de plástico	0.434
ALUPLAST S.A. de C.V.	fabricación de material de artículos de plástico	0.306
AVÍOS/TELARES S.A. de C.V.	fabricación de productos metálicos	---
BASF VITAMINAS S.A. de C.V.	industria química	---
BEECHMAM DE MÉXICO S.A. de C.V.	fabricación de perfumes, cosméticos y otros productos	1.40
BUCKMAN LABORAT. S.A. de C.V.	fábrica de productos químicos	0.006
CABLES AUTOMOTRICES S.A.	elaboración de alambres	---
CEMENTOS PORTLAND S.A. de C.V.	fabricación de cemento, cal, yeso	0.014
CERILLERA MORELENSE S.A.	fabrica de cerillos y fósforos	0.009
CHRISTIANSON S.A. de C.V.	fabrica de petroquímicos básicos	0.26
COLOIDE MEXICANA S.A. de C.V.	fabrica de accesorios y suministros	1.80
COLORANTES XOCHI S.A. de C.V.	colorantes y pigmentos	0.05
CONVERSE ESTRELLA S.A. de C.V.	calzado de tela con suela de hule	0.100
DOMINICS S.A. de C.V.	reparación de maquinas eléctricas	0.006
ESQUIM S.A. de C.V.	industria química	3.00
EMAPRIM S.A. de C.V.	industria química	0.05
GIVAUDAN DE MÉXICO S.A. de C.V.	aditivos para alimentos	2.44
GRÁFICA INDUSTRIAL MEXICANA S.A. de C.V.	placas litográficas	0.30
HAZEL AZTECA S.A. de C.V.	productos de cuero y piel	5.80
INDUSTRIAS PARMAL S.A. de C.V.	perfumería, cosméticos y artículos de tocador	0.264
JUNTAS DE EXPANS S.A. de C.V.	productos metálicos	0.004
KS DE MORELOS S.A. de C.V.	artículos de plástico	0.228
LABORATORIOS IMPERIALES S.A. de C.V.	productos farmacéuticos y medicamentos	0.277
LABORATORIOS JULIAN S.A. de C.V.	productos químicos	4.44
LABORATORIOS LEPETIT S.A. de C.V.	productos farmacéuticos y medicamentos	0.40
METAL KEMM S.A. de C.V.	artículos de plástico	1.00
MOLÉCULAS REARREGLADAS DE MÉXICO	productos manufacturados no clasificados	---
NEC DE MÉXICO S.A. de C.V.	ensambles partes electrónicas	0.160
NACIONAL ALGODONERA S.A. de C.V.	industrialización de algodón	0.003
NISSAN MEXICANA S.A. de C.V.	ensamble de automóviles	17.20
NOBILIS LEES S.A. de C.V.	fibras textiles	7.48
ORSABE S.A. de C.V.	productos químicos	1.41
PENNWALT S.A. de C.V.	productos químicos	0.41
PRINTEK S.A. de C.V.	películas/estambres color	0.065
PARKER MEXICANA S.A. de C.V.	artículos de escritura	---
PHARMA-TAP S.A. de C.V.	productos de hule y plástico	0.30
POLIGAE MEXICANA S.A.	fábrica de hilos	1.50
POND'S DE MÉXICO S.A. de C.V.	perfumería, cosméticos y artículos de tocador	2.46
PORCELANA DE CUERNAVAÇA S.A. de C.V.	artículos de porcelana	0.20
PROCESADORA DE AVES S.A. de C.V.	matanza y procesamiento de aves	1.81
PRODUCTOS ALIMENTICIOS EL SUPREMO	cereales y otros granos	0.003
QUÍMICA MEXAMA S.A. de C.V.	productos químicos	57.55

**Cuadro 2.1. continuación**

RAFFIA S.A. de C.V.	materiales y artículos de plástico	0.006
REQUIMEX S.A. de C.V.	productos químicos	0.80
SELEMEX S.A. de C.V.	película de polivinilo	1.10
SYNTEX S.A. de C.V.	productos químicos	13.00
TAMACANI S.A.	fibras textiles	0.125
TELEGABINETES DE MÉXICO S.A.	muebles de madera	0.03
TERMOHIDRAULICA S.A. de C.V.	instalación y reparación de equipo hidráulico	0.025
TEXTILES SAN ANDRÉS	fibras textiles	4.95
UPJOHN S.A. de C.V.	productos farmacéuticos y medicamentos	0.85
VECO S.A. de C.V.	equipos para purificación de aire	0.01
VALVULAS JET S.A. de C.V.	válvulas de mariposa	---
WESTFALIA SEPARATOR MEXICANA	maquinaria para la industria alimentaria	0.03
	TOTAL	130.51

La cantidad total que se muestra al final del cuadro, corresponde a 57 industrias, de las cuales no se encontraron datos sobre 7 de ellas. Sin embargo, de acuerdo a los datos reportados por la CNA (1993), se encuentran conectadas a la Eccaciv un total de 63 empresas, sin que aporte los datos de las 13 industrias restantes que aquí no se incluyen. Asimismo, reporta que la planta tiene una capacidad instalada de 17,280 m<sup>3</sup>/día, con un volumen actual de tratamiento de 16,416 m<sup>3</sup>/día (la suma de las empresas que aquí se presentan, arroja una cantidad de 130.51 L/seg, que equivalen a 11,276.15 m<sup>3</sup>/día).

En el reactor se desarrollan grandes poblaciones de microorganismos, principalmente bacterias, bajo condiciones aerobias, oxidando los compuestos orgánicos disueltos o suspendidos biodegradables, presentes en el agua residual y convirtiéndolos en dióxido de carbono, agua y material celular (ecuación 1).



Estas bacterias y otros microorganismos, como ya se dijo antes, forman agregados o flóculos en un proceso conocido como floculación. Para finalizar el tratamiento, las aguas pasan a través de sedimentadores secundarios donde, para separar los microorganismos de manera más eficiente, se aglutinan con algunos metales (como el aluminio), se separan del flujo y se sedimentan. De esta manera resultan aguas tratadas y lodos residuales. Las aguas son descargadas al arroyo Puente Blanco y reutilizadas para riego agrícola.

Los lodos residuales están constituidos por los sólidos retenidos en las rejillas, en los sedimentadores primarios y en los secundarios. Son transportados por carga hidráulica hacia el digestor de lodos, que es un tanque provisto de agitadores mecánicos donde continúa la descomposición aerobia y la oxidación directa de materia orgánica e inorgánica. Es frecuente que, en la parte superior de este tanque, se separen lodos superficiales que contienen microorganismos jóvenes activos y aerobios que son bombeados a los tanques amortiguadores y de preaireación para inocular el agua a tratar.

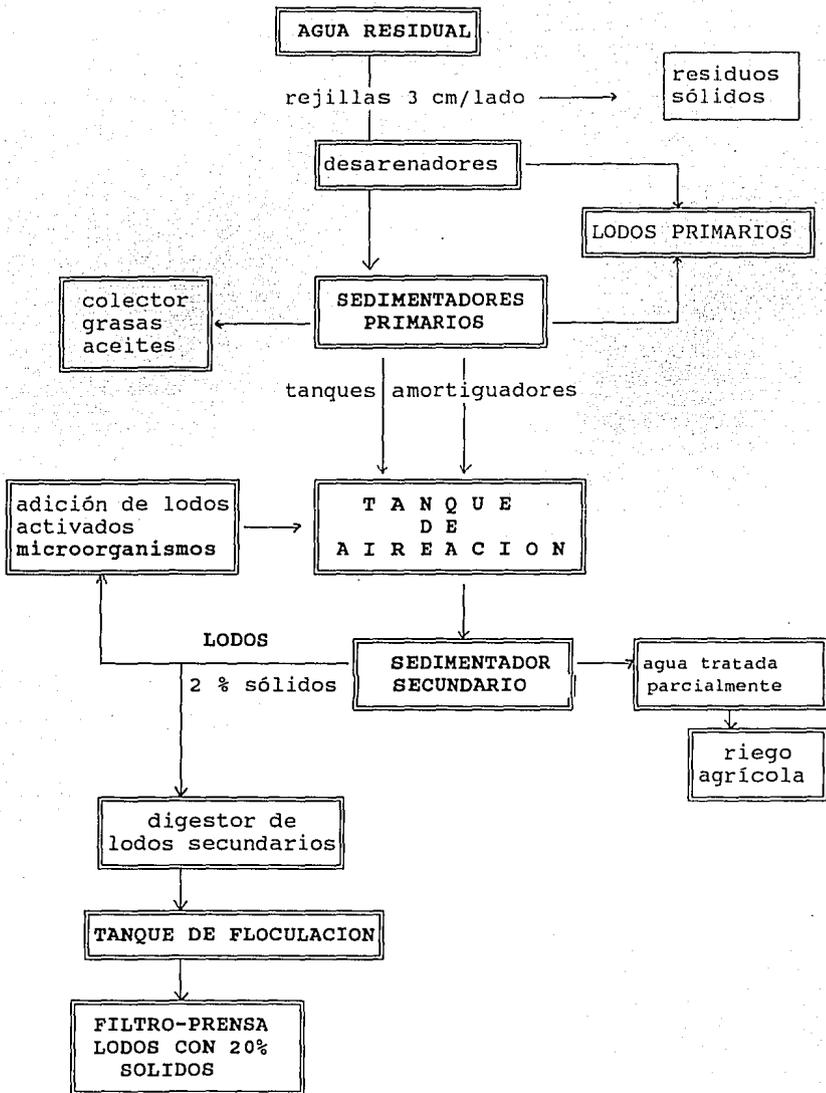


Fig. 2.3. Esquema del proceso de tratamiento de la planta Eccaciv

Los agitadores se detienen dos veces al día para permitir la sedimentación de los lodos. De esta manera se retiran 230 m<sup>3</sup>/ día de lodos, con un contenido de sólidos de 2% (4.6 ton/día en base seca). El lodo residual pasa con flujo continuo por una tubería y para flocularlo se le adicionaba sulfato de aluminio, mismo que posteriormente se sustituyó por una resina orgánica de nombre comercial NALCO (poliacrilamida). Luego el lodo pasa al tanque de floculación donde por atracción electrostática se forman conglomerados capaces de ser retenidos por filtración.

Los lodos floculados pasan por filtros de bandas continuas, donde por escurrimiento y compresión el líquido se separa de los sólidos y es retornado a los tanques de tratamiento. Al final del equipo filtrante, los lodos aún húmedos pasan a una banda transportadora y a la tolva de almacenamiento temporal.

Inicialmente la planta denominada Eccaciv construyó unos lechos de secado con el fondo de grava y arena para lograr una filtración y perder la mayor cantidad de agua; ésto no fue posible por el contenido de aluminio que retiene al agua. Posteriormente, el destino final de los lodos fueron los terrenos aledaños a la planta de tratamiento y basureros clandestinos a cielo abierto. En todos los casos, se pudieron haber producido lixiviados que drenaran hacia el suelo y los mantos acuíferos, ya que, el material geológico del lugar es permeable y con fracturas (fig. 2.4).

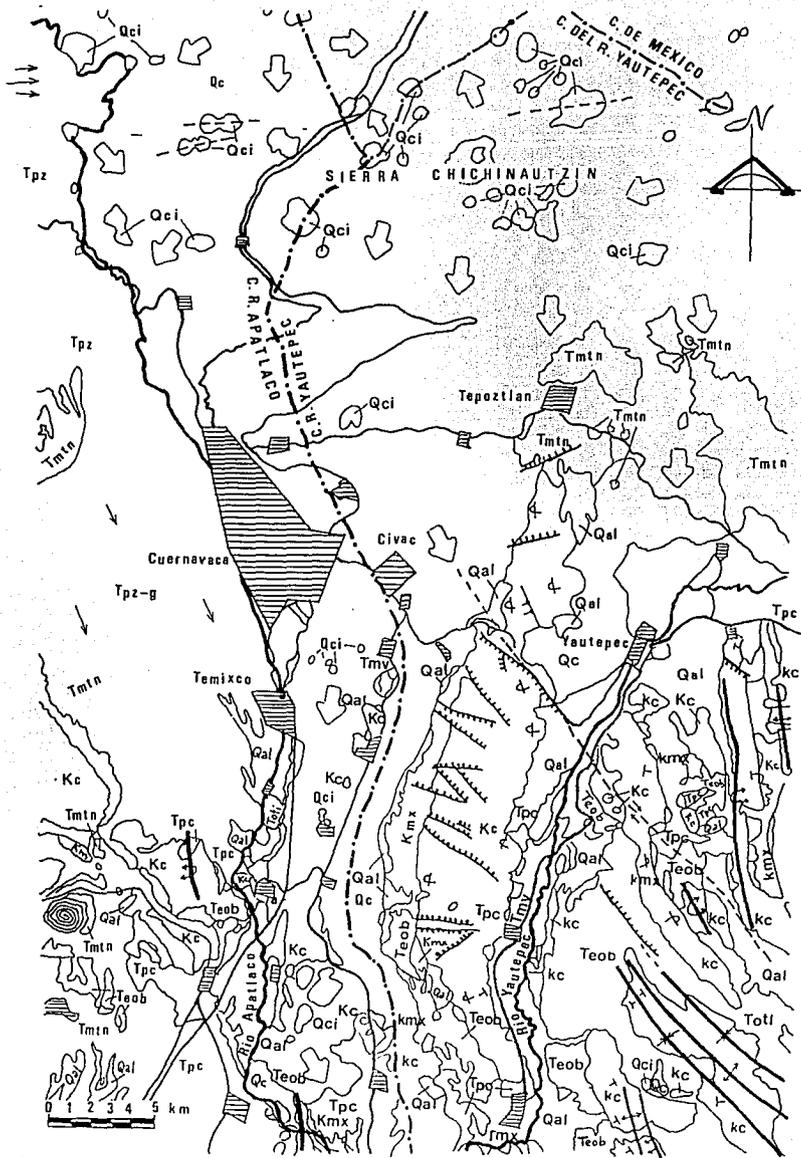


Fig. 2.4. Hidrogeología del estado de Morelos (Jaimes, 1991)

## EXPLICACIÓN

### ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS Y SEDIMENTARIAS

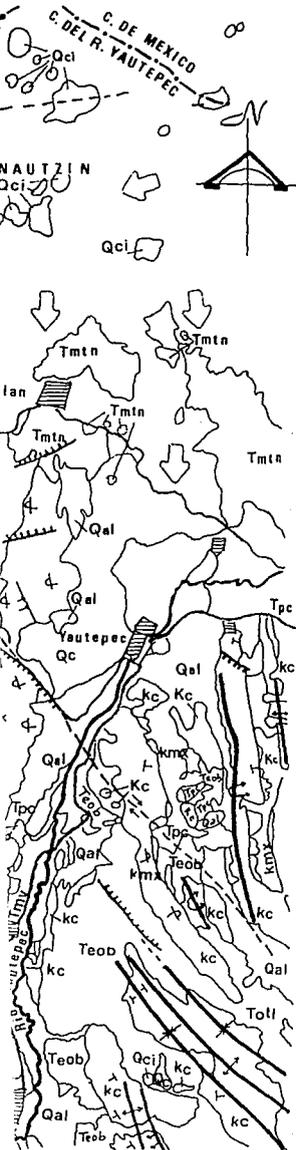
- Qal.** Aluvión. Con depósitos locales de cenizas volcánicas travertina y margas. Acuífero, permeabilidad debido a la porosidad
- Qc.** Formación Chichinautzin, lavas andesíticas muy densas en algunos lugares y lavas muy extensas y cavernosas intercaladas con tufa de caliza libre en otros lugares. Zona de recarga en la sierra del mismo nombre, acuífero fracturado en la parte baja de las cuencas.
- Qci.** Conos sineríticos y de escoria, pertenecientes a la formación Chichinautzin.
- Tpc.** Material clástico del Plioceno, posiblemente provenientes de los cauces fluviales que drenaban la cuenca de México, se incluye aquí parte de lo que se ha denominado "Formación Cuernavaca", que consta de conglomerado, material aluvial, travertino, margas y yeso. Acuífero granular, permeabilidad debido a porosidad, transmisividad muy variable de media a alta.
- Tpz.** Formación Zempoala: derrames lávicos interestratificados con flujos piroclásticos, tobas, brochas volcánicas y lahares de composición que varía de andesítica a riodesítica. Esta unidad es en la porción de las interestratificaciones, zona de recarga y en los flujos piroclásticos que se interdigitan con Tpc, un multiacuífero con dos niveles principales. Su permeabilidad varía por ser un medio fracturado, intercalado con otro granular.
- Tmv.** Rocas volcánicas del Mioceno, derrames lávicos de composición andesítica y desítica. Unidad permeable por fracturamiento con pocos afloramientos.
- Tmnt.** Formación Tepoztlán: lahares y tubos intercalados de composición andesítica, principalmente. Se explotan caudales bajos, por lo que se considera un acuífero de bajo rendimiento.
- Totl.** Riolita Tizapalita, poco permeable por tener fracturas rellenas por material de alteración.
- Tob.** Grupo Balsas: principalmente conglomerados oligomíticos de calizas, aunque se presentan en algunos sitios limolita, arenisca, lavas mágicas, margas, pedernal y yeso. Unidad permeable por fracturamiento, se considera acuífero en algunos sitios.
- Kmx.** Formación Mezcala: secuencia Flysch, constituida por limolita, arenisca y lutita y conglomerado fino. Acuífero, se le considera como capa confinante de las rocas calcáreas del Cretácico.
- Kc.** Formación Cuauhtla: caliza de estratificación variable entre delgada y gruesa, con nódulos y lentes de pedernal, abundantes fósiles silíceos en algunos estratos de las facies de banco, mientras que en las facies de plataforma, la estratificación es más delgada y escasean los fósiles. Acuífero, permeabilidad por carsticidad y fracturas. Se explotan principalmente los manantiales con caudal hasta de 90 L/seg.
- Km.** Formación Morelos. Está compuesta en su parte superior por caliza y dolomita, de estratificación mediana o gruesa, con pocos fósiles, en su parte inferior está compuesta por anhidrita. Acuífero, permeabilidad por carsticidad y fracturas. El yeso actúa como basamento hidrogeológico donde se encuentra presente.
- Kx.** Formación Xochitlaco: caliza delgada con intercalaciones de lutita y bandas de pedernal, permeable por fracturamiento, se desconoce su comportamiento acuífero.

### ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS

- Tgc.** Tronco Granítico de Coatepec: tronco de composición félsica, que intruena a la formación Xochitlaco, probablemente impermeable.

### SIMBOLOGÍA

- Contacto
- Rumbo y echado
- Rumbo y echado de estratos invertidos
- Falla normal
- Falla normal con deslizamiento lateral
- Falla inferida
- Anticlinal con línea discontinua donde está cubierto mostrando el extremo donde se clava
- Cono sinerítico
- Dirección de flujo de lava
- Sinclinal con línea discontinua donde está cubierto
- Carretera
- Poblado
- Dirección de flujo subterráneo
- Lago
- Río
- Dirección de flujo subterráneo profundo
- Divisoria de cuencas
- Divisoria de aguas subterráneas



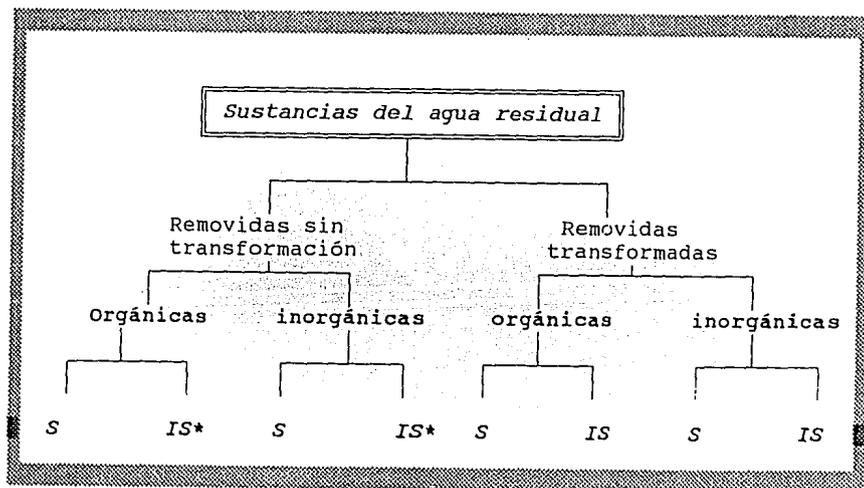
### 3. ESTRATEGIA Y FUNDAMENTOS

#### 3.1. Estrategia de trabajo

Los lodos de las plantas de tratamiento biológico contienen una gran proporción de las sustancias que se remueven de las aguas residuales. Pueden estar presentes en sus formas originales o haber sufrido transformaciones a través del tratamiento.

Por su naturaleza, las sustancias pueden clasificarse en orgánicas e inorgánicas y su peligrosidad está relacionada directamente con composición química y reactividad, concentración y disponibilidad (fig. 3.1). El efecto químico de las sustancias reactivas en los organismos se relacionan principalmente con cualquiera de los siguientes mecanismos que alteran a una biomolécula: sustitución del elemento central, sustitución de los ligantes, bloqueo de los sitios activos o precipitación de los componentes esenciales. Las sustancias inertes también causan daños ya que se depositan en diversas partes del organismo y alteran su funcionamiento.

Fig. 3.1. Clasificación de las sustancias que se encuentran en al agua residual antes y después del tratamiento (Gutiérrez y Ortiz, 1994)



\*Estables

S = Soluble

IS = Insoluble

A través del aire, agua y alimentos los elementos contaminantes pueden entrar a los organismos. Por lo tanto, cuando el aumento de la población y la producción de satisfactores disminuyeron la disponibilidad del agua potable, contaminando el agua y el suelo, fue necesario encontrar tecnologías que permitieran limpiar el entorno; especialmente el agua. Todos los procesos de purificación del aire y del agua, que hasta el momento se han desarrollado, se basan en transformar a los contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos solubles a formas sólidas insolubles y fácilmente separables por métodos físicos y a gases inocuos.

Las sustancias sólidas insolubles generadas por estos procesos, tradicionalmente se han depositado en terrenos aledaños o han sido enterradas. Sin embargo, al pasar el tiempo, los agentes naturales mediante procesos físicos, químicos y bioquímicos pueden volver a disponibilizar las sustancias peligrosas. Estas, dependiendo de su naturaleza química, pasan a la atmósfera, al suelo o a los cuerpos de agua, especialmente los profundos; introduciéndose en ocasiones a la cadena trófica, con lo cual afectan nuevamente la vida (fig. 3.2 y 3.3).

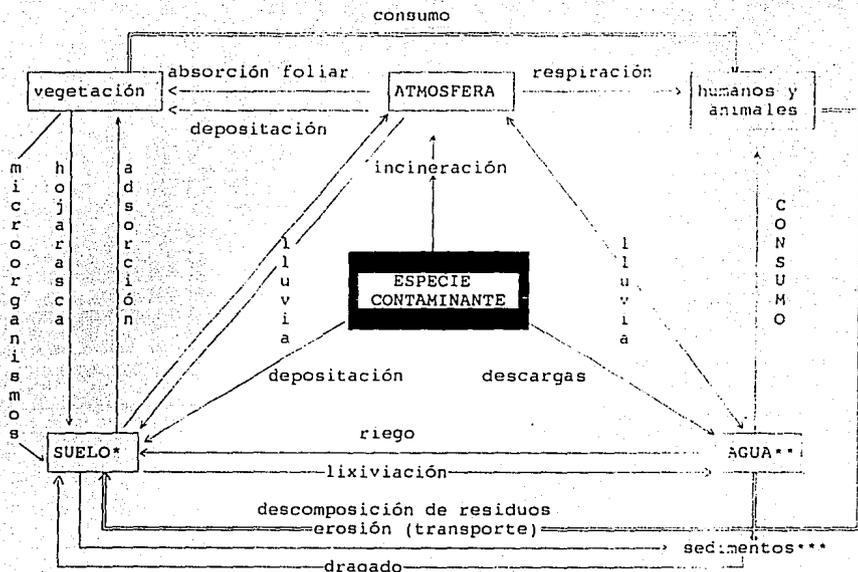
En el caso de sustancias orgánicas la peligrosidad está relacionada con las propiedades del compuesto ya que, en general, los elementos constitutivos de los mismos, no son peligrosos. Una sustancia alimenticia y una tóxica pueden tener la misma fórmula mínima por estar constituida por iguales elementos, como por ejemplo C, N, H, O, que son esenciales para la vida. El efecto de las sustancias inorgánicas, en cambio, está más relacionado con las propiedades del elemento. Tal es el caso de los metales transicionales que tienen una gran tendencia a coordinarse a través de los orbitales d, y sustituir a metales esenciales, como por ejemplo, el ion plomo que en el organismo ocupa el lugar del hierro de la hemoglobina, o el cadmio que sustituye al calcio en los huesos. La relación carga/radio, que se conoce como potencial iónico, el potencial de óxido-reducción, las propiedades ácido base y la solubilidad también influyen en las propiedades tóxicas. Por ejemplo, el ion sulfuro es muy tóxico ya que precipita a los elementos esenciales.

La cantidad que resulta tóxica, depende también de la naturaleza y reactividad del compuesto. Los compuestos orgánicos acumulativos son muy tóxicos aún en cantidades menores a los niveles de los inorgánicos (ppb y ppt).

La concentración límite en la que las sustancias inorgánicas resultan peligrosas es muy variable. Principalmente depende de la abundancia de los elementos en el ambiente, ya que las cantidades tóxicas siempre son mayores a las concentraciones disponibles naturalmente. En otras ocasiones, cuando el elemento inorgánico presenta diferentes estados de oxidación, las cantidades peligrosas de cada uno son diferentes. Un ejemplo muy completo lo constituye el cromo. Este elemento en pequeñas concentraciones y en estado de oxidación trivalente es esencial para los mamíferos ya que potencializa a la insulina, ayudando en el metabolismo de la glucosa; no obstante, si se rebasa la concentración límite o cambia su estado de oxidación a hexavalente, genera diversos problemas a los seres vivos. En obreros expuestos se han observado

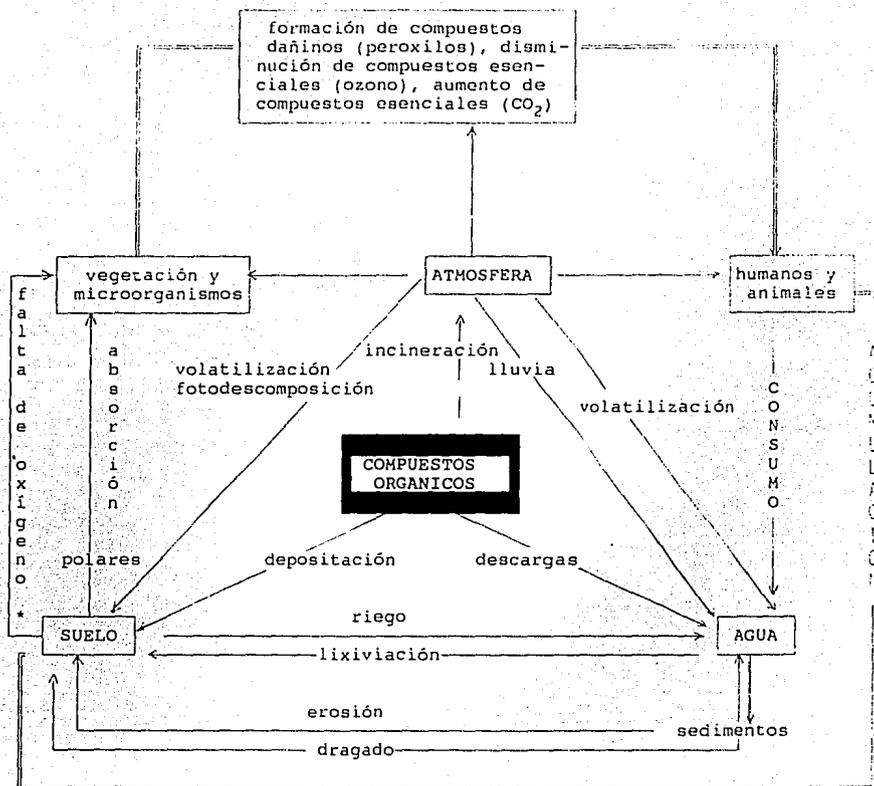
desde simples vómitos y afecciones a la piel hasta cáncer pulmonar (Villalobos, 1977).

Fig. 3.2. Interacción de una especie contaminante constituyente de un residuo, con el medio (Gutiérrez y Ortiz, 1994)



- \* fase terrestre subaérea
- \*\* agua dulce o salada
- \*\*\* fase terrestre subacuática

Fig. 3.3. Interacción de los compuestos orgánicos constituyentes de un residuo, con el medio (Gutiérrez y Ortiz, 1994)



▪ No polares

Otros elementos que comúnmente no se consideran peligrosos como el sodio, en ciertas cantidades y períodos de ingestión producen problemas arteriales y cálculos, entre otros.

Por lo tanto, en el caso de las sustancias orgánicas reactivas se debe buscar su

degradación a formas no peligrosas, y de las no reactivas, mantener la concentración abajo de los niveles considerados peligrosos o destruirlos. En el caso de sustancias inorgánicas se deben transformar a especies insolubles y estables termodinámicamente; además de mantener los niveles abajo de los límites naturales de la zona relacionados con la composición del material parental. Asimismo, se debe considerar la presencia de microorganismos patógenos que puedan ser portadores potenciales de diferentes enfermedades.

De entre las opciones de tratamiento y disposición final para residuos sólidos, son adecuadas para el caso de los lodos, las siguientes: tratamiento anaerobio y aerobio, el reuso, la incineración, la pirólisis (apéndice A.2) y el confinamiento controlado. En la mayor parte de los países que cuentan con plantas de tratamiento biológico, se utilizan los lodos estabilizados como mejoradores de suelo y, en menor proporción, se incineran o se confinan (fig. 3.4).

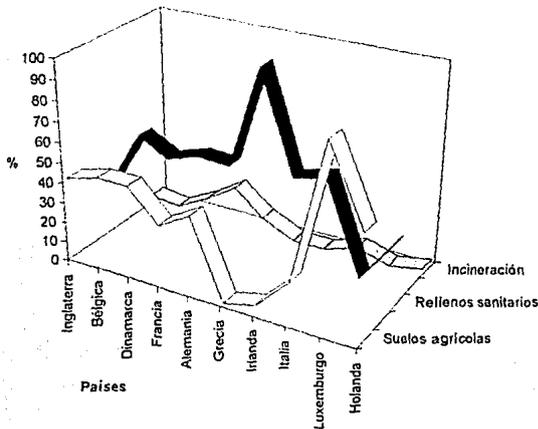
La incineración de lodos no resulta recomendable, pues este método se ve limitado por el incremento de los costos de combustible, por el peligro de emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera y por el riesgo que las cenizas representan para contaminar los acuíferos. Por otro lado, se generan compuestos orgánicos en ppb y ppt que son difíciles de detectar, pero que se acumulan y causan problemas. En Suiza, la población de búhos ha disminuido drásticamente debido a que las sustancias orgánicas provenientes de incineradores de lodos residuales, que se han acumulado a través del tiempo, han provocado la esterilización de los huevos. (Tarradellas, 1991). Además, se gasta gran cantidad de energía, sólo se eliminan los sólidos volátiles, las cenizas deben disponerse mediante un relleno sanitario y el agua se evapora reduciéndose en un 90% del volumen original.

Respecto a su posible confinamiento, el problema radica en la selección y disponibilidad de un sitio adecuado (no debe llover en grandes cantidades, subsuelo impermeable, cuenca cerrada, ubicación lejos de poblaciones, entre otros factores). Existen además, otros factores como el rechazo por parte de la población, los costos de instalación, transporte y mantenimiento que, al menos en países en desarrollo, no están considerados.

Por lo tanto, una de las alternativas viables, especialmente en zonas agrícolas, la conforma el uso como mejorador de suelos con o sin tratamiento previo, dependiendo las condiciones particulares de cada caso. Esta opción presenta las siguientes bondades:

- se aportan al suelo los nutrimentos que el lodo contiene y que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas,
- la materia orgánica mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como la estructura y el contenido de nutrimentos para las plantas,
- la materia orgánica del lodo oscurece al suelo permitiendo la acumulación de calor y una actividad más fuerte de los microorganismos.

**Fig. 3.4. Disposición final de lodos residuales en los países de la Comunidad Económica Europea**



No obstante, existen limitantes, pues para poder utilizar los lodos hay que asegurar que:

- los elementos potencialmente tóxicos se presenten en formas insolubles,
- los microorganismos patógenos contenidos en los lodos residuales, se expongan a las condiciones ambientales, tales como la radiación solar, para asegurar que después de algún tiempo, se abata la población
- los compuestos orgánicos se degraden y no contaminen cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales.

Los métodos posibles para eliminar estas desventajas consisten en:

- caracterización de los lodos, especialmente en lo referente a elementos inorgánicos acumulables, ya que en el caso de los compuestos orgánicos, no es posible una caracterización exhaustiva (la Organización Mundial de la Salud considera que existen aproximadamente 400 000 sustancias peligrosas en este tipo de sistemas)
- aumentar el pH con cal para disminuir la solubilidad y abatir el crecimiento de microorganismos,
- llevar a cabo un composteo para aumentar la temperatura, disminuir microorganismos y degradar compuestos tóxicos,
- realizar pruebas en invernadero y campo para analizar el comportamiento del lodo

con el objeto de determinar dosis y lapsos de aplicación óptimas.

## 3.2. Lodos residuales

### 3.2.1. Producción y composición

La producción de lodos residuales en la Comunidad Económica Europea es mayor a  $6.2 \times 10^6$  toneladas de sólidos secos por año, de los cuales la República Federal de Alemania es la que contribuye en mayor proporción al producir  $2.2 \times 10^6$  ton/año. Inglaterra e Italia también contribuyen con cantidades sustanciales al producir  $1.5 \times 10^6$  y  $1.2 \times 10^6$  toneladas respectivamente (Calcutt y Moss, 1984). En los Estados Unidos de América en 1982, se producían  $4.5 \times 10^6$  toneladas anualmente y para 1990 esta cantidad aproximadamente se ha duplicado debido al incremento en el volumen del agua a ser tratada, a la instrumentación de tratamientos secundarios y a la remoción de fósforo de efluentes por precipitantes químicos (Bunch, 1982).

El tratamiento y disposición de tan grandes cantidades de lodos residuales, tienen un costo de aproximadamente el 50% del total del tratamiento de aguas; por ejemplo, en Inglaterra se gasta una cantidad aproximada de 200 millones de libras por año (Calcutt y Moss, *op cit*). Los lodos contienen entre 1 y 7% de sólidos en estado de descomposición y de olor muy desagradable. A menudo son tratados para producir lodos mas estables, reducir el volumen y disminuir el contenido de microorganismos patógenos; todo ésto para facilitar la disposición final.

En estudios realizados por Solís (1982) se reporta que, en la República Mexicana, están establecidas plantas de tratamiento de aguas residuales, con diferentes procesos tales como: 48 de lodos activados, 42 lagunas biológicas, 19 tanques Imhoff, 13 sedimentadores primarios, 11 separadores API, 7 filtros rociadores, 3 zanjas de oxidación y 2 emisores submarinos. De estas plantas no todas están en funcionamiento o en la mayoría de los casos su eficiencia es muy baja.

Cualquiera que sea el sistema de tratamiento de aguas residuales, genera lodos residuales, los cuales contienen los compuestos químicos y microorganismos que se han removido durante el proceso de tratamiento y que son fuente de contaminación para el ecosistema en el momento del manejo y disposición final de los mismos. Estas plantas de tratamiento, teóricamente producen la cantidad de lodo mencionado en la introducción de este trabajo.

La composición de lodos residuales va a depender del tipo y cantidad de las aguas residuales que se han tratado. Dentro de los contaminantes que se pueden presentar en el lodo, se encuentran los elementos potencialmente tóxicos, microorganismos patógenos, nutrimentos en exceso tales como nitrógeno y fósforo y compuestos orgánicos (para mayor información sobre la composición de los lodos, referirse al apéndice A.2).

### 3.2.2. Formas y disponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos

Las formas químicas en que los elementos potencialmente tóxicos se presentan en los lodos, tienen influencia en el comportamiento fisicoquímico de los mismos y pueden ser clasificados como sigue:

- 1) solubles (forma iónica y formando complejos orgánicos e inorgánicos)
- 2) coprecipitados en óxidos de metales
- 3) precipitados
- 4) adsorbidos (físicamente, por quimiosorción y en estructuras de arcillas)
- 5) formando complejos organometálicos (complejos simples y quelatos)
- 6) residuos biológicos

La distribución de los elementos entre las formas específicas varía ampliamente, de acuerdo a las propiedades químicas de cada uno de ellos y a las características del lodo (Lake *et al.*, 1984). Particularmente, las propiedades físicas y químicas asociadas con el proceso de tratamiento del lodo, incluye parámetros como el pH, potencial de óxido-reducción, presencia de agentes quelatantes y concentraciones de ligandos precipitantes, los cuales determinan la distribución relativa de cada elemento entre varias formas (Gould y Genetelli, 1978).

Desafortunadamente, las limitaciones analíticas debido a interferencias, selectividad y sensibilidad, impiden una completa diferenciación de elementos en sus formas específicas en la matriz compleja del lodo. Sin embargo, se han propuesto varias técnicas para fraccionar los metales con base en el tamaño de partícula (Gould y Genetelli, 1977), asociación con la biomasa (Hayes y Theis, 1978) y su extractabilidad en varios reactivos químicos (Lake, *et al.*, 1984).

Las formas químicas de los elementos se han investigado con mayor frecuencia por técnicas de extracción similares a las aplicadas en química de suelos. La extracción secuencial utiliza una serie de reactivos químicos selectivos para removerlos de varias fracciones componentes, ya que ofrece una aproximación conveniente de los diferentes estados de los "metales pesados" en los lodos residuales.

Aunque el número de procedimientos para la extracción secuencial varía en detalles experimentales, todos han demostrado que los metales están presentes, predominantemente, en precipitados insolubles y ligados a formas orgánicas (Lake *et al.*, 1985; Oake *et al.*, 1984; Emmerich *et al.*, 1982a; Stover *et al.*, 1976)

Stover *et al.* (1976), utilizaron una extracción secuencial con nitrato de potasio, fluoruro de potasio, pirofosfato de sodio, EDTA y ácido nítrico para fraccionar varios elementos en las formas intercambiables, adsorbidas, con enlaces orgánicos y en formas de carbonatos y sulfitos, respectivamente. Finalmente, reportan los siguientes intervalos en las formas de los elementos:

Cd: carbonatos > sulfitos > orgánicos > adsorbidos = intercambiable  
Cu: sulfitos > carbonatos > orgánicos = adsorbidos > intercambiable  
Ni: carbonatos > orgánicos > intercambiable > adsorbido > sulfitos.  
Pb: carbonatos > orgánicos > sulfitos > adsorbido > intercambiable  
Zn: orgánicos > carbonatos > sulfitos > adsorbido > intercambiable

Las especies solubles e intercambiables (frecuentemente extraídas con nitrato de potasio), representan menos del 10% del contenido total del cadmio, cobre, plomo y zinc; sin embargo, con respecto al níquel las formas solubles e intercambiables tienden a ser más significativas, encontrándose hasta un 27%. Las bajas concentraciones de metales en formas solubles han sido encontradas consistentemente por extracción o percolación con agua destilada (Jenkins y Cooper, 1964; Lagerwerff *et al*, 1976). Estos mismos autores reportaron que en extractos por percolación utilizando agua en repetidas ocasiones, se encontraron concentraciones no mayores a 0.3, 14.3 y 1.7 % del total de cobre, níquel y zinc, respectivamente.

### 3.2.3. Tratamiento y/o disposición final de lodos residuales

En la Comunidad Económica Europea y los Estados Unidos de América, el tratamiento de lodos residuales consiste principalmente en una digestión anaerobia y/o un tratamiento aerobio, que son utilizados para reducir la materia orgánica y el contenido de agua de los lodos residuales. De esta forma, su consistencia es adecuada para una incineración o disposición mecánica. Se prefiere la digestión anaerobia porque no se necesita energía para aireación comparándolo con la estabilización aerobia. Además, los contaminantes orgánicos son convertidos a un combustible útil (90% de biogás) y como resultado, sólo se produce aproximadamente un 10% de biomasa (Matthews, 1979).

Sin embargo, en dichos países, el costo aproximado para el tratamiento de los lodos por esta metodología, es la mitad de lo que se gasta para el tratamiento de la totalidad de aguas residuales. Por ejemplo, para 1985, Inglaterra gastaba 200 millones de libras anuales, lo que corresponde a una cantidad mayor a mil millones de nuevos pesos anuales (Calcutt y Moss, 1984).

En los Estados Unidos de América, los métodos para su disposición final son la incineración y la utilización como fertilizante. En Japón, Alemania e Inglaterra, la mayor parte de los estudios están enfocados a su utilización como abono orgánico en forma de compostas con suelos y otros materiales.

Las opciones de disposición de lodos residuales están limitadas por factores económicos, principalmente por el incremento en el costo de la energía, además de una fuerte legislación, ya que generalmente contienen niveles altos de contaminantes potenciales. La fig. 3.4 muestra la producción y disposición final de lodos residuales en algunos países.

### 3.2.3.1. Incineración

La incineración es una técnica en la cual se descomponen los residuos en un ambiente rico en oxígeno y a altas temperaturas. Como cualquier otro dispositivo de combustión, su eficiencia depende de ciertos factores tales como el suministro de aire, cantidad del material a procesar, contenido de humedad, tiempo de combustión, temperatura y naturaleza química del material a tratar. De estos dos últimos factores depende la toxicidad de los gases liberados en la chimeneas, de los humos, así como los residuos de incineración (cenizas y escorias).

Cuando se incinera un lodo residual se provoca la combustión de la materia orgánica, con lo se que reduce el volumen de sólidos a aproximadamente un 10% del volumen original; aunque la disposición de cenizas y la emisión de gases al aire son un verdadero problema. Los "metales pesados" que contiene el lodo residual no se remueven durante la incineración sino que se concentran en las cenizas o en ocasiones se volatilizan causando verdaderos problemas. Los contaminantes orgánicos, como los plaguicidas, según estudios reportados por la EPA (Shen, 1979), pueden formar otros compuestos aún más tóxicos como las dioxinas.

El conocimiento de la composición química y física de los lodos que se van a incinerar, es muy importante para predecir los efectos que se causarán con la emisión de gases resultantes de la combustión. De acuerdo con la composición de lodos que se observa en los cuadros 3.2 y 3.3, los gases que se emitirían son: óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ácido clorhídrico (este último proviene de plásticos combustibles que son descompuestos durante la incineración). En general, se provoca la emisión de gases contaminantes y un volumen menor de sólidos (cenizas) que aunque menos peligrosas, se les tendría que reciclar o depositar en algún sitio.

### 3.2.3.2. Rellenos sanitarios

Otra práctica común en el manejo de lodos es la disposición en sitios adecuados, a manera de rellenos sanitarios. Sin embargo, se deben de tomar en consideración muchos factores que se mencionan a continuación (EPA, 1978):

- tamaño del sitio, que se selecciona de acuerdo a la cantidad de lodo producido por la planta de tratamiento,
- topografía, los sitios adecuados son los que presentan poca pendiente (entre 1 y 20 %)
- agua superficial y subterránea, para evitar contaminación por escurrimiento y lixiviación
- sitios de acceso, para determinar un tráfico adecuado de camiones
- uso de la tierra, eligiendo aquélla que no se utilice para otros fines
- significado histórico y arqueológico
- costos
- suelos y geografía, las propiedades que deben considerarse en cuestión de

suelos son la textura, la estructura, profundidad, permeabilidad, pH y capacidad de intercambio catiónico. La geología es importante para el control de lixiviados

- áreas sensibles, que incluyen a suelos húmedos, suelos susceptibles de inundación, áreas de congelamiento permanente y zonas de recarga de acuíferos
- vegetación, que pueda ayudar a reducir el olor y la visibilidad.

Por otro lado, para considerar esta opción, se deben tener lodos con un contenido de sólidos mayor al 15%, los lodos que tienen una cantidad menor, deben ser tratados antes del relleno sanitario para alcanzar esta condición. Esta práctica generalmente no es económicamente viable, pues los costos para deshidratar los lodos aumenta.

### **3.2.3.3. Utilización para fines agrícolas**

El contenido de materia orgánica y su riqueza en elementos esenciales, puede permitir el uso de este material para fines de fertilización y como mejorador de suelos, ya que puede resultar benéfico para la estructura del suelo y para incrementar la capacidad de retención de agua y de los elementos esenciales (Pattero, 1979). Sin embargo, debe considerarse la presencia de elementos y sustancias potencialmente tóxicos (Pierce, 1977).

Los "metales pesados" presentes en el lodo están en equilibrio entre las formas solubles e insolubles, dependiendo del estado del metal que se descarga, su movilidad es muy limitada, sobre todo en los niveles de pH aptos para la agricultura, además de que la absorción por las plantas y/o la lixiviación, difícilmente se llevan a cabo; en general, esto los hace permanecer en formas insolubles (Coker y Matthews, 1983).

Los metales que se agregan al suelo en el lodo pueden seguir dos vías: coprecipitar de la misma forma que los constituyentes inorgánicos del suelo (tales como óxidos de hierro y aluminio, fosfatos de hierro, aluminio y calcio y carbonatos de calcio) o absorberse en los coloides orgánicos del suelo. De esta forma la disponibilidad sería muy baja y sólo se solubilizarían después de un período de tiempo muy largo o cuando se produjera un cambio brusco de pH (abajo de 4) (Leeper, 1978).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), a través de la publicación de diversos estudios, promueve el uso de la aplicación directa de lodos, pero reglamenta y ofrece metodologías de aplicación para evitar en lo posible la contaminación de suelos y las consecuencias que de ello derivan.

En forma general, se deben considerar los siguientes puntos:

- selección de sitio adecuado
- selección de cultivos adecuados, que sean tolerantes a las condiciones resultantes y que no causen daños a la salud de humanos y animales
- tasas de aplicación
- reglamentaciones regionales y estatales y

- composición del lodo.

Eger (1978), menciona que deben ser considerados por un gran número de beneficios potenciales, como el contenido de materia orgánica y los nutrientes encontrados en la mayoría de los lodos. Epstein *et al* (1976), han reportado que la adición del lodo al suelo incrementa la conductividad hidráulica y, por la adición de materia orgánica, con ayuda de microorganismos, se incrementa la agregación del suelo de 10 a 33%.

Jaakko (1970), menciona las siguientes ventajas:

- se provee al suelo de las propiedades físicas y químicas de los coloides (tales como intercambio de cationes y la formación de agregados)
- es recomendable particularmente para suelos arenosos
- provee de una alta concentración de nutrientes, especialmente nitrógeno, que es liberado del lodo por la acción de las bacterias. También es fuente de una buena cantidad de fósforo
- es rico en nutrientes que están presentes en formas útiles para las plantas
- retiene humedad, lo que estimula el desarrollo radicular y una buena aireación.
- es adecuado para los suelos con pH de 6 o más.

Parsa (1970), utilizó lodos residuales sobre un suelo para recuperarlo por deficiencias de zinc y encontró que fueron más efectivos que el  $ZnSO_4$ . Lindsay y Park (1970) encontraron que los lodos fueron tan efectivos como los quelatos de hierro para evitar las deficiencias del elemento sobre un suelo calcáreo. Sin embargo, Mordvedt y Giordano (1975), encontraron que sobre un suelo ácido, las sales inorgánicas de Zn fueron más disponibles para las plantas que el zinc agregado por lodos residuales.

Por otro lado, el Zn y Cu son antagonistas al Fe y Brown y Jones (1975) encontraron que los dos primeros constituidos en algunos desperdicios orgánicos, eventualmente acentúan una deficiencia de Fe, aunque fue temporal y, posteriormente, se corrigió.

#### **a) Factores que intervienen en la forma de los elementos potencialmente tóxicos en el suelo**

En el caso de los "metales pesados" es conveniente conocer las formas en que se encuentran dentro de la matriz del lodo para poder predecir el comportamiento que presentarán una vez depositados en el suelo. Por revisión de literatura se conoce que, en el lodo, las formas encontradas más frecuentemente son las descritas en la sección 3.2.2.

Por otro lado, en los suelos las formas que normalmente se presentan son las siguientes (Matthews, 1984):

- iónica o formando complejos en la solución del suelo,
- iones intercambiables en el material activo de intercambio,

- iones enlazados en los complejos de intercambio
- iones quelatados en el complejo orgánico y organomineral
- incorporados en sesquióxidos precipitados o sales insolubles
- incorporados dentro de los microorganismos y sus residuos biológicos
- incorporados en la estructura de minerales primarios y secundarios.

Estos pueden presentarse en la solución del suelo o fuera de ella por los fenómenos de intercambio catiónico, adsorción, quelación, precipitación o cristalización.

Las formas de metales en lodos como en suelos, puede conocerse por un procedimiento de extracción secuencial. Existen varios trabajos que proponen diferentes reactivos para la especiación de estos elementos. Esta técnica tiene sus limitaciones, pero proporciona información valiosa sobre las formas químicas de los elementos en los lodos residuales. Esto fue enfatizado por Emmerich, *et al.* (1982a) quien reporta que mientras el cobre, níquel y zinc se encuentran predominantemente en formas de carbonatos o enlazados a la materia orgánica, la mayor parte de ellos (65 %) se presentan en formas más estables.

Las formas de los elementos, son influenciadas por varios factores que incluyen:

- pH
- potencial redox
- textura
- composición mineral (contenido de arcillas y óxidos de Fe y Mn)
- características del perfil del suelo
- capacidad de intercambio catiónico
- cantidad y tipo de compuestos orgánicos en la solución del suelo
- presencia de cationes (por la competencia de sitios de adsorción).
- temperatura del suelo
- contenido de humedad
- otros factores que afectan la actividad microbiana.

**La capacidad de intercambio catiónico** es un proceso reversible por el cuál las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa, desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes y establecen equilibrio entre ambas fases. Estos fenómenos se deben a las propiedades específicas del complejo coloidal que tienen cargas electrostáticas y una gran superficie (Fassbender, 1986).

Las cargas negativas del complejo se deben a las arcillas minerales, materia orgánica y óxidos de hierro y aluminio. Es de importancia para determinar en qué grado los cationes son adsorbidos por los constituyentes de la fase sólida de un suelo.

Las cargas de los cationes se distribuyen especialmente de mayor a menor concentración, hasta lograr el equilibrio, formando una doble capa difusa (fig. 3.5).

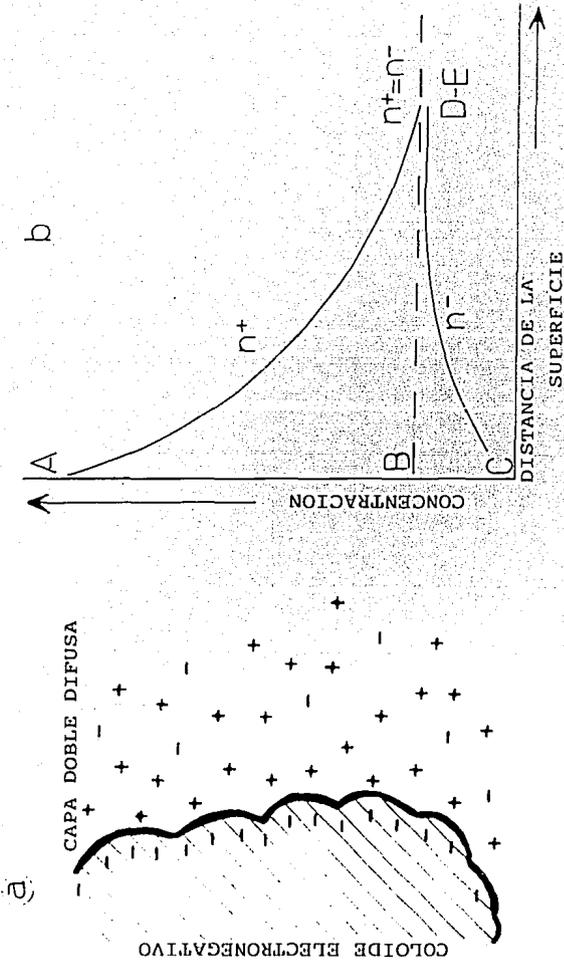


Fig. 3.5. Formación de una doble capa difusa

El pH del suelo no es un concepto simple como en solución acuosa y normalmente se determina como "un valor aparente". Se mide en una suspensión obtenida al agitar el suelo con agua deionizada.

Es uno de los parámetros más importantes que controlan las formas de los elementos. La solubilidad de los elementos potencialmente tóxicos es mayor a pH bajo, con excepción del selenio y molibdeno (fig 3.6) que se presentan en el suelo en formas aniónicas, principalmente (Matthews, op cit). Sin embargo el cadmio, cobalto, manganeso y zinc, aumentan su concentración en solución, a valores de pH bajos (aproximadamente 5). Lindsay (1972), menciona que el zinc y el pH se relacionan de la siguiente manera:

$$[Zn^{2+}] = 10^6 [H^+]^2$$

lo que indica que por cada unidad de pH que disminuya en el suelo, la concentración de zinc en solución aumenta 100 veces. Por otro lado, el efecto del pH del suelo sobre la disponibilidad de metales pesados se ha descrito por la Ley de Proporciones (Russell, 1972), la cual predice que un incremento en la acidez y consecuentemente en iones  $H^+$ , aumentará la concentración de otros elementos presentes en la solución, de manera proporcional al poder de sus valencias.

Los factores que pueden provocar el abatimiento del pH en el suelo son los siguientes:

- La presencia de sales neutras en la solución del suelo, altera el equilibrio de los iones  $H^+$  adsorbidos en los coloides del suelos, facilita su liberación y el pH baja. Cuando el mecanismo es de adsorción no selectiva, los protones se sitúan en la denominada capa difusa, alrededor de la partícula coloidal del suelo, interactuando electrostáticamente. Los cationes de la sal, compiten por las posiciones de la doble capa difusa y sustituyen a los iones  $H^+$ , los cuales pasan a la solución del suelo (fig. 3.7a).
- En el caso de óxidos y materia orgánica, los  $H^+$  están enlazados covalentemente. Sin embargo, su enlace tiene ciertas características iónicas por la diferencia de electronegatividad entre el oxígeno e hidrógeno, por lo que algunos  $H^+$  pueden ser sustituidos por cationes, aumentando la acidez (fig. 3.7b).
- En arcillas que tienen  $Al^{+3}$  en su doble capa, los cationes de las sales sustituyen a los iones aluminio, los envían a la solución, reaccionan con el agua (hidrólisis) y liberan iones hidrógenos (fig. 3.7c). Aunque el aluminio es el catión anfotérico más importante, existen otros en el suelo que se comportan de la misma manera.

Controlando el pH se abate la solubilidad de los elementos, ya que es un factor que tiene influencia directa sobre las reacciones de adsorción-desorción, formación y descomposición de complejos y precipitación-disolución.

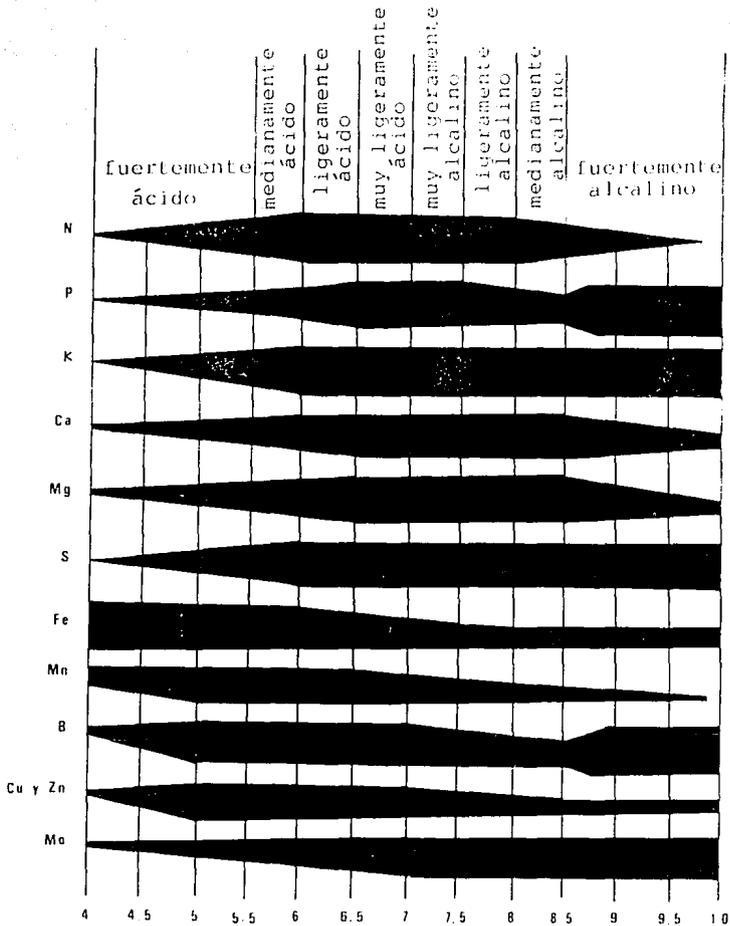
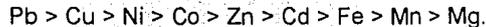


Fig. 3.6. Efecto del pH sobre la disponibilidad de los elementos. El ancho de las bandas horizontales, representa la solubilidad del elemento (Bidwell, 1979)

El contenido de **materia orgánica** es importante porque los elementos se asocian con ella formando complejos. La mayor parte de estos elementos se encuentran en formas insolubles relativamente estables, formando complejos con los ácidos húmicos (Stevenson y Ardakani, 1983). Los "metales pesados" pueden formar enlaces con estos ácidos a través de fuerzas electrostáticas o de enlaces covalentes, dando lugar a anillos de quelatación estables (Lester, 1987a). Los ácidos húmicos y fúlvicos son muy efectivos al quelatar metales pesados debido al gran contenido de grupos funcionales carboxílicos y fenólicos. Su fuerza de asociación depende del tipo de enlace que se forme, su abundancia y distribución, el grado de saturación con cationes y el valor del pH. En trabajos experimentales se ha descubierto que la preferencia de las sustancias orgánicas para formar complejos con metales, es de la siguiente manera:



La materia orgánica aumenta la capacidad de adsorción de un suelo (Gerritse *et al*, 1982).

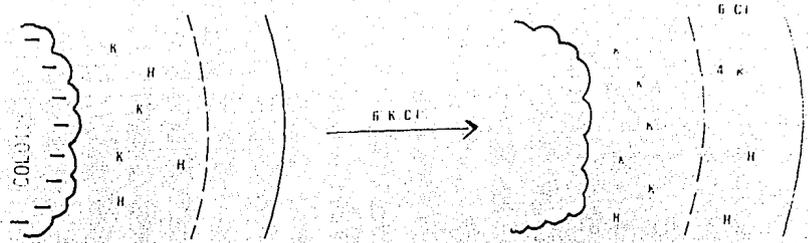
#### **b) Cambios de los elementos en el suelo después de adicionarle lodos residuales**

La aplicación de lodo residual al suelo, causa un aumento en la concentración de metales solubles e intercambiables, debido a la intensa actividad microbiana que se presenta al mezclar los dos materiales. La actividad microbiana modifica el potencial de óxido-reducción, produce ácidos orgánicos y baja el pH, lo que provoca la solubilidad de metales (fig. 3.6). Además, son liberados otros elementos por disolución de compuestos precipitados tales como carbonatos, hidróxidos y fosfatos debido a cambios del pH. Se presenta oxidación de sulfitos y sulfatos por bacterias autótrofas oxidantes del azufre y degradación microbiana de complejos materia orgánica-metal (Petruzzelli *et al*, 1981 y Silviera *et al*, 1977).

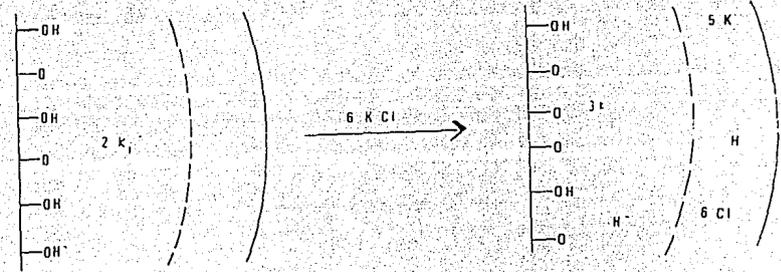
Estas reacciones se presentan rápidamente, sobre todo si se le agrega lodo líquido. Además, se presenta una degradación de materia orgánica, incluyendo la que se encuentra en el suelo, generalmente anaerobia o microaerofílica.

Posterior a la estabilización microbiana, los "metales pesados" son menos solubles y por lo tanto, menos disponibles para las plantas, ya que son adsorbidos por los constituyentes del suelo para formar compuestos orgánicos insolubles o precipitados insolubles. Beckett, *et al* (1979) sugiere que el equilibrio se establece después de dos años de la aplicación y que una vez que se alcanza, los metales permanecen inmóviles.

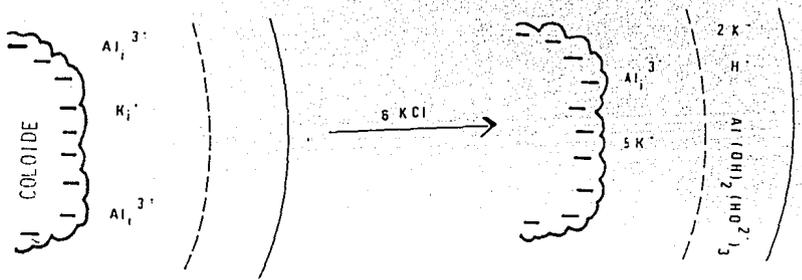
Los **microorganismos patógenos** que se agregan al suelo con el lodo, se exponen a las condiciones ambientales tales como sol, aire, agua y suelo, los cuales afectan la sobrevivencia de los mismos.



a) Adsorción no selectiva. Los cationes de la sal sustituyen a iones  $H^+$ , los cuales pasan a la solución y bajan el pH



b) En la materia orgánica los cationes de la sal sustituyen al  $H^+$  y el pH baja



c) Con la presencia de aluminio en los coloides, la sal provoca que el elemento pase a la solución, aumentando la acidez

Fig. 3.7. Efecto de la presencia de sales sobre el pH y en general sobre el equilibrio

El tiempo máximo de sobrevivencia varía con la especie microbiana y va desde pocos días hasta un año.

Las variables importantes para la supervivencia de las bacterias son (cuadro 3.1): el contenido de humedad, temperatura, pH, radiación solar, materia orgánica y competición o predación (Gerba, 1983). El contenido de humedad es muy importante, ya que la desecación lleva a una muerte celular; las bajas temperaturas prolongan la sobrevivencia y a pH bajo se aumenta la proporción de inactivación.

Si el lodo es aplicado en la superficie del suelo y se permite que se seque antes de la incorporación dentro del suelo, puede lograrse una reducción considerable de las bacterias patógenas del lodo.

**Cuadro 3.1. Factores que influyen la supervivencia de bacterias y virus en el suelo (Gerba, 1983)**

<b>Factor</b>	<b>Bacterias</b>	<b>Virus</b>
Temperatura	Mayor sobrevivencia a temperaturas bajas	Mayor sobrevivencia a temperaturas bajas
pH	Sobrevivencia baja a pH ácido (3-5)	Puede afectar indirectamente al controlar su absorción al suelo
Cationes	Desconocido	Puede afectar indirectamente al controlar su absorción al suelo
Desecación y humedad del suelo	Mayor sobrevivencia en suelos húmedos y con lluvia alta	En suelos secos, baja su sobrevivencia
Radiación solar	Puede ser mortal para ellas en la superficie	Puede ser mortal para ellos en la superficie
Antagonismo con la flora del suelo	Aumenta su sobrevivencia en suelos estériles	No ha sido claro el efecto con la microfiora del suelo
Materia orgánica	Aumenta la sobrevivencia y su posible desarrollo cuando hay mucha materia orgánica	Desconocido

### 3.2.3.4. Composteo

El composteo de lodos residuales, es una descomposición termofílica de sus constituyentes orgánicos, producida por microorganismos aerobios, para producir un material relativamente estable, tal como el humus (Ehret y Walker, 1977). Los

factores ambientales tienen influencia sobre las actividades de las bacterias, hongos y actinomicetos, por lo que afectan el tiempo y la calidad del composteo. Otros factores determinantes en el proceso son: el tipo de material y sus constituyentes volátiles, contenido de humedad, concentración de oxígeno, relación C/N, temperatura y pH (Golueke, 1977).

Se considera que el proceso de composteo ha sido finalizado, cuando el producto pueda ser almacenado sin que cause molestias, tales como malos olores, y cuando el calor que se produce durante la descomposición de la materia orgánica, pueda alcanzar temperaturas letales para que los microorganismos patógenos sean abatidos a un nivel donde el producto final, pueda ser manejado en forma segura (Kubota, 1984). Burge *et al*, (citado por EPA, 1985), recomienda 10 días de composteo para lograr la destrucción de *Salmonella* y coliformes. La EPA (1985) establece en la norma 40CFR-257, una temperatura mínima de 40°C por 5 días consecutivos y un máximo de seguridad con 55° por 15 días.

Además, debe considerarse el momento en que el producto pueda ser aprovechado como abono y mejorador de suelos, sin causar efectos desfavorables (EPA, *op cit*).

El sistema de composteo consiste en la formación de pilas de lodo mezclado con materiales orgánicos para incrementar la porosidad de la mezcla y reducir su contenido de humedad. Puede llevarse a cabo en lugares abiertos o en un reactor (EPA, *op cit*).

La composta que se produce de los lodos residuales, puede ser adicionada a suelos y proporcionarles los nutrimentos para el desarrollo de los cultivos. La materia orgánica de la composta, es benéfica como mejorador del suelo, ya que ha sido estabilizada, descompuesta lentamente y permanece en esas condiciones por más tiempo, comparativamente con la materia orgánica de los desechos que no han sido sometidos a este proceso (EPA, *op cit*).

La composta de lodos es adecuada para cualquier tipo de suelos, pero principalmente para aquellos con proporciones altas de arenas o arcillas. Los efectos que puede ocasionar al suelo son (Epstein y Parr, 1977):

- aumenta el contenido de agua y su capacidad de retención en suelos arenosos
- mejora los agregados del suelo (estructura)
- aumenta la aireación en suelos arcillosos
- aumenta la capacidad de infiltración de agua en suelos arcillosos
- aumenta la población microbiana
- baja las costras de la superficie

La persistencia de compuestos orgánicos, microorganismos patógenos o "metales pesados" en algunos lodos sometidos a composteo, pueden restringir su uso, sobre todo en suelos donde se cultivan alimentos (Jelenek *et al*, 1977). Por otro lado,

durante el composteo se provoca una reducción importante del nitrógeno del lodo, por lo que sólo se adiciona una pequeña cantidad de nitrógeno disponible para las plantas (EPA, 1985).

### 3.2.5. Legislación

En nuestro país, la legislación existente no contempla el manejo, tratamiento y/o disposición final de los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas domésticas o mixtas. La Norma Técnica Ecológica NOM-CRP-001-ECOL/93 (Diario Oficial de la Federación, 23 de octubre de 1993) establece los criterios para la determinación de residuos peligrosos y el listado de los mismos. También establece que la regulación de residuos peligrosos está considerada en el Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, y que de acuerdo a ella, un residuo es peligroso cuando por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Los lodos residuales son considerados un residuo peligroso, aunque sólo hace mención de aquéllos que resultan de industrias que utilizan materia prima a base de metales pesados y de compuestos orgánicos.

En otros países, la legislación en cuanto a lodos residuales señala que, debido a la concentración de elementos potencialmente tóxicos, se debe definir un límite de adición al suelo. Los cuadros 3.2 y 3.3 muestran las condiciones que se han fijado para tal fin, lo que demuestra que ya se encuentran perfectamente establecidos los parámetros necesarios para obtener los beneficios de los lodos en suelos agrícolas, además de evitar desequilibrios en el ambiente. Más aún, se tiene establecido el límite máximo permitido de cada uno de los elementos en el suelo y de acuerdo a este criterio, no deben rebasarse estas concentraciones; prueba de ello es el ejemplo dado en el cuadro 3.4, que muestra las concentraciones máximas de metales pesados que debe contener un lodo para agregarlo al suelo.

**Cuadro 3.2. Condiciones fijadas en diferentes países para la adición de lodo al suelo (Lester, 1987b; Moller, 1983)**

<b>País</b>	<b>Criterio de adición</b>	<b>Máxima aplicación</b>
Alemania	concentración máxima en suelos	----
Escandinavia	concentración máxima en lodos	----
Holanda	concentración máxima en lodos	1 a 2 ton/año
Dinamarca	demanda de N de cultivos	----
Suecia	concentración máxima en lodos	1 ton/ha/año
Finlandia	concentración máxima en lodos	4 ton/ha/año
Noruega	concentración máxima en lodos	2 ton/ha/año
Estados Unidos de América	capacidad de intercambio catiónico*	----
Reino Unido	Zn equivalente**	----

Nota:\* Capacidad de Intercambio Catiónico. Un suelo con CIC > 15 mg/100 g puede tolerar una carga de metales cuatro veces mayor que uno con una CIC < 5 mg/100 g; \*\* Supone que el cobre es dos veces y el níquel ocho veces tan tóxico como el zinc, sobre una base húmeda y que la toxicidad es aditiva; Zn equivalente = Zn + 2Cu + 8Ni

---- no se encontraron datos

**Cuadro 3.3. Guía para la adición de "metales pesados" en lodos aplicados a suelos agrícolas (Lester, 1987b)**

Metal	límite de adición de metal al suelo (promedio anual, kg/ha)				
	Reino Unido	Comunidad Económica Europea	Estados Unidos de América, CIC del suelos (meq/100 g)		
			0-5	5-15	>15
cadmio	0.17	0.15	0.17	0.33	0.67
chromo	33.30	10.00	---	---	---
cobre	9.33*	12.00	4.17	8.33	16.70
níquel	2.33*	3.00	1.67	3.33	6.67
plomo	33.30	15.00	16.70	33.30	66.70
selenio	0.17	---	---	---	---
zinc	18.70*	30.00	8.33	16.70	33.30
período de adición (años)	30	10	30		

Nota: \* Las adiciones de cobre, níquel y zinc están sujetos al límite del zinc equivalente.

--- no se encontraron datos

**Cuadro 3.4. Concentraciones de "metales pesados" máximas permitidas en lodos residuales para uso en agricultura, propuesto por la CEE (Lester, 1987b)**

Metal	Límite recomendado (mg/kg, base seca)	Límite obligatorio (mg/kg, base seca)
cadmio	20	40
chromo	750	--
cobre	1,000	1,500
mercurio	16	--
níquel	300	400
plomo	750	1,000
zinc	2,500	3,000

Nota: --- no se encontraron datos reportados

## **4. PARTE EXPERIMENTAL**

### **4.1. Composición de los lodos**

#### **4.1.1. Muestreo y pretratamiento**

El muestreo se llevó a cabo según la metodología propuesta por la EPA (1988), con la finalidad de detectar variaciones de los contaminantes sobre un período de tiempo largo.

El muestreo y pretratamiento se realizó de la siguiente manera (EPA, 1988):

Para los análisis físicos y químicos, se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg de lodo del filtro-prensa y se colocó en un recipiente de polietileno previamente lavado con ácido nítrico diluido y enjuagado debidamente con agua destilada. Esta muestra se conservó en refrigeración y se trasladó al laboratorio, donde se secó a 100°C hasta peso constante.

El muestreo y secado se repitió durante los 7 días consecutivos de una semana, al final de la cual las muestras se mezclaron para formar una compuesta.

La muestra se molió en un mortero de ágata y se tamizó a través de una malla de 0.5 mm. El lodo seco se guardó en un frasco de vidrio con boca ancha y con tapa de plástico hasta su análisis.

De esta misma manera, se colectaron un total de 12 muestras compuestas de lodos residuales, procedentes de 84 individuales. Como se mencionó, cada muestra compuesta se preparó mezclando 7 muestras individuales. El tiempo de muestreo fue de 12 semanas, durante dos años.

Para los análisis microbiológicos, se tomaron cajas de Petri y se esterilizaron en el laboratorio. Se colectaron las muestras directamente de el filtro-prensa, del tanque aireador y de lodos acumulados un mes, se colocaron en las cajas Petri y de inmediato se trasladaron al laboratorio, conservadas en hielo para llevar a cabo su posterior análisis.

#### **4.1.2. Análisis cualitativos**

Se determinaron los elementos presentes en las muestras realizando análisis cualitativos por emisión, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica. A partir de los resultados se definieron los elementos a cuantificar. Los equipos utilizados son: microscopio electrónico marca Geol-35C y fluorescencia de rayos X marca Philips-1410.

### 4.1.3. Análisis físicos y químicos

Para los análisis físicos y químicos de rutina, se tomaron como base a las técnicas de análisis de suelos (tales como pH, conductividad eléctrica, % de humedad, densidad, entre otros), ya que el lodo seco, presentó una consistencia semejante a la de ellos. Por otro lado, en la revisión de literatura concerniente a los métodos de análisis, había una coincidencia para tal fin.

Los análisis se realizaron por duplicado y con un blanco. Se utilizaron estándares NIST-Standard Reference Materials (SRM) 2709, con una composición similar de matriz (materia orgánica con sales inorgánicas).

Una vez seleccionadas las técnicas, se llevaron a cabo preliminarmente diferentes pruebas. Conjuntamente se analizó un "blanco" para evitar los resultados erróneos.

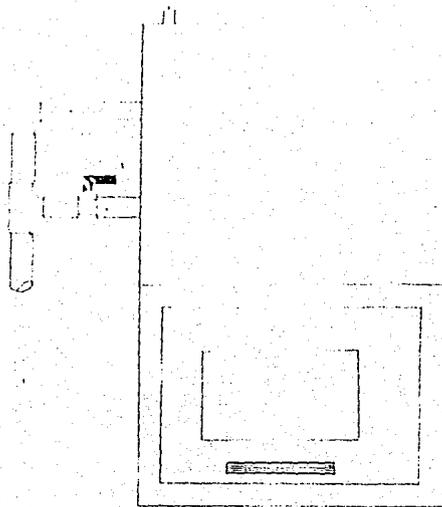
#### 4.1.3.1. Parámetros de rutina (Ortiz, 1986)

- pH en suspensión 1:5 lodo-agua y utilizando un potenciómetro Conductronic pH 20.
- densidad aparente ( $g/cm^3$ )
- % de humedad, por pérdida de peso
- % de sólidos por diferencia entre 100 y el porcentaje de humedad
- conductividad eléctrica, utilizando un conductímetro Cole Parmer 1481-00.
- aniones solubles (carbonatos, bicarbonatos y cloruros)
- capacidad de intercambio catiónico, utilizando al sodio como catión reemplazante y cuantificándolo después con un espectrofotómetro de flama Corning 400
- cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio), utilizando el catión amonio para desplazarlos de sus posiciones de intercambio y cuantificándolos después por espectrofotometría de absorción atómica y de flama
- materia orgánica, a partir de su pérdida por ignición y por el método Walkley-Black
- nitrógeno orgánico, método Kjeldahl
- fósforo total, determinado por colorimetría
- fósforo disponible, con el método Bray I

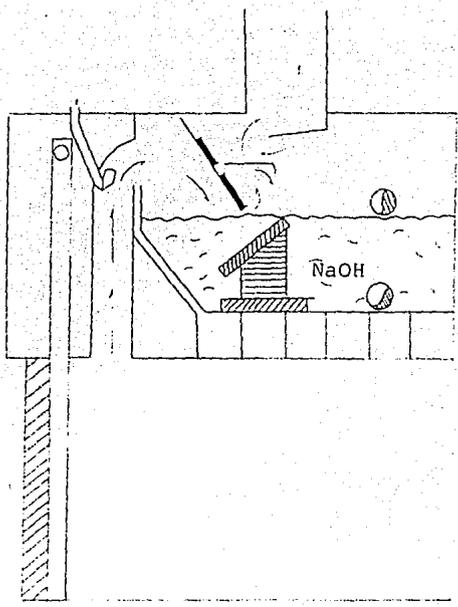
#### 4.1.3.2. Determinación de "metales pesados"

##### a) Concentración total de "metales pesados"

Las muestras se solubilizaron mediante una digestión con una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico ( $HNO_3 \cdot HClO_4$ ), la cual se llevó en una campana de extracción especial para ácido perclórico (fig. 4.1) y se seleccionó la espectrofotometría de absorción atómica para su cuantificación por su rapidez y su baja presencia de interferencias. El aparato usado fue un Perkin-Elmer modelo 2380, equipado con corrector de fondo (lámpara de deuterio). Las condiciones de operación del equipo se fijaron según las instrucciones de Perkin-Elmer (1977), (ver cuadro 4.2).



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

Fig. 4.1. Esquema de la campana utilizada para la digestión de la muestra con  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$

En el cuadro 4.3 se presentan los intervalos de concentración que se utilizaron para la curva estándar de cada elemento.

**Cuadro 4.1. Condiciones de operación y límites de detección del equipo de absorción atómica**

Elemento	Lámpara	Slit	Longitud de onda (nm)	Flama	Combustible	Comburente	Límite de detección	Supresión de interferencias
plomo	C.H.	0.7	283.30	est.ox.	acetileno	aire	0.010	n.r.
hierro	C.H.	0.2	248.30	est.ox.	acetileno	aire	0.005	n.r.
manganeso	C.H.	0.2	279.50	est.ox.	acetileno	aire	0.002	n.r.
cobre	C.H.	0.7	324.80	est.ox.	acetileno	aire	0.002	n.r.
níquel	C.H.	0.2	232.80	est.ox.	acetileno	aire	0.005	n.r.
cadmio	C.H.	0.7	228.80	est.ox.	acetileno	aire	0.001	n.r.
zinc	C.H.	0.7	213.90	est.ox.	acetileno	aire	0.001	n.r.
cobalto	C.H.	0.7	240.70	est.ox.	acetileno	aire	0.010	n.r.
cromo	C.H.	0.7	359.90	est.red.	acetileno	aire	0.003	NH <sub>4</sub> Cl 2%
aluminio	C.H.	0.7	309.30	est.red.	acetileno	óxido nítrico	0.020	KCl 2%
calcio	C.H.	0.7	422.70	est.ox.	acetileno	aire	0.0005	La 1 %
magnesio	C.H.	0.7	285.20	est.ox.	acetileno	aire	0.0001	La 1 %

Nota: slit = abertura; C.H. = cátodo hueco; nm = nanómetros; est.ox. = flama estequiométrica oxidante; est.red. = flama estequiométrica reductora; n.r. = no reportado; La = Lantano

**Cuadro 4.2. Concentraciones de las curvas de calibración para el análisis de "metales pesados"**

Elemento	Concentración mínima (ppm)	Concentración máxima (ppm)	r
calcio	1.00	4.00	0.9999
magnesio	0.1	0.4	0.9998
cobre	0.5	5.0	0.9999
hierro	0.5	5.0	0.9999
manganeso	0.1	0.5	0.9998
zinc	0.1	1.5	0.9999
cromo	0.5	5.0	0.9999
plomo	0.5	20.0	0.9999
níquel	0.5	3.0	0.9999
cadmio	0.1	1	0.9998
cobalto	0.5	5.0	0.9998
aluminio	1.0	100.0	0.9995

Nota: r = coeficiente de correlación de Pearson

## **b) "Metales pesados" disponibles (Bloomfield y McGareth, 1982)**

Las extracciones se realizaron con una solución de EDTA 0.05 M. Este reactivo se utilizó ya que se combina primeramente con los iones metálicos que se encuentran en solución, formando complejos solubles EDTA-metal con lo que reduce la actividad de los iones libres. Como respuesta a este movimiento químico, otros iones metálicos se desorben de la superficie de intercambio (arcillas y materia orgánica, principalmente), van a la solución hasta que la concentración original es restablecida. El EDTA entonces actúa como con los iones libres. Por otro lado forma quelatos con los metales que se encuentran enlazados débilmente con los compuestos orgánicos. De esta manera se extrae a los metales que pueden considerarse como disponibles para las plantas.

Se tomaron 5 g de lodo y se colocaron en un tubo de ensaye de 50 mL, se agregaron 25 mL de  $\text{NH}_4\text{EDTA}$  0.05 M, se agitaron durante 30 minutos y se filtró para recuperar la solución. La cuantificación se llevó a cabo por medio de espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo las especificaciones del aparato mencionadas anteriormente.

Se utilizaron reactivos marca Baker y Merck, grado analítico y estándares marca Merck tritisol de 1000 mg/L. Los análisis se hicieron por duplicado y con un blanco; los datos se reportan en base seca.

## **c) Especiación de "metales pesados" (Chang *et al*, 1984b; Emerich *et al*, 1982b; Sposito *et al*, 1982)**

En 5 muestras compuestas seleccionadas al azar, se analizaron los metales pesados, a través de una técnica de especiación que consiste en una extracción secuencial. El procedimiento es como sigue:

- 1) Se tomó un vaso de precipitados, se le agregaron 5 g de lodo, 25 mL de  $\text{KNO}_3$  0.5 M y se agitó por 16 horas en un agitador mecánico. Posteriormente se centrifugó y decantó para después aforarlo a 100 mL. Con este reactivo se extraen los metales que se encuentran como iones solubles o complejos simples en la solución y también aquéllos que se encuentran ocupando los sitios de intercambio del lodo, que son catalogados como intercambiables.
- 2) Al residuo del lodo se le mezcló con 25 mL de agua deionizada y se agitó por espacio de dos horas para posteriormente ser centrifugado y decantado. Este procedimiento se repitió tres veces. Los sobrenadantes fueron combinados y al final fueron aforados a 100 mL. Se obtuvieron los metales que se encuentran de forma adsorbida, es decir, aquéllos que se encuentran adheridos a la superficie de los sólidos por procesos físicos (fuerzas de Van der Waals o interacciones ión-dipolo o dipolo-dipolo).

- 3) Al residuo del lodo se le agregaron 25 mL de NaOH 0.5 M y se agitó por 16 horas, posteriormente la suspensión se centrifugó y decantó. Finalmente se aforó a 100 mL. De esta manera se obtuvieron los metales de la materia orgánica, ya que el NaOH la solubiliza y libera a los metales contenidos en ella.
- 4) Al residuo del lodo se le agregaron 25 mL de Na<sub>2</sub>EDTA 0.05 M, se agitó por 6 horas y se centrifugó y decantó. Con este procedimiento se obtuvieron los metales que se encuentran en fosfatos, carbonatos, ocluidos en óxidos y en sulfitos precipitados, mediante la formación de quelatos solubles.
- 5) Al residuo se le aplicó una digestión con HNO<sub>3</sub> y fue necesario agregar una pequeña cantidad de HClO<sub>4</sub> para solubilizar los metales residuales que pudieran encontrarse en formas altamente estables, que han sido el resultado de reacciones químicas y que incluyen los hidróxidos, fosfatos, sulfitos, óxidos de hierro y manganeso y/o iones enlazados en látices cristalinos de minerales primarios y secundarios.

Posteriormente, a todas las soluciones obtenidas se les cuantificaron los metales mencionados por espectrofotometría de absorción atómica y los resultados se reportan en ppm.

#### 4.1.4. Análisis microbiológicos

Los parámetros microbiológicos que se realizaron son los siguientes:

- coliformes totales
- coliformes fecales
- *Salmonella*
- estreptococos fecales
- hongos
- huevecillos de *Ascaris lumbricoides*

**Coliformes totales:** se esterilizaron los materiales a utilizar (licuadora, cucharas, espátulas, pipetas, entre otros), con una olla de presión. En un vaso de licuadora estéril, se molieron 10 g de la muestra con 90 mL de agua destilada para tener una suspensión homogénea, dilución (1/10). De aquí se siguieron realizando diluciones sucesivas con alícuotas de 1 mL y volúmenes finales de 10 mL hasta alcanzar una dilución de 1/1,000,000. Para cada dilución realizada, se prepararon 3 tubos con el medio de cultivo que fue el caldo lactosado, incluyendo un tubo Durham (fig. 4.2).

Los tubos se colocaron en una incubadora a 37°C, durante 48 horas; después se revisaron para verificar la producción de gas, mismo que es provocado por la fermentación de lactosa. Posteriormente, se verificó en cual dilución se presentó la fermentación y se comparó con las tablas existentes expreso para determinar el número más probable (NMP/g) de coliformes totales por gramo de muestra (APHA, 1989).

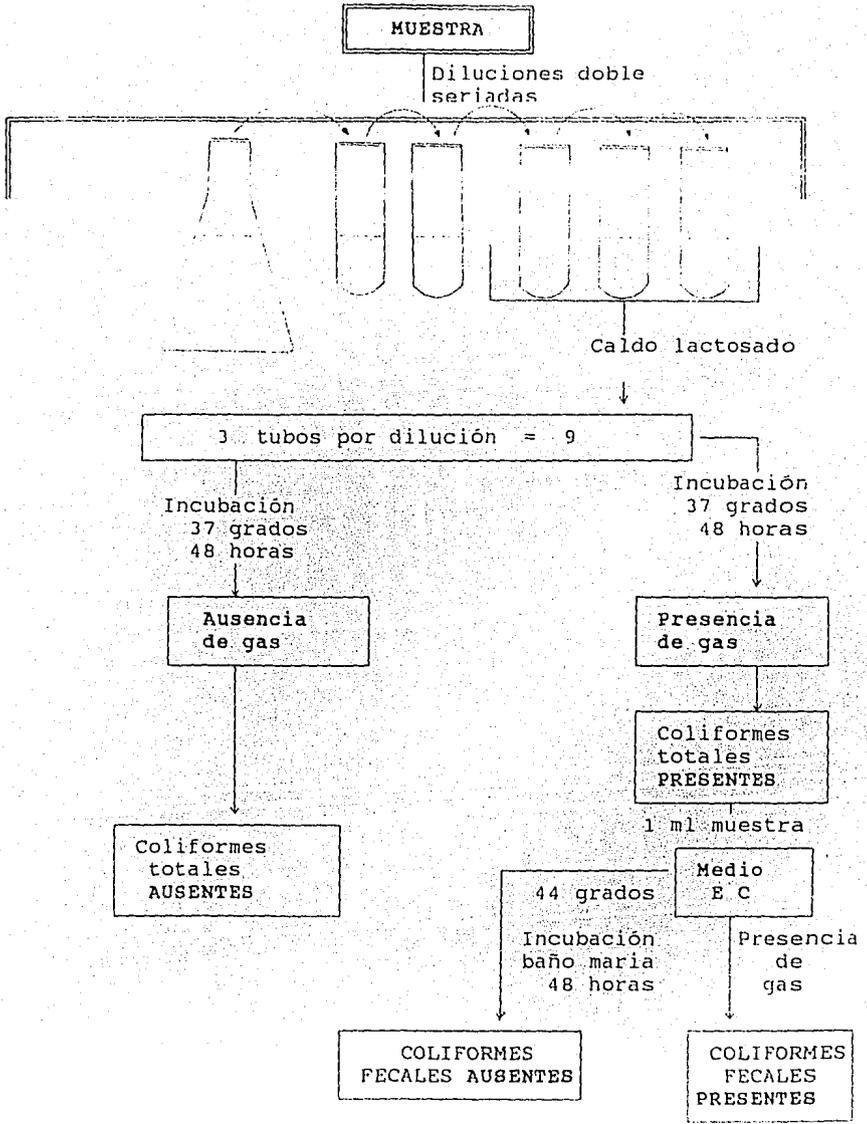


Fig. 4.2. Procedimiento para la determinación del NMP de coliformes totales y fecales

**Coliformes fecales:** se tomó 1 mL de cada una de las diluciones que resultaron positivas en la prueba presuntiva de los coliformes totales y se colocaron en tubos de ensayo preparados con el medio de cultivo EC de Merck (peptona de caseína, lactosa, mezcla de sales biliares, cloruro de sodio, di-potasio hidrogenofosfato). Se incubaron en baño María a 44° C durante 48 horas y después de este tiempo se verificó la presencia de gas en los tubos. Para determinar el NMP/g de coliformes fecales, se realizó el mismo procedimiento que para los coliformes totales.

**Salmonella:** se utilizó un medio de cultivo denominado agua peptonada para el preenriquecimiento, tomando 25 g de lodo y licuándolo con 225 mL del medio. Se incubó a 35° C durante 24 horas. Posteriormente se tomó 1 mL del cultivo anterior y se colocó en un tubo con 10 mL de caldo tetrionato, se homogeneizó y se volvió a incubar por 24 horas a la misma temperatura. Para finalizar la prueba, se sembró por estrías en un medio sólido denominado SS, completamente estéril y se incubó de la misma manera que con los medios anteriores.

Posteriormente se tomó la lectura de acuerdo a las características de las colonias para el medio SS, que deben ser incoloras o ligeramente rosas, traslúcidas, ocasionalmente opacas y algunas cepas dieron colonias con centro negro (productoras de sulfuros) (fig. 4.3).

**Streptococos fecales:** se realizaron las mismas diluciones que para los coliformes totales, además se transfirió 1 mL sin dilución, a tubos de ensayo sin tubo de fermentación (Durham), que contenían caldo azida-glucosa (AD). Se mezclaron y se incubaron a 35° C durante 24-48 horas. La presencia de turbiedad en el medio se consideró como prueba positiva. Posteriormente, de los tubos positivos se resembraron de una a tres asadas a tubos con caldo azida-violeta de etilo (EVA) y se incubaron de la misma manera. Se consideraron positivos los tubos que presentaron turbiedad y/o un precipitado púrpura en el fondo y los resultados se obtuvieron de la misma manera que los coliformes totales, reportándose en NMP/g.

**Hongos:** se utilizó el medio sólido agar papa-dextrosa y de las diluciones más pequeñas (1/10, 1/100 y 1/1000) se tomó 1 mL y se transfirió a una caja de Petri estéril, posteriormente se le agregó el medio que debía tener una temperatura de 44° C, se homogeneizó y se dejó solidificar a temperatura ambiente. Se incubó a temperatura ambiente por 5 a 7 días, al final de los cuales se contaron de las colonias.

**Huevecillos de *Ascaris lumbricoides*:** las identificación de los huevecillos se llevó a cabo en un laboratorio privado, a través de observación directa al microscopio.

## 4.2. Métodos de estabilización

### 4.2.1. Incineración

Se tomaron muestras de las cenizas obtenidas del incinerador piloto diseñado por la

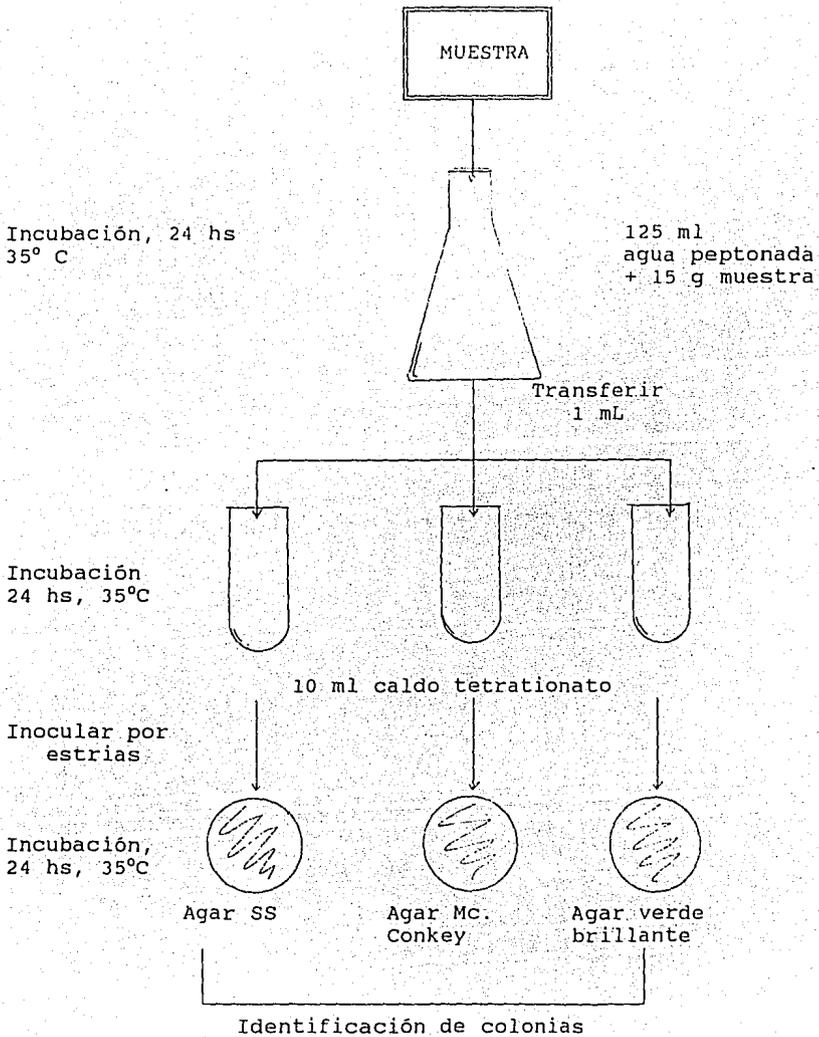


Fig. 4.3. Procedimiento para la determinación de *Salmonella*

Eccaciv para quemar los lodos residuales. Se llevaron a cabo los análisis mencionados en la sección 4.1.

#### 4.2.2. Composteo

Para la elaboración de compostas de los lodos de la Eccaciv, se elaboraron mezclas de lodo con tierra de monte (material utilizado como sustrato para el cultivo de plantas de ornato, extraído del bosque de pino-encino, fuertemente descompuesto, con el material original apenas reconocible y que ha perdido la mayor parte de su estructura), y tierra de hoja.(material extraído del bosque de pino-encino, con los restos vegetales todavía reconocibles pero que muestran fragmentación).

Las cantidades requeridas de estos materiales se determinaron de acuerdo con el balance de masas descrito por la EPA (1985), el cual establece que para garantizar un composteo adecuado es necesario un mínimo de 40% de sólidos en la mezcla. La ecuación para calcular las cantidades de tierra de monte y de hoja que deben mezclarse por cada kilogramo de lodo húmedo, es la siguiente:

$$X = \frac{W1 (40 \% - \%S1)}{\%Sm - 40\%}$$

Donde:

X = peso de material orgánico (kg), tierra de monte o de hoja.

W1 = peso de lodo húmedo (kg)

%S1 = porcentaje de sólidos totales en el lodo (100 - % de humedad del lodo).

%Sm = porcentaje de sólidos en el material orgánico (100 - % de humedad tierra de monte o de hoja).

El porcentaje de sólidos en los materiales se determinó mediante el análisis de las muestras antes de hacer las mezclas, los resultados que se obtuvieron para estos parámetros son:

25 % de sólidos en el lodo

60 % en tierra de monte

46 % en tierra de hoja

Las cantidades necesarias para obtener un 40 % de sólidos en las mezclas fueron de 75 kg de tierra de monte y 250 kg de tierra de hoja por cada 100 kg de lodo húmedo, las proporciones en peso para cada mezcla son de 1:0.75 y 1:2.5 respectivamente. Además se preparó una mezcla con los tres materiales con proporciones de peso de 1:0.50:0.83 (100 kg de lodo: 50 kg de tierra de monte y 83 kg de tierra de hoja). Adicionalmente se estableció una pila únicamente con lodo como testigo. Todos los tratamientos se establecieron con tres repeticiones.

Las dimensiones de las pilas fueron de 50 cm de altura por un metro de diámetro, a partir del día en que se formaron, se voltearon manualmente con pala dos veces por día. La aireación proporcionada por el volteo de las mezclas, suministra el oxígeno requerido como combustible para que el proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, actúe sobre el lodo y se generen altas temperaturas para destruir a los patógenos. Además, el volteo de las mezclas incrementa la porosidad por movimiento convectivo del aire y ayuda a distribuir las áreas anaerobias hacia la zona aerobia (Bishop y Godfrey, 1983).

Las temperaturas se midieron diariamente en el centro de las pilas (entre las 11 y las 12 horas del día), hasta que no presentaron variaciones. La duración del proceso de composteo fue de 19 días en total.

Se llevaron a cabo análisis físicos, químicos y microbiológicos de los materiales originales antes de realizarse las pilas y después de los 19 días de haberse aireado, con la finalidad de detectar los cambios que pudieran producirse.

#### 4.2.3. Pruebas en suelos agrícolas

Durante la época de lluvias, se llevó a cabo un experimento sobre un suelo de tipo vertisol, que se eligió en función de la disponibilidad del terreno y su cercanía con la planta de tratamiento. Se seleccionó al maíz como el cultivo a implantarse sobre el suelo con lodo, ya que en la zona de estudio es el más común y es una planta que difícilmente absorbe los elementos potencialmente tóxicos.

Para adicionar el lodo residual al suelo y no concentrar elementos contaminantes por encima de los niveles aceptados internacionalmente, es recomendable controlar las adiciones considerando al elemento de mayor concentración en el lodo, su concentración máxima permisible en el suelo, la frecuencia anual de aplicación del lodo y el número de años que desea agregarse al suelo. Por tal motivo, se planteó una ecuación a partir de la fórmula utilizada por la Comunidad Económica Europea (Lester, 1987a)

$$\text{Ton de lodo residual/ha} = \frac{(N-n) (P)}{(F) (T) (A)}$$

en donde:

N = concentración máxima permisible del elemento en suelos (ppm)

n = concentración del elemento en el suelo (ppm)

P = peso de una hectárea de suelo, considerando una densidad aparente de 1 g/mL y una profundidad de 20 cm (ton).

F = frecuencia anual de aplicación del lodo

T = concentración del elemento en el lodo (ppm)

A = número de años de aplicación del lodo

Las concentraciones máximas permisibles de cada elemento en el suelo, aceptadas internacionalmente son (Aubert y Pinta, 1977):

Zn = 250 ppm; Cu = 130 ppm; Ni = 300 ppm; Cr = 300 ppm; Mn = 1000 ppm y Pb = 70 ppm

Se investigaron las concentraciones en muestras de suelos del Valle de Cuernavaca, tomando los más cercanos a la planta de tratamiento, para contar con una base de las concentraciones de metales pesados de los suelos del lugar. De acuerdo a Sánchez y Ortiz (1989), las concentraciones son las siguientes:

Zn = 79 ppm; Cu = 53 ppm; Ni = 80 ppm; Cr = 65 ppm; Mn = 760 ppm y Pb = 20 ppm.

Con base en la ecuación diseñada, se calculó el tonelaje que se puede añadir por hectárea durante 50 años y con una aplicación anual. La ecuación se debe aplicar para cada uno de los elementos potencialmente tóxicos presentes en los lodos residuales con la finalidad de elegir la menor dosis que resulte. Los cálculos que se llevaron a cabo son los siguientes:

Ton de lodo (Zn) =  $(250-79) (2000)/1 \times 50 \times 1540.00 = 4.40$   
Ton de lodo (Cu) =  $(130-53) (2000)/1 \times 50 \times 537.50 = 5.73$   
Ton de lodo (Ni) =  $(300-80) (2000)/1 \times 50 \times 95.90 = 91.72$   
Ton de lodo (Cr) =  $(300-65) (2000)/1 \times 50 \times 378.30 = 24.84$   
Ton de lodo (Mn) =  $(1000-760) (2000)/1 \times 50 \times 105.80 = 90.71$   
Ton de lodo (Pb) =  $(70 - 0) (2000)/1 \times 50 \times 432.50 = 6.46$

En el caso de los lodos de la Eccaciv, la dosis que resultó ser la menor fue de 4.40 ton/ha, correspondiente al zinc.

En el experimento agrícola se utilizó un diseño de bloques al azar, ya que "esta distribución de los tratamientos tiene grandes ventajas cuando es posible agrupar las unidades experimentales en bloques, de tal manera que la variabilidad entre unidades experimentales sea mínima, aún cuando la variación entre bloques sea alta" (Reyes, 1980). Se formaron 9 unidades experimentales (parcelas), a las que se les adicionaron los siguientes tratamientos: 0 ton/ha, 1 ton/ha y 5 ton/ha de lodo. La dosis menor se definió arbitrariamente y la mayor, en función de los cálculos efectuados anteriormente. A cada tratamiento le correspondieron tres repeticiones. Cada parcela ocupó un área aproximada de 383 m<sup>2</sup> (22 X 17.4 m), incluyendo dos surcos terminales sin tratamiento para eliminar el efecto de colindancia. El área total utilizada para el experimento fue de aproximadamente 3,450 m<sup>2</sup>.

Antes de la aplicación de lodo, se tomaron muestras del suelo con la finalidad de comparar, al final del experimento, los cambios ocurridos por la acción de los tratamientos. Se procedió a aplicar las dosis de lodo residual al suelo, para lo cual primeramente se llevaron a cabo los cálculos necesarios para agregar la dosis

correcta en base seca, debido a que el lodo utilizado contenía un cierto grado de humedad. El lodo se homogeneizó con el suelo utilizando un rastrillo y pala, a una profundidad de 20 cm considerada como la capa arable.

El lodo se dejó en el suelo aproximadamente un mes, con el objeto de disminuir la población de microorganismos patógenos, por el efecto de factores ambientales, y para permitir una mayor homogeneización del lodo con el suelo. Posteriormente se construyeron los surcos, dejando 75 cm de distancia entre ellos. El surcado se llevó a cabo por el personal de la empresa, utilizando un tractor.

A continuación se sembraron las semillas de maíz de la variedad H-419, lo cual se realizó en forma manual y ubicando las semillas en el lomo del surco. Se colocaron las semillas a unos 7 cm de profundidad, con una distancia entre ellas de 30 cm y depositando tres semillas por punto. En el momento de la siembra, se aplicó un plaguicida fosforado (terbufos o counter) para el combate de la "gallina ciega" (*Phyllophaga spp*), que se detectó en el suelo antes del experimento. Se llevaron a cabo labores de deshierbe en forma manual, dos veces por ciclo.

Las adiciones de lodo al suelo, fueron dos veces, una vez por año, cuidando que las dosis utilizadas fueran las mismas en las parcelas correspondientes. Durante los dos años se implantó el cultivo de maíz.

Antes de la cosecha, se colectaron hojas maduras y la raíz de 15 plantas de maíz tomadas al azar, del centro de la parcela. Se lavaron perfectamente con agua destilada y se secaron a 70<sup>o</sup> C para su posterior análisis químico. Además, en el momento de la cosecha, se colectaron las mazorcas de 15 plantas tomadas del centro de cada una de las parcelas. El grano que se obtuvo se pesó y se secó a 75<sup>o</sup> C para su posterior análisis.

Para los análisis de hojas, raíz y grano, se molieron en un molino de acero inoxidable y se tamizaron a través de un tamiz (del mismo material), con abertura de 0.5 mm. Se tomó 1 g de cada muestra y se llevó a cabo una digestión con HNO<sub>3</sub> y HClO<sub>4</sub>. La solución resultante se filtró y se aforó a 100 mL. De aquí se determinaron los siguientes elementos: P, Mg, K, Fe, Zn, Mn, Cu, Co, Cr, Pb Ni y Cd. El nitrógeno se determinó utilizando el método Kjeldahl.

También después de la cosecha del maíz, se tomaron muestras de suelos superficiales (0-20 cm) de cada una de las parcelas. Se secaron al aire (temperatura ambiente) y se tamizaron a través de una malla de 2 mm de abertura para los análisis físicos y químicos. Se analizaron con los mismos parámetros y técnicas mencionados en la sección 4.1.3.1 y 4.1.3.2.

La totalidad del grano cosechado, se pesó y se sumó con el resultado del grano colectado para análisis. Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el rendimiento en kg/ha.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis cualitativos

En el cuadro 5.1 se muestran los resultados de los análisis cualitativos. La fluorescencia de rayos X mostró una cantidad mayor de elementos en comparación con la microscopía electrónica y la espectroscopia de emisión, sin embargo los tres coinciden en señalar los siguientes elementos como constituyentes principales de los lodos residuales y que son: aluminio, silicio, hierro y calcio; en menores cantidades el cobre, titanio, níquel, zinc, plomo, cromo, sodio y manganeso.

**Cuadro 5.1. Resultados de los análisis cualitativos aplicados a los lodos residuales de la Eccaciv**

MICROSCOPIA ELECTRONICA	Al, Si, P, K, Cl, Ca, Fe, S
FLUORESCENCIA DE RAYOS X	Al, Si, Ca, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn, Pb, As y Cr
ESPECTROSCOPIA DE EMISION	Al, Si, P, Ca, Fe, Na, Cu, Ti, B y Mn

### 5.2. Parámetros de rutina

#### 5.2.1. Porcentaje de humedad y sólidos

Las muestras analizadas indican un intervalo de humedad de 71.55 a 79.50 %, con baja variabilidad, ya que los valores de la media y mediana son muy similares y la desviación estándar es de 2.7 (cuadro 5.2). El porcentaje de sólidos se comporta de manera análoga, ya que este valor se deriva del anterior (100 - % de humedad) (fig. 5.1).

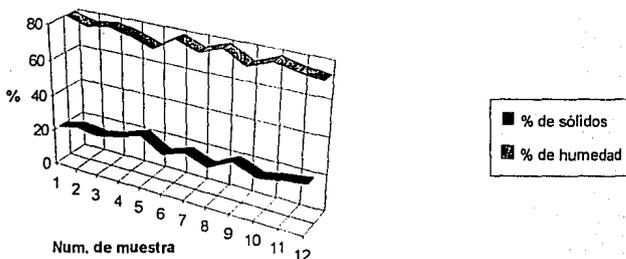
#### 5.2.2. Densidad aparente

Los resultados de densidad aparente presentan valores menores o iguales a 1 (0.71 a 1.02 g/cm<sup>3</sup>). La media y mediana son ligeramente diferentes (cuadro 5.2). Estos resultados indican que no afectan la densidad de un suelo, si se le agrega lodo residual, ya que no es muy diferente a la del mismo.

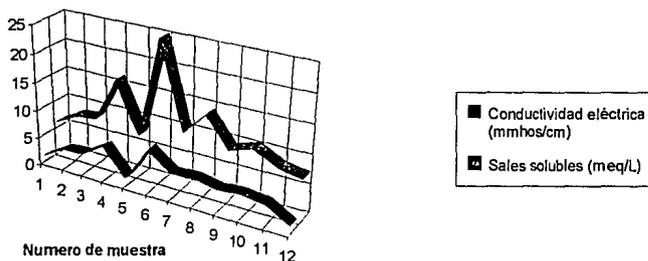
#### 5.2.3. Sales solubles y conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de los lodos residuales presenta una variación considerable entre 1.19 a 7.70 mmhos/cm, con una media de 3.94 y una mediana de 4.03 (cuadro 5.2). Una de las muestras presentó un valor muy alto (7.70) y otro muy bajo (1.19), lo que puede deberse a la variación en la calidad y cantidad de aguas residuales que recibe la planta de tratamiento. El resto de las muestras presentaron valores entre 3.50 y 4.90 (figs. 5.2 y 5.3).

**Fig. 5.1. Porcentaje de humedad y sólidos de 12 muestras compuestas de lodos residuales**



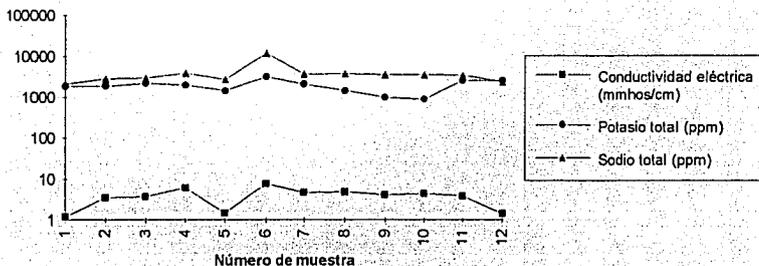
**Fig. 5.2. Comportamiento de la conductividad eléctrica y sales solubles**



La conductividad en todas las muestras, excepto la de la muestra 6, se relaciona con el contenido de sodio y potasio (fig. 5.3). La muestra 6 contiene una concentración alta de cloruros así como  $Mn$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Mg^{+2}$  y  $Fe^{+3}$ , debido a que el pH es menor que en el resto (ver apéndice A.3).

Los valores de conductividad indican que el uso de estos lodos puede aumentar la salinidad en suelos con problemas de drenaje, ya que de acuerdo al Laboratorio de Salinidad de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (USSLS, 1954), una conductividad mayor de 4 mmhos/cm, restringe el crecimiento de la mayor parte de las plantas, provocando también presiones osmóticas altas en las raíces de las mismas.

**Fig. 5.3. Relación entre la concentración total de sodio y potasio con la conductividad eléctrica**



### 5.2.4. pH

El pH se midió en una suspensión lodo-agua en proporción 1:5 y 1:2.5. El intervalo de pH fue de 5.35 a 7.07, con una mediana de 5.83, que corresponden a un lodo ligeramente ácido, (cuadro 5.2).

En la relación 1:5 el pH es mayor, pues la cantidad de cationes en la doble capa disminuye (efecto de dilución salina), favoreciendo que protones de la solución pasen a ocupar los sitios alrededor de la micela, disminuyendo la concentración de  $H^+$  en la solución (fig. 3.7a).

En el lodo residual, los valores ligeramente ácidos que se encontraron, se deben al contenido de ácidos orgánicos que liberan protones al medio (fig. 3.7b), (se relaciona con las cargas negativas que la materia orgánica presenta en su superficie y que es discutido más adelante), al contenido de sales que en la doble capa difusa sustituyen al ion hidrógeno para liberarlo al medio y a la hidrólisis provocada por el aluminio (figs. 3.7c, 3.5 y cuadro 5.2).

Por lo tanto, los lodos residuales no deben agregarse a suelos ácidos sin tratarlos previamente con cal, ya que en condiciones extremas, pudieran presentarse problemas de solubilidad de los elementos potencialmente tóxicos del lodo y los que están presentes naturalmente en la fase mineral de los suelos (fig. 3.6).

### 5.2.5. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica en el lodo residual, es muy alto, se presenta en el cuadro 5.3 y varía de 44.16 a 84.00 %, con una media de 55.45 y una mediana de 51.31 %. A pesar de que no se detectaron carbonatos, en todos los casos el método de pérdida por ignición, dio resultados más altos (60.94 a 84 %) y puede deberse a que se perdieron otros componentes durante la incineración del lodo (fig. 5.4), por

ejemplo, agua intersticial o SO<sub>2</sub>.

**Cuadro 5.2. Resultados de los análisis físicos y químicos de rutina de lodos residuales**

Parámetro	Intervalo	Media	Mediana	S
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.71-1.02	0.87	0.89	0.009
C.E. (mmhos/cm)	1.19-7.70	3.94	4.03	1.94
% de humedad	71.55-79.50	76.14	76.02	2.70
% de sólidos	20.50-28.45	23.86	23.98	2.70
pH (1:2.5)	5.35-6.69	5.77	5.66	0.40
pH (1:5)	5.35-7.07	6.01	5.83	0.57
Carbonatos*	ND	ND	ND	0.00
Bicarbonatos*	3.00-8.00	4.59	4.20	1.50
Cloruros*	3.20-20.00	6.35	4.25	5.07

Nota: \* meq/L; C.E.= Conductividad eléctrica y ND = no detectado

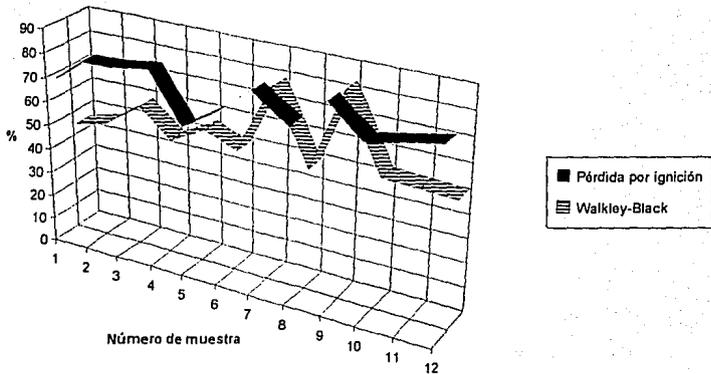
### 5.2.6. Nitrógeno

En el cuadro 5.3 se presentan los resultados del contenido de nitrógeno total y del nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico constituye un 96.64 % del nitrógeno total (el lodo está compuesto por 4.46 % de N total y 4.31 % de N orgánico, valores promedio). El resto (3.36 %), se presenta en formas inorgánicas.

El nitrógeno es un elemento esencial para las plantas y pertenece a los llamados macronutrientes, es decir, que se requiere en cantidades altas para el buen crecimiento de las mismas.

Los valores son altos comparados con nitrógeno en suelo, presentan baja variación y corresponden a lo esperado por los valores de porcentaje de carbono orgánico. El lodo se puede considerar un excelente medio para reponer el nitrógeno que el suelo pierde al ser cultivado.

Fig. 5.4. Concentración de materia orgánica



### 5.2.7. Fósforo

El fósforo es otro elemento constitutivo de los lodos residuales y es esencial para las plantas. En los lodos fue determinado en su contenido total y disponible. Este último da una referencia de la cantidad que puede ser tomado por las plantas e incluye todas las formas de fosfatos inorgánicos tales como los iones ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ),  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Como se observa en el cuadro 5.3, el fósforo disponible representa un 6.92 % del fósforo total (1.59 % de P total y 0.11 % de P disponible, valores promedio), lo que hace suponer que el 93.08 % se presenta en formas orgánicas, y con una tendencia hacia la insolubilidad.

Al igual que el nitrógeno, el lodo se puede considerar alto en fósforo y su disponibilidad dependerá de las condiciones finales del suelo mejorado, especialmente del pH.

En el cuadro 5.4 se muestran los valores de los principales nutrientes que proporcionan los abonos orgánicos más comúnmente usados y se comparan con el contenido en lodos residuales. Aquí se observa que el contenido de materia orgánica se encuentra por arriba de los abonos comunes, en el contenido de nitrógeno y fósforo sólo lo supera la gallinaza, el resto de los macronutrientes se presenta en proporciones más bajas.

**Cuadro 5.3. Materia orgánica, nitrógeno y fósforo contenido en los lodos residuales (valores promedio de 12 muestras)**

Parámetro	Intervalo	Media	Mediana	S
% materia orgánica (W-B)	44.16-83.00	55.45	51.31	12.34
% pérdida de peso	60.94-84.00	74.98	76.31	6.72
% nitrógeno total	2.47-5.65	4.46	4.39	0.88
% nitrógeno orgánico	2.44-5.64	4.31	4.31	0.92
relación C/N	10.79-17.88	12.43	11.69	14.02
% fósforo total	1.00-3.60	1.59	1.26	0.89
% fósforo disponible	0.07-0.29	0.11	0.09	0.06

Nota: S = desviación estándar, W-B = Walkley-Black y C/N = carbono/nitrógeno

**Cuadro 5.4. Comparación del contenido nutrimental de abonos comunes con el lodo residual de la Eccaciv (Ramírez *et al*, 1991)**

Parámetro de comparación	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Ovino	lodo
pH	8.70	7.60	7.20	9.00	5.86
% M.O	48.24	29.43	46.90	48.24	55.45
% N	2.10	5.10	3.10	2.30	4.46
% P	0.58	2.06	0.64	0.72	1.59
% K	3.10	2.20	1.83	4.36	0.19
% Ca	3.39	20.13	1.68	2.91	1.18
% Mg	0.97	0.88	0.93	0.57	0.24

### 5.2.8. Calcio, magnesio, sodio y potasio

La concentración total de estos elementos es la siguiente: calcio, 11788.67 ppm, magnesio 2383.00 ppm, sodio 4013.50 ppm y potasio 1931.00 ppm (cuadro 5.5 y fig. 5.5).

La concentración de calcio y magnesio se encuentran dentro del intervalo normal de los suelos, mientras que la de los otros elementos son más bajas.

En el cuadro 5.5. se listan los valores de los cationes intercambiables. El intervalo para calcio es de 9.8 a 20.36 meq/100 g, notablemente más alto que un suelo, al igual que el magnesio (2.66 a 7.87 meq/100 g), sodio (2.48 a 6.81 meq/100 g) y potasio (1.85 a 13.5 meq/100 g).

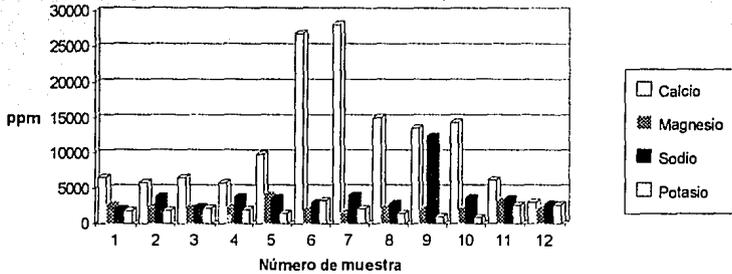
**Cuadro 5.5. Calcio, magnesio, sodio, potasio y capacidad de intercambio catiónico de los lodos residuales de la Eccaciv**

Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S
<b>Ca:</b>				
T (ppm)	3036.00-28122.00	11788.67	8156.00	8285.95
T (meq/100 g)	15.18-1406.10	58.94	40.78	41.43
I (meq/100 g)	9.80-20.36	13.83	14.07	3.24
Sol (meq/L)	0.33-0.60	0.46	0.43	0.08
Sol (meq/100 g)	1.65-3.00	2.30	2.15	0.40
<b>Mg:</b>				
T (ppm)	1573.00-4045.00	2383.00	2228.50	672.83
T (meq/100 g)	13.11-337.08	19.86	18.57	5.60
I (meq/100 g)	2.66-7.87	5.82	6.28	1.70
Sol (meq/L)	0.00-0.53	0.21	0.19	0.13
Sol (meq/100 g)	0.00-2.65	1.05	0.95	0.65
<b>Na:</b>				
T (ppm)	2111.00-12374.00	4013.50	3132.60	458.29
T (meq/100 g)	9.18-53.80	17.45	13.62	1.99
I (meq/100 g)	2.48-6.81	4.67	4.55	1.40
Sol (meq/L)	1.13-9.39	2.55	1.82	2.26
Sol (meq/100 g)	6.65-46.95	12.75	9.01	11.30
<b>K:</b>				
T (ppm)	896.00-3283.00	1931.00	1954.00	668.33
T (meq/100 g)	2.30-84.18	9.95	9.98	1.71
I (meq/100 g)	1.85-13.50	7.15	7.62	3.04
Sol (meq/L)	0.00-0.60	0.22	0.21	0.17
Sol (meq/100 g)	0.00-3.00	1.10	1.05	0.85
<b>C.I.C (meq/100 g)</b>	<b>49.00-89.00</b>	<b>64.92</b>	<b>62.50</b>	<b>11.95</b>

Nota: C.I.C. = capacidad de intercambio catiónico; T = concentración total; I = intercambiable; Sol = solubles; S = desviación estándar

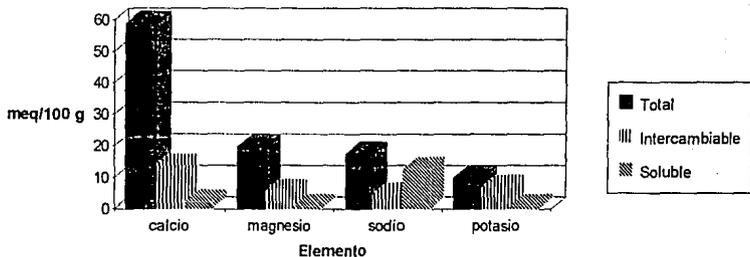
Aunque el lodo contiene cantidades totales mayores o iguales que el suelo, la disponibilidad de estos elementos es más alta, ya que así lo muestran los valores de los cationes intercambiables. Con excepción del sodio y magnesio, que disminuye las cualidades físicas del suelo, la presencia de altas cantidades de potasio, y calcio intercambiables, resultan muy favorables.

**Fig. 5.5. Concentración total de calcio, magnesio, sodio y potasio**



De las formas intercambiables, el calcio compite en mayor proporción, seguido del potasio, magnesio y sodio. En cuanto a las formas solubles el potasio y magnesio presentaron menor grado de solubilidad en comparación con el calcio y el sodio. Los valores de sodio soluble explican el resultado de la conductividad eléctrica. (cuadros 5.2, 5.5 y figs. 5.3 y 5.6).

**Fig. 5.6. Comparación entre las concentraciones total, intercambiable y soluble de calcio, magnesio, sodio y potasio**



Todos estos elementos son esenciales, aunque el sodio solamente es necesario para algunas plantas (halófitas). Su presencia en solución afecta a las plantas no tolerantes, ya que aumenta la presión osmótica y disminuye la absorción del agua.

El calcio es un constituyente mayor en todas las plantas, las formas disponibles del elemento puede encontrarse dentro de los iones intercambiables o en la solución del lodo. Los cuatro cationes son los que compiten en mayor proporción en el complejo de

intercambio, constituido principalmente por las micelas orgánicas del lodo que presentan grupos funcionales tales como -OH, -COOH y fenólicos. Estos grupos funcionales se hidrolizan y resultan terminaciones con cargas negativas sin satisfacer y que por adsorción puede atraer a los cationes del medio, formando una doble capa difusa (figs. 3.5 y 5.7).

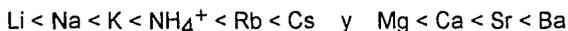
### 5.2.9 Capacidad de intercambio catiónico

De acuerdo a los resultados obtenidos para los lodos residuales, la capacidad de intercambio catiónico varía de 49 a 89 meq/100 g, con una media de 64.92, una mediana de 62.50 y una desviación estándar de 11.95, siendo más alta que en los suelos (cuadro 5.5 y fig. 5.8).

Si se observan los valores de las medidas de tendencia central, están más desviados hacia una CIC mayor de 50 meq/100 g, lo que significa que los lodos tienden hacia una disponibilidad de los metales, principalmente de calcio, magnesio, sodio y potasio. Los lugares de intercambio que pudieran ocupar los metales transicionales, aparentemente se sustituyen por la formación de quelatos, como se discute a continuación.

En los lodos, la capacidad de intercambio catiónica está relacionada principalmente con la materia orgánica, ya que el contenido de arcillas es despreciable. Principalmente los cationes (Ca, Mg, Na y K), ocupan posiciones de los hidrógenos ionizables de las terminales polares de la materia orgánica (como -COOH, -OH, -CH<sub>2</sub>OH, entre otros), (fig. 3.7b y 5.7), ya que no compiten favorablemente con los iones transicionales que están coordinados a la materia orgánica formando quelatos (Lester, 1987b).

La mayor parte de los sitios de intercambio son ocupadas por el calcio, seguido por el potasio, magnesio y sodio (cuadro 5.5), lo que coincide con la serie "liotrópica" (Carroll, 1959), basada en la relación carga/radio hidratado y también con la concentración de iones totales (cuadro 5.5 y fig. 5.6). El orden de sustitución según Carroll (1959), es el siguiente:



Esta es la llamada serie "liotrópica", basada en la carga del catión/radio iónico hidratado. Entre mayor sea la relación, el enlace será más favorecido.

### 5.2.10. Aluminio

El cuadro 5.6 muestra la concentración del aluminio en las doce muestras compuestas y se puede observar que a partir de la muestra 9, la concentración del elemento es considerablemente menor en un 37.94 % (este dato muestra el porcentaje que le corresponde al promedio de las 4 últimas muestras, con respecto al promedio de las primeras 8 muestras).

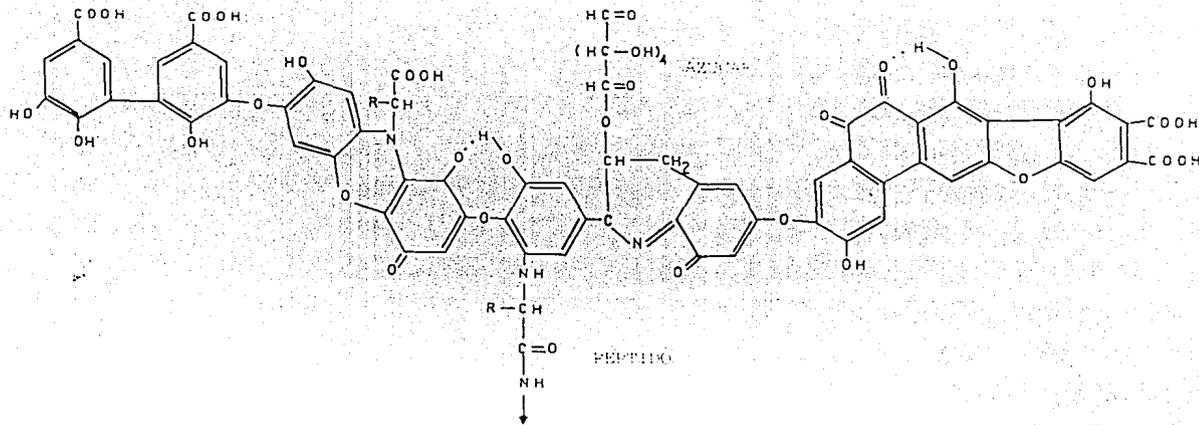
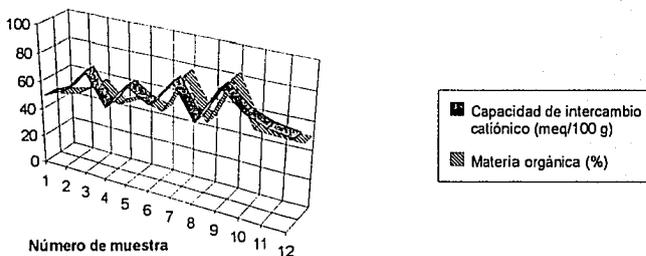


Fig. 5.7. Esquema hipotético de la composición de la materia orgánica. Los grupos funcionales -OH y -COOH contribuyen con las cargas negativas de su superficie y aumentan la capacidad de intercambio catiónico

**Fig. 5.8. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica en los lodos residuales de la planta Eccaciv**



Esta disminución se debe a que inicialmente la planta de tratamiento utilizaba al sulfato de aluminio para flocular los lodos residuales (sección 2.2), sin embargo, durante la fase experimental de este estudio, se les recomendó sustituirlo, ya que la dispersión del aluminio en el ambiente provoca desequilibrios, que también tienen relación con el pH (fig. 3.7c).

Posteriormente se empezó a utilizar una poliacrilamida (NALCO), que es un compuesto orgánico y los resultados del contenido de aluminio fueron menores (fig. 5.9)

### 5.3 Elementos potencialmente tóxicos

#### 5.3.1. Concentración total

Los resultados de las concentraciones totales de 10 metales se presentan en el cuadro 5.6 y en el apéndice A.3. En todos los casos se observan valores diferentes de la media y la mediana; los de la desviación estándar son altos, lo que indica una concentración variable de estos elementos (figs. 5.9 y 5.10; cuadros 5.6 y 5.7). Estos elementos posiblemente provienen de descargas industriales con efluentes de composición muy variable. Cuatro de estos elementos son micronutrientes, es decir, elementos esenciales para las plantas en bajas concentraciones (Fe, Zn, Cu y Mn). En los análisis cuantitativos no se detectaron el cadmio y cobalto; el arsénico y mercurio no se detectaron en las diferentes pruebas cualitativas, por lo que en adelante no se volvieron a analizar.

**Cuadro 5.6. Contenido total de elementos potencialmente tóxicos en lodos (ppm)**

Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S
hierro	5982.00-12136.00	9059.08	9764.00	2207.45
aluminio	4800.00-24000.00	14300.00	16000.00	6100.00
zinc	504.00-2904	1749.16	1926.00	814.88
cobre	330.00-631.00	470.08	453.00	110.27
níquel	87.00-104.50	95.94	98.14	7.02
manganeso	55.00-208.00	110.42	94.50	48.63
cromo	126.00-457.00	311.75	318.50	109.10
plomo	267.00-823.00	479.42	456.00	163.96
cadmio	ND	ND	ND	ND
cobalto	ND	ND	ND	ND

Nota: ND = no detectado; S = desviación estándar

**Cuadro 5.7. Proporción media/mediana de las concentraciones totales de metales pesados**

Metal	Proporción media/mediana
aluminio	0.89
hierro	0.93
zinc	0.90
cobre	1.04
níquel	0.98
cromo	0.98
manganeso	1:17
plomo	1.05
cobalto	--
cadmio	--

Nota: -- = sin datos, ya que el Co y Cd no se detectaron en los lodos

### 5.3.2. Disponibles

Los resultados obtenidos para los "metales pesados" disponibles se observan en el cuadro 5.8, donde se presenta también una comparación con la concentración total de los mismos y en el cuadro A.3.8 del apéndice. La distribución de los elementos encontrados en esta forma es como sigue:

$$\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Cr} = \text{Co} = \text{Cd}$$

El porcentaje de recuperación con la solución extractante fue menor o igual al 10 %, lo que indica que sólo este porcentaje puede ser disponible para las plantas.

Fig. 5.9. Concentración de aluminio, hierro y zinc

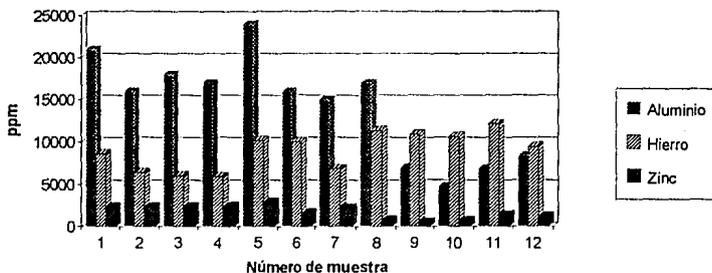
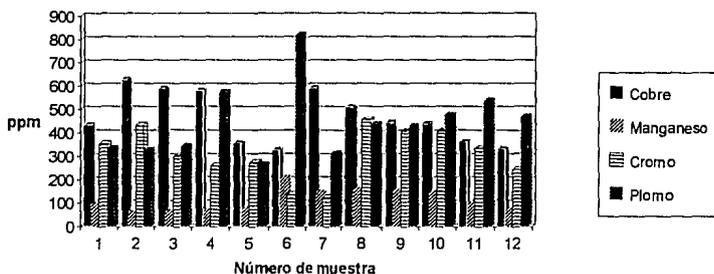


Fig. 5.10. Concentración total de cobre, manganeso, cromo y plomo



El elemento que se extrajo en mayor proporción fue el níquel, seguido del cobre, hierro, manganeso, zinc y plomo. Cabe mencionar que el cromo no se detectó en el extracto, quizás porque la materia orgánica oxida al  $Cr^{+6}$ , cambiándolo a formas insolubles y no reactivas ( $Cr^{+3}$ ) (Gutiérrez, 1994). Si bien el porcentaje de extracción relativo del níquel es el más alto, su concentración total y disponible es de las más bajas (cuadro 5.8). El plomo, se comporta en forma similar, aunque su extractabilidad es más restringida. Estos resultados indican que los metales que se presentan en mayor concentración total y disponibilidad son los esenciales para las plantas.

**Cuadro 5.8. Resultados de la concentración de elementos potencialmente tóxicos extraídos con EDTA 0.05 M, en los lodos residuales de la Eccaciv (valores promedio de 12 muestras compuestas)**

Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S	% con respecto a la concentración total
hierro	424.12-860.44	642.00	692.26	156.50	7.09
zinc	16.83-96.99	58.40	64.32	27.21	3.34
cobre	27.39-52.37	39.00	37.59	9.26	8.30
manganeso	5.59-21.15	11.25	9.61	4.94	10.17
chromo	ND	ND	ND	0.00	0.00
níquel	10.05-14.15	13.00	13.29	0.72	13.54
plomo	8.35-25.72	15.00	14.27	4.77	3.13
cadmio	ND	ND	ND	0.00	ND
cobalto	ND	ND	ND	0.00	ND

Nota: ND = no detectado; S = desviación estándar

El EDTA extrae a metales unidos a carbonatos, materia orgánica, intercambiables, solubles y algunos precipitados a sulfitos u ocluidos en óxidos (Beckett *et al*, 1983 ) y se seleccionó este reactivo porque el principal componente de los lodos es la materia orgánica.

Los niveles de metales pesados en estos lodos, son muy bajos comparados con los valores de lodos de EEUUA, Inglaterra, Japón y demás países de la Comunidad Económica Europea, lo que corresponde a una composición básicamente doméstica (alta población en relación a la industria).

#### **5.4. Especiación de "metales pesados"**

Con el objeto de identificar las especies de los metales en los lodos, se llevó a cabo una extracción secuencial. Mediante diferentes soluciones, se buscó extraer selectivamente a los metales en solución, analizando su disponibilidad. Se eligió el método propuesto por diferentes autores (Chang *et al*, 1984b; Emerich *et al*, 1982b y Sposito *et al*, 1982) (ver sección 4.1.3.1c).

En el cuadro 5.9 se muestran los resultados obtenidos al llevar a cabo la especiación de 9 metales pesados, así como la suma de las fracciones. En este caso no se incluyó el aluminio debido a que es uno de los elementos más abundantes en el suelo y la legislación internacional no lo contempla.

Como puede verse, el porcentaje de recuperación con este método es óptimo, lo que puede apreciarse en el cuadro 5.10. La mayor concentración se encontró en la fracción extraída con una mezcla de ácido nítrico y perclórico, lo que significa que la mayor proporción de los metales se encuentra en formas altamente estables, de muy baja disponibilidad para las plantas.

La fracción extraída con NaOH es significativa, ya que el contenido de materia orgánica es alto y forma complejos con los metales. No obstante, las concentraciones obtenidas con EDTA fueron también significativas, lo que indica que una buena proporción se encuentra en formas precipitadas, adsorbidas o posiblemente coprecipitadas con los hidróxidos de aluminio (cuadro 5.11).

Por último, las soluciones con las que se recuperaron los metales en menor proporción fueron con agua y con nitrato de potasio, que son formas solubles o débilmente enlazadas y por lo tanto, las más disponibles para las plantas (cuadro 5.11). Además, en forma análoga a la extracción general con EDTA, los metales que se recuperaron son los esenciales para las plantas (Cu, Fe, Mn y Zn). Esto no sucede con aquéllos que no juegan ningún papel en la nutrición de las mismas y que pudieran llegar a ser tóxicos e introducirse a la cadena alimentaria (figs. 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14).

**Cuadro 5.9. Resultados de la especiación de los metales pesados en lodos residuales de la Eccaciv (ppm, base seca)**

Metal	HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub>	EDTA	NaOH	H <sub>2</sub> O	KNO <sub>3</sub>	Suma
hierro	6597.69	2159.60	190.48	28.58	23.35	9000.39
zinc	1059.60	521.00	53.15	0.90	2.45	1637.10
cobre	355.43	54.75	28.79	1.00	14.10	457.07
manganeso	79.93	124.40	4.15	0.83	1.80	211.11
romo	273.72	44.88	7.18	ND	ND	289.78
plomo	353.82	116.90	22.30	ND	ND	493.00
cobalto	ND	ND	ND	ND	ND	-----
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	-----
níquel	112.00	12.00	13.05	ND	ND	139.75

Nota: ND y ----- = no detectado

**Cuadro 5.10. Porcentaje de recuperación de metales pesados por extracción secuencial, con respecto a la concentración total**

Metal	Porcentaje
hierro	99.32
zinc	93.57
cobre	96.59
manganeso	101.49
romo	92.95
plomo	102.83
cobalto	----
cadmio	----
níquel	105.07

Nota: Algunos metales sumaron más de 100%, aunque no con mucha diferencia. Esto puede deberse a un error en la parte analítica, de la misma manera que aquellos metales donde el porcentaje fue menor ---- = no detectados

**Cuadro 5.11. Porcentaje de extracción con cada uno de los reactivos, con respecto a la concentración total**

Metal	Fracción extraída por (%)				
	HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub>	EDTA	NaOH	H <sub>2</sub> O	KNO <sub>3</sub>
hierro	73.30	23.99	2.12	0.32	0.26
zinc	64.72	31.82	3.25	0.05	0.15
cobre	78.27	12.06	6.34	0.22	3.10
manganeso	37.86	58.93	1.97	0.39	0.85
cromo	82.03	15.49	2.48	0.00	0.00
plomo	71.76	23.71	4.52	0.00	0.00
cobalto	-	-	-	-	-
cadmio	-	-	-	-	-
níquel	80.14	9.34	9.34	0.00	1.93

Nota: - = no detectado

En los cuadros 5.8 y 5.12, se puede observar que las concentraciones de metales extraídos con EDTA diamónico 0.05 M, son mayores comparativamente con la suma de las fracciones obtenidas con agua y nitrato de potasio (disponibles), ya que en el primer caso el porcentaje de recuperación es menor o igual a 10 % y en el segundo caso es menor o igual 1.93 %. Esto concuerda con lo que se informa en la literatura, de que el EDTA extrae los metales precipitados en los carbonatos y óxidos, que no son tan disponibles para las plantas (fig. 5.14).

**Cuadro 5.12. Concentración y porcentaje de "metales pesados" disponibles para las plantas, con el método de especiación secuencial**

Metal	Suma de las cantidades extraídas con H <sub>2</sub> O y KNO <sub>3</sub> (disponibles, en ppm)	% de disponibilidad de cationes (H <sub>2</sub> O y KNO <sub>3</sub> ), con respecto a la concentración total
hierro	51.93	0.58
zinc	3.35	0.20
cobre	15.10	0.32
manganeso	2.63	1.24
cromo	0.00	0.00
plomo	0.00	0.00
cobalto	---	---
cadmio	---	---
níquel	2.70	1.93

Nota: --- no detectados

Fig. 5.11. Comparación entre la concentración total y disponible de "metales pesados"

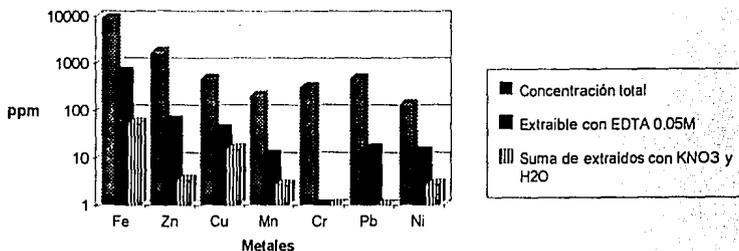


Fig. 5.12. Proporción de la concentración total, extraíble y disponible (%)

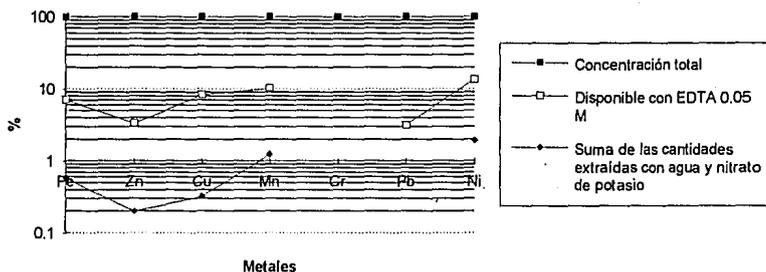


Fig. 5.13. Extractabilidad de metales con diferentes soluciones utilizadas

**HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>: Cr > Ni > Cu > Fe > Pb > Zn > Mn > Co = Cd**

**EDTA: Mn > Zn > Fe = Pb > Cr > Cu > Ni > Co = Cd**

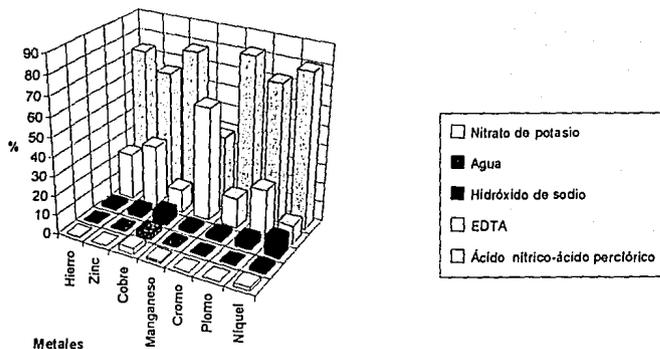
**NaOH: Ni > Cu > Pb > Zn > Cr > Fe > Mn > Co = Cd**

**H<sub>2</sub>O: Mn > Fe > Cu > Zn > Pb = Cr = Co = Cd = Ni**

**KNO<sub>3</sub>: Cu > Ni > Mn > Fe > Zn > Cr = Pb = Co = Cd**

Al comparar los resultados de metales pesados obtenidos en los lodos de la Eccaciv, con los contenidos en otros países, se puede observar que en todos los casos las concentraciones se encuentran en niveles más bajos (cuadro 5.13), debido a una alta relación población/industria.

Fig. 5.14. Porcentaje de extracción de "metales pesados"



Cuadro 5.13 Comparación de concentraciones de elementos potencialmente tóxicos de la Eccaciv, con la de otros países (valores promedio, ppm)

Metal	Inglaterra (2,400 lodos)	Estados Unidos de América (250 lodos)	Eccaciv (12 muestras compuestas)
cadmio	menor a 200	104	ND
cobalto	24	10	ND
cromo	980	2,226	311.75
cobre	970	1,346	470.08
hierro	24,000	31,000	8565.16
manganeso	500	194	94.50
níquel	510	236	98.14
plomo	820	1,894	456.00
zinc	4,100	2,132	1749.16

Nota: ND = no detectado

La mayor parte de los metales pesados contenidos en los lodos de Eccaciv, se encuentran en formas no disponibles, lo que coincide con lo informado para los lodos de otros países (Chang *et al*, 1984b; Emerich *et al*, 1982b; Sposito *et al*, 1982, entre otros) (cuadros 5.8 a 5.12).

Si se toma en cuenta la legislación de la Comunidad Económica Europea y de los Estados Unidos, en cuanto a metales pesados, y se compara con los resultados obtenidos en la Eccaciv, se puede observar que se encuentran por abajo de los límites máximos permitidos, en todos los casos (cuadro 5.14).

**Cuadro 5.14. Comparación de las concentraciones máximas permitidas de "metales pesados" en lodos para uso en agricultura, propuesto por la CEE y Estados Unidos de América y resultados de la Eccaciv**

Metal	Límite CEE (ppm) (Lester, 1987b)	Límite EEUUA (ppm) (Page et al, 1983)	Eccaciv
cadmio	20	50	ND
chromo	750	1,000	318.50
cobre	1,000	800-1,000	470.08
níquel	300	100-200	95.94
plomo	750	1,000	479.42
zinc	2,500	2,000-2,500	1,749.16

Nota: ND = no detectado

### 5.5. Análisis microbiológicos.

Los análisis microbiológicos se llevaron a cabo con la finalidad de detectar organismos indicadores de contaminación fecal y los resultados se muestran en el cuadro 5.15. Los coliformes totales y fecales se presentan casi en la misma proporción, lo que significa que la mayoría de las bacterias son de origen humano. La Salmonella se detectó en todas las muestras, así como los estreptococos fecales y los hongos. Los huevecillos de *Ascaris lumbricoides* sólo se detectaron en el lodo del filtro-prensa.

De acuerdo a estos resultados, los lodos son portadores potenciales de enfermedades gastrointestinales, sin embargo, se nota una clara disminución en los coliformes totales y fecales en los lodos acumulados después de un mes, estando expuestos a las condiciones ambientales, lo que indica que con un tratamiento previo a la disposición final, puede disminuir la población de microorganismos patógenos.

### 5.6. Resultados de los métodos de estabilización

#### 5.6.1. Pruebas en suelos agrícolas

##### 5.6.1.1. Resultados de suelos

Los resultados de los análisis físicos y químicos del suelo donde se llevó a cabo el experimento se muestran en los cuadros 5.16 al 5.20.

**Cuadro 5.15. Resultados de los análisis microbiológicos de los lodos residuales de la Eccaciv**

Parámetro	Lodo filtro-prensa	Lodo tanque aireador (líquido superficial)	Lodo tanque aireador (fondo)	Lodo acumulado una semana	Lodo acumulado un mes
Coliformes totales (NMP/g X 10 <sup>6</sup> )	18.20	24.00	19.20	21.00	7.36
Coliformes fecales (NMP/g X10 <sup>6</sup> )	18.10	19.20	18.60	8.90	0.24
<i>Salmonella</i>	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
Estreptococos fecales (NMP/g)	3266.00	2100.00	2566.00	15433.00	4200.00
Hongos (UFC/g)	655.00	355.00	483.00	1410.00	775.00
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	positivo	negativo	negativo	negativo	negativo

Los resultados del suelo antes de la adición de lodo, se encuentran en el cuadro 5.16, y presenta los valores típicos de un suelo agrícola; incluyendo las concentraciones de metales pesados (cuadro 5.17). El pH corresponde a un ligeramente alcalino, es un suelo no salino, rico en materia orgánica, nitrógeno y fósforo; con una relación C/N de 10, que corresponde a una clasificación mediana; los resultados de la textura reportan una proporción de 38 % de arcillas, 34 % de limos y 28 % de arenas. La capacidad de intercambio catiónico se clasificó como media (cuadro 5.18).

**Cuadro 5.16. Resultados de los análisis del suelo sin lodo y del lodo adicionado al suelo en el primero y segundo ciclo**

Parámetro	Suelo (muestra compuesta)	lodo adicionado en el primer ciclo	lodo adicionado en el segundo ciclo
% arcilla	38	SD	SD
% limo	34	SD	SD
% arena	28	SD	SD
densidad aparente (g/mL)	1.11	0.83	0.83
densidad real (g/mL)	2.38	SD	SD
pH	7.42	6.40	5.68
CE (mmhos/cm)	0.16	3.91	1.44
materia orgánica (%)	3.33	51.64	50.98
N total (%)	0.19	4.45	4.33
N orgánico (%)	0.17	5.03	4.93
CIC (meq/100 g)	43.00	64.00	61.00
Ca <sub>i</sub> (meq/100 g)	29.00	16.74	15.40
Mg <sub>i</sub> (meq/100 g)	14.00	5.79	4.81
Na <sub>i</sub> (meq/100 g)	1.52	6.81	5.50
K <sub>i</sub> (meq/100 g)	0.77	7.40	5.60
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (meq/L)	ND	ND	ND
HCO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (meq/L)	3.50	4.50	4.00

**Cuadro 5.16. Continuación**

Cl <sup>-</sup> (meq/L)	3.00	4.00	4.00
P disponible (ppm)	115.00	0.17	0.29
P total (ppm)	1475.00	1.28	1.25
<b>Metales disponibles (ppm)</b>			
Hierro	189.00	860.44	670.22
Manganeso	29.00	9.66	7.42
Zinc	34.00	46.26	40.91
Cobre	11.00	30.21	27.80
Plomo	ND	16.90	14.77
Cromo	ND	ND	ND
Níquel	ND	13.10	13.09
Cobalto	ND	ND	ND
Cadmio	ND	ND	ND
<b>Metales totales (ppm)</b>			
Hierro	34,800.00	12,136.00	9,453.00
Zinc	79.00	1,385.00	1,225.00
Manganeso	760.00	95.00	73.00
Cobre	53.00	364.00	335.00
Plomo	20.00	540.00	472.00
Cromo	65.00	335.00	243.00
Níquel	80.00	96.76	96.65
Cobalto	43.00	ND	ND
Cadmio	ND	ND	ND

Nota: SD = sin determinar

**Cuadro 5.17. Intervalo normal de la concentración total de "metales pesados" en suelos agrícolas y valores del suelo donde se realizó el experimento**

Metal	Intervalo normal (ppm) (Lester, 1987b)	Valor típico (ppm) (Lester, 1987b)	Suelo del experimento (ppm)
cadmio	0.01-0.7	0.1	ND
cobalto	2-100	15	43
cromo	5-1000	100	65
cobre	2-100	20	53
hierro	10000-200000	40000	34800
manganeso	100-3000	800	760
níquel	5-500	50	80
plomo	2-200	30	20
zinc	10-300	80	79

Nota: ND = no detectado

**Cuadro 5.18. Clasificación de suelos segun su contenido de materia orgánica y nutrimentos (Tisdale, 1982).**

<b>Materia orgánica (%)</b>	
Extremadamente pobre	menor de 0.60
Pobre	0.60-1.20
Medianamente pobre	1.21-1.80
Mediano	1.81-2.40
Medianamente rico	2.41-3.00
Rico	3.01-4.20
Extremadamente rico	mayor de 4.20
<b>Nitrógeno total (%)</b>	
Extremadamente pobre	menor que 0.032
Pobre	0.032-0.063
Medianamente pobre	0.064-0.095
Mediano	0.096-0.128
Medianamente rico	0.127-0.158
Rico	0.159-0.221
Extremadamente rico	mayor que 0.221
<b>Relación C/N</b>	
Muy alta	mayor que 25
Alta	15-25
Mediana	10-15
Baja	8-10
Muy baja	menor que 8
<b>Fósforo (ppm)</b>	
Extra rico	mayor que 12.5
Rico	12.5-7.0
Mediano	7.0-4.0
Pobre	menor que 4

La adición de lodos causó algunos cambios estadísticamente significativos en los suelos, principalmente en aquellas parcelas en las que se utilizaron dosis de 5 ton de lodo/ha. En el caso de adición de 1 ton de lodo/ha, no se observaron cambios significativos.

De acuerdo al análisis de varianza factorial (ver apéndice A.5), el pH presentó diferencias significativas, ya que cambió de ligeramente alcalino a ligeramente ácido (7.23 a 6.82). La conductividad eléctrica mostró diferencias entre ciclos, debido a la acumulación de sales solubles, tales como los cloruros y el sodio y magnesio intercambiables. No obstante se observaron aumentos al final del segundo ciclo en la parcela testigo (sin adición de lodo), lo que indica que parte de las sales que causaron el aumento de la conductividad eléctrica en todas las parcelas, son transportadas por aire de los aireadores de la planta de tratamiento. Los valores máximos de conductividad eléctrica en suelos adicionados con lodo son de 0.27 mmhos/cm y no se consideran con problemas de salinidad (cuadro 5.19).

**Cuadro 5.19. Resultados de los análisis físicos y químicos de suelos con lodos residuales de las parcelas agrícolas, 1o. y 2o. ciclo (valores promedio de 3 repeticiones)**

parámetro	S <sub>(0)</sub> ciclo 1	S <sub>(0)</sub> ciclo 2	S <sub>(1)</sub> ciclo 1	S <sub>(1)</sub> ciclo 2	S <sub>(5)</sub> ciclo 1	S <sub>(5)</sub> ciclo 2
% arcillas	40	36	39	37	39	38
% limos	35	33	34	35	33	33
% arenas	25	31	27	28	28	29
densidad aparente (g/mL)	1.09	1.10	1.09	1.11	1.08	1.10
densidad real (g/mL)	2.36	2.28	2.28	2.16	2.34	2.27
pH	7.23	7.10	6.89	6.84	6.88	6.89
C.E (mmhos/cm)	0.16	0.23	0.23	0.24	0.22	0.24
materia orgánica (%)	3.93	3.89	4.32	4.49	4.43	4.66
N total (%)	0.44	0.38	0.41	0.45	0.52	0.49
N orgánico (%)	0.43	0.29	0.38	0.42	0.45	0.48
CIC (meq/100 g)	45.00	53.00	47.00	52.00	51.00	49.00
Ca <sub>i</sub> (meq/100 g)	20.47	23.38	20.74	24.07	20.66	20.66
Mg <sub>i</sub> (meq/100 g)	12.15	13.52	12.97	13.48	13.95	13.90
Na <sub>i</sub> (meq/100 g)	0.56	0.63	1.11	0.85	1.12	1.12
K <sub>i</sub> (meq/100 g)	0.74	0.76	1.35	1.28	2.03	2.03
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (meq/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	4.56	3.25	4.90	3.83	4.18	4.02
Cl <sup>-</sup> (meq/L)	4.83	5.45	7.42	9.52	7.05	9.85
P disponible (ppm)	115.00	93.00	150.00	160.00	172.00	150.00
P total (ppm)	1700.00	1636.00	1800.00	1777.33	1736.00	1739.00

Nota: ND = no detectado; S<sub>(0)</sub> suelo de parcela testigo, 1o. y 2o. ciclo; S<sub>(1)</sub> suelo de parcela de 1 ton/ha, 1o. y 2o.ciclo; S<sub>(5)</sub> suelo de parcela de 5 ton/ha, 1o. y 2o. ciclo

Se presentaron aumentos estadísticamente significativos de la materia orgánica (de 3.33% a 4.66% después del 2o. ciclo), del nitrógeno total y orgánico (de 0.19% a 0.49% del total y de 0.17% a 0.48% de N orgánico) y del fósforo disponible (de 115 a 150 ppm) en el suelo (ver apéndice A), por lo que el suelo pasó de rico a extremadamente rico con base en la clasificación de Tisdale (1982) (cuadros 5.18 y 5.19). El aumento de la capacidad de intercambio catiónico sólo fue significativa después del segundo ciclo.

De acuerdo al análisis de varianza (ver apéndice A.4), no existen diferencias significativas en la concentración total de elementos potencialmente tóxicos, aunque se observó una tendencia al aumento de los siguientes metales: Fe, Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, K, Na, Cr, Ni y Pb (cuadro 5.20). No obstante, en su forma disponible, sólo aumentaron ligeramente el Mn, Zn y Ni. Los siguientes elementos permanecieron sin cambios: hierro y cobre, el plomo, cobalto y cromo, no se detectaron en el extracto. Sin embargo, en ningún caso las concentraciones de metales en suelos alcanzaron el límite máximo del intervalo normal para suelos agrícolas (cuadros 5.17, 5.21 y fig 5.15).

**Cuadro 5.20. Resultados de metales totales y disponibles de los suelos con lodos residuales de las parcelas agrícolas, 1o. y 2o. ciclo (valores promedio de 3 repeticiones)**

Metal	S <sub>(0)</sub> ciclo 1	S <sub>(0)</sub> ciclo 2	S <sub>(1)</sub> ciclo 1	S <sub>(1)</sub> ciclo 2	S <sub>(5)</sub> ciclo 1	S <sub>(5)</sub> ciclo 2
<b>Metales disponibles (ppm)</b>						
hierro	140.60	97.00	117.33	113.67	108.00	131.67
manganeso	30.00	23.33	34.00	26.67	41.33	43.33
zinc	30.00	34.00	35.67	38.33	50.33	47.67
cobre	13.67	13.33	12.84	12.67	12.06	13.00
plomo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
chromo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
níquel	0.77	1.80	2.07	2.15	2.24	2.14
cobalto	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Metales totales (ppm)</b>						
hierro	33700.00	32900.00	43100.00	46800.00	42100.00	41400.00
zinc	93.00	96.00	111.00	108.67	110.00	115.33
manganeso	763.67	732.33	816.33	795.00	849.00	835.67
cobre	34.57	41.67	37.33	42.33	39.83	55.67
plomo	20.00	20.00	25.05	26.40	26.82	27.20
níquel	116.67	127.00	121.67	133.33	124.67	110.67
chromo	79.00	78.00	82.00	84.67	86.33	87.33
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cobalto	61.33	71.77	61.33	80.67	86.33	87.33
calcio	2400.00	3300.00	3600.00	8233.00	5800.00	8700.00
magnesio	4800.00	5700.00	7000.00	8900.00	8200.00	8500.00
sodio	569.33	584.00	708.67	542.00	659.33	681.00
potasio	235.00	248.00	301.00	337.67	394.00	365.00

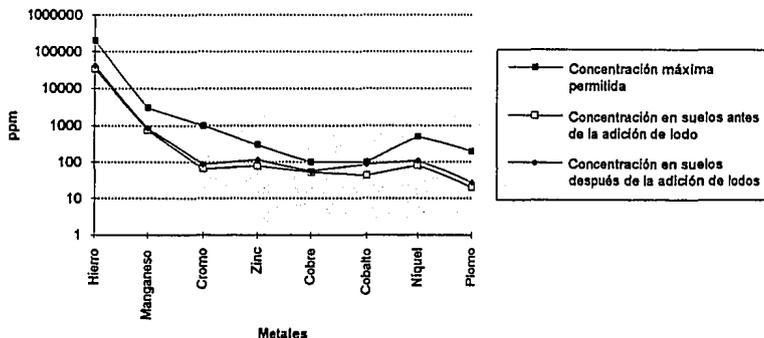
Nota: ND = no detectado; S<sub>(0)</sub> suelo de parcela testigo, 1o. y 2o. ciclo; S<sub>(1)</sub> suelo de parcela de 1 ton/ha, 1o. y 2o.ciclo; S<sub>(5)</sub> suelo de parcela de 5 ton/ha, 1o. y 2o. ciclo

**Cuadro 5.21. Intervalo de concentración normal para los elementos comúnmente encontrados en suelos, en su forma disponible (Tisdale, 1982)**

Elemento	Disponibilidad (ppm)
calcio	100-15,000
cobalto	---
cobre	0.5-100
hierro	10-1000
potasio	50-4,000
magnesio	10-3,000
manganeso	2-500
sodio	0-10,000
fósforo	0.5-500
zinc	1-100

Nota: --- sin datos reportados

**Fig. 5.15. Concentración máxima permitida de "metales pesados" en suelos agrícolas y contenido en los suelos bajo experimento, antes y después de la adición de lodos residuales**



El rendimiento del maíz H-419 cultivado, aumentó en las parcelas con lodos residuales, siendo más significativo en las de mayor dosis (2097.00 y 2137.67 kg/ha en las parcelas testigo, 2102.33 y 2271.67 kg/ha en las parcelas de 1 ton/ha y; 2323.33 y 2350.00 kg/ha en los tratamientos de 5 ton de lodo/ha) (fig. 5.16, cuadro 5.22 y apéndice A.7).

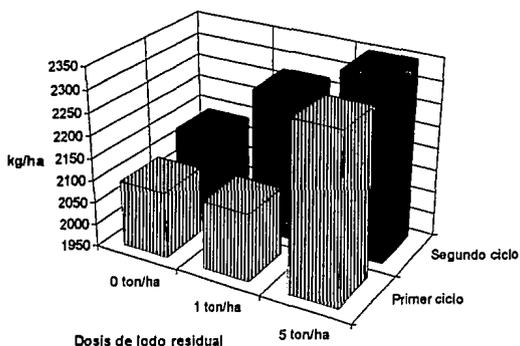
**Cuadro 5.22. Rendimiento en kg/ha de grano de maíz, de las tres parcelas bajo estudio (promedio de 3 repeticiones)**

Tratamiento	Ciclo 1	Ciclo 2
0 ton/ha	2097.00	2137.67
1 ton/ha	2102.33	2271.67
5 ton/ha	2323.33	2350.00

### 5.6.1.2. Resultados de tejidos vegetales

Durante el crecimiento de las plantas de maíz, no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad. Los resultados de los análisis químicos se muestran en los cuadros 5.23 a 5.25 y en ellos se puede apreciar que el contenido de los nutrientes esenciales para la planta (N, P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn y Mn), se encuentran dentro del intervalo normal para maíz (cuadro 5.26), excepto el hierro y el manganeso, que se detectaron en concentraciones más altas. Estos niveles altos, sin observarse síntomas de toxicidad, en general se deben a la presencia de partículas de suelo en los tejidos vegetales antes de llevar a cabo los análisis (Gutiérrez, 1982). Los metales potencialmente tóxicos (Cr, Pb, Ni, Cd y Co) no se detectaron en raíz, hojas y grano.

Fig. 5.16. Rendimiento del grano de maíz, cultivado en parcelas con lodos residuales durante dos ciclos (promedio de 3 repeticiones)



Cuadro 5.23. Resultados de nutrientes y metales pesados en la raíz del maíz cultivado con lodos residuales, 1o. y 2o. ciclo (valores promedio de 3 repeticiones)

Nutrientes y metales pesados (ppm)	0 ton/ha, 1er. ciclo	0 ton/ha, 2o. ciclo	1 ton/ha, 1er. ciclo	1 ton/ha, 2o. ciclo	5 ton/ha, 1er. ciclo	5 ton/ha, 2o. ciclo
nitrógeno	700.00	920.00	2170.00	2700.00	4000.00	3500.00
fósforo	1800.00	1900.00	3400.00	1720.00	1390.00	1950.00
magnesio	360.00	385.00	640.00	380.00	355.00	410.00
potasio	640.00	720.00	925.00	980.00	1075.00	1050.00
hierro	1445.00	1250.00	2522.00	1800.00	772.00	2200.00
zinc	16.00	35.00	85.00	58.00	73.00	69.00
manganeso	34.00	40.00	67.00	35.00	35.00	45.00
cobre	ND	8.00	12.00	12.00	21.00	20.00
cobalto	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cromo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
plomo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
níquel	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Nota: ND = no detectado

**Cuadro 5.24. Resultados de los análisis químicos de las *hojas del maíz* cultivado con lodos residuales, 1o. y 2o. ciclo (valores promedio de 3 repeticiones)**

Nutrientos y metales pesados (ppm)	0 ton/ha, 1er. ciclo	0 ton/ha, 2o. ciclo	1 ton/ha, 1er. ciclo	1 ton/ha, 2o. ciclo	5 ton/ha, 1er. ciclo	5 ton/ha, 2o. ciclo
nitrógeno	1250.00	10300.00	4900.00	4580.00	11300.00	10300.00
fósforo	980.00	950.00	3400.00	1200.00	600.00	1150.00
magnesio	1700.00	1590.00	1382.00	1490.00	1665.00	1700.00
potasio	2845.00	2850.00	3050.00	3050.00	2927.00	2845.00
hierro	1310.00	550.00	637.00	686.00	182.00	720.00
zinc	77.00	52.00	86.00	76.00	32.00	81.00
manganeso	40.00	35.00	24.58	32.00	33.50	34.00
cobre	91.00	88.00	125.00	95.00	50.00	88.00
cobalto	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cromo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
plomo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
níquel	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Nota: ND = no detectado

**Cuadro 5.25. Resultados de los análisis del *grano del maíz* cultivado con lodos residuales, 1o. y 2o. ciclo (valores promedio de 3 repeticiones)**

Nutrientos y metales pesados (ppm)	0 ton/ha, 1er. ciclo	0 ton/ha, 2o. ciclo	1 ton/ha, 1er. ciclo	1 ton/ha, 2o. ciclo	5 ton/ha, 1er. ciclo	5 ton/ha, 2o. ciclo
nitrógeno	14280.00	12740.00	14720.00	13540.00	13800.00	14200.00
fósforo	7900.00	6300.00	8300.00	6800.00	7500.00	7800.00
magnesio	1020.00	1040.00	1027.00	1035.00	1045.00	1050.00
potasio	2560.00	3128.00	4125.00	2860.00	3280.00	3590.00
hierro	316.00	349.00	237.00	320.00	350.00	360.00
zinc	57.00	63.00	39.00	45.00	50.00	61.00
manganeso	45.00	34.58	32.50	32.00	35.00	31.00
cobre	8.00	8.00	10.00	8.00	10.00	8.00
cobalto	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cromo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
plomo	ND	ND	ND	ND	ND	ND
níquel	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Nota: ND = no detectado

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

**Cuadro 5.26. Concentraciones de diferentes elementos en tejidos vegetales.**

Elemento	Deficiente	Bajo	Medio	Alto	Tóxico	Referencia
boro	0-3	4-5	6-25	26-60	>60	1
calcio	---	---	200	---	---	2
cobre	0-2	3-5	6-40	41-70	>70	1
cobalto	---	---	0.01	---	---	3
cromo	---	---	0.22-2.07	---	4-8	3
hierro	24-56	---	56-178	---	---	3
hierro	---	<30	30-300	301-550	>550	1
manganeso	---	---	6.4	---	---	2
níquel	---	---	0.14	---	---	3
zinc	0-10	11-20	21-70	71-150	150	1
zinc	0-9	---	31-36	---	---	3

- 1) Liquid fertilizer manual. National Fertilizer Solutions Association. 1701 W. Detwiller D. Peoria, Illinois, 1614, USA.
  - 2) Necesidades nutritivas para el ganado vacuno. Academia de Ciencias de Estados Unidos. Colección de Textos de Agronomía y Veterinaria. V. 8. Ed. Hemisferio Sur, Argentina, 1971.
  - 3) Diagnostic criteria for plants and soils. Edited by Chapman, California, 1965.
- = sin reporte de datos

Al final del segundo ciclo se tomaron muestras para analizar microbiológicamente el suelo de las tres parcelas y los resultados se presentan en el cuadro 5.27. Aquí se puede apreciar que la prueba para *Salmonella* resultó ser negativa en las tres parcelas, a pesar de haberle adicionado un lodo donde la prueba resultó ser positiva. En el caso de los huevecillos de *Ascaris lumbricoides*, no se presentaron en el lodo ni en las parcelas. Para el caso de los coliformes fecales y totales, se detectaron cantidades altas como NMP, incluso en la parcela donde no se agregó lodo residual. Al igual que con las sales solubles, la presencia de microorganismos en grandes cantidades y en todas las parcelas, pudo deberse a la influencia del aireador de la planta de tratamiento, localizado a un costado de las parcelas experimentales.

**Cuadro 5.27: Resultados del análisis microbiológico de las parcelas agrícolas, después del segundo ciclo**

Microorganismo	Lodo	Parcela de 0 ton/ha	Parcela de 1 ton/ha	Parcela de 5 ton/ha
Coliformes totales (NMP/g)	$2.40 \times 10^9$	$1.75 \times 10^7$	$1.75 \times 10^7$	$9.30 \times 10^5$
Coliformes fecales (NMP/g)	$1.10 \times 10^9$	$2.10 \times 10^6$	$1.10 \times 10^7$	$2.10 \times 10^3$
<i>Salmonella</i>	positivo	negativo	negativo	negativo
Estreptococos fecales (NMP/g)	3,200.00	1,850.00	1,850.00	1,850.00
Huevecillos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	negativo	negativo	negativo	negativo

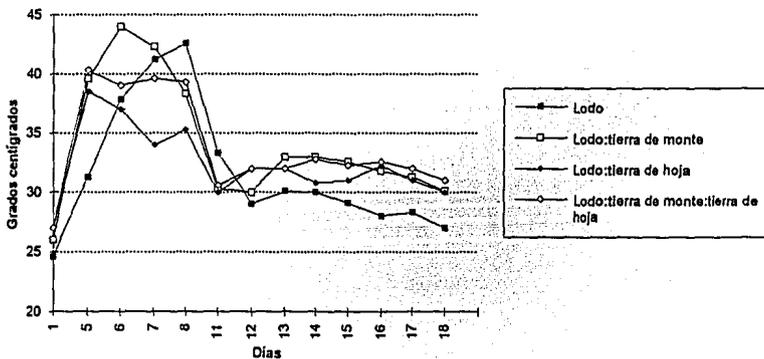
Como se observa en los resultados aquí presentados, la falta de control del sitio de experimentación (el único disponible), pudieron haber sesgado los resultados microbiológicos y químicos, ya que el aumento de los elementos potencialmente tóxicos fue mayor de lo esperado y los microorganismos patógenos se siguieron presentando a pesar del tiempo transcurrido.

## 5.6.2. Composteo

### Temperatura

En las compostas preparadas con los lodos residuales de la Eccaciv se observó una variación de temperaturas de 24.5 a 45°C. Las pilas de lodo sin suelo orgánico y de lodo con tierra de monte fueron las únicas que desarrollaron temperaturas mayores de 40°C durante tres días consecutivos (fig. 5.17 y apéndice A.8). Los resultados de este trabajo se compararon con la norma 40 CFR-257 publicada por la EPA (1985), que establece 40°C por cinco días o 55°C por tres días consecutivos para lograr un buen control de patógenos. La comparación indicó que las compostas más cercanas a esta norma fueron la del lodo sin suelo orgánico y la del lodo con tierra de monte.

Fig. 5.17. Temperaturas alcanzadas por las mezclas, durante el proceso de composteo



### Control de patógenos

El efecto del composteo para el control de patógenos se evaluó a través del contenido de microorganismos indicadores de contaminación fecal, entre los que se encuentran los coliformes totales y fecales. Asimismo se evaluó la presencia de *Salmonella* y huevecillos de *Ascaris lumbricoides*, ambos microorganismos patógenos para el ser humano. Los resultados son bastante alentadores ya que en el lodo después de

airearse durante 18 días, se detectó un promedio de 697 NMP/ g de coliformes totales y cero coliformes fecales (cuadro 5.28). Esto significa una reducción de 99.99 % y 100 % respectivamente. El abatimiento de coliformes fecales superó el nivel permisible de 1000 NMP/mL para el abastecimiento de agua potable establecido en la norma CE-CA-001/89 de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.

En las compostas de lodos con suelos orgánicos, los coliformes fecales se abatieron a cero (excepto en la mezcla de lodo-tierra de hoja). Las pruebas para huevecillos de *Ascaris lumbricoides* resultaron negativas en todas las compostas, sin embargo, la *Salmonella* resultó ser positiva (cuadro 5.28), por lo que el proceso de composteo bajo las condiciones realizadas, no fue suficiente para eliminarla. El abatimiento de los coliformes y de los huevecillos de helmintos estuvo muy relacionado con los incrementos de temperatura y con el número de días consecutivos con temperaturas mayores de 40° C. Dentro de las mezclas, la que tuvo menor eficiencia fue la de lodo con tierra de hoja, ya que presentó mayor número de coliformes totales y fecales y no desarrolló temperaturas mayores de los 40° C (cuadro 5.28)

**Cuadro 5.28. Análisis microbiológicos de lodos y compostas (valores p romedio).**

<b>Materiales</b>	<b>Coliformes totales (NMP/g)</b>	<b>Coliformes fecales (NMP/g)</b>	<b>Salmonella</b>	<b>Huevecillos de Helmintos</b>
tierra de monte	0	0	negativo	negativo
tierra de hoja	0	0	negativo	negativo
lodo	2.4 X 10 <sup>9</sup>	1.1 X 10 <sup>9</sup>	positivo	positivo
<b>Composta (18 días de aireación):</b>				
lodo	697.00	0	positivo	negativo
lodo:tierra de monte	4310.00	0	positivo	negativo
lodo:tierra de hoja	8.0 X 10 <sup>6</sup>	7.6 X 10 <sup>5</sup>	positivo	negativo
lodo:tierra de monte:tierra de hoja	26,666.00	0	positivo	negativo

#### **pH y conductividad eléctrica.**

El pH tuvo una variación de ligeramente ácido a neutro (6.23 a 7.5), teniendo el mismo comportamiento en las compostas de lodo con suelos orgánicos. En el caso de la conductividad eléctrica, el efecto de la dilución de lodo causó resultados muy buenos, ya que el valor de la conductividad eléctrica se disminuyó considerablemente, lo que significa que el efecto de las sales sería menor en caso de aplicarse lodo composteado a los suelos (cuadro 5.29).

## **Nutrientes y elementos potencialmente tóxicos.**

El composteo, así como la adición de suelos orgánicos al lodo (dilución), variaron el contenido de materia orgánica, nutrientes y metales pesados potencialmente tóxicos. El contenido de materia orgánica, nitrógeno total y orgánico fue menor en los lodos después de la aireación (cuadro 5.29). Estos decrementos se deben a la acción de los microorganismos degradadores de la materia orgánica y a la pérdida de nitrógeno por la aireación y están de acuerdo a lo reportado por la EPA (1985).

Los suelos de monte enriquecen su contenido de nitrógeno y materia orgánica, pues los niveles son más altos en la mezcla con lodo que en el suelo original (cuadro 5.29).

Se presentaron valores diferentes de la capacidad de intercambio catiónico entre las mezclas de lodo con suelo orgánico. En el lodo sin mezclar con otro material aumentó con el composteo, así como la cantidad de calcio y potasio intercambiables (cuadro 5.29), en cambio disminuyó la cantidad de magnesio y sodio intercambiables.

La relación C/N aumentó con el composteo hasta valores de aproximadamente 10, lo que significa una pérdida de N durante este proceso.

En cuanto a los valores disponibles de los elementos potencialmente tóxicos, el cadmio y el cromo no se detectaron y el resto, disminuyeron su disponibilidad con el composteo (cuadro 5.30). En términos generales se presentó una disminución de 50.16 % de los "metales pesados" extraídos con EDTA, con respecto al lodo original (cuadro 5.30). El cobalto se detectó únicamente en la tierra de monte, por lo que apareció en las compostas realizadas con lodo y tierra de monte.

Finalmente, en el cuadro 5.31 se comparan los intervalos de metales disponibles, comúnmente encontrados en suelos y que se pueden considerar normales, con los resultados de las compostas. Se puede observar que en todos los casos los valores de las compostas, incluyendo la del lodo, no rebasan los límites superiores de los intervalos estipulados.

Por otro lado, si se comparan los resultados de los nutrientes de las compostas (respecto a la materia orgánica, nitrógeno y fósforo), con la clasificación mostrada en el cuadro 5.18, las compostas se clasificarían como extremadamente ricas y con una relación C/N media (9.18 a 11.73).

**Cuadro 5.29. Resultados de los análisis físicos y químicos de lodos residuales, materiales originales y compostas (promedio de 3 repeticiones).**

Parámetro	Lodo	Tierra de monte	Tierra de hoja	Composta lodo	Composta lodo:tierra de monte	Composta lodo:tierra de hoja	Composta lodo:tierra de monte:tierra de hoja
densidad aparente (g/mL)	0.85	0.86	0.42	0.87	1.01	0.47	0.81
densidad real (g/mL)	2.29	2.46	2.09	1.99	1.97	1.60	2.13
% humedad	74.70	39.58	54.06	11.20	11.15	11.32	13.63
% sólidos	25.30	60.42	45.94	88.80	88.85	88.68	86.37
% porosidad	62.80	65.00	78.74	56.35	49.00	70.89	62.00
pH (1:5)	6.23	6.22	5.70	7.50	7.80	7.05	7.70
C.E (mmhos/cm)	4.69	0.18	0.17	4.10	0.46	0.35	0.46
% materia orgánica	78.32	13.82	10.26	44.16	21.33	39.60	25.89
% N total	5.74	1.13	0.95	2.79	1.15	1.97	1.28
% N orgánico	5.64	1.04	0.93	1.78	1.13	1.62	0.53
% P disponible	0.40	0.13	0.11	0.47	0.27	0.39	0.24
CIC (meq/100 g)	51.12	59.00	60.50	72.00	51.00	74.00	61.00
relación C/N	8.00	7.09	6.26	9.18	10.75	11.66	11.73
Ca <sub>i</sub> (meq/100 g)	15.29	7.90	12.60	22.00	14.60	26.00	20.20
Mg <sub>i</sub> (meq/100 g)	2.66	0.63	4.17	0.25	0.16	0.15	0.22
Na <sub>i</sub> (meq/100 g)	5.45	0.95	0.34	2.37	1.69	3.31	2.64
K <sub>i</sub> (meq/100 g)	1.72	1.12	1.33	6.24	2.01	2.61	2.11

**Cuadro 5.30. Resultados de iones solubles y metales disponibles de lodos residuales, materiales originales y compostas (promedio de 3 repeticiones).**

Parámetro	Lodo	Tierra de monte	Tierra de hoja	Composta lodo	Composta lodo:tierra de monte	Composta lodo:tierra de hoja	Composta lodo:tierra de monte:tierra de hoja
<b>iones solubles (meq/L)</b>							
calcio	0.25	0.39	0.22	2.10	0.71	2.61	0.91
magnesio	0.24	0.00	0.85	2.73	2.73	3.29	2.31
sodio	6.42	0.45	0.34	7.82	8.29	8.77	7.82
potasio	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
carbonatos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
bicarbonatos	3.20	0.00	0.00	4.00	3.00	5.20	1.60
cloruros	13.40	0.32	0.12	12.50	20.00	15.00	12.50
<b>"Metales pesados" disponibles (ppm)</b>							
hierro	745.00	119.00	57.50	327.00	463.00	180.00	275.00
zinc	94.00	77.50	19.50	83.00	41.00	65.00	55.00
manganeso	58.00	1.58	5.75	17.70	1.44	1.89	1.17
cobre	36.00	4.99	0.00	26.00	6.70	5.84	6.80
plomo	30.00	ND	ND	25.00	12.00	11.20	8.00
níquel	8.50	ND	ND	5.50	1.55	3.80	2.50
cobalto	ND	1.16	ND	ND	1.20	ND	1.00
cromo	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

**Cuadro 5.31. Comparación entre los rangos de concentración normal para los elementos comunmente encontrados en suelos, en su forma disponible y los resultados de las compostas con lodo residual.**

Metal	Intervalo normal disponible (ppm) (Tisdale, 1982)	Composta lodo	Composta lod:tierra de monte	Composta lodo:tierra de hoja	Composta lodo:tierra de monte:tierra de hoja
calcio	100-15000	4448.00	2932.07	5311.06	4062.47
cobalto	-	ND	1.20	ND	1.00
cobre	0.5-100	26.00	6.70	5.84	6.80
hierro	10-1000	327.00	463.00	180.00	275.00
potasio	50-4000	2433.60	787.90	1017.90	822.90
magnesio	10-3000	67.62	56.82	102.00	60.62
manganeso	2-500	17.70	1.44	1.89	1.17
sodio	0-10000	751.80	566.75	1190.50	829.25
fósforo	0.5-500	4685.00	2700.00	3900.00	2350.00
zinc	1-100	83.00	41.00	65.00	55.00

### 5.6.3. Análisis de cenizas

Se consideró pertinente analizar muestras de una ceniza "negra" que provenía de lodo original y una ceniza "gris" de lodo con adición de cal (la empresa Eccaciv no facilitó los datos de la proporción de cal adicionada). Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 5.32 y fig. 5.20. En ellos puede apreciarse que la materia orgánica no se destruyó totalmente, y que los resultados son diferentes para el lodo tratado con cal y el original. Si se toma como base el resultado promedio de la materia orgánica del lodo fresco (55.45 %), puede deducirse que se obtuvo una eficiencia del 66 % para el caso de los lodos sin tratar y del 98.70 % para los lodos con cal. Consecuentemente la concentración de N y P fue alta en la ceniza "negra" y muy baja en la gris (el nitrógeno no se detectó). Sin embargo se observa un buen resultado en la concentración de fósforo total y disponible en la segunda ceniza, posiblemente por el efecto de adición de cal. La conductividad eléctrica aumenta en la ceniza con adición de cal puesto que se le añade una sal (cuadro 5.32)

Las cantidades totales de los "metales pesados", se sumaron y se compararon con las concentraciones de metales del lodo sin incinerar (fig. 5.18). Los metales se concentraron en las cenizas, además de que se obtuvieron resultados disímbolos a las diferencias de la eficiencia en la incineración. La cenizas se concentran en un 933 % (adicionado con cal) y un 463 % (sin cal), con respecto al lodo original. Esto se evidencia con más claridad al observar los resultados del cadmio y cobalto, ya que en los lodos residuales originales nunca se detectaron (concentraciones menores al límite de detección), sin embargo, aparecen en las cenizas.

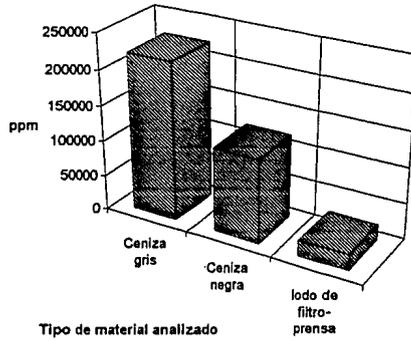
En el lodo con cal, los metales no se encuentran disponibles, ya que el pH aumenta (13.00) y los metales se insolubilizan. Los microorganismos patógenos se destruyen completamente en los dos tipos de cenizas (cuadro 5.32)

**Cuadro 5.32 Resultados de los análisis de lodo incinerado (cenizas)**

<b>Parámetro</b>	<b>Ceniza negra (lodo incinerado sin cal)</b>	<b>Ceniza gris (lodo incinerado con cal)</b>
densidad aparente (g/mL)	0.77	0.77
densidad real (g/mL)	1.73	2.60
C.E (mmhos/cm)	5.13	11.53
pH (1:5)	9.52	13.00
% N orgánico	3.75	0.00
% materia orgánica	18.85	0.70
% N total	4.04	0.08
% P total	1.65	2.86
% P disponible	0.66	1.11
<b>Metales totales (ppm)</b>		
calcio	92511.02	195000.00
magnesio	5474.19	5638.80
cobre	726.97	863.54
hierro	15005.83	16829.70
manganeso	394.72	354.29
zinc	2291.18	2240.27
cadmio	0.87	3.93
cobalto	14.06	29.06
níquel	112.26	227.06
plomo	876.56	776.56
cromo	497.04	599.72
<b>Total</b>	<b>117,905.12</b>	<b>222,562.93</b>
<b>Metales disponibles (ppm)</b>		
cobre	16.40	0.03
hierro	48.46	3.35
manganeso	6.69	ND
zinc	48.74	0.70
cadmio	ND	ND
cobalto	ND	ND
níquel	7.52	1.31
plomo	28.74	ND
cromo	ND	ND
<b>Total</b>	<b>156.55</b>	<b>5.39</b>
coliformes totales	0.00	0.00
coliformes fecales	0.00	0.00

Nota: ND = no detectado

**Fig. 5.18. Comparación entre la concentración de "metales pesados" en lodos incinerados y del filtro-prensa**



## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a la caracterización del lodo mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos; los experimentos de composteo, la aplicación a suelos agrícolas; y los análisis de los tejidos vegetales de las plantas cultivadas, se deducen las siguientes conclusiones:

### 6.1. Caracterización del lodo residual

- los lodos residuales presentan un contenido alto de macro y micronutrientes y materia orgánica
- presentan una baja concentración y disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos (inorgánicos), comparativamente con los niveles de concentración de estos elementos en lodos de otros países, los cuales actualmente están siendo utilizados con éxito como fertilizantes y/o mejoradores de suelos, cumpliendo con la legislación que establece las concentraciones máximas permitidas por la Comunidad Económica Europea, Canada, EEUUA y Japón para su uso en suelos agrícolas
- de acuerdo a la especiación realizada en los lodos, la mayor parte de los compuestos químicos de metales potencialmente tóxicos ("metales pesados"), son estables, insolubles y de baja disponibilidad para las plantas
- la presencia de grandes cantidades de microorganismos patógenos en el lodo, convierte a los lodos residuales en un problema potencial de salud pública
- el contenido de sales en lodo (principalmente sodio), puede limitar su uso en el suelo, ya que su acumulación genera el deterioro en sus características físicas (desfloculación, que conduce a la pérdida de estructura y porosidad y a la reducción de permeabilidad a líquidos y gases), así como presiones osmóticas altas que limitan el crecimiento de las plantas

### 6.2. Experimento agrícola

- durante los dos años de cultivo, la conductividad eléctrica en el suelo no aumentó de manera significativa, a pesar de que en los lodos residuales se presentaron conductividades eléctricas elevadas (el valor de la media fue de 4 mmhos/cm)
- al agregar lodo al suelo, se mejoraron sus características de fertilidad, ya que se presentaron aumentos significativos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo total y disponible. Al final del experimento, el suelo se clasificó como extremadamente rico. Además, el rendimiento del maíz cultivado con lodos residuales, fue más alto, comparativamente con las parcelas que no recibieron lodo
- en las parcelas con la dosis de 5 ton/ha de lodo residual, se observó un aumento en la concentración total de elementos potencialmente tóxicos. Sin embargo, en ninguno de los tratamientos aplicados en los dos ciclos de cultivo, no se rebasaron los niveles máximos permisibles de estos elementos en el suelo
- los niveles de los elementos potencialmente tóxicos, analizados en su forma disponible para las plantas, no presentaron aumentos significativos en el suelo de

- ninguna de las parcelas bajo estudio
- en las plantas de maíz cultivadas en suelos con lodos, no se detectaron niveles de micronutrientes en concentraciones más altas de las requeridas por las plantas, ni absorbieron elementos potencialmente tóxicos. Estos resultados coinciden con los datos obtenidos a partir de la especiación de estos elementos en el lodo y con los valores de concentración en su forma disponible en el suelo.

### 6.3. Composteo

- el composteo de lodos con suelos orgánicos, permitió abatir la presencia de microorganismos coliformes a niveles donde la mezcla puede manejarse sin riesgo (excepto la mezcla de lodo con tierra de hoja). Sin embargo, bajo las condiciones en que se llevó a cabo este proceso, las temperaturas no se aumentaron a los niveles deseados (40°C por 5 días consecutivos), por lo que la *Salmonella* continuó presente al final del composteo
- el composteo también permitió la dilución de elementos potencialmente tóxicos, así como bajar su disponibilidad tanto por este efecto como por el aumento de pH.
- durante el proceso de composteo se llevó a cabo una mineralización de la materia orgánica, lo que permite tener mayor disponibilidad de macronutrientes para las plantas. La mezcla resultante se clasificó como extremadamente rica en materia orgánica, macro y micronutrientes

La utilización de lodos para suelos agrícolas, es un método de disposición final que puede dar resultados prometedores. El composteo de lodos residuales es un método de estabilización que permite el abatimiento de los microorganismos patógenos (siempre y cuando se alcancen temperaturas de 40°C por 5 días consecutivos), la mineralización de la materia orgánica y disponibilidad de macronutrientes. Adicionalmente baja los niveles y la disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos en el producto resultante. Por ello, puede considerarse como una alternativa para el tratamiento de los lodos residuales, con la finalidad de obtener un producto estable, tal como el humus, que pueda ser adicionado a suelos agrícolas o ser utilizado como sustrato para el cultivo de plantas forestales o de ornato, sin causar con ello problemas de salud pública ni daños al ambiente

## 7. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo y al análisis de la problemática de los lodos residuales, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Los estudios de lodos residuales a nivel nacional, son absolutamente necesarios. Primeramente debe conocerse, de manera objetiva, la cantidad y calidad de lodos residuales que se producen en todo el país, localización de la planta de tratamiento que los genera, manejo, tratamiento y disposición final. De esta manera se tendrán datos objetivos al respecto y los estudios se podrán llevar a cabo con una base de datos más completa.
- La aplicación de lodos residuales al suelo debe llevarse a cabo después de haber realizado diversas pruebas, bajo condiciones controladas. Ésto, con la finalidad de hacer las recomendaciones bajo las cuales pueda ser posible su utilización, sin causar problemas de contaminación a suelos y mantos acuíferos. No obstante, las recomendaciones deben hacerse para cada planta de tratamiento en particular. Su utilización debe llevarse a cabo bajo estrictas condiciones de control y su manejo debe estar a cargo de técnicos especializados.
- Es necesario dosificar las cantidades de lodo que se aplica al suelo, seleccionar las características de drenaje de las parcelas, para evitar la acumulación de sales y las condiciones reductoras, y controlar el pH en el intervalo de 7-8.
- En los resultados obtenidos en este trabajo no se logró la destrucción de la *Salmonella*, debido a que las temperaturas no se incrementaron lo suficiente para eliminarla (arriba de 45<sup>o</sup> C). Por este motivo, se recomienda que el composteo debe llevarse a cabo bajo condiciones controladas y cuidar que la temperatura se eleve hasta los 50<sup>o</sup> C, con un valor óptimo de 60<sup>o</sup> C. Con ello se eliminarán los microorganismos patógenos y la composta resultante se podrá manejar sin causar problemas de salud pública.
- La legislación vigente clasifica a los lodos residuales como residuo peligroso. No obstante, no contempla su utilización para aprovechar sus valores potenciales, tales como nutrimentales y generadores de energía, entre otros. Con los estudios que se proponen, podrían generarse normas técnicas que especifiquen el uso que debe darse a cada tipo de lodo residual. En caso de cumplir con las características para su aplicación al suelo, especificar las concentraciones máximas permisibles de los elementos potencialmente tóxicos en el lodo.
- El problema de contaminación con lodos procedentes de las plantas de tratamiento, es un problema de índole nacional, que puede agravarse con el tiempo. Por tal motivo, se recomienda que a futuro, antes de construir una planta de tratamiento, se contemple la edificación de instalaciones de acuerdo a la legislación vigente, para dar tratamiento a los lodos residuales previo a su uso para fines agrícolas o

cualquier otro método de disposición final. Asimismo es necesario investigar e implantar nuevas técnicas limpias, tomando en cuenta las que actualmente se estén desarrollando.

- Es urgente que implanten un sistema que funcione sin dañar al ambiente. Uno de ellos puede estar conformado por el composteo y la aplicación del producto al suelo. También se recomienda realizar estudios para probar una mezcla de composteo con termólisis, así como sus costos. La termólisis es muy atractiva desde el punto de vista ambiental y económico, y no solamente es una alternativa óptima para los residuos de Eccaciv, sino también para toda la basura doméstica e industrial.
- Para instrumentar un sistema integral, se requiere realizar estudios locales del tipo de desechos e idiosincrasia de la población, establecer una planta con la mejor tecnología disponible y conformar un sistema de administración que asegure su funcionamiento. Además, se debe contemplar la industria o población que consumirá la energía generada.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Academia de Ciencias de Estados Unidos. (1971). Necesidades Nutritivas para el Ganado Vacuno. Colección de Textos de Agronomía y Veterinaria. V. 8. Ed. Hemisferio Sur, Argentina.
- Aguilar, S. (1984). Estudio geográfico para el conocimiento y conservación del agua en el Estado de Morelos. Tesis de Maestría (Geografía), UNAM, México, D.F., México.
- Aguilar, S. (1990). Dimensiones ecológicas del Estado de Morelos. CRIM, UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.
- APHA, AWWA, WPCF (1989). Standard methods for the examination of water and waste water. 17a. edición, Washington. EEUUA.
- Arroyo, J. y Molina M. (1990). Programa nacional de reutilización del agua. Memorias del 11o. Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo I. Asociación Mexicana de Hidráulica. Querétaro, Querétaro.
- Aubert H. y Pinta M. (1977). Trace elements in soils. Developments in Soils Science 7. Elsevier Scientific Publishing. Amsterdam. Holanda.
- Baxter, C., Aguilar, M. y Brown, K. (1983). Heavy Metals and persistents organics at the sewage sludge disposal site. J. Environ. Qual. 12, 3, p. 311-316.
- Barth, F., Ettinger, B., Salotto, V., y McDermott, N. (1965). Summary report on the effects of heavy metals on the biological treatment processes. J. Water Pollut. Control Fed., 37, 86.
- Beckett, T., Davis, D., y Brindley, P. (1979). The disposal of sewage sludge onto farmland: the scope of the problem of toxic elements. Water Pollut. Control., 78, 419.
- Beckett, T. (1980). The statistical distribution of sewage sludge analysis". Environ. Pollut. 1, 27.
- Beckett, T., Warr, E., y Davis, R.D. (1983). Cu and Zn in soils treated with sewage sludges: their "extractability" to reagents compared whit their "availability" to plants. Plant Soil, 70, 3.
- Berrow, L. y Weber, J. (1972). Trace Elements in Sewage Sludges. Sci. Food Agric., 23, 93.
- Bishop, L. y Godfrey, C. (1983). Nitrogen transformations during composting". BioCycle. p. 34-39.
- Bidwell, S. (1979). Fisiología Vegetal. AGT Editor. Barcelona, España.
- Bloomfield, C. y McGareth, P. (1982). A comparison of the extractabilities of Zn, Cu, Ni and Cu from sewage sludges prepared by treating raw sewage with the metal salts before and after anaerobic digestion. Environ. Pollut., 193.
- Bolt, H. (1978). Soil chemistry. A basic elements. 2a. Ed. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, Holanda.
- Bowen, M. (1977). Residence times of heavy metals in the environment. En: Hutchinson, L. (ed). Proc. Inter. Conf. on heavy metals in the environment, Toronto. Institute for Environmental Studies, Univ. of Toronto. Toronto, Ontario. Canada.
- Brown, C. y Jones, E. (1975). Heavy metal toxicity in plants; a crisis in embryo. Common. Soil. Sci. Plants. 421-438.
- Brown, W., Donnelly, C, Thomas, J. y Davol, P. (1985). Mutagenicity of three

- agricultural soils. *Sci. Total Environ.* **41**, 173-186
- Bunch, L. (1982). Water pollution control technology in the *Water Qual. Bull.*, **7**, 107.
- Calcutt T. y Moss J. (1984). Sewage sludge, treatment and disposal -the way ahead. *Water Pollut. Control.* **83**,
- Carroll, D. (1959). Ion exchange in clays and other minerals. *Bulletins of the Geological Society of America*, **70**, p.
- Chaney, L. (1980). Health risks associated with toxic metals in municipal sludges. En: Bitton, G. *Sludge-health risk of land application*. Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, MI.
- Chaney, L. (1983). Plant uptake of inorganic waste constituents. En: Parr, F. (1985) *Land treatment of hazardous wastes*. Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, EEUUA.
- Chang, C., Warneke, F., Page, L. y Lund, J. (1984a), Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* **13**, No. 1. p. 87-91.
- Chang, C., Page, L., Warneke, E. y Grgurevic, E. (1984b). Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application". *J. Environ. Qual.*, **13**, 1, p. 33-37.
- CNA. (1993). *Informe anual del programa agua limpia*. Gerencia Estatal en Morelos. Subgerencia de Administración del Agua, Departamento de Calidad, Reuso del Agua e Impacto Ambiental. Cuernavaca, Mor., México.
- Coker G. y Matthews J. (1983). Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. *Wat. Sci. Tech.* 209-225.
- Cortés, A. y Vázquez, E. (1991). Frontera hidrogeológica entre la Cuenca de México y los valles del Estado de Morelos. En: *El recurso agua en el Estado de Morelos y problemas de su contaminación*. CRIM, UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.
- Davis, L. y Cornwell, A. (1991). *Introduction to environmental engineering*. McGraw Hill International.
- Diagnostic Criteria for Plants and Soils. Edited by Chapman, California, 1965. EEUUA.
- Diario Oficial de la Federación (6 de junio de 1988). Norma Oficial Mexicana NTE-CRP/88
- Diario Oficial de la Federación (14 de diciembre de 1988). Norma Oficial Mexicana NTE-CRP-010/88
- Diario Oficial de la Federación (8 de septiembre de 1989). Norma Oficial Mexicana NTE-CRP-009/89
- Diario Oficial de la Federación (23 de octubre de 1993). Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93.
- Díaz, G. (1988). *Informe del impacto de las sustancias tóxicas en el recurso hidráulico*. SARH. Cuernavaca, Morelos.
- DGACSH-SARH. (1985). *Inventario Nacional de descargas de aguas residuales municipales e industriales*. México, D.F. México.
- Eger, J. (1978). Effects of land disposal of sewage wastes. Comunicación personal.
- Ehreth, J. y Walker, M. (1977). The role of composting and other beneficial use options in municipal sludge management. En: Proc. *National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges*. Information Transfer, Inc., Rockville, MD, EEUUA.
- Emmerich, E., Lunch, J., Page, L. y Chang, C. (1982a). Solids phase forms of heavy metals to sewage sludge-treated soil. *J. Environ. Qual.*, **11**, 178.

- Emmerich, E., Lunch, J., Page, L. y Chang, C. (1982b). Predicted solution phase forms of heavy metals in sewage sludge-treated soil. *J. Environ. Qual.*, **11**, 182.
- EPA. (1978). Technology transfer process design manual. Municipal sludge landfills. Washington, D.C., EEUUA.
- EPA. (1977). Municipal sludge management. Environmental factors. EPA/430/9-77-004. Technical Bulletin MCD 28. USEPA, Washington, D.C., EEUUA.
- EPA. (1985). Composting of municipal wastewater sludges. EPA/625/4-85/014. Cincinnati Ohio, EEUUA.
- EPA. (1988). Samples procedures and protocols for the national sewage sludge survey. Office of Water Regulations and Standards, WH-522, Washington D.C., EEUUA.
- Epstein, E., Taylor, A. y Chaney, L. (1976). Effects of sewage sludge compost applied to soil and some physical and chemical properties. *J. Environ. Qual.* **5**, 4. p. 422-426.
- Epstein, E. y Parr, F. (1977). Utilization of composted municipal wastes. En: Proc. National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges. Information Transfer, Inc., Rockville, MD, EEUUA.
- Fassbender, W. (1986). Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. 1a. edición. San José, Costa Rica.
- Fries, F. (1982). Potential Polichlorinated biphenil residues in animal products from application of contaminated sewage sludge to land. *J. Environ. Qual.* **11**, 14 - 20
- Gerba, P., Wallis, C. y Melnick, L. (1975). Viruses in water: the problem, some solutions. *Environ. Sci. Technol.* 1122-1126.
- Gerba, P. (1983). Pathogens. En: Page, L., Thomas, G., Smith, E., Iskandar, K. y Sommers, (1983). Utilization of municipal wastewater and sludge on land. University of California, Riverside, CA. EEUUA.
- Gerritse, G., Vriesema, R., Darenberg, W., y de Roos, P. (1982). Effects of sewage sludge on trace element mobility in soils. *J. Environ. Qual.* **2**, 3, p.
- Gobierno del Estado de Morelos, (1988). Los municipios de Morelos. Cuernavaca, Mor., México.
- Golueke, G. (1977). Biological reclamation of solid wastes. Rodale Press, Emmaus, PA, EEUUA.
- González, T. y Rodríguez, R. (1991). Algunas consideraciones sobre las principales fuentes de contaminación en el Valle de Cuernavaca, Morelos. En: El recurso agua en el Estado de Morelos y problemas de su contaminación. CRIM-UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.
- Gould, S. y Genetelli, J. (1977). Heavy metals distribution in anaerobically digested sludges. En Proc. 30 Industrial Wastes Conf. Purdue University. May, 1975. Ann Harbor Science, Ann Harbor, Mich., 698 pags. EEUUA.
- Gould, S. y Genetelli, J. (1978). Heavy metal complexation behavior in anaerobically digested sludges. *Water Res.* **12**.
- Guerrero, M. (1993). Suelos agropecuarios del Estado de Morelos. Producción y rendimientos. CRIM, UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.
- Gutiérrez M.E (1982). Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los distritos de riego 03 y 88. Tesis de Maestría en Ciencias,

- Facultad de Química, UNAM, México, D.F., México.
- Gutiérrez, M. E. (1993). Aplicación de la pirólisis para el manejo integral de la basura municipal. Instituto de Geografía, UNAM. Comunicación personal.
- Gutiérrez, M. E. y Ortiz L. (1994). Elaboración del cuadro para esta tesis.
- Gutiérrez, M. E. (1994). Comunicación personal.
- Hayes, D. y Theis, L. (1978). The distribution of heavy metals in anaerobic digestion. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 50, 61.
- Hilleboe, D. (1986). Manual de Tratamiento de Aguas Negras. Departamento de Sanidad de Nueva York. Ed. Limusa, México, D.F.
- Holden, T., Newton, J., Sylvestri, P. y Diaz, M. (1989). How to select hazardous waste treatment technologies for soils and sludges. Alternative innovative and emerging technologies. Pollution Technology, Review No. 163. Noyes Data Corporation New Jersey, USA.
- Hopke, K. y Plewa, J. (1984). The evaluation of mutagenicity of municipal sewage sludges. EPA-600/1-83-016. Washington, D.C, EEUUA.
- Horvath, J. Koshut, A. (1981). Proportions of several elements found in sewage effluents and sludges from several municipalities in West Virginia. *J. Environ. Qual.*, 10, 491.
- Hubbert, K. 1940. The theory of groundwater motion. *J. Geology*. p. 785-944.
- INEGI, (1990). Síntesis geográfica del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México.
- Jaakko, P. (1970). Fertilizer from sewage sludge. *Environ. Pollut. Manag.* p. 169-172.
- Jaimes, L. y Cortés, A. (1991). Hidrogeología de las cuencas de los ríos Apatlaco y Yautepac, región noroccidental del estado de Morelos. En: El recurso agua en el Estado de Morelos y problemas de su contaminación. CRIM, UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.
- Jáuregui, E. (1961). El clima de la ciudad de Cuernavaca. *Sobretiro de la Revista Ingeniería Hidráulica en México*. Oct-nov-dic. México, D.F., México.
- Jarvis, J. (1983). Heavy metal pollution: an Annotated Bibliography. Geo Books, Norwich, Inglaterra.
- Jelenek, F., Read, B. y Braude, L. (1977). Health perspective, use of municipal sludge on land. En: Proc. National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges. Information Transfer, Inc., Rockville, MD, EEUUA.
- Jenkins, H. y Cooper, S. (1964). The solubility of heavy metal hidroxides in water, sewage and sewage sludge. III. The solubility of metals present in digested sewage sludges. *Int. J. Air Water Pollut.*, 8, 695.
- Kiff, J. (1978). A study of the factors affecting bioflocculation in the activated sludge processes. *Water Pollut. Control.*, 464.
- Kubota, H. (1984). Composting has promising future in Japan. *BioCycle*, 3, p. 28-31.
- Lagerwerff, V., Biersdorf, T, y Brower, L. (1976). Retention of metals in sewage sludge. I Constituent Heavy Metals. *J. Environ. Qual.* 5, 19.
- Lake, L., Kirk, W y Lester, N. (1984). Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in sewage sludges and sludges-amended soils: A review. *J. Environ. Qual.* 13, 175.
- Lake, L., Kirk, W. y Lester, N. (1985). The effects of anaerobic digestion of heavy metal

- distribution in sewage sludges". *Water Pollut. Control.* 84, 549.
- Leeper W. (1972). Reactions of heavy metals with soil, with special regard for their application in sewage wastes. Army Corps Engineers, Contract No. DACW/73-73-C-0026. Washington, D.C., EEUUA.
- Leidner, J. (1981). Plastic Wastes. Recovery of economic value. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Lester, N. (1987a). Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes. Vol. I Sources, Analysis and Legislation. CRC Press, Inc. Florida, EEUUA.
- Lester, N. (1987b). Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes. Vol. II Treatment and disposal. CRC Press, Inc. Florida, EEUUA.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. (1991). Porrúa, México, D.F. México.
- Lindsay, L. (1972). Zinc in soils and plant nutrition. *Adv. Agron.* 24, 147.
- Lindsay, L. y Park, J. (1970). Waste composts as chelating agents in plant nutrition. En: Soil for Management of Organic Wastes and Waste Waters. (1975). Symp. ASSA, ASA, CSCA, Alabama, EEUUA.
- Liquid Fertilizer Manual. (1979). National Fertilizer Solutions. Association. 1701 W. Detwiller D. Peoria, Illinois, 61614, EEUUA.
- López, V. (1985). Tratamiento biológico de aguas residuales. En prospectiva de la biotecnología en México. Compilador, Rodolfo Quintero Ramírez. Ed. Fundación Javier Barrios Sierra, A.C. y CONACYT, 259-284.
- Matthews, J. (1979). Sewage sludge disposal. A service to agriculture. *Effluent and Water Treatment Journal.* 19, 185.
- Matthews, J. (1984). Control of metal application rates from sewage sludge utilization in agriculture. *Crit. Rev. Environ. Control.* 14, 199.
- Mengel, K. y Kirkby, A. (1987). Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Bern, Suiza.
- Metcalf y Eddy. (1987). Tratamiento y depuración de aguas residuales. Ed. Labor, S.A. Barcelona, España.
- Moller, O. (1983). German practice in land disposal of sludge including legislation and health aspects". *Water Sci.Tech.* 15, p. 115-133.
- Morse, D. (1989). Sludge in the nineties. *Civil Engineering.* 47-50. Riverside, CA., EEUUA.
- Mortvedt, J. y Giordano, H. (1975). Response of corn to zinc and chromium in municipal wastes applied to soil. *Environ. Qual.*, 4, p. 170-174.
- Neufeld, D. y Hermann, R. (1975). Heavy metal removal in acclimated activated sludge. *Water Res.* 2, 811.
- Newman, J. y Bowden, V. (1989). Production, treatment and handling of sewage sludge. En: Dirkzwager, H. y Hermite, L. (1989). Sewage sludge treatment and use new developments, technological aspects and environmental effects. Elsevier Applied Science. Londres y Nueva York.
- Nieboer, E. y Richardson, S. (1980). The replacement of the nodescríp term heavy metals by a biologically an chemically significant classification of metal ions. *Environ. Pollut. Ser.* 1, 3.
- Oake, J., Booker, S. y Davis, D. (1984). Fractionation of heavy metals in sewage

- sludges" *Water Sci. Technol.* 17, 587.
- Ortiz L. (1986). Manual de técnicas y procedimientos para análisis físicos y químicos de suelos. Tesis. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Ortiz, F., Cortina, C. y Maffey, G. (1987). Manejo de desechos industriales peligrosos en México. Colección Medio Ambiente. Universo Veintiuno. México, D.F., México.
- Page, L., Thomas, G., Smith, E., Iskandar, K. y Sommers, (1983). Utilization of municipal wastewater and sludge on land. University of California, Riverside, CA. EEUUA.
- Page, L., Logand, T. y Ryan, J. (1987). Land application of sludge. Lewis Publishers Inc. pp 101-133.
- Parsa, A. (1970). Solid wastes as zinc fertilizers. En: Soil for Management of Organic Wastes and Waste Waters. (1975). Symp. ASSA, ASA, CSCA, Alabama, EEUUA.
- Pattero, J. (1979). Fertilizer from sewage sludge. *Environ. Pollut. Management.* 169-172.
- Pearson, G. (1968). Hard and soft acids and bases. *Fundamental principles.* J. Chem. Educ., 45, 581.
- Perkin Elmer. (1977). Analytical methods for atomic absorption. Handbook of Management. EEUUA.
- Peters, E. (1985). Screening municipal wastewater treatment plant sludges for suitability for land application. M.Sc. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA. EEUUA.
- Petruzzelli, G., Lubrano, L., y Guidi, G. (1981). The effect of sewage sludge and composts on the extractability of heavy metals from soil. *Environ. Technol. Lett.*, 2, 449.
- Pierce, R.G. (1977). Sewage sludge for agriculture use. Public. information officer, USDA. *Waste Age.*, 8.
- Purves, D. (1977). Trace-elements contamination of the environment Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Ramírez, E., Cardoso, L. y López, S. (1991). Composteo en pila estática: desarrollo experimental. Informe interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Mor., México.
- Reyes, P. (1980). Bioestadística aplicada. Trillas. México, D.F., México
- Russell, E.W., (1972). Soil Conditions and Plant Growth. Longmans, Londres, Inglaterra.
- Sahm, H. (1984). Anaerobic wastewater treatment. *Adv. Biochem Eng.*, 29, 83.
- Salazar, C. (1991). Tratamiento de los desechos líquidos industriales en el distrito de control de la contaminación del agua de la zona de Civac. En: El recurso agua en el Estado de Morelos y problemas de su contaminación. (1991). CRIM, UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.
- Salazar, C. (1990). Comunicación personal.
- Sánchez E. y Ortiz L. (1989). Efecto de las aguas industriales tratadas sobre suelos agrícolas en el Estado de Morelos. Informe Interno, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
- SARH. (1987). Programa operativo 87. Sector agropecuario y forestal. Región sur. Delegación Estatal Morelos. México.

- SEDESOL. (1992). Desechos municipales y aguas residuales. En: Programa México XXI. Borrador O. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., México.
- SEDUE. (1988). Control de la contaminación del agua. Programa nacional de capacitación ambiental. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. México, D.F. México.
- Shen, T. (1979). Air pollutant from sewage sludge incineration. Jour. Environ. Eng. Division. 195.
- Silviera, J. y Sommers, E. (1977). Extractability of copper, zinc, cadmium and lead in soils incubated with sewage sludge. J. Environ. Qual., 6, 47.
- Sommers, E. (1977). Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. Environm. Qual., 6, 225.
- Solís, C. (1982). Funcionamiento de los sistemas lagunares modificados, modelo UAEM en valles altos. Curso: Depuración de aguas en pequeñas comunidades. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.
- Spiegel, J., Farmer, K. y Garver, R. (1985). Heavy metal concentrations in municipal wastewater treatment plant sludge. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 35, 38.
- Sposito, G., Lund, J.; y Chang, C. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludges. I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46, 260.
- SRH, (1976). Atlas del agua de la República Mexicana. Talleres Offset Altamira. México
- Sterrit, M. y Lester, N., (1980). Atomic absorption spectrophometric analysis of the metal content of wastewater samples. Environ. Technol. Lett. 1, 402.
- Sterrit, M. y Lester, N. (1981). Concentrations of heavy metals in forty sewage sludges in England. Water air soil pollut. 14, p. 125-131.
- Stevenson, J. y Ardakani, S. (1983). Reacciones de la materia orgánica que involucran a los micronutrientes en el suelo. En Micronutrientes en Agricultura. Comp. Mortvedt, J., Giordano, M. y Lindsay, L. AGT Editor. Barcelona, España.
- Stover, C., Sommers, E. y Silviera, J. (1976). Evaluation of metals in wastewater sludges. J. Water Pollution Control Fed. 48, 2165.
- Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. (1984). Manual de Microbiología del Agua. 3a. Edición, 1er. Volumen. México, D.F., México.
- TACSA-SARH. (1981). Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México (reporte técnico).
- Tarradellas, J. (1991). Comunicación personal. Instituto Politécnico de Laussane, Suiza.
- Tisdale, S. y Nelson, W. (1982). Fertilidad de los suelos y fertilizantes. UTEHA. México, D.F., México.
- USSLS. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S. Dept. Agr. Handbook 60.
- Vidal, R. (1980). Algunas relaciones clima-cultivos en el Estado de Morelos. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México.
- Villalobos, R. (1977). Efectos biológicos del cromo. Ana. Inst. Biol. UNAM. 48, 115-162.

## **APENDICE A**

## APENDICE A.1

### DESCRIPCION HISTORICA DEL PROBLEMA

Al analizar las fuentes documentales (INEGI, 1990), se encuentra como justificación para la implantación de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Civac), el que únicamente se permitiría la implantación de "industria limpia", con lo cual se pensaba proteger al ambiente y a la población, evitando afectar al turismo y agricultura, que son actividades de suma importancia para el estado.

Sin embargo, las ramas industriales establecidas distan mucho de poder considerarse "limpias", ya que utilizan reactivos químicos y generan efluentes líquidos, sólidos y gaseosos, que obligadamente requieren de un control de acuerdo a las normas ecológicas respectivas para cada tipo de industria. Además, no se planeó la selección del sitio para la ubicación de la zona industrial, ya que en ese momento existía información preliminar acerca de los sitios más adecuados para el establecimiento de industrias, con base en la dirección de vientos predominantes diurnos y nocturnos de la zona. No obstante, estos estudios no se consideraron ya que la zona industrial se estableció en el lugar menos adecuado, de acuerdo con los estudios realizados por Jáuregui (1961).

En estos estudios (Jáuregui, op cit), se menciona que por encontrarse en la porción media de una cuesta pronunciada y de gran desarrollo, la ciudad de Cuernavaca se ve sometida a la regularidad de los llamados vientos de valle (anabáticos) y de montaña (katabáticos). Durante el día, el aire tibio del valle asciende hacia la montaña, en este caso, hacia el norte, registrándose vientos tibios al sur que generalmente se establecen entre las 6 y las 9 de la mañana con intensidades de 2-4 m/seg (débiles). Después de las 6 p.m., se comienzan a establecer los vientos frescos de la montaña que soplan del norte y duran toda la noche; son algo más intensos que los vientos tibios del sur y si vienen acompañados de lluvia se llegan a registrar rachas moderadas de 7 a 10 m/seg. Es notable la regularidad de estos vientos locales que sólo son perturbados ocasionalmente durante el invierno y la primavera por los "nortes" fríos que llegan a desbordarse sobre el Valle de Cuernavaca.

Jáuregui (op. cit.) menciona que la calidad del aire en 1961 era bastante puro y transparente, debido a que "no existía una fuente de humo industrial"; además, la barrera montañosa que separa a Cuernavaca de la Cuenca de México, por ser suficientemente alta, impide que la nube de humo industrial de la Ciudad de México se desborde hacia el valle de Cuernavaca. Si a futuro se pensara construir una zona industrial, la ubicación ideal debería ser tal que los humos en ningún momento se difundieran sobre la ciudad y que además existiera una separación suficiente con la misma para dar lugar a la dilución de dichos humos.

Esta condición es ideal para la faja N-S (marcada con el número 1 en la fig. A.1.1), al oriente de la serranía que limita por el este al valle de Cuernavaca. Localizada ahí, en

la zona de Yautepec, la ciudad industrial permitiría que el área residencial se extendiera (como ya se observaba en esa época) hacia el oriente hasta llegar a las faldas de la serranía donde se encuentra Jiutepec. Los humos de la zona industrial no podrían así invadir el valle de Cuernavaca debido a la barrera de cerros y lomeríos que separan a Jiutepec de Yautepec. De esta manera, los vientos serían acarreados hacia el sur, permitiendo su dilución antes de llegar a otro poblado, sin afectar a la población de Yautepec.

Si los estudios de planificación no previeran una fuerte expansión en el futuro de la industria en Cuernavaca, existe la alternativa (menos ventajosa) de localizar la zona industrial en el área que se localiza al NE de Cuernavaca, entre Jiutepec y Tepoztlán (marcada con el número 2 en la fig. A.1.1). Durante el día los vientos del S y SO acarrearían los humos fuera de la ciudad de Cuernavaca, pero durante la noche las emanaciones se difundirían a la ciudad debido al viento N y NW (Jáuregui, op. cit.).

Además, Jáuregui previó que de seleccionarse una ciudad industrial en las cercanías de la ciudad de Cuernavaca, favorecería un crecimiento no controlado del área urbana, dificultando aún más el ordenamiento del uso del suelo.

Estas opciones no fueron consideradas y finalmente se seleccionó un sitio ubicado en una zona que favorece la contaminación atmosférica del área urbana, que además estaba compuesto por suelos fértiles y de alta productividad, con múltiples cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales.

Actualmente el área habitacional, comercial y de servicios ha crecido hacia el oriente, de tal manera que ha alcanzado y rebasado a la zona industrial de acuerdo a lo previsto por Jáuregui (op. cit.). De acuerdo a este crecimiento, en la actualidad se ha constituido la zona conurbada del valle de Cuernavaca, que incluye los municipios de Cuernavaca, Jiutepec, Emiliano Zapata y Temixco (fig. A.1.2).

Todas las industrias que se establecieron, utilizan abundante agua, principalmente potable, en sus procesos y generan efluentes líquidos que contienen diversos compuestos químicos. En los primeros años de funcionamiento, las aguas eran vertidas directamente hacia los arroyos de La Gachupina, Rivetex y Puente Blanco (INEGI, 1990 y Aguilar, 1990), que cruzan el área de norte sur, junto con las descargas municipales de las localidades de Tejalpa, Tlahuapan y Jiutepec (fig. 2.2). Más al sur, se unían con las aguas provenientes del manantial San Gaspar y todas ellas fueron utilizadas para riego agrícola.

Los suelos de los terrenos agrícolas de los ejidos en que se utilizaba el agua residual para riego, eran aptos para el cultivo de lechuga, jitomate, cebolla, arroz, flor de corte, maíz y caña de azúcar, entre otros. Los productos de dichos cultivos eran utilizados para consumo propio, para abastecer los principales mercados del estado y del Distrito Federal y, en ocasiones para exportación. Los ejidatarios notaron que la diversidad de

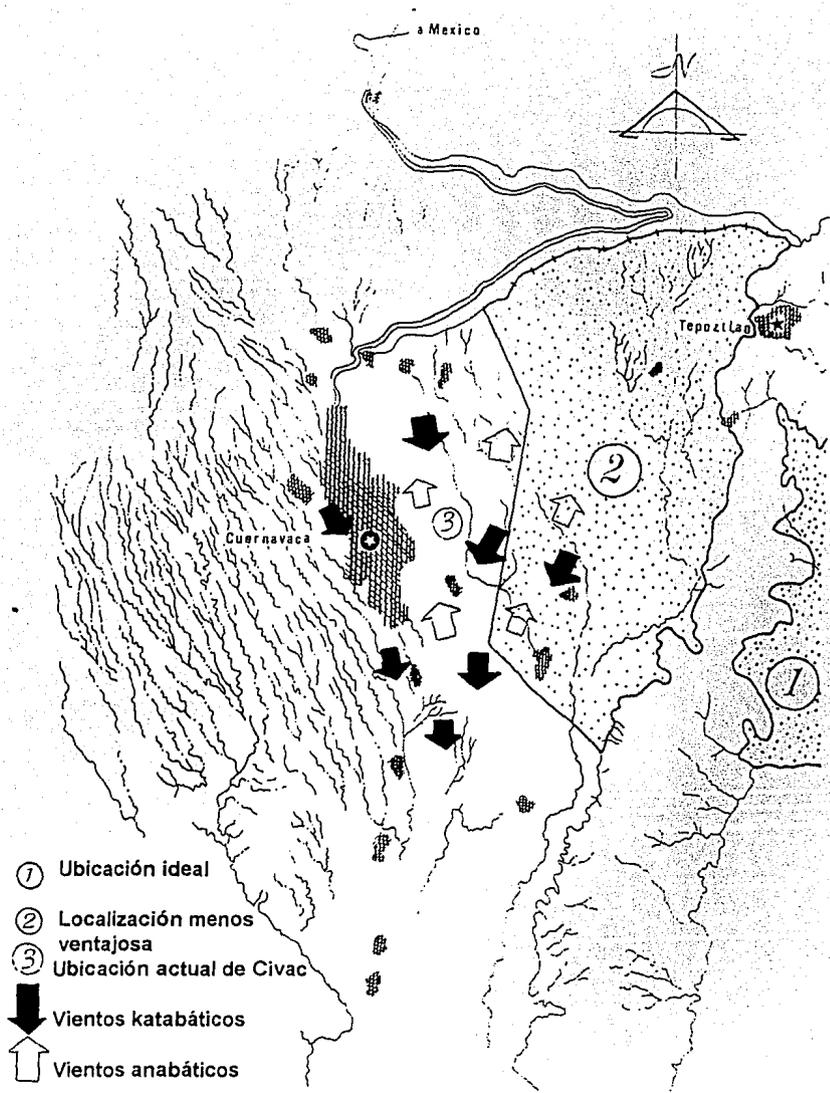


Fig. A.1.1. Propuesta para la ubicación ideal de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Jáuregui, 1961)

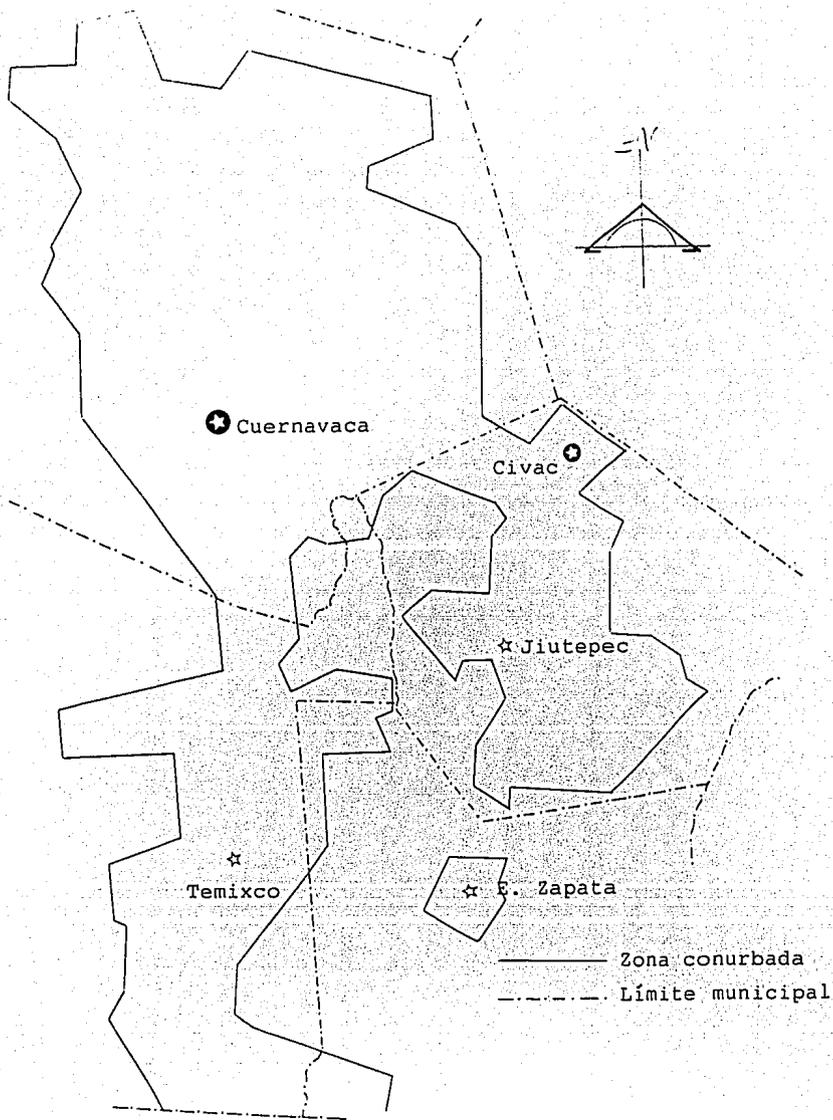


Fig. A.1.2. Zona conurbada del valle de Cuernavaca

cultivos en la región, así como su producción, empezaron a bajar drásticamente a partir del uso del agua residual, por lo que se organizaron y presentaron sus quejas ante el Gobierno del Estado y dependencias federales, exigiendo la pronta solución a este problema.

En el año de 1972, la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) llevó a cabo un estudio encaminado a determinar las condiciones de calidad del agua en la cuenca alta del Río Amacuzac. Se definió la zona de Tejalpa-Jiutepec-Emiliano Zapata, como una de las que enfrentaban mayores problemas de contaminación del agua, como consecuencia de las descargas de aguas residuales generadas en Civac y áreas aledañas a esta ciudad industrial (INEGI, 1990).

Las conclusiones del estudio recomendaron la necesidad de fijar condiciones particulares de esas descargas y exigir el tratamiento correspondiente a los responsables de las mismas. Este antecedente y los problemas planteados anteriormente, dieron la pauta a seguir para a la SRH, tendiente a solucionar el problema de la contaminación del agua de la zona, así como los conocimientos iniciales para la búsqueda de la mejor solución. De esta forma se unieron esfuerzos con las autoridades estatales, los municipios afectados y los industriales de la zona y después de diferentes estudios sobre las posibles opciones, se acordó instituir el Primer Distrito para el Control de la Contaminación del Agua, en el que quedó incluida la Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de Civac (Eccaciv) (Salazar, 1991)

El Distrito de Control se formó con los efluentes de 55 industrias de la zona de Civac, 14 de las zonas aledañas, cinco fraccionamientos y tres poblados vecinos. Del total de usuarios del distrito, tan solo 10 del sector industrial harían uso del 95% del sistema de tratamiento predominando las industrias químicas de tipo orgánico y las textiles (Salazar op. cit.)

El sistema de recolección de aguas residuales está constituido por dos "intersiduales" (interceptores de las aguas), con una longitud aproximada de 3.2 y 6.5 km respectivamente, los cuales se unen a un emisor de 2.2 km que se conecta a la planta de tratamiento.

Las aguas que se generan en Civac, antes de ser descargados a un "intersidual", son colectadas por un sistema de alcantarillado separado que forma parte de las obras del Distrito, con una longitud de 3 km.

## APÉNDICE A.2

### ASPECTOS AMBIENTALES

#### A.2.1. Generalidades sobre contaminación del agua

##### A.2.1.1. Características

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1991), en su artículo 4o. establece las siguientes definiciones:

- 1) **Contaminante.** Es toda materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, los derivados químicos o biológicos, así como toda forma de energía térmica, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, aguas, suelo, flora, fauna o cualquier elemento ambiental, alteren o modifiquen su composición o afecten la salud humana.
- 2) **Contaminación.** Es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que perjudique o resulte nocivo a la vida, la salud o el bienestar humano, a la flora y la fauna o degraden la calidad del aire, del agua, del suelo o de los bienes y recursos en general.

Actualmente el problema de la contaminación del agua se ha agravado y adquirido proporciones dramáticas tanto por su intensificación como por su extensión geográfica. Ya en los siglos XVIII y XIX se hablaba de la contaminación debido a grandes aglomeraciones urbanas y centros industriales (González y Rodríguez, 1991)

La gravedad de la contaminación reside en su propagación a partir de fuentes bien localizadas: la biosfera como sistema autoregulator tiende a la estabilidad, es decir, a conservar sus rasgos esenciales para poder sobrevivir a posibles alteraciones del ambiente. De ahí la necesidad de reciclar los residuos contaminantes y de utilizar los productos de desecho como materia prima para otros procesos industriales.

El constante aumento de la actividad humana ha hecho necesaria la extracción de agua subterránea para satisfacer sus necesidades domésticas, industriales y agropecuarias. Estas actividades producen desechos contaminantes que, con el tiempo, al incorporarse al flujo subterráneo, el lixiviado generado por ellos va degradando la calidad del agua y, en muchos casos, restringiendo su uso para consumo humano.

El agua se contamina por diferentes fuentes que pueden ser (SEDUE, 1988):

**Fuentes naturales.** Se emiten sustancias extrañas de manera natural, que degradan la calidad de las aguas superficiales. Dentro de estas fuentes se agrupan a la erosión acuática y eólica, erupciones volcánicas, yacimientos subterráneos de sustancias

tóxicas, entre otras.

**Fuentes antropogénicas.** Como resultado de las actividades humanas, se generan sustancias extrañas al ambiente acuático, degradando su calidad y haciendo más difícil su utilización. Dentro de estas fuentes se pueden mencionar las descargas municipales, industriales y agrícolas.

Las descargas de agua municipal constituyen la mayor fuente de contaminación, con respecto al volumen generado, ya incluyen a las descargas domésticas de las poblaciones que, en ocasiones se mezclan con las pluviales. Están constituidas por desperdicios caseros y desechos humanos y animales (SEDUE, 1988).

Las descargas de agua que provienen de los diferentes procesos de las industrias, son desechos más peligrosos que las municipales, ya que concentran las sustancias que son utilizadas como materia prima para la elaboración de diversos subproductos. Estas aumentan cada vez más como consecuencia del desarrollo tecnológico e industrial del mundo entero, además de que muchas de las empresas descargan sus aguas directamente a los cuerpos de agua superficial, sin tratamiento previo, poniendo aún más en peligro a los ecosistemas acuáticos.

Los desechos industriales pueden originarse por procesos de enfriamiento, lavado, descargas, extracciones, impregnaciones, tratamiento químicos y operaciones similares. Se producen desperdicios muy variados, tanto en cantidad como en naturaleza; desde procesos que descargan grandes volúmenes de agua de enfriamiento, hasta cantidades relativamente pequeñas con altas concentraciones de sustancias orgánicas e inorgánicas. La magnitud y la concentración de los desechos de una industria varían dentro de amplios límites, dependiendo de los procesos de fabricación y los métodos de control de los mismos (González y Rodríguez, *op cit*)

La contaminación agrícola es el resultado del riego de los campos de cultivo, los que han sido sometidos a fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, fungicidas, entre otros; con la finalidad de controlar plagas y aumentar la producción del suelo. Estas sustancias son arrastradas por diversos medios, hacia las corrientes de agua limpia, provocando también desequilibrios en el ambiente acuático.

En nuestro país, la contaminación del agua se debe básicamente a las actividades industriales y agrícolas, ya que los productos de estas prácticas tales como metales pesados, cianuros, hidrocarburos, fenoles y plaguicidas, son peligrosos y persistentes en el ambiente. Prueba de ello son los casos de intoxicación en humanos provocados por diferentes accidentes en la industria y campo (Díaz, 1988).

#### **A.2.1.2. Toxicología**

Los contaminantes que se descargan en las aguas superficiales pueden ser agrupadas dentro de diferentes clases (cuadro A.2.1).

Los componentes tóxicos existentes en los desechos industriales pueden causar al organismo humano, desde perturbaciones ligeras, hasta síntomas graves definidos, característicos de los componentes del residuo, de su concentración y de la capacidad de dilución del agua receptora.

Los efectos acumulativos sobre el organismo requieren largos períodos de observación y por otra parte, la tecnología industrial avanza rápidamente produciendo nuevos productos. De algunos desechos existen fuertes evidencias de la actividad carcinógena, y de otros, efectos alérgicos y lesiones orgánicas, perturbaciones fisiológicas e interferencias en procesos vitales (Ortiz *et al* 1987).

**Cuadro A.2.1. Categorías de los contaminantes mayores y sus principales fuentes (Davis y Cornwell, 1991)**

Categoría del contaminante	fuentes puntuales		fuentes no puntuales	
	descargas domésticas	descargas industriales	lavados agrícolas	lavados urbanos
demandante de oxígeno	X	X	X	X
nutrimentos	X	X	X	X
patógenos	X	X	X	X
sólidos suspendidos	X	X	X	X
sales	X	X	X	X
metales tóxicos		X		X
tóxicos orgánicos		X	X	
calor		X		

Existen una serie de sustancias que poseen alta toxicidad, por lo cual se han fijado, según el caso, las concentraciones máximas permisibles, mediante normas establecidas por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los gobiernos de cada nación.

Entre las sustancias altamente tóxicas se incluyen al arsénico, cadmio, cianuros, cromo hexavalente, plomo, fenoles, aceites y grasas, plaguicidas y otros metales pesados. Todas ellas son producto de actividades industriales, agrícolas y domésticas.

## **A.2.2. Tratamiento de aguas residuales**

Desde principios de siglo ha existido una preocupación por el continuo desarrollo de los métodos para el tratamiento de aguas residuales. Inicialmente, el objetivo del tratamiento fue acelerar los procesos naturales de depuración, bajo condiciones controladas, para lograr la remoción de material flotante y suspendido, de la materia orgánica biodegradable y la eliminación de microorganismos patógenos. Actualmente, el grado de purificación del agua requerido para diferentes usos ha aumentado, por lo que se han establecido nuevos procedimientos (Hilleboe, 1986) .

El tratamiento de aguas residuales se define de la siguiente manera: "es el proceso o serie de procesos a los que se someten las aguas residuales, con el objeto de disminuir o eliminar características perjudiciales de los contaminantes que éstas contienen"(Metcalf y Eddy, 1987).

Los procesos requeridos para el tratamiento de aguas residuales, dependen de las características que presenten dichas aguas. Los tipos de tratamiento pueden clasificarse como sigue:

### **A.2.2.1. Tratamiento primario**

Es un tratamiento físico que implica un proceso de sedimentación para remover los sólidos suspendidos cuya densidad es mayor que la del agua. En esta etapa no se pueden quitar todos los sólidos, debido a la velocidad de sedimentación, relacionada al tamaño o a la gravedad específica de las partículas.

La mayoría de las plantas de tratamiento incorporan tanques de sedimentación que operan mecánicamente, de forma rectangular o circular, con flujos horizontales y radiales, respectivamente. Los tanques horizontales requieren menos área de terreno que los circulares, especialmente si se utilizan muchos de ellos.

La remoción de metales pesados en el tratamiento primario es importante por dos razones: primero, reduce la carga de metales sobre los microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico, reduciendo la posibilidad de dañar la eficiencia de tratamiento como resultado de toxicidad por metales. Segundo, contribuye a la eficiencia de remoción de las plantas de tratamiento, reduciendo la contaminación de aguas superficiales a las que se descargan los efluentes finales (Barth *et al*, 1965).

La remoción de metales durante la sedimentación primaria es un proceso físico, que depende de la estabilidad del metal precipitado o de la asociación de metales con la materia orgánica. La remoción mínima de los metales disueltos, se presenta durante este proceso y la proporción de ellos con respecto a los totales, se incrementa en el efluente. Aunque los factores determinantes para la remoción de metales durante la sedimentación primaria son la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y la especie química del metal (soluble o insoluble), estos dos factores son influenciados

por varios otros (Lester, 1987a).

La remoción de metales está determinado por:

- a) diseño de la planta de tratamiento
- b) flujo de agua, estación seca o época de lluvias
- c) concentración de sólidos suspendidos en el influente.

Las especies químicas de los metales dependen de (Lester, 1987a):

- a) concentraciones de los metales en el influente
- b) demanda química de oxígeno del influente
- c) dureza, alcalinidad y pH de las aguas residuales.

De esta manera, la remoción de metales durante el proceso de sedimentación primaria, varía ampliamente.

#### **A.2.2.2. Tratamiento secundario**

El propósito del tratamiento secundario es remover la materia orgánica biodegradable medida como demanda bioquímica de oxígeno soluble ( $DBO_5$ ), que escapa al tratamiento primario y remover sólidos suspendidos adicionales. Los factores esenciales para un buen tratamiento secundario son: disponibilidad de un gran número de microorganismos, buen contacto entre ellos y la materia orgánica, disponibilidad de oxígeno, condiciones ambientales favorables (por ejemplo, temperatura y tiempo) y ausencia de compuestos tóxicos.

El tratamiento biológico es un proceso de transformación en el que los organismos aerobios y facultativos y los sólidos orgánicos solubles de las aguas, se mezclan íntimamente en un medio favorable para la descomposición de los sólidos y la generación de nuevas células microbianas. El medio está formado por las mismas aguas a tratar, por lo que la eficacia de tratamiento depende de que se mantenga continuamente oxígeno disuelto durante todo el proceso y una proporción adecuada de microorganismos.

Las aguas residuales contienen microorganismos, pero su número no es suficiente para que puedan llevar a cabo la degradación requerida, por lo que es necesario agregarlos y distribuirlos homogéneamente en las aguas, antes de que proceso de todos activados pueda funcionar con eficacia.

Entre los sistemas de tratamiento biológicos, se encuentra el conocido como de **lodos activados**, el cual se emplea después de una operación de sedimentación simple. Las aguas residuales contienen sólidos suspendidos y coloidales, de manera que cuando se agitan en presencia de aire forman núcleos sobre los cuales se desarrollan los microorganismos. Gradualmente forman partículas más grandes de sólidos que se

conocen como lodos activados. En consecuencia, estos lodos están formados por flóculos parduscos que contienen materia orgánica procedente de las aguas y gran cantidad de bacterias (Metcalf y Eddy, 1987).

La generación de lodos activados es un proceso lento, de manera que la cantidad que se forma en cualquier volumen de aguas negras durante el período de tratamiento, no es suficiente para lograr un tratamiento rápido y eficaz. Con el objeto de lograr una mayor concentración, se recolectan lodos ya producidos en anteriores operaciones y se usan nuevamente para el tratamiento de volúmenes subsecuentes. Este es un proceso acumulativo por lo que es necesario retirar continuamente el exceso de lodos activados.

Los lodos activados sobrantes se mezclan con los sólidos de las rejillas y de los tanques de sedimentación primaria y, conjuntamente, forman el desecho final del proceso de tratamiento (lodos residuales).

La eficiencia de remoción de elementos contaminantes por las plantas de tratamiento de lodos activados es muy variable, ya que depende de las condiciones de cada planta. En algunas, es muy alta y en otras muy baja, ya que difieren las relaciones entre las concentraciones de ellos y su inclusión en los flóculos de lodos activados; de esta forma se ha observado un alto grado de eficiencia para hierro, cobre, cromo y zinc. En cambio, para níquel, manganeso, calcio y magnesio, la eficiencia ha sido baja.

La remoción de metales durante el tratamiento biológico se ha estudiado extensivamente, sobre todo para las plantas de tratamiento que utilizan el proceso de lodos activados. La adsorción de metales pesados por flóculos de lodos activados no es diferente a los procesos de película biológica en un filtro percolador que absorbe metales.

La remoción de metales contenidos en las aguas residuales parece ocurrir en dos etapas: primero, durante la sedimentación primaria en la que los metales insolubles o los metales adsorbidos a partículas son sedimentados. Segundo, durante el tratamiento biológico los metales disueltos se adsorben a floculantes biológicos y se depositan en el sedimentador secundario. En un estudio realizado por Neufeld y Herman (1975), añadieron zinc, mercurio y cadmio en el influente y para dosis mayores de 300 ppm se removieron aproximadamente el 90% de mercurio, 75% de cadmio y 55% de zinc. Con dosis de 1000 ppm, el porcentaje de zinc y cadmio se redujo; sin embargo, estas concentraciones son mucho más altas que las que se presentan en aguas residuales. Los autores sugieren que la remoción inicial de metales pesados no es un fenómeno biológico, pero que debe estar relacionado con las propiedades físicas y químicas, y -probablemente- con la superficie de la masa biológica.

De acuerdo a Lester (1987b), se ha observado que son muchos los factores que afectan la remoción de elementos contaminantes en el proceso biológico de lodos

activados y pueden ser divididos en operación de la planta y factores físicos, químicos y biológicos. Dentro de los parámetros de operación se incluyen la edad del lodo, remoción de sólidos suspendidos, concentración de sólidos suspendidos, concentración de oxígeno disuelto y tiempo de sedimentación. Los factores físicos y químicos que afectan la remoción son temperatura, pH, concentración del metal, solubilidad, valencia, concentración de agentes quelatantes y tamaño de partícula. El factor biológico principal es la concentración de polímeros extracelulares, siguiéndole otros productos microbianos que incluyen a metabolitos intermediarios y materiales liberados como resultado de lisis.

Un **filtro percolador** es un lecho de oxidación biológica formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual escurre el agua residual. El medio de empaque o soporte consiste generalmente de piedras cuyo tamaño oscila de 2.5 a 10 cm de diámetro; la profundidad varía de 0.9 a 2.4 m con una profundidad media de 1.8 m. El agua se distribuye por encima del lecho por medio de un distribuidor giratorio y cada filtro posee un sistema de saneamiento inferior para recoger el líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio. La materia orgánica se adsorbe sobre la película biológica adherida al medio y se degrada por la acción de los microorganismos aerobios.

Un **estanque de estabilización** es una masa de agua relativamente poco profunda, tienen bajos costos de construcción y pueden ser utilizados para dar tratamiento a las aguas residuales industriales o a la mezcla de industriales-domésticas que sean susceptibles de tratamiento biológico. El oxígeno para los microorganismos se suministra mediante la aireación superficial natural y por la fotosíntesis de las algas; también puede suministrarse aireación artificial, la que además sirve para mezclar el contenido del estanque y así evitar la sedimentación de sólidos suspendidos.

### **A.2.2.3. Tratamiento terciario**

Aunque el proceso de tratamiento secundario remueve el 85% de la DBO<sub>5</sub>, la DQO soluble y los sólidos suspendidos, sólo remueve una pequeña parte de otras sustancias tales como nitrógeno, fósforo, y metales pesados. El tratamiento terciario da una calidad del efluente adecuada para la mayoría de los propósitos de reuso.

En este tipo de tratamiento, la remoción o conversión de contaminantes se lleva a cabo por la adición de sustancias químicas o por el desarrollo de reacciones químicas. Los procesos comúnmente usados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales son: precipitación química, transferencia de gases, adsorción, neutralización, reacciones de óxido-reducción e intercambio iónico (SEDUE, 1988; Davis y Cornwell, 1991).

### **A.2.3. Información sobre los elementos potencialmente tóxicos ("metales pesados") y nutrimentos presentes en el lodo**

Existe un considerable desacuerdo sobre la definición actual de "metales pesados", ya que existe una gran variedad de criterios, tal y como lo demuestran Nieboer y Richardson (1980). Una de las definiciones más comunes es la siguiente: son aquéllos con gravedades específicas de aproximadamente 5 g/mL o mayores (Matthews, 1984). El grupo incluye a metales de la serie de transición y de los grupos IIA, IIIB, IVB, VB y VIB; sin embargo, este término se aplica frecuentemente cuando existen connotaciones de toxicidad y de aquí surge otra definición de este grupo, que normalmente se utiliza en el contexto ambiental y se incluyen metales mayores tales como el aluminio y berilio, además de metaloides como el arsénico, selenio y antimonio.

Los "metaloides" se comportan como metales y no-metales, así que al arsénico, aunque no es un metal en el sentido estricto, se le relaciona con los metales en el sentido toxicológico. Jarvis (1983), define a los "metales pesados" e incluye a ciertos "metaloides" en su definición como: "aquéllos que tienen suficiente distribución y/o abundancia en el ambiente como para ser una sustancia biológicamente tóxica".

Se han realizado varias clasificaciones de los "metales pesados", basadas en sus propiedades toxicológicas o biológicas. Las clasificaciones químicas surgen de los conceptos tradicionales de ácido-base, en el cual un donador de electrones (base según Lewis), provee de ellos a un aceptor pobre de electrones (ácido de Lewis) para formar un enlace covalente. Pearson (1968), clasificó a los elementos dentro de ácidos fuertes y débiles o aceptores, dependiendo de la fuerza de su enlace con su respectivo donador de electrones y de la magnitud de sus constantes de equilibrio para la formación de complejos. Los aceptores fuertes se asocian con donadores fuertes y los aceptores débiles con donadores débiles.

Las clasificaciones biológicas están basadas sobre la esencialidad y/o toxicidad de cada uno de los elementos: los esenciales se dividen en macro y micronutrimentos, dependiendo de las concentraciones que son fisiológicamente requeridos. La mayoría de los cationes potencialmente tóxicos se clasifican dentro de la segunda categoría y sus concentraciones varían de 1 a 2 mg/kg de tejido.

Las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos que se presentan en un lodo residual varía ampliamente, de acuerdo a la localización geográfica, del tipo y cantidad del influente industrial y de la eficiencia de remoción de la planta de tratamiento (Spiegel *et al*, 1985, Berrow y Weber, 1972 ). Las contribuciones industriales pueden variar de planta a planta en una misma zona geográfica y, debido a las fluctuaciones en el proceso industrial, las concentraciones en el lodo de una sola planta, puede diferir de día a día (Matthews, 1984).

Los cuadros A.2.2 y A.2.3 muestran ejemplos de las concentraciones totales de

metales pesados encontrados en lodos de plantas de tratamiento de Inglaterra y los Estados Unidos (Spiegel *et al*, 1985; Horvath y Koshut, 1981; Sterritt y Lester, 1981 y Beckett, 1980). La extrema variabilidad en las concentraciones totales de cada uno de los metales, se ilustra por el intervalo tan amplio que se presenta y por los valores divergentes de la media y mediana. Aparentemente los valores de la media y la mediana no concuerdan con muchos de los constituyentes de los lodos, lo que indica que algunos valores muy altos o bajos pueden afectar el resultado final de la media. De esta forma, la medida de tendencia central para indicar la concentración de un elemento potencialmente tóxico en particular en los lodos, puede estar mejor representada por la mediana que con la media y por la desviación estándar.

Los elementos potencialmente tóxicos pueden provenir de tres fuentes: descargas domésticas, fuentes difusas (lluvia) y descargas industriales. Los valores más bajos que se presentan en los cuadros A.2.2 y A.2.3 pertenecen a lodos de origen doméstico y los más altos a aquéllos que provienen de aguas industriales altamente contaminadas.

**Cuadro A.2.2. Concentración de "metales pesados" en lodos de 2,400 muestras de lodos de 193 plantas de tratamiento en Inglaterra (mg/kg) (Spiegel *et al*, 1985; Horvath y Koshut, 1981; Sterritt y Lester, 1981; Beckett, 1980;)**

<b>Metal</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>
cadmio	menor de 60-1,500	menor de 200	--
cobalto	2-260	24	12
cromo	40-8,800	980	250
cobre	200-8,000	970	800
hierro	6,000-62,000	24,000	21,000
manganeso	150-2,500	500	400
níquel	20-5,300	510	80
plomo	120-3,000	820	700
zinc	700-49,000	4,100	3,000

Se han registrado algunos casos de concentraciones extremadamente altas de cromo, cobre, plomo y zinc (arriba de 5%); pero, en general, la media y la mediana de las concentraciones de esos elementos son del orden de 0.1 a 0.3 %. Con excepción del hierro, los metales restantes son una o dos veces menores en concentración que los anteriores; el hierro puede presentarse en concentraciones tan altas como 8 %.

Se han identificado los siguientes elementos como los de mayor importancia por su toxicidad o peligro potencial para animales y hombre: Cd, Pb, Hg, As, Se y Zn, así que se les presta atención prioritaria por introducirse como contaminantes en la cadena alimentaria (Purves, 1977).

**Cuadro A.2.3. Concentraciones de "metales pesados" en 250 muestras de lodos de 150 plantas de tratamiento localizadas en 6 estados de los Estados Unidos de América (mg/kg) (Sommers, 1977)**

<b>Metal</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>
aluminio	8,100-51,200	18,300	14,000
arsénico	3-30	14	12
cadmio	7-444	104	65
cobalto	4-18	10	9
cromo	169-14,000	2,226	1,290
cobre	458-2,890	1,346	1,244
hierro	8,800-82,800	31,000	25,650
manganeso	32-527	194	143
níquel	36-562	236	169
plomo	136-7,627	1,849	1,456
zinc	560-6,890	2,132	1,588

Chaney (1980), introduce el término "barrera suelo-planta" refiriéndose al riesgo de los elementos tóxicos en el sistema planta-animal-hombre. Chaney y Giordano (1983), mencionan que la "barrera" que protege la cadena alimentaria cuando uno o más de los siguientes procesos limita la transmisión a las plantas, pueden ser: a) insolubilidad de los elementos en el suelo que previene la absorción, b) inmovilidad de un elemento en la raíces para prevenir la traslocación a los tejidos de las plantas y c) la fitotoxicidad de los elementos se presenta cuando las concentraciones del elemento en los tejidos de las plantas está por abajo de las concentraciones peligrosas para los animales.

#### **A.2.4. Nitrógeno y fósforo**

El nitrógeno y fósforo son macronutrientes que, generalmente, se agregan al suelo en forma de fertilizantes para las plantas, ya que juegan un papel importante en la productividad de una parcela debido a que tienen funciones muy específicas e importantes dentro de las plantas. Sin embargo, también un exceso de estos elementos pueden producir problemas de contaminación directa o indirecta.

En el caso del nitrógeno, existen dos motivos por los que se desea evitar un exceso en el suelo: por aspectos directos de salud y por aspectos ecológicos. Si existe una cantidad alta de nitrógeno en el suelo, puede lixiviarse y llegar a los mantos acuíferos y los nitratos en el agua producen la metahemoglobina en niños o cianosis por ingestión diaria. El ganado presenta metahemoglobina, deficiencia de vitamina A, dificultades reproductivas, abortos y pérdida en la producción de leche. En los Estados Unidos y Holanda, la legislación permite una concentración máxima de nitratos en el agua de 45 a 100 mg/L (Bolt, 1978).

En cuanto a aspectos ecológicos puede provocarse la eutroficación de aguas

superficiales, lo que significa un enriquecimiento con nutrientes que causa un desarrollo rápido de las plantas acuáticas. La eutroficación es un proceso natural que se acelera con las actividades humanas tales como descargas de aguas domésticas e industriales, efluentes de plantas de tratamiento, lluvia y lixiviados de los campos de cultivo hiperfertilizados.

En el caso de altas concentraciones de fósforo en el suelo, éstas pueden afectar el desarrollo de las plantas por una acción indirecta. Por ejemplo, los síntomas de deficiencia de zinc posiblemente sean indicio de altos niveles de fosfatos solubles, ya que favorecen la formación de fosfatos de zinc haciendo que este catión no sea disponible para las plantas (Bolt, op. cit.).

#### **A.2.5. Microorganismos patógenos**

Un agente patógeno es una especie biológica que puede causar enfermedades en los organismos vivos (Page *et al*, 1983).

Los microorganismos patógenos que comúnmente se presentan en los lodos residuales son bacterias, virus, protozoarios y helmintos. No obstante, el número y tipo varía de comunidad a comunidad dependiendo del grado de urbanización, densidad de población, hábitos sanitarios, estación del año y frecuencia de enfermedades en la comunidad contribuyente. Las bacterias patógenas más comunes encontradas en lodos se presentan en el cuadro A.2.4.

En las aguas de origen doméstico, pueden encontrarse diferentes microorganismos que se presentan normalmente en el intestino del hombre y que son llamados "flora intestinal normal" y los microorganismos patógenos que en el intestino producen enfermedades de diferentes tipos.

Dentro de la flora intestinal se encuentran 4 géneros de la familia Enterobacteriaceae que son patógenos: Salmonella, Shigella, Klebsiella, y Yersinia.

Cuando se presentan las enfermedades gastrointestinales bacterianas (fiebre tifoidea, disentería, gastroenteritis, cólera), los agentes etiológicos son expulsados en las heces en grandes cantidades. Las heces usualmente se mezclan con las aguas residuales domésticas que pueden ser descargadas en cuerpos de aguas o a las plantas de tratamiento respectivas. En el último caso, los microorganismos patógenos se almacenan en los lodos residuales, mismos que se diseminan sin ningún control sanitario por lo que pueden ser arrastrados por la lluvia hasta algún cauce o, en algunos casos, penetrar por infiltración a las aguas subterráneas que alimenten pozos de abastecimiento público.

**Cuadro. A.2.4. Microorganismos encontrados en los lodos residuales (Page et al, 1983)**

<b>Grupo</b>	<b>Patógeno</b>	<b>Enfermedad causada</b>
Bacterias Salmonelosis.	<u>Salmonella</u> (1700 tipos)	Tifoidea, paratifoidea,
	<u>Shigella</u> (4 sp)	Disentería bacilaria
	<u>Escherichia coli</u>	Gastroenteritis
	<u>Yersinia enterocolitica</u>	Gastroenteritis
	<u>Compylobacter jejuni</u>	Gastroenteritis
	<u>Vibrio cholerae</u>	Cólera
	<u>Leptospira</u>	Enfermedad de Weil
Protozoarios ulceraciones en colon	<u>Entamoeba histolytica</u>	Disentería ambiana
	<u>Giardia lamblia</u>	Diarrea, absorción deficiente
	<u>Balantidium coli</u>	Ulceración del colon, diarrea
Helmintos (huevos)	<u>Ascaris lumbricoides</u>	Ascariasis
	<u>Ancylostoma duodenale</u>	Anemia
	<u>Necator americanus</u>	Anemia
	<u>Taenia saginata</u>	Teniasis

Esto da una idea de la importancia que tiene la detección e identificación de las bacterias patógenas presentes en los lodos residuales. Sin embargo, a pesar de todos los adelantos en técnicas de análisis y medios de cultivo, aún no se ha logrado simplificar la metodología para la recuperación, aislamiento e identificación de las bacterias patógenas, básicamente porque requiere para su desarrollo de medios artificiales bastante complejos y para su identificación deben aplicarse pruebas bioquímicas que requieren de mucho tiempo para obtener resultados.

Por estas razones se han buscado bacterias o grupos de bacterias que pudieran utilizarse como indicadores de la presencia de patógenos, ésto es, indicadores de contaminación fecal y para que un grupo de organismos pueda considerarse como indicador debe reunir las siguientes características (Subsecretaría de la Infraestructura Hidráulica, 1984):

- que estén presentes siempre que se encuentran los patógenos,
- su densidad debe estar asociada con la contaminación fecal,
- deben sobrevivir en el agua o lodo más tiempo que los patógenos, pero su desaparición debe ser inmediatamente posterior a la de aquéllos,
- no deben multiplicarse en el agua,
- deben estar ausente en agua bacteriológicamente potables,
- las técnicas para su análisis deben ser sencillas, rápidas, aplicables a cualquier

tipo de material y no deben presentar interferencias por otros microorganismos.

Al estudiar a los diferentes grupos de bacterias de origen intestinal, se llegó a la conclusión de que ninguno se ajustaba a todas las características de un indicador ideal; sin embargo, se encontraron dos grupos que cumplían con los requisitos más importantes y que fueron designados como INDICADORES. Estos grupos fueron los COLIFORMES, que incluye a tres géneros de la familia Enterobacteriaceae (Escherichia, Klebsiella y Enterobacter) y el grupo de los Enterococos, formado por cinco especies del género Streptococcus.

Dentro de los coliformes, los géneros mencionados anteriormente se suponía que eran habitantes exclusivos del tracto intestinal, pero por investigaciones posteriores se encontró que algunas especies de estos géneros también eran saprófitos de vida libre. De este modo el grupo coliforme quedó dividido en dos: los coliformes totales (Escherichia, Klebsiella y Enterobacter) y los coliformes fecales (Escherichia y algunas especies de Klebsiella).

Los estreptococos son habitantes exclusivos del tracto intestinal, tienen propiedades bioquímicas que las diferencian de todas las demás bacterias y por convención se les denomina estreptococos fecales.

De esta manera los grupos de bacterias que son utilizadas como indicadores biológicos son los coliformes totales, los coliformes fecales y los estreptococos fecales.

Las ventajas de la evaluación de los coliformes como indicadores, son las siguientes:

- su presencia es indicio de la posible presencia de bacterias patógenas
- su densidad es una medida proporcional de la contaminación fecal
- se eliminan en las heces en mucho mayor número que otros patógenos.
- persisten mucho más tiempo en el agua que otros patógenos y desaparecen inmediatamente después que ellos.
- pueden determinarse por procedimientos sencillos y en relativamente corto tiempo.

Por otro lado también tiene desventajas que son las siguientes:

- su ausencia no necesariamente evidencia potabilidad bacteriológica, puesto que hay algunos patógenos que pueden estar presentes cuando no hay coliformes
- algunas bacterias pueden interferir con las pruebas
- algunas bacterias son patógenas para el hombre

Las ventajas para la evaluación de los estreptococos fecales (EF) son:

- su presencia indica contaminación por desechos fecales
- indican una contaminación reciente, ya que sobreviven menos tiempo que los

coliformes

- su densidad con relación a la de coliformes fecales (CF) es indicio de si la contaminación fecal es de origen humano o animal:

CF/EF = >4 origen humano

CF/EF = <0.7 origen animal

Cabe aclarar que es conveniente analizar simultáneamente los tres grupos indicadores debido a que, por las desventajas que presentan, la ausencia de cualquiera de ellos no necesariamente excluye la presencia de los otros.

### A.2.6. Compuestos orgánicos

Existen miles de compuestos orgánicos vestigiales, muchos de los cuales pueden estar presentes en lodos residuales en concentraciones variables (Page, *et al*, 1987). La literatura que discute los efectos de los orgánicos sobre un sistema planta-suelo, es mucho menor que la de metales pesados, debido a la complejidad de estudio de estos compuestos químicos y al costo de los análisis de compuestos tóxicos orgánicos.

Existen entre 15,000 y 20,000 productos químicos fabricados por el hombre, con una gran variedad de grupos funcionales, por lo que analizar todos ellos en los lodos residuales, es prácticamente imposible. Pueden ser analizados de acuerdo a una lista predeterminada que incluya los contaminantes prioritarios (NRDC, 1976, en Page *et al*, 1987). Otra posibilidad es separar los compuestos orgánicos en "grupos químicos", que posean propiedades físicas y químicas similares y que tengan un mayor riesgo toxicológico y ambiental. Para ello es adecuado contar con la información del tipo de agua que llegue a la planta de tratamiento. Otra opción es utilizar bioensayos a corto plazo para probar la mutagenicidad del lodo (Brown *et al*, 1985; Hopke and Plewa, 1984; Peters, 1985). Los lodos que en los bioensayos presenten cierto grado de toxicidad, deben ser analizados para detectar ciertos compuestos orgánicos.

Existen muy pocos trabajos que informen sobre el análisis de compuestos tóxicos orgánicos en lodos residuales. Se menciona la amplia variedad de compuestos que pueden presentarse en los mismos (cuadro A.2.5); pero existen problemas en el análisis e interpretación de estos datos, tales como (Page *et al*, 1987):

- los lodos son heterogéneos y es difícil obtener una muestra representativa,
- se presentan variaciones en su composición día a día,
- las técnicas analíticas varían ampliamente en extracciones, separaciones y procedimientos de limpieza, con lo cual se afecta el número y tipo de compuestos recuperados;
- para algunos grupos, la recuperación en una matriz compleja como el lodo, puede ser muy pobre,
- los datos son reportados en varias unidades (mg/L, mg/kg, etc.); algunos sobre base húmeda y otros sobre base seca.

- los límites de detección en algunos casos son pobres o no se reportan y
- la confirmación de cada compuesto orgánico, si fue llevado a cabo, no se reporta.

**Cuadro A.2.5 Resumen de compuestos orgánicos en lodos residuales (Page et al, 1987)**

Grupo químico	Num. de compuestos orgánicos analizados	Número de compuestos orgánicos analizados y sus concentraciones medias en lodos (mg/kg)				
		ND	<1	1-10	11-100	>100
ésteres	6	0	0	1	4	1
aromáticos monocíclicos	23	12	5	2	4	0
aromáticos polinucleares	7	0	4	2	1	0
bifenilos halogenados	9	1	3	5	0	0
alifáticos halogenados	10	0	6	4	0	0
triaril fosfato ésteres	3	0	0	2	1	0
aminas aromáticas y alquílicas	16	6	9	0	1	0
fenoles	12	0	1	11	0	0
plaguicidas clorados e HC	21	4	14	3	0	0
varios	2	1	0	1	0	0
<b>total</b>	<b>109</b>	<b>24</b>	<b>42</b>	<b>31</b>	<b>11</b>	<b>1</b>

Nota: ND: no detectado en todas las muestras analizadas

Debido a estos problemas y a que la base de datos es muy limitada, no se puede llevar a cabo una conclusión definitiva de los compuestos tóxicos orgánicos en lodos residuales y sus efectos en el suelo. Para atenuar esta situación, se sugiere la siguiente información para evaluar el contenido orgánico en los lodos (Page et al, 1987):

- tipo de lodo
- porcentaje de sólidos secos
- número de muestras analizadas
- número de muestras "positivas" por arriba del límite de detección
- límite de detección y
- concentración media de todas las muestras analizadas.

Una característica importante para diferenciar los compuestos orgánicos y los metales pesados, es el tiempo de residencia en el suelo (Baxter, 1983). El promedio de vida de los compuestos orgánicos más persistentes (por ejemplo los BPCs) es de unos 10 años (Fries, 1982) y el de los metales pesados es de miles de años (Bowen, 1977).

En revisiones de 240 revistas durante el período 1977-1985 (Page, *et al*, 1983), se encontraron cerca de 4,000 compuestos de este tipo que siguen varias rutas después de estar en contacto con los factores ambientales, incluyendo: volatilización, fotólisis, descomposición química y microbiológica, adsorción, lixiviación y fitotoxicidad.

Todos los estudios reportan que la vía predominante es la descomposición química y/o la adsorción fuerte a la materia orgánica del suelo, lo que reduce significativamente la absorción por las plantas o su lixiviación. Esta es una diferencia importante con los "metales pesados", pues se acumulan en el suelo y pueden llegar a alcanzar niveles tóxicos para las plantas.

## **A.2.7. Información adicional sobre el tratamiento y disposición final de lodos residuales**

### **A.2.7.1. Tratamiento anaerobio (EPA, 1978)**

El tratamiento anaerobio es la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno libre, misma que es acompañada por una gasificación y licuefacción, lo que conduce a una estabilización, una descomposición de la estructura coloidal y a la pérdida de humedad. Dependiendo del contenido de sólidos volátiles del lodo a ser tratado, la digestión anaerobia puede lograr de un 50 a 70% de reducción de sólidos volátiles. Los principales objetivos del tratamiento anaerobio son:

- prevenir molestias por la descomposición de sólidos orgánicos para llegar a formas más estables
- reducir la masa del lodo al convertir los sólidos orgánicos a gases y líquidos
- reducir organismos patógenos

La digestión anaerobia es una técnica particularmente efectiva para reducir la materia orgánica y el contenido de agua de los lodos residuales, el producto final de la degradación anaerobia, el metano, puede ser utilizado para la operación de la planta y calentamiento. Este es un proceso que no necesita gran cantidad de energía, comparado con el tratamiento aerobio y los contaminantes orgánicos son convertidos a combustible útil y biomasa (Lester, 1987a).

La digestión anaerobia empieza cuando el lodo se conduce a un tanque de digestión el cual se cierra herméticamente y se calienta a una temperatura entre 35 a 40°C. Los microorganismos anaerobios degradan los componentes orgánicos del lodo hasta los productos finales que son el metano, el dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico y el amoniaco, principalmente. Después de 10 a 20 días de residencia, durante los cuales se presenta una reducción de sólidos volátiles del 60 al 75%, se produce un lodo estabilizado compuesto por materia orgánica menos biodegradable, materiales orgánicos recalcitrantes como la celulosa y biomasa. Todo se transfiere a otro tanque de digestión a temperatura ambiente, del cual el sobrenadante puede ser regresado a la planta y el lodo se separa para su posterior disposición (Sahm, 1984).

Las bacterias que provocan la digestión anaerobia, se agrupan de manera gruesa en tres grandes grupos: las que producen hidrólisis, fermentación y metanogénesis (fig. A.2.1).

El primer grupo consiste de las bacterias hidrolíticas y acidogénicas, las cuales hidrolizan polímeros tales como polisacáridos, grasas y proteínas para convertirlos en grupos más simples como ácidos orgánicos, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno.

El segundo grupo comprende a las bacterias acetogénicas y acetoclásticas productoras de hidrógeno.

El tercer grupo es el de las bacterias metanogénicas, utilizan hidrógeno, dióxido de carbono y acetato en la producción de metano.

### **A.2.7.2. Tratamiento aerobio**

El tratamiento aerobio es un proceso en el cual los lodos residuales se someten a una aireación por un período de tiempo largo. Produce un material que consiste de sólidos volátiles e inorgánicos que resisten una posterior degradación biológica. Es un método alterno para el tratamiento de lodos orgánicos en el que los reactores pueden ser utilizados únicamente para tratar lodos activados, mezclas de desechos de lodos activados, lodos primarios y lodos de plantas de tratamiento biológico sin sedimentación primaria (EPA, 1978).

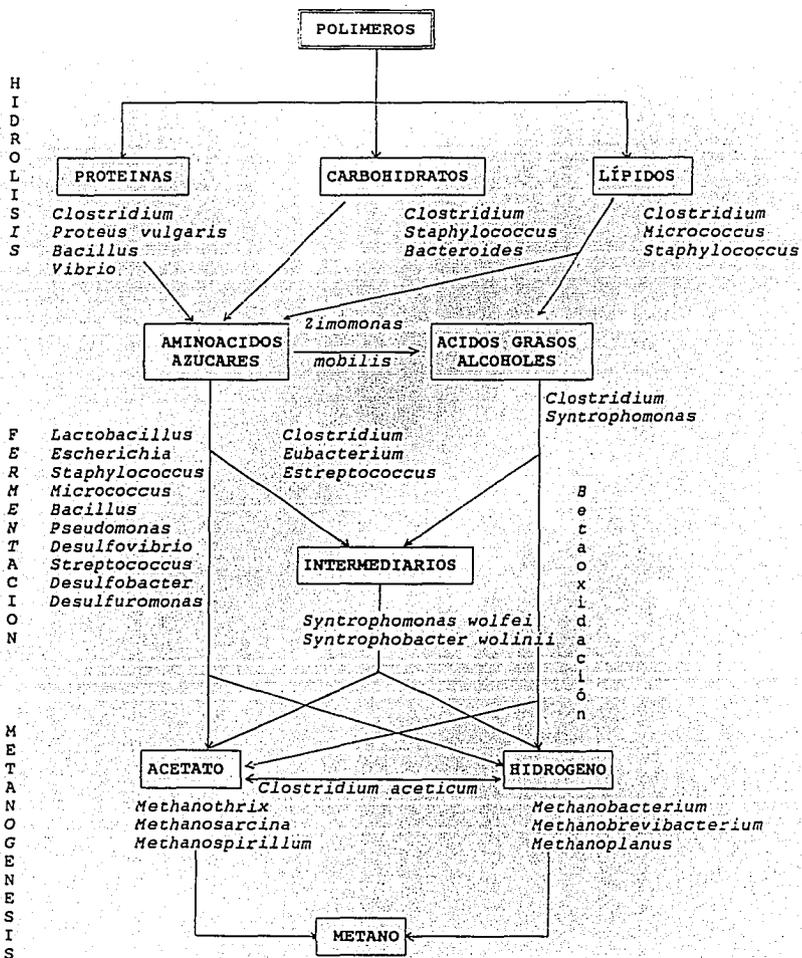
El principal propósito del tratamiento aerobio, es reducir el volumen del lodo para su posterior disposición. Esta reducción se produce por la oxidación de una buena parte del lodo, que da como resultado a compuestos volátiles ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ). Esta oxidación se presenta cuando el sustrato en un tratamiento aerobio, es insuficiente para suministrar energía y para llevar a cabo la síntesis (Metcalf y Eddy, 1987).

### **A.2.7.3. Termólisis**

Los investigadores de algunos países, tales como Japón, Alemania y los Estados Unidos de América, han buscado alternativas para destruir los subproductos de plantas de tratamiento tales como basura y lodos residuales. Actualmente, se tienen resultados muy prometedores con la termólisis.

La termólisis consiste en la descomposición térmica de las cadenas de carbono (compuestos orgánicos) en un medio reductor y a menores temperaturas que la incineración, para generar diversos productos que pueden ser utilizados como materia prima o combustibles fósiles de alta pureza. Esta técnica ha sido utilizada tradicionalmente para descomponer hidrocarburos, mediante la descomposición térmica que empieza a producirse entre 500 y 650°C, con una temperatura óptima de 350°C aproximadamente (Holden *et al*, 1989).

Fig. A.2.1. Bacterias que intervienen en la descomposición anaerobia (Lester, 1987a)



Entre las principales ventajas y desventajas que tiene este proceso se encuentran las siguientes (Gutiérrez, 1993):

- los residuos sólidos municipales pueden ser convertidos en productos económicamente rentables
- el volumen de desechos puede ser reducido en un 90% o más,
- no causa problemas de contaminación del aire
- es un proceso que requiere de espacios más pequeños que la incineración directa y, por consiguiente, el costo se abate,
- es un proceso que produce energía neta (considerando en teoría, la combustión posterior de los productos de la termólisis)
- la energía producida de la combustión posterior de los productos de la termólisis, se convierte en diferente formas (por ejemplo, combustión de gas, aceite, carbón y otros materiales inertes generados durante la termólisis) y
- durante la pirólisis se pueden "volatilizar" algunos de los metales, dado que los procesos de oxidación son mínimos, por lo que éste debe tomarse en cuenta en el manejo de los gases generados.

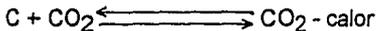
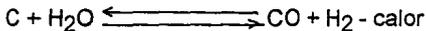
Dentro del proceso de termólisis se llevan a cabo diversas reacciones. La principal se refiere al rompimiento de enlaces carbono-hidrógeno y a las escisiones de las cadenas de carbono, cuyo tamaño básicamente determina el estado físico de los productos (gases, líquidos y sólidos).

Leidner (1981), menciona que las reacciones que se llevan a cabo durante la pirólisis de desechos sólidos, son las siguientes:

Reacción principal,

Material orgánico  $\longrightarrow$  gases + líquidos + carbón

Reacciones secundarias,



## APÉNDICE A.3

### RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE DOCE MUESTRAS COMPUESTAS DE LODOS RESIDUALES

**Cuadro A.3.1. Resultados de los análisis físicos y químicos de rutina de lodos residuales (12 muestras compuestas)**

Muestra	Densidad aparente (g/mL)	% de humedad	% de sólidos	C.E. (mmhos/cm)	pH (1:5 lodo:agua)	pH (1:2.5 lodo:agua)
1	0.71	79.50	20.50	1.19	5.60	5.45
2	0.92	76.35	23.65	3.50	6.08	6.05
3	0.93	78.46	21.54	3.70	5.40	5.40
4	0.93	75.70	24.30	6.20	5.85	5.80
5	0.74	71.55	28.45	1.47	6.99	6.89
6	0.85	78.94	21.06	7.70	5.35	5.35
7	0.87	74.70	25.30	4.70	6.23	6.13
8	0.90	79.24	20.76	4.89	7.07	6.11
9	1.02	72.58	27.42	4.15	5.80	5.58
10	1.00	77.78	22.22	4.47	5.70	5.74
11	0.83	75.35	24.65	3.91	6.40	5.53
12	0.83	73.51	26.49	1.44	5.68	5.52
Media	0.88	76.14	23.86	3.94	6.01	5.78
S	0.009	2.70	2.70	1.94	0.57	0.40

Nota: C.E. = Conductividad eléctrica

**Cuadro A.3.2. Cationes y aniones solubles (meq/L)**

Muestra	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Sodio	Potasio	Magnesio	Calcio
1	ND	8.00	5.30	1.13	0.19	0.17	0.46
2	ND	3.00	3.20	1.39	0.27	0.23	0.42
3	ND	3.00	4.30	1.65	0.28	0.19	0.33
4	ND	5.00	3.80	2.85	0.31	0.23	0.45
5	ND	3.00	5.00	1.36	0.07	0.09	0.41
6	ND	5.40	20.00	9.39	ND	0.53	0.38
7	ND	3.20	13.40	2.44	ND	ND	0.52
8	ND	6.00	4.00	2.85	0.22	0.19	0.58
9	ND	5.00	5.00	1.83	0.15	0.15	0.40
10	ND	4.00	4.20	2.00	0.14	0.22	0.52
11	ND	4.50	4.00	1.82	0.60	0.36	0.60
12	ND	4.00	4.00	1.34	0.36	0.20	0.42
media		4.51	6.35	2.50	0.22	0.21	0.46
S		1.50	5.07	2.26	0.17	0.13	0.08

Nota: ND = no detectado

**Cuadro A.3.3. Cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)**

Muestra	Calcio intercambiable	Magnesio intercambiable	Sodio intercambiable	Potasio intercambiable	Capacidad de intercambio catiónico
1	9.80	6.83	4.55	8.50	49.00
2	11.00	7.16	5.51	9.00	56.00
3	12.00	7.28	5.75	3.50	73.00
4	10.40	6.62	6.34	7.85	51.00
5	20.36	7.87	2.68	9.70	70.00
6	10.26	2.66	2.48	1.85	60.00
7	15.29	2.66	2.95	5.42	80.00
8	16.60	6.83	4.55	8.00	56.00
9	13.84	5.38	4.33	4.00	83.00
10	14.30	5.94	4.55	5.00	70.00
11	16.74	5.79	6.81	7.40	64.00
12	15.40	4.81	5.50	5.60	61.00
<b>Media</b>	<b>13.83</b>	<b>5.82</b>	<b>4.67</b>	<b>7.15</b>	<b>64.42</b>
<b>S</b>	<b>3.24</b>	<b>1.70</b>	<b>1.40</b>	<b>3.04</b>	<b>11.95</b>

**Cuadro A.3.4. Materia orgánica, nitrógeno y fósforo**

Muestra	% materia orgánica (ignición)	% materia orgánica (W-B)	% N total	% N orgánico	% P total	% P disponible
1	67.63	44.16	2.47	4.31	1.00	0.09
2	78.41	47.69	3.95	3.86	1.00	0.10
3	78.94	57.84	5.25	3.98	1.56	0.10
4	81.30	46.92	3.82	3.19	1.00	0.13
5	60.99	54.51	5.05	2.44	1.36	0.09
6	70.56	49.20	4.19	5.48	1.25	0.09
7	82.00	78.32	5.60	5.64	3.30	0.10
8	71.16	48.80	4.13	4.32	1.17	0.07
9	84.00	83.00	5.65	4.53	3.60	0.07
10	71.78	52.40	4.65	3.99	1.28	0.07
11	74.85	51.64	4.45	5.03	1.28	0.17
12	77.77	50.98	4.33	4.93	1.25	0.29
<b>media</b>	<b>75.00</b>	<b>55.46</b>	<b>4.46</b>	<b>4.31</b>	<b>1.59</b>	<b>0.11</b>
<b>S</b>	<b>6.72</b>	<b>12.34</b>	<b>0.88</b>	<b>0.92</b>	<b>0.89</b>	<b>0.06</b>

**Cuadro A.3.5. Contenido total de elementos mayores: calcio, magnesio, sodio, potasio y aluminio (ppm)**

Muestra	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Aluminio
1	6500.00	2700.00	2111.00	1859.00	21000.00
2	5812.00	2370.00	3840.00	1890.00	16000.00
3	6500.00	2255.00	2455.00	2229.00	18000.00
4	5750.00	2345.00	3805.00	2018.00	17000.00
5	9812.00	4045.00	3680.00	1479.00	24000.00
6	26875.00	1925.00	3001.00	3283.00	16000.00
7	28122.00	1573.00	4005.00	2142.00	15000.00
8	15050.00	2202.00	2865.00	1476.00	17000.00
9	13525.00	1985.00	12374.00	1006.00	7000.00
10	14350.00	1932.00	3645.00	896.00	4800.00
11	6132.00	3230.00	3560.00	2630.00	6900.00
12	3036.00	2035.00	2821.00	2664.00	8400.00
<b>media</b>	<b>11788.67</b>	<b>2383.08</b>	<b>4013.50</b>	<b>1931.00</b>	<b>14300.00</b>
<b>S</b>	<b>8285.95</b>	<b>672.83</b>	<b>458.29</b>	<b>668.33</b>	<b>0.61</b>

Cuadro A.3.6. Contenido total de metales vestigiales (ppm)

1	Hierro	Zinc	Cobre	Manganeso	Cromo	Plomo	Níquel	Cobalto	Cadmio
1	8600.00	2379.00	435.00	94.00	356.00	336.00	94.02	ND	ND
2	6449.00	2414.00	631.00	55.00	434.00	329.00	89.00	ND	ND
3	6040.00	2400.00	592.00	63.00	302.00	346.00	89.55	ND	ND
4	5982.00	2437.00	584.00	66.00	261.00	578.00	103.10	ND	ND
5	10190.00	2904.00	360.00	75.00	274.00	267.00	94.00	ND	ND
6	10075.00	1617.00	330.00	208.00	137.00	823.00	102.00	ND	ND
7	6864.00	2235.00	592.00	145.00	128.00	312.00	93.05	ND	ND
8	11350.00	805.00	512.00	156.00	457.00	440.00	104.50	ND	ND
9	10920.00	504.00	446.00	150.00	408.00	430.00	89.46	ND	ND
10	10650.00	685.00	440.00	145.00	408.00	480.00	99.10	ND	ND
11	12136.00	1385.00	364.00	95.00	335.00	540.00	96.76	ND	ND
12	9453.00	1225.00	335.00	73.00	243.00	472.00	96.65	ND	ND
<b>Media</b>	9059.08	1749.17	470.08	110.42	311.75	479.42	95.94	--	--
<b>S</b>	2207.45	814.88	110.27	48.63	109.10	163.96	7.02	--	--

Nota: ND = no detectado

Cuadro A.3.7. Concentración disponible de metales pesados (ppm)

Muestra	Hierro	Zinc	Cobre	Manganeso	Cromo	Plomo	Níquel	Cobalto	Cadmio
1	609.74	79.45	36.10	9.56	ND	10.52	12.73	ND	ND
2	457.26	80.63	52.37	5.59	ND	10.30	12.05	ND	ND
3	428.23	80.16	49.13	6.41	ND	10.83	12.12	ND	ND
4	424.12	81.40	48.47	6.71	ND	18.09	13.96	ND	ND
5	722.47	96.99	28.88	7.62	ND	8.36	12.73	ND	ND
6	714.32	54.00	27.39	21.15	ND	25.76	13.81	ND	ND
7	486.65	74.65	49.14	14.75	ND	9.76	12.60	ND	ND
8	804.72	26.88	42.50	15.86	ND	13.77	14.15	ND	ND
9	774.23	16.83	37.02	15.25	ND	13.46	12.18	ND	ND
10	755.08	22.88	36.52	14.75	ND	15.02	13.42	ND	ND
11	860.44	46.26	30.21	9.66	ND	16.90	13.10	ND	ND
12	670.22	40.91	27.80	7.42	ND	14.77	13.09	ND	ND
<b>Media</b>	642.00	58.40	39.00	11.25	ND	15.00	12.99	ND	ND
<b>S</b>	156.50	27.21	9.26	4.94	ND	4.77	0.72	ND	ND

Nota: ND = no detectado

APÉNDICE A.4

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES, TRES TRATAMIENTOS, DOS CICLOS Y TRES REPETICIONES

Materia orgánica (%)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	3.93	3.89	4.32	4.49	4.43	4.66
2	3.91	3.85	4.35	4.45	4.44	4.63
3	3.74	3.81	4.33	4.45	4.43	4.70
Media	3.85	3.85	4.33	4.46	4.43	4.66
S	0.10	0.04	0.075	0.02	0.005	0.03

Fósforo disponible (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	115.00	93.00	150.00	160.00	172.00	150.00
2	113.00	98.00	155.00	165.00	178.00	165.00
3	112.00	110.00	158.00	163.00	175.00	168.00
Media	113.00	100.00	154.00	162.66	175.00	161.00

Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	45.00	53.00	47.00	52.00	51.00	49.00
2	48.00	54.00	48.00	55.00	52.00	54.00
3	48.00	49.00	49.00	53.00	51.00	53.00
Media	47.00	52.00	48.00	52.00	51.33	52.00
S	1.73	2.54	1.70	1.52	0.57	2.64

Hierro disponible (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	137.00	95.00	116.00	107.00	140.00	140.00
2	145.00	98.00	116.00	118.00	108.00	120.00
3	140.00	98.00	120.00	116.00	110.00	135.00
Media	140.66	97.00	117.33	113.67	119.00	131.67
S	4.04	1.73	2.30	5.85	17.92	10.40

Nitrógeno total (%)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	0.43	0.38	0.41	0.45	0.52	0.49
2	0.47	0.39	0.42	0.43	0.52	0.49
3	0.46	0.37	0.42	0.44	0.51	0.49
Media	0.44	0.38	0.41	0.44	0.52	0.49
S	0.02	0.01	0.005	0.01	0.005	0.00

Fósforo total (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1700.00	1607.00	1800.00	1745.00	1720.00	1701.00
2	1680.00	1679.00	1805.00	1782.00	1753.00	1809.00
3	1705.00	1622.00	1800.00	1805.00	1735.00	1707.00
Media	1695.00	1636.00	1801.00	1777.33	1736.00	1739.00
S	13.22	38.55	2.88	30.27	16.52	60.69

pH

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	7.18	7.02	6.84	6.81	6.86	6.87
2	7.20	7.05	6.93	6.84	6.85	6.93
3	7.32	7.25	6.90	6.89	6.93	6.88
Media	7.23	7.10	6.89	6.84	6.88	6.89
S	0.75	0.12	0.04	0.04	0.04	0.03

Conductividad eléctrica (mmhos/cm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	0.15	0.27	0.22	0.22	0.21	0.23
2	0.18	0.20	0.23	0.24	0.22	0.24
3	0.16	0.21	0.23	0.25	0.22	0.24
Media	0.16	0.23	0.23	0.24	0.22	0.24
S	0.015	0.04	0.005	0.01	0.005	0.005

Hierro total (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	34,000.00	32,000.00	43,000.00	47,000.00	42,000.00	41,000.00
2	33,500.00	32,900.00	43,200.00	46,900.00	42,300.00	41,900.00
3	33,500.00	33,800.00	43,000.00	46,500.00	42,000.00	41,200.00
Media	33,700.00	32,900.00	43,100.00	46,800.00	42,100.00	41,400.00
S	288.67	900.00	115.47	264.47	173.20	472.58

zinc total (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	92.00	95.00	111.00	107.00	109.00	115.00
2	93.00	95.00	110.00	109.00	109.00	116.00
3	94.00	98.00	112.00	110.00	112.00	115.00
Media	93.00	96.00	11.00	108.67	110.00	115.33
S	1.00	1.73	1.00	1.52	1.73	0.57

Manganeso total (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	754.00	720.00	812.00	780.00	850.00	830.00
2	772.00	745.00	822.00	805.00	845.00	833.00
3	765.00	732.00	815.00	800.00	852.00	844.00
Media	763.67	732.33	816.33	795.00	849.00	835.67
S	9.07	12.50	5.13	13.23	3.61	7.37

**Cobre total (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	33.70	45.00	37.00	42.00	38.50	57.00
2	35.00	40.00	37.00	40.00	41.00	52.00
3	35.00	40.00	38.00	45.00	40.00	58.00
Media	34.57	41.67	37.33	42.33	39.83	55.67
S	0.75	2.88	0.57	2.51	1.25	3.21

**Cromo total (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	78.00	75.00	81.00	83.00	88.00	92.00
2	80.00	79.00	82.00	83.00	85.00	83.00
3	79.00	80.00	83.00	88.00	88.00	90.00
Media	79.00	78.00	82.00	84.67	86.33	87.33
S	1.00	2.64	1.00	2.88	1.73	4.72

**Cobalto (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	69.00	75.00	69.00	83.00	86.00	89.00
2	55.00	70.00	55.00	79.00	85.00	83.00
3	60.00	70.00	60.00	80.00	88.00	90.00
Media	61.33	71.77	61.33	80.67	86.33	87.33
S	7.09	2.88	7.09	2.08	1.52	3.78

**Calcio total (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	2600.00	3700.00	3600.00	8200.00	5900.00	8600.00
2	2200.00	3100.00	3700.00	8300.00	5500.00	8600.00
3	2500.00	3000.00	3500.00	8200.00	6000.00	8800.00
Media	2400.00	3300.00	3600.00	233.00	5800.00	8700.00
S	208.16	378.59	100.00	57.73	264.57	115.47

**Magnesio total (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	4900.00	6000.00	7200.00	9400.00	8200.00	8100.00
2	3800.00	5500.00	7000.00	8700.00	8200.00	8600.00
3	5000.00	5500.00	6900.00	8500.00	8200.00	8700.00
Media	4600.00	5700.00	7000.00	8900.00	8200.00	8500.00
S	665.83	288.67	152.75	472.58	0.00	321.45

**Níquel total (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	116.00	131.00	125.00	135.00	125.00	105.00
2	116.00	122.00	120.00	135.00	120.00	115.00
3	118.00	128.00	120.00	130.00	129.00	112.00
Media	116.67	127.00	121.67	133.33	124.57	110.67
S	1.15	4.58	2.88	2.88	4.50	5.13

**Cobre disponible (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	13.00	12.00	12.51	12.00	12.19	12.00
2	15.00	14.00	13.00	14.00	12.00	13.00
3	13.00	14.00	13.00	12.00	12.00	14.00
Media	13.67	13.33	12.84	12.67	12.06	13.00
S	1.15	1.15	0.28	1.15	0.10	1.00

**Niquel disponible (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1.20	2.40	2.40	2.40	2.56	2.09
2	1.10	1.89	1.90	2.03	2.25	2.09
3	0.00	1.10	1.90	2.03	1.90	2.25
Media	0.77	1.80	2.07	2.15	2.24	2.14
S	0.66	0.65	0.28	0.21	0.33	0.09

**Manganeso disponible (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	32.00	22.00	35.00	26.00	40.00	42.00
2	30.00	22.00	32.00	26.00	42.00	44.00
3	28.00	26.00	35.00	28.00	42.00	44.00
Media	30.00	23.33	34.00	26.67	41.33	43.33
S	2.00	2.30	1.73	1.15	1.15	1.15

**Zinc disponible (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	29.00	36.00	36.00	39.00	52.00	45.00
2	29.00	30.00	35.00	38.00	49.00	51.00
3	32.00	36.00	36.00	38.00	50.00	47.00
Media	30.00	34.00	35.67	38.33	50.33	47.67
S	1.73	3.46	0.57	0.57	1.52	3.05

APENDICE A.5

ANALISIS DE VARIANZA PARA LOS PARAMETROS DEL EXPERIMENTO DE CAMPO

pH					
fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	0.3555	3	0.1185	25.36	0.0000
dosis	0.3432	2	0.1716	36.73	0.0000
ciclos	0.0123	1	0.0123	2.63	0.1310
dosis X ciclos	0.0149	2	0.0075	1.59	0.2436
residual	0.0560	12	0.0047		
total	0.4265	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA					
fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	0.0091	3	0.0030	9.10	0.0020
dosis	0.0047	2	0.0024	7.12	0.0092
ciclos	0.0044	1	0.0044	13.07	0.0590
dosis X ciclos	0.0024	2	0.0012	3.62	
residual	0.0040	12	0.0003		
total	0.155	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

MATERIA ORGANICA					
fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	1.6580	3	0.5527	228.78	0.0000
dosis	1.5968	2	0.7984	329.62	0.0000
ciclos	0.0612	1	0.0612	25.29	0.0003
dosis X ciclos	0.0436	2	0.0218	9.00	0.0041
residual	0.290	12	0.0024		
total	1.7307	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO					
fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	74.6111	3	24.8703	7.22	0.0050
dosis	14.1111	2	7.0555	2.05	0.1717
ciclos	60.5000	1	60.5000	17.56	0.0013
dosis X ciclos	20.3333	2	10.1666	2.95	0.0907
residual	41.3333	12	3.4444		
total	136.2777	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

FOSFORO DISPONIBLE					
fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	13176.33	3	4392.11	129.60	0.0000
dosis	13002.11	2	6501.05	191.83	0.0000
ciclos	174.222	1	174.22	5.14	0.0426
dosis X ciclos	477.222	2	238.72	7.04	0.0095
residual	406.666	12	33.888		
total	14060.44	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**NITROGENO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	0.0544	3	0.0181	36.29	0.0000
dosis	0.0543	2	0.0271	54.34	0.0000
ciclos	0.0001	1	0.0001	0.18	0.6852
dosis X ciclos	0.0010	2	5.0555	1.01	0.3928
residual	0.0060	12	5.0000		
total	0.0614	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**FOSFORO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	49597.44	3	16532.48	15.12	0.0002
dosis	46397.44	2	23198.72	21.27	0.0001
ciclos	3200.000	1	3200.000	2.93	0.1124
dosis X ciclos	2864.333	2	1432.167	1.31	0.3094
residual	13086.00	12	1090.500		
total	65547.78	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**MAGNESIO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	42163333	3	14054444	96.19	0.0000
dosis	37043333	2	18521667	126.76	0.0000
ciclos	5120000	1	5120000	36.04	0.0001
dosis X ciclos	1843333.3	2	921666.7	6.31	0.0134
residual	1753333.3	12	146111.1		
total	45760000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**SODIO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	34734.833	3	11578.280	47.75	0.0000
dosis	26241.444	2	13120.720	54.11	0.0000
ciclos	8493.389	1	8493.389	35.02	0.0001
dosis X ciclos	34200.111	2	17100.056	70.52	0.0000
residual	2910.000	12	242.500		
total	71844.944	17			

**POTASIO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	388044.00	3	129348.00	1000.00	0.0000
dosis	368309.78	2	184154.89	1000.00	0.0000
ciclos	19734.22	1	19734.22	482.63	0.0001
dosis X ciclos	2867.11	2	1433.56	35.06	0.0000
residual	490.67	12	40.89		
total	391401.78	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**CALCIO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	95425556	3	31808519	673.59	0.0000
dosis	60703333	2	30351667	642.74	0.0000
ciclos	34722222	1	34722222	735.29	0.0000
dosis X ciclos	10847778	2	5423888	114.86	0.0000
residual	566666	12	47222		
total	106840000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**HIERRO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	437220000	3	145740000	710.93	0.0000
dosis	434730000	2	217370000	1000.00	0.0000
ciclos	249390000	1	2493900	12.16	0.0045
dosis X ciclos	20101111	2	10050556	49.02	0.0000
residual	2460000	12	205000		
total	459790000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**MANGANESO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	29315.33	3	9771.78	115.57	0.0000
dosis	27137.33	2	13568.67	160.47	0.0000
ciclos	2178.00	1	2178.00	25.76	0.0003
dosis X ciclos	244.00	2	122.00	1.44	0.2745
residual	1014.67	12	84.55		
total	30574.00	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**COBRE TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	706.98	3	235.66	51.454	0.0000
dosis	316.98	2	158.42	34.590	0.0000
ciclos	390.14	1	390.14	85.182	0.0000
dosis X ciclos	99.02	2	49.51	10.81	0.0021
residual	54.96	12	4.58		
total	860.96	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**PLOMO TOTAL**

fuelle de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	271.2130	3	90.4044	99.929	0.0000
dosis	265.7460	2	132.8730	146.872	0.0000
ciclos	5.4670	1	5.4670	6.043	0.0301
dosis X ciclos	4.93514	2	2.4676	2.728	0.1056
residual	10.8562	12	0.9047		
total	287.0044	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**CROMO TOTAL**

f fuente de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	256.8333	3	85.6111	12.039	0.0006
dosis	252.3333	2	126.1666	17.742	0.0003
ciclos	4.5000	1	4.5000	0.633	0.4501
dosis X ciclos	10.3333	2	5.1666	0.727	0.5037
residual	85.3333	12	7.1111		
total	352.5000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**NIQUEL TOTAL**

f fuente de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	324.3333	3	108.1111	7.572	0.0042
dosis	292.3333	2	146.1666	10.237	0.0025
ciclos	32.0000	1	32.0000	2.241	0.1602
dosis X ciclos	626.3333	2	313.1666	21.934	0.0001
residual	171.3333	12	14.27777		
total	1122.0000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**COBALTO TOTAL**

f fuente de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	1839.00	3	613.00	28.29	0.0000
dosis	1368.77	2	684.39	31.58	0.0000
ciclos	470.22	1	470.22	21.70	0.0006
dosis X ciclos	252.11	2	126.06	5.81	0.0171
residual	260.00	12	21.67		
total	2351.00	17			

**MANGANESO DISPONIBLE**

f fuente de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	877.7777	3	292.5926	107.483	0.0000
dosis	805.7777	2	402.8888	148.000	0.0000
ciclos	72.0000	1	72.0000	26.449	0.0002
dosis X ciclos	81.3333	2	40.6666	14.939	0.0006
residual	32.6666	12	2.7222		
total	991.7777	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**ZINC DISPONIBLE**

f fuente de variaci3n	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	924.0000	3	308.0000	67.610	0.0000
dosis	916.0000	2	458.0000	100.537	0.0000
ciclos	8.0000	1	8.0000	1.756	0.2098
dosis X ciclos	37.3333	2	18.6666	4.098	0.0440
residual	54.6666	12	4.5555		
total	1016.0000	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**HIERRO DISPONIBLE**

fuente de variación	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	923.6111	3	307.8703	3.780	0.0404
dosis	311.1111	2	155.5555	1.910	0.1905
ciclos	612.5000	1	612.5000	7.520	0.0179
dosis X ciclos	2496.0000	2	1248.0000	15.323	0.0005
residual	977.3333	12	81.4444		
total	4396.9444	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**COBRE DISPONIBLE**

fuente de variación	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	3.1860	3	1.0620	1.251	0.3347
dosis	3.0921	2	1.5460	1.822	0.2037
ciclos	0.0939	1	0.0939	0.111	0.7486
dosis X ciclos	1.4321	2	0.7160	0.844	0.4541
residual	10.1841	12	0.8486		
total	14.8023	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

**PLOMO DISPONIBLE**

fuente de variación	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	0.0544	3	0.0181	36.289	0.0000
dosis	0.0544	2	0.0271	54.344	0.0000
ciclos	0.0001	1	0.0001	0.178	0.6852
dosis X ciclos	0.0010	2	0.0005	1.011	0.3928
residual	0.0060	12	0.0005		
total	0.0614	17			

**NIQUEL DISPONIBLE**

fuente de variación	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	3.5580	3	1.1860	6.356	0.0080
dosis	3.0341	2	1.5170	8.131	0.0059
ciclos	0.5239	1	0.5239	2.808	0.1196
dosis X ciclos	1.0927	2	0.5464	2.928	0.0921
residual	2.2390	12	0.1866		
total	6.8897	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

APENDICE A.6

RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE TEJIDOS VEGETALES DEL MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES

Cuadro A.6.1. Resultados de los análisis de la RAÍZ

Nitrógeno (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	697.00	918.00	2163.00	2690.00	3990.00	3482.40
2	701.00	919.00	2172.00	2706.00	3999.00	3505.35
3	702.00	922.30	2175.00	2704.00	4010.00	3510.00
media	700.00	920.00	2171.00	2700.00	4000.00	3500.00
S	2.64	2.25	6.24	8.72	10.02	16.23

Fósforo (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1790.00	1793.00	3395.00	1713.00	1385.00	1941.50
2	1801.00	1799.00	3401.00	1722.00	1390.00	1949.70
3	1810.00	1809.00	3406.00	1725.00	1395.00	1959.15
media	1800.00	1900.00	3400.00	1720.00	1390.00	1950.00
S	10.01	8.08	5.50	6.24	5.00	8.83

Magnesio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	355.00	381.00	633.00	384.00	349.00	415.00
2	359.00	383.00	648.00	371.00	364.00	407.00
3	365.00	391.00	641.00	385.00	352.00	408.00
media	360.00	385.00	640.00	380.00	355.00	410.00
S	5.03	5.29	7.50	7.81	7.93	4.35

Potasio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	648.00	712.00	919.00	983.00	1069.00	1044.00
2	632.00	718.00	927.00	981.00	1074.00	1050.00
3	640.00	230.00	929.00	978.00	1081.00	1058.00
media	640.00	720.00	925.00	980.00	1075.00	1050.00
S	8.00	9.16	5.29	2.51	6.02	7.02

Hierro (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1452.00	1243.00	2516.00	1787.00	764.00	2181.00
2	1443.00	1248.00	2526.00	1805.00	778.00	2210.00
3	1440.00	1258.00	2525.00	1809.00	773.00	2209.00
media	1445.00	1250.00	2522.00	1800.00	772.00	2200.00
S	6.24	7.64	5.51	11.71	7.09	16.46

## Zinc (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	18.00	30.00	87.00	50.00	69.00	65.00
2	15.00	38.00	88.00	61.00	74.00	67.00
3	16.00	37.00	80.00	65.00	76.00	75.00
media	16.00	35.00	85.00	58.00	73.00	69.00
S	6.24	7.64	5.51	11.71	7.09	16.46

## Manganeso (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	31.00	47.00	66.00	31.00	30.00	39.00
2	33.00	39.00	67.00	37.00	38.00	49.00
3	38.00	35.00	68.00	37.00	37.00	47.00
media	34.00	40.00	67.00	35.00	35.00	45.00
S	3.60	6.11	1.00	3.46	4.35	5.29

## cobre (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	ND	5.00	8.00	10.00	19.00	18.00
2	ND	11.00	13.00	11.00	21.00	22.00
3	ND	7.00	15.00	15.00	22.00	20.00
media	ND	8.00	12.00	12.00	21.00	20.00
S	0.00	3.05	3.60	0.70	1.52	2.00

## Cuadro A.6.2. Resultados de los análisis de HOJAS

## Nitrógeno (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1240.00	10275.00	4875.00	4572.00	11307.00	10190.00
2	1253.00	10310.00	4909.00	4579.00	11315.00	10350.00
3	1258.00	10315.00	4915.00	4588.00	11280.00	10350.00
media	1250.00	10300.00	4900.00	4580.00	11300.00	10300.00
S	9.29	21.79	27.57	8.02	18.33	92.37

## Fósforo (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	981.00	940.00	3380.00	1182.00	572.00	1140.00
2	979.00	963.00	3405.00	1210.00	610.00	1140.00
3	982.00	958.00	3415.00	1208.00	618.00	1168.00
media	980.00	950.00	3400.00	1200.00	600.00	1150.00
S	1.52	12.09	18.02	15.62	24.57	16.16

## Magnesio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1679.00	1589.00	1370.00	1475.00	1650.00	1687.00
2	1709.00	1590.00	1385.00	1496.00	1652.00	1705.00
3	1713.00	1591.00	1392.00	1500.00	1665.00	1708.00
media	1700.00	1590.00	1382.00	1490.00	1655.00	1700.00
S	18.58	1.00	11.23	13.42	8.14	11.35

Potasio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	2832.00	2842.00	3043.00	3045.00	2913.00	2840.00
2	2860.00	2848.00	3060.00	3058.00	2934.00	2850.00
3	2842.00	2861.00	3047.00	3047.00	2930.00	2845.00
media	2845.00	2850.00	3050.00	3050.00	2927.00	2845.00
S	14.18	9.71	8.88	7.00	11.15	5.00

Hierro (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1301.00	540.00	630.00	688.00	181.00	718.00
2	1316.00	554.00	637.00	679.00	181.00	720.00
3	1313.00	557.00	645.00	691.00	183.00	722.00
media	1310.00	550.00	637.00	686.00	182.00	720.00
S	7.93	9.07	7.50	6.24	1.15	2.00

Zinc (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	70.00	52.00	86.00	76.00	32.00	81.00
2	75.00	54.00	87.00	77.00	30.00	83.00
3	85.00	52.00	91.00	81.00	36.00	74.00
media	77.00	52.00	86.00	76.00	32.00	81.00
S	7.63	1.15	2.64	2.64	3.05	4.72

Manganeso (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	35.00	31.00	22.25	28.83	29.90	34.00
2	45.00	39.00	27.17	36.43	35.78	36.00
3	40.00	35.00	24.32	30.69	34.80	32.00
media	40.00	35.00	24.58	32.00	33.50	34.00
S	5.00	4.00	2.47	3.96	3.15	2.00

cobre (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	86.00	84.00	128.00	90.00	47.00	79.00
2	97.00	92.00	125.00	99.00	56.00	96.00
3	90.00	89.00	123.00	96.00	48.00	90.00
media	91.00	88.00	125.00	95.00	50.00	88.00
S	5.56	4.04	2.51	4.58	4.93	8.62

Cuadro A.6.3. Resultados de los análisis del GRANO

Nitrógeno (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	14250.00	13560.00	12727.00	13775.00	14713.00	14200.00
2	14290.00	13530.00	12745.00	13815.00	14716.00	14200.00
3	14300.00	13529.00	12749.00	13811.11	14732.00	14200.00
media	14280.00	13540.00	12740.00	13800.00	14720.00	14200.00
S	26.45	17.61	11.71	22.03	10.21	0.00

## Fósforo (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	7887.00	6775.00	6286.00	7488.00	8300.00	7791.00
2	7899.00	6816.00	6305.00	7500.00	8300.00	7810.00
3	7915.00	6811.00	6310.00	7512.00	8300.00	7810.00
media	7900.00	6800.00	6300.00	7500.00	8300.00	7800.00
S	14.04	22.36	12.66	12.00	0.00	10.96

## Magnesio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	1010.00	1029.00	1036.00	1037.00	1019.00	1044.00
2	1019.00	1033.00	1037.00	1045.00	1027.00	1045.00
3	1031.00	1043.00	1048.00	1053.00	1036.00	1061.00
media	1020.00	1035.00	1040.00	1045.00	1027.00	1050.00
S	10.53	7.21	6.65	8.00	8.50	9.53

## Potasio (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	2560.000	2568.00	3119.00	3265.00	4105.00	3574.00
2	2553.00	2552.00	3125.00	3285.00	4130.00	3595.00
3	2568.00	2561.00	3140.00	3291.00	4140.00	3600.00
media	2560.00	2860.00	3128.00	3280.00	4125.00	3590.00
S	7.50	8.02	10.81	13.61	18.02	13.79

## Hierro (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	310.00	310.00	344.00	344.00	229.00	351.00
2	315.00	319.00	347.00	345.00	231.00	363.00
3	325.00	331.00	355.00	361.00	249.00	365.00
media	316.00	320.00	349.00	350.00	237.00	360.00
S	7.63	10.53	5.68	9.53	11.01	7.57

## Zinc (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	55.00	45.00	60.00	42.00	33.00	55.00
2	57.00	45.00	61.00	52.00	39.00	59.00
3	59.00	45.00	68.00	55.00	45.00	68.00
media	57.00	45.00	63.00	50.00	39.00	61.00
S	2.00	0.00	4.35	6.80	6.00	6.65

## Manganeso (ppm)

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	43.00	29.00	30.93	29.00	29.15	26.00
2	45.00	33.00	35.96	43.00	33.20	30.00
3	47.00	35.00	36.85	33.00	35.15	37.00
media	45.00	32.00	34.58	35.00	32.50	31.00
S	2.00	3.05	3.19	7.21	3.06	5.56

**cobre (ppm)**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	6.00	9.00	8.00	8.50	8.00	6.00
2	7.00	8.00	8.00	9.20	10.00	9.00
3	10.00	7.00	8.00	12.30	12.00	8.00
media	8.00	8.00	8.00	10.00	10.00	8.00
S	2.08	1.00	0.00	2.02	2.00	1.52

**APENDICE A.7**

**RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES**

**Cuadro A.7.1. Resultados del rendimiento de maíz (kg/ha), de las parcelas experimentales, con tres tratamientos, dos ciclos y tres repeticiones**

Repeticiones	0 ton/ ha 1er. ciclo	0 ton/ha 2o. ciclo	1 ton/ha 1er. ciclo	1 ton/ha 2o. ciclo	5 ton/ha 1er. ciclo	5 ton/ha 2o. ciclo
1	2038.00	2140.00	1927.00	2265.00	2250.00	2300.00
2	2063.00	2180.00	2200.00	2250.00	2340.00	2350.00
3	2190.00	2093.00	2180.00	2300.00	2380.00	2400.00
Media	2097.00	2137.67	2102.33	2271.67	2323.33	2350.00
S	81.50	43.54	152.17	25.65	66.58	50.00

**Cuadro A.7.2. Análisis de varianza para el rendimiento de maíz del experimento de suelos agrícolas con lodos residuales y cultivo de maíz.**

fFuente de variación	SC	GL	CM	F	nivel de significancia
principales efectos	178726.89	3	59575.63	9.098	0.0020
dosis	150721.33	2	75360.67	11.509	0.0016
ciclos	28005.56	1	28005.56	4.277	0.0609
dosis X ciclos	18552.44	2	9276.22	1.417	0.2803
residual	78574.66	12	6547.88		
total	275854.00	17			

SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = varianza relativa.

APÉNDICE A.8.

RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE LAS COMPOSTAS DE LODO CON DIFERENTES MATERIALES ORGANICOS

Cuadro A.8.1. Temperaturas promedio (° C) de las compostas con lodos residuales de Eccaciv y número de días de composteo.

Número de días	lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte:tierra de hoja
1	24.60	26.00	27.00	27.00
5	31.30	39.60	38.50	40.30
6	37.80	44.00	37.00	39.00
7	41.20	42.30	34.00	39.60
8	42.60	38.30	35.30	39.30
11	33.30	30.30	30.00	30.60
12	29.00	30.00	32.00	32.00
13	30.10	33.00	32.00	32.00
14	30.00	33.00	30.80	32.80
15	29.10	32.60	31.00	32.30
16	28.00	31.80	32.30	32.60
17	28.30	31.30	31.00	32.00
18	27.00	30.10	30.00	31.00

Cuadro A.8.2. Resultados de los análisis físicos y químicos de las compostas de lodos residuales con suelos orgánicos

Densidad aparente (g/mL)

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	0.87	1.01	0.48	0.82
2	0.87	1.00	0.47	0.81
3	0.87	1.01	0.46	0.80
Media	0.87	1.01	0.47	0.81
S	0.00	0.005	0.01	0.01

Densidad real (g/mL)

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	2.00	1.98	1.61	2.13
2	1.99	1.97	1.60	2.13
3	1.99	1.97	1.60	2.13
Media	1.99	1.97	1.60	2.13
S	0.005	0.005	0.005	0.00

% de humedad

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	10.23	11.15	11.25	13.18
2	13.16	11.15	11.93	14.17
3	10.21	11.15	10.80	13.54
Media	11.20	11.15	11.32	13.63
S	1.69	0.00	0.56	0.50

**% de sólidos**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	89.80	88.85	88.75	86.82
2	86.86	88.85	88.07	85.83
3	89.80	88.85	89.20	86.46
Media	88.80	88.85	88.68	86.36
S	1.69	0.00	0.56	0.50

**% de porosidad**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	56.50	49.49	70.18	61.50
2	56.28	48.73	71.25	61.97
3	56.28	48.98	71.25	62.53
Media	56.35	49.00	70.89	62.00
S	0.12	0.38	0.61	0.51

**pH**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	7.38	7.81	7.00	7.71
2	7.52	7.70	7.05	7.60
3	7.59	7.90	7.10	7.80
Media	7.50	7.80	7.05	7.70
S	0.10	0.10	0.05	0.10

**Conductividad eléctrica (mmhos/cm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	4.10	0.45	0.33	0.45
2	4.05	0.46	0.34	0.45
3	4.15	0.47	0.38	0.48
Media	4.10	0.46	0.35	0.46
S	0.05	0.007	0.026	0.01

**% de materia orgánica**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	43.75	21.00	38.60	25.89
2	43.79	21.00	38.80	25.89
3	49.94	22.00	41.60	25.89
Media	44.16	21.33	39.60	25.89
S	0.67	0.57	1.67	0.00

**% de nitrógeno total**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	2.69	1.11	1.95	1.33
2	2.79	1.16	1.98	1.26
3	2.89	1.18	1.98	1.28
Media	2.79	1.15	1.97	1.28
S	0.10	0.03	0.017	0.036

**% de nitrógeno orgánico**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	1.83	1.13	1.60	0.55
2	1.76	1.13	1.62	0.53
3	1.78	1.13	1.64	0.50
Media	1.78	1.13	1.62	0.53
S	0.03	0.00	0.02	0.02

**fósforo disponible (%)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	0.50	0.27	0.37	0.26
2	0.47	0.24	0.39	0.24
3	0.44	0.30	0.41	0.22
Media	0.47	0.27	0.39	0.24
S	0.03	0.03	0.02	0.02

**Capacidad de Intercambio catiónico (meq/100 g)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	68.96	51.00	74.00	62.00
2	72.80	51.00	73.00	62.00
3	74.50	51.00	75.00	60.00
Media	72.00	51.00	75.00	60.00
S	1.15	0.00	1.00	1.15

**Calcio Intercambiable (meq/100 g)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	22.00	14.68	26.00	20.20
2	22.00	15.30	26.00	20.20
3	22.00	13.82	26.00	20.20
Media	22.00	14.60	26.00	20.20
S	0.00	0.74	0.00	0.00

**Magnesio Intercambiable (meq/100 g)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	0.23	0.16	0.17	0.20
2	0.25	0.16	0.16	0.21
3	0.27	0.17	0.13	0.23
Media	0.25	0.16	0.15	0.22
S	0.02	0.005	0.02	0.015

**Sodio Intercambiable (meq/100 g)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	2.30	1.69	3.25	2.60
2	2.40	1.69	3.30	2.64
3	2.41	1.69	3.40	2.64
Media	2.37	1.69	3.31	2.64
S	0.06	0.00	0.07	0.04

**Potasio intercambiable (meq/100 g)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	6.20	2.01	2.56	2.09
2	6.28	2.01	2.63	1.99
3	6.25	2.01	2.63	2.25
Media	6.24	2.01	2.61	2.11
S	0.04	0.00	0.04	0.13

**Calcio soluble (meq/L)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	2.15	0.69	2.35	0.85
2	2.08	0.74	2.70	0.93
3	2.07	0.70	2.78	0.95
Media	2.10	0.71	2.61	0.91
S	0.04	0.02	0.22	0.05

**Magnesio soluble (meq/L)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	2.70	2.80	3.24	2.20
2	2.74	2.43	3.40	2.37
3	2.75	2.96	3.23	2.36
Media	2.73	2.73	3.29	2.31
S	0.02	0.27	0.09	0.09

**Sodio soluble (meq/L)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	7.75	8.20	8.45	7.75
2	7.80	8.30	8.90	7.90
3	7.91	8.37	8.96	7.81
Media	7.82	8.29	8.77	7.82
S	0.08	0.08	0.27	0.075

**Bicarbonatos (meq/L)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	3.90	3.01	5.15	1.60
2	4.20	2.90	4.95	1.45
3	3.90	3.09	5.50	1.75
Media	4.00	3.00	5.20	1.60
S	0.17	0.09	0.27	0.15

**Cloruros (meq/L)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	12.40	20.00	15.25	12.45
2	12.60	20.00	14.90	11.97
3	12.50	20.00	14.85	13.08
Media	12.50	20.00	15.00	12.5
S	0.10	0.00	0.21	0.55

**Hierro disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	325.00	462.00	182.00	273.00
2	328.00	463.00	177.00	276.00
3	328.00	464.00	181.00	276.00
Media	327.00	463.00	180.00	275.00
S	1.73	1.00	2.64	1.73

**Zinc disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	82.50	38.00	60.00	58.50
2	83.50	42.00	67.00	51.50
3	83.00	43.00	68.00	55.00
Media	83.00	41.00	65.00	55.00
S	0.50	2.64	4.35	3.50

**Manganeso disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	17.50	1.43	1.86	1.15
2	17.90	1.43	1.88	1.19
3	17.70	1.46	1.93	1.17
Media	17.70	1.44	1.89	1.17
S	0.20	0.01	0.03	0.02

**Cobre disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	26.00	6.60	5.80	6.70
2	25.00	6.85	5.82	6.95
3	24.00	6.65	5.90	6.75
Media	26.00	6.70	5.84	6.80
S	1.00	0.13	0.05	0.13

**Plomo disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	24.50	11.60	11.24	8.00
2	25.50	12.30	11.16	7.90
3	25.00	12.10	11.22	8.10
Media	25.00	12.00	11.20	8.00
S	0.50	0.36	0.04	0.10

**Níquel disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	5.4082.50	1.58	3.50	2.51
2	5.30	1.59	3.90	2.49
3	5.80	1.48	4.00	2.50
Media	5.50	1.55	3.80	2.50
S	0.26	0.06	0.26	0.01

**Cobalto disponible (ppm)**

Repetición	composta lodo	lodo:tierra de monte	lodo:tierra de hoja	lodo:tierra de monte: tierra de hoja
1	ND	1.21	ND	1.10
2	ND	1.19	ND	1.00
3	ND	1.20	ND	0.90
Media	ND	1.20	ND	0.10
S	ND	0.01	ND	0.10