

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“EVALUACION DE LA RECIRCULACION DE LIXIVIADOS  
PRODUCIDOS EN UN RELLENO SANITARIO A ESCALA, PARA  
DETERMINAR EL GRADO DE INCIDENCIA EN EL  
ASENTAMIENTO Y EL MEJORAMIENTO DE SU CALIDAD”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**SPRANGER DÍAZ ALIAGA  
AÍDA MAGALY REYES HUANCHACO**

**LIMA, PERÚ**

**2006**

**DEDICATORIA**

A mi madre y a mi hermana Leslie  
por su amor y comprensión.

**MAGALY REYES H.**

A mis padres por su amor y apoyo incondicionales  
Y a mi hermana Deise por su empeño, paciencia y ejemplo.

**SPRANGER DIAZ ALIAGA.**

**AGRADECIMIENTOS:**

**Al Ingeniero Víctor Yessen Escobar,  
por su acertada dirección en la  
elaboración de la presente tesis.**

**A la Ingeniera Rosa Yaya Beas  
por sus consejos, paciencia  
y disposición constantes.**

**A nuestro amigo Jorge García Moscoso,  
por su apoyo constante en la realización  
de la presente tesis.**

**A las personas amigas que  
nos permitieron intercambiar  
emociones y aprender más cada día.**

## RESUMEN

### ORIGEN DE LA INVESTIGACION:

La investigación se originó por la necesidad de demostrar en la práctica las ventajas comparativas del proceso de recirculación de lixiviados, aprovechando la infraestructura de un relleno sanitario, para promover la remoción de la carga orgánica producida por la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos dispuestos. Asimismo, se ha buscado demostrar las ventajas del proceso de recirculación con relación a los desplazamientos verticales producidos en las celdas de un relleno sanitario, toda vez, que se hace necesario optimizar los espacios destinados a ser operados como rellenos sanitarios, especialmente en centros urbanos con elevados índices de expansión urbana.

### FORMULACION DEL PROBLEMA:

El problema responde a las siguientes interrogantes: ¿Es realmente el proceso de recirculación un tratamiento preliminar para los lixiviados producidos al interior de un relleno sanitario? ¿En que medida favorece el proceso de recirculación de los lixiviados un mejor aprovechamiento de los espacios destinados para el emplazamiento de rellenos sanitarios?

### OBJETIVO DE LA INVESTIGACION:

Determinar experimentalmente las ventajas comparativas del proceso de recirculación de lixiviados, en el control de su carga contaminante; así como, en el incremento del periodo de vida útil de un Relleno Sanitario.

## **HIPOTESIS:**

Se han planteado las siguientes:

- ✓ Una disminución del periodo de estabilización de la degradación, lográndose incrementos en la velocidad de los asentamientos en la superficie del Relleno Sanitario, debido a la disminución del volumen ocupado, generando un mayor espacio para la disposición de residuos sólidos
  
- ✓ Una disminución de la carga orgánica presente en los lixiviados, es decir considerar la recirculación como un tratamiento previo.

## **MARCO TEORICO:**

Se llama lixiviado, a los líquidos que se generan en el módulo de un Relleno Sanitario debido a la degradación de la materia orgánica y como producto de la infiltración del agua de lluvia, que, al atravesar ("percolar") la masa de residuos sólidos, disuelve, extrae y transporta ("lixivia") los distintos componentes sólidos, líquidos o gaseosos presentes en los residuos dispuestos.

Dado que los procesos suscitados al interior de un relleno sanitario son en general de carácter anaeróbico, se ha buscado ubicar las diferentes variables y/o parámetros obtenidos durante la etapa de monitoreo, en el esquema de las diferentes fases que comprenden al proceso conocido como: Digestión Anaeróbica.

En relación a los desplazamientos verticales se han estudiado comparativamente dos tipos de desplazamientos, aquellos producidos debido a la acción directa del peso de los residuos sólidos denominados asientos inmediatos o primarios y aquellos producidos en el tiempo debido a la descomposición de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos, denominados asientos mediáticos o secundarios.

## **VI**

Se presentan además cuadros explicativos obtenidos de la recopilación de información, cuyo contenido explica de manera aproximada y basados empíricamente, las diferentes etapas que experimentan los lixiviados mencionándose entre estos estados: Biodegradable, maduro y estabilizado, cada uno de los cuales está acompañado de sus respectivos parámetros representativos.

### **METODOLOGIA EMPLEADA:**

#### **Preparación de las Celdas Piloto**

La muestra se eligió de uno de los camiones recolectores del Distrito de Comas, que realizaba operaciones en este distrito y cuya disposición final la realizaba en el Relleno Sanitario de Ancón (CASREN).

Esta muestra fue esparcida sobre una membrana plástica, para luego realizar el cuarteo con la finalidad de obtener una muestra representativa y un mejor manejo de los residuos sólidos.

Luego se segregó de acuerdo a la siguiente clasificación:

- ✓ Papel y Cartón
- ✓ Metal
- ✓ Vidrio
- ✓ Materia Inerte
- ✓ Materia Orgánica
- ✓ Plástico
- ✓ Pañales
- ✓ Textil

La muestra segregada se pesó y añadió en las Celdas Piloto, manteniendo la proporción representativa de los Residuos Sólidos generados en el Distrito de Comas, logrando el peso, porcentaje y grado de compactación propuesto en cada una de las capas.

## VII

### **El monitoreo periódico durante un periodo de siete (7) meses**

La finalidad del presente estudio fue *primera* la variación de la calidad del lixiviado en el tiempo, debido a la recirculación del mismo en la masa de residuos sólidos y *segundo* el asentamiento generado en las Celdas Piloto debido a la recirculación.

Para observar dicho comportamiento se monitoreó la calidad del lixiviado producido, poniendo énfasis en la carga orgánica presente en éste. Los parámetros medidos fueron los siguientes:

- ✓ pH
- ✓ Temperatura
- ✓ DBO
- ✓ DQO
- ✓ Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos, Sólidos Disueltos, Sólidos Fijos y Volátiles.

Además para la medición de los asentamientos se midieron 09 puntos diferentes en toda la superficie de las Celdas Piloto utilizando una wincha y una plomada.

### **El proceso de recirculación es un proceso manual**

La recirculación de los lixiviados se realizó una vez al día y de lunes a viernes durante siete (07) meses. Los lixiviados eran colectados en baldes, para luego ser recirculados a través de las tuberías colocadas en toda la superficie de las Celdas Piloto; para este proceso, se utilizó un embudo y un vaso de precipitado de plástico

### **RESULTADOS OBTENIDOS:**

*Primero:* En la Celda Piloto N°01, la calidad del lixiviado mejoró en un 44.79 % con respecto a la calidad inicial producida de la masa de Residuos Sólidos colocados en las Celdas Piloto, medidos en términos de mg/l de DBO. En la Celda Piloto N°02 solo se registró una remoción del 19.23% de la carga orgánica presente en el lixiviado.

## VIII

**Segundo:** Durante los primeros 89 días, en la Celda Piloto con recirculación, se produjeron asentamientos promedios de 14.03 cm, mientras que en la Celda sin recirculación se obtuvo 12.73cm. En los 125 días restantes, en la Celda Piloto N° 01 se produjo un asentamiento de 5.99cm., y en la Celda N° 02 solo hubo un descenso del 4.41cm.

### **CONCLUSION FINAL:**

- ✓ Debido a la recirculación del lixiviado producido en una Celda Piloto, se logra una remoción de la carga orgánica presente, en un 44.79% (en términos de DBO), en comparación a celdas piloto que no registran recirculación de los lixiviados en la masa de residuos sólidos contenidos.
- ✓ La realización de la recirculación en una de las celdas durante el periodo de monitoreo ha promovido la generación de asentamientos mayores en un 35.83% con relación a los asentamientos generados en la celda sin recirculación.



**INDICE****RESUMEN**

<b>Capítulo I:</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>01</b>
<b>Capítulo II:</b>	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>02</b>
	2.1 Planteamiento del problema .....	02
	2.1.1 Identificación del problema.....	02
	2.1.2 Formulación del problema.....	02
	2.1.3 Justificación de la Investigación.....	02
	2.2 Objetivo General.....	03
	2.3 Objetivos Específicos.....	03
	2.4 Hipótesis.....	03
	2.5 Variables de Estudio.....	04
	2.5 Definiciones de Términos Básicos.....	06
	2.6 Marco Legal.....	07
	2.7 Antecedentes de la Investigación.....	09
<b>Capítulo III:</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
	3.1 Reseña Histórica.....	11
	3.2 Lixiviados.....	12
	3.3 Factores que intervienen en la producción de Lixiviados.....	13
	3.4 El problema de la generación de los lixiviados en la operación de los Rellenos Sanitarios.....	14
	3.5 Recirculación de lixiviados: Una posible solución.....	17
	3.6. Procesos Asociados a la Recirculación de Lixiviados – Digestión Anaeróbica.....	20

<b>Capítulo IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>24</b>
4.1 Ubicación de las Celdas Piloto.....	24
4.2 Descripción General de las Celdas Piloto.....	25
4.3 Materiales de Fabricación.....	26
4.4 Criterios de Diseño.....	27
4.5 Forma, Partes y Dimensionamiento de las Celdas Piloto.....	29
4.6 Implementación de las Celdas Piloto.....	42
4.7 Pruebas Realizadas.....	49
4.7.1 Pruebas de Campo.....	49
4.7.2 Pruebas de Laboratorio.....	55
 <b>Capítulo V: RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	 <b>58</b>
5.1 Resultados de mediciones de temperatura ambiental..	58
5.2 Resultados de mediciones de la temperatura del lixiviado producido.....	61
5.3 Resultados de mediciones de PH del lixiviado producido.....	62
5.4 Resultados de mediciones de DBO del lixiviado producido.....	63
5.5 Resultados de mediciones de DQO del lixiviado producido.....	64
5.6 Resultados de mediciones de los sólidos en el lixiviado producido.....	65
5.7 Resultados de mediciones del asentamiento en las celdas piloto.....	69
 <b>Capítulo VI: ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS..</b>	 <b>72</b>
6.1 Análisis de los Resultados del Plan Piloto.....	72
6.1.1 Temperatura Ambiental.....	72

6.1.2 Temperatura del Lixiviado Producido.....	73
6.1.3 PH del Lixiviado Producido.....	73
6.1.4 DBO del Lixiviado Producido.....	74
6.1.5 DQO del Lixiviado Producido.....	75
6.1.6 Sólidos Presentes en el Lixiviado Producido.....	76
6.1.5 Asentamientos Generados en las Celdas Piloto	78
6.2 Comprobación de Hipótesis.....	79
6.3 Justificación Económica del Proceso de Recirculación.	80
<b>Capítulo VII: CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>Capítulo VIII: RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>92</b>

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

Es evidente que los impactos ambientales de mayor importancia que se pueden generar durante la operación de un sistema de disposición final de residuos sólidos en un Relleno Sanitario, son sin duda alguna los lixiviados. El peligro potencial de los lixiviados, es la contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas, que pueden darse por escurrimientos no controlados o por infiltración a través de formaciones permeables. La afectación de los acuíferos provoca que sean inutilizados por largo tiempo ya que su regeneración toma muchos años.

Este estudio se realizó con la finalidad de proponer una alternativa de solución al manejo de los lixiviados, el cual permite analizar los efectos de la recirculación de los lixiviados producidos en un Relleno Sanitario, referido al mejoramiento de su calidad y a los asentamientos generados. Además permite determinar las ventajas comparativas, tanto económicas como técnicas, entre un Relleno Sanitario que realiza recirculación de lixiviados con otro en el que no.

Para tal fin ha sido necesario monitorear la calidad del lixiviado generado y recirculado; se midieron parámetros como pH, Tº, Sólidos Totales, disueltos y suspendidos, así como el nivel de Remoción de carga orgánica a través de la DQO y DBO. Por otro lado para determinar el asentamiento producido en las celdas pilotos habilitadas para el presente estudio, fue necesario realizar mediciones relacionadas con el nivel de la plataforma del Relleno.

Este trabajo de investigación se realizó en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI – UNITRAR, iniciándose el 03 de Agosto del 2005 con la construcción de dos celdas piloto y concluyendo el 03 de marzo del 2006.

## CAPITULO II

### DISEÑO DE LA INVESTIGACION

#### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

##### 2.1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:

El enfoque clásico de la operación de un Relleno Sanitario presenta dos principales problemas que resultan ser la generación de los gases invernadero y los lixiviados producidos.

En cuanto a los lixiviados producidos, no existe una práctica adecuada de tratamiento de estos productos, no obstante, su recirculación a través de las capas de residuos sólidos dispuestos es una práctica común en nuestro medio, sin embargo, es una solución planteada en forma transitoria sin ningún tipo de planificación, ni un estudio de las potenciales ventajas tanto operacionales como económicas de esta práctica.

##### 2.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

Si bien la recirculación de los lixiviados a través de las capas de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario, no resulta ser la solución definitiva al problema del manejo de los lixiviados producidos, en nuestro país no se han estudiado las ventajas comparativas que podría ofrecer operativa y económicamente esta práctica.

### **2.1.3 JUSTIFICACIÓN DE L INVESTIGACIÓN:**

El análisis de las ventajas comparativas que resultan de una práctica planificada de la recirculación de los lixiviados, es importante, puesto que a partir de estas deducciones podrían introducirse nuevos conceptos de un eficiente aprovechamiento de las áreas destinadas para rellenos sanitarios, asimismo, prolongar los tiempos de operación de los mismos, administrando en forma ambientalmente responsable la generación de los lixiviados.

### **2.2 OBJETIVO PRINCIPAL:**

- ✓ Determinar experimentalmente las ventajas comparativas del proceso de recirculación de lixiviados, en el control de su carga contaminante; así como, en el incremento del periodo de vida útil de un Relleno Sanitario.

### **2.3 OBJETIVOS SECUNDARIOS:**

- ✓ Evaluar el comportamiento de los parámetros que determinan la carga contaminante de los lixiviados.
- ✓ Determinar principalmente el porcentaje de remoción de la materia orgánica presente en el lixiviado generado.
- ✓ Evaluar el comportamiento progresivo de los asentamientos en un Relleno Sanitario, a través de un modelo a escala piloto con recirculación de lixiviados y otro sin recirculación.
- ✓ Generar una alternativa de solución diferente en el manejo de lixiviados, técnica y económicamente factible.

### **2.4 HIPÓTESIS:**

La hipótesis de trabajo indica que la recirculación de los lixiviados generados en un Relleno Sanitario, debería producir:

- ✓ Una disminución del periodo de estabilización de la degradación, lográndose incrementos en la velocidad de los asentamientos en la superficie del Relleno Sanitario, debido a la disminución del volumen ocupado, generando un mayor espacio para la disposición de residuos sólidos
- ✓ Una disminución de la carga orgánica presente en los lixiviados, es decir considerar la recirculación como un tratamiento previo.

## **2.5 VARIABLES DEL ESTUDIO:**

Dado que la presente tesis pretende explicar experimentalmente y en función a teorías las hipótesis planteadas, las variables e indicadores han sido clasificadas en el siguiente orden:

**2.5.1. VARIABLES DEPENDIENTES:** Referido a aquellas características que sufre alteraciones por efecto de las variables independientes. Para el presente estudio las variables dependientes corresponden a:

- ✓ Calidad de los lixiviados
- ✓ Asentamientos producidos en el Relleno Sanitario Piloto

**2.5.2. VARIABLES INDEPENDIENTES:** Referido a aquellos factores cuya modificación origina la alteración de las variables dependientes. Para el presente estudio las variables independientes corresponden a:

- ✓ Composición de los residuos sólidos domiciliarios.
- ✓ Grado de compactación de la celda del Relleno Sanitario Piloto.

**2.5.3. INDICADORES:** Con relación a los indicadores de contaminación de los lixiviados, se han considerado para el proceso de monitoreo los siguientes:

- ✓ **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Constituye, el parámetro de mayor importancia en la valoración del grado de contaminación de los lixiviados, toda vez que las muestras de residuos sólidos, corresponden a residuos de tipo doméstico, los cuales reúnen características básicamente orgánicas, condición que es determinada cuantitativamente por este indicador.
  
- ✓ **Demanda Química de Oxígeno:** Este parámetro, es importante para establecer correlaciones con otras variables principalmente con la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la determinación de fracciones biológicamente susceptibles a ser oxidadas ya sea por medios químicos o biológicos.

Además, sirve como parámetros de comprobación de los valores obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno, ya que como veremos mas adelante estos conceptos guardan similares tendencias en sus resultados.

- ✓ **Sólidos Disueltos (SD):** Indicador relacionado directamente con la contaminación orgánica, este es un parámetro muy importante, pues la percolación de los lixiviados a través del suelo, promueve una remoción de aquellos elementos en suspensión, ya sean estos orgánicos o inorgánicos; no sucede lo propio con los sólidos disueltos, pues estos prevalecen hasta entrar en contacto con estratos inferiores del suelo pudiendo incluso alcanzar la napa freática.
  
- ✓ **Potencial de Hidrógeno (pH):** Debido a las variaciones que van a experimentar los lixiviados con relación a sus condiciones iniciales, se hace necesario el monitoreo del comportamiento de este parámetro en función al tiempo de duración del ensayo, pues este parámetro a su vez involucra indirectamente a indicadores como la actividad microbiana.



- ✓ **Desplazamiento Vertical:** Se realizará un monitoreo semanal de los asentamientos en cada uno de los 9 puntos de monitoreo ubicados en los dos módulos acondicionados, con la finalidad de establecer relaciones comparativas entre los asentamientos de uno u otro módulo (con y sin recirculación de lixiviados).
- ✓ **Temperatura:** Este indicador será monitoreado con motivos referenciales a fin de reforzar el tramo final de la presente investigación referida al planteamiento de conclusiones, toda vez, que existe una relación directa entre las variaciones de la temperatura en relación a las variaciones de la actividad microbiana.

## 2.6 DEFINICIONES DE TÉRMINOS BÁSICOS:

Las siguientes definiciones han sido tomadas de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos - Disposiciones Complementarias, Transitorias y Finales (Décima Disposición), de esta se extrae los siguientes:

**Botadero:** Acumulación inapropiada de residuos sólidos en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas, rurales o baldías que generan riesgos sanitarios o ambientales. Carecen de autorización sanitaria.

**Disposición Final:** Procesos u operaciones para tratar o disponer en un lugar los residuos sólidos como última etapa de su manejo en forma permanente, sanitaria y ambientalmente segura.

**Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos:** Persona jurídica que presta servicios de residuos sólidos mediante una o varias de las siguientes actividades: limpieza de vías y espacios públicos, recolección y transporte, transferencia, tratamiento o disposición final de residuos sólidos.

**Manejo de Residuos Sólidos:** Toda actividad técnica operativa de residuos sólidos que involucre manipuleo, acondicionamiento, transporte, transferencia, tratamiento, disposición final o cualquier otro procedimiento técnico operativo utilizado desde la generación hasta la disposición final.

**Operador:** Persona natural que realiza cualquiera de las operaciones o procesos que componen el manejo de los residuos sólidos, pudiendo ser o no el generador de los mismos.

**Relleno Sanitario:** Instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos en la superficie o bajo la tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental.

**Residuos Domiciliarios:** Son aquellos residuos generados en las actividades domésticas realizadas en los domicilios, constituidos por restos de alimentos, periódicos, revistas, botellas embalajes en general, latas, cartón, pañales descartables, restos de aseo personal y otros similares.

**Riesgo Significativo:** Alta probabilidad de ocurrencia de un evento con consecuencias indeseables para la salud y el ambiente.

**Tratamiento:** Cualquier proceso, método o técnica que permita modificar la característica física, química o biológica del residuo sólido, a fin de reducir o eliminar su potencial peligro de causar daños a la salud y el ambiente.

## **2.7 MARCO LEGAL:**

La presente investigación está enmarcada fundamentalmente dentro de la siguiente legislación:

### **LEY GENERAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, LEY N° 27314 (21-07-00)**

**Artículo 1, Título I: Objeto:** La presente Ley establece derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su

conjunto, para asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos, sanitaria y ambientalmente adecuada con sujeción a los principios de minimización, prevención de riesgos ambientales y protección de la salud y el bienestar de la persona humana.

#### **REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (22-07-04)**

**Artículo 79, Capítulo II, Título V: Operaciones de Tratamiento centralizado de residuos del ámbito de gestión municipal.-** La instalación de tratamiento centralizada de residuos del ámbito de gestión municipal, según corresponda, incluye algunas de las siguientes operaciones:

1. Segregación mecanizada, semi-mecanizada o manual de los elementos constitutivos de los residuos adoptándose las necesarias medidas de salud ocupacional a fin de minimizar los riesgos derivados
2. Compactación o embalaje de los residuos para que el transporte, reaprovechamiento, comercialización o disposición final sea más eficiente;
3. Biodegradación de la fracción orgánica de los residuos con fines de producción de energía o de un mejorador de suelo;
4. Uso de la fracción orgánica para la producción de humus a través de la crianza de lombrices, o para el desarrollo de prácticas de compostaje;
5. Tratamiento térmico de la fracción orgánica de los residuos a fin de emplearlos como alimento de animales; y,
6. **Otras operaciones de tratamiento, que se puedan diseñar e implementar y que cumplan con los requisitos del Reglamento y normas emitidas al amparo de éste.**

**Artículo 89, Capítulo III, Título V: Plan de cierre de Infraestructura.-** La EPS-RS o la municipalidad provincial que administra una infraestructura de residuos sólidos es responsable de la ejecución del plan de cierre que es aprobado por la DIGESA como parte del EIA o PAMA. Para la ejecución del indicado plan, éste deberá ser replanteado y presentado para su aprobación por la Autoridad de Salud de la jurisdicción, como mínimo 4

años antes del límite del tiempo de vida útil del proyecto de infraestructura, de acuerdo a lo establecido en el literal g) del artículo 8 del Reglamento.

El plan deberá cumplir como mínimo con los siguientes aspectos técnicos, según corresponda al tipo de infraestructura de residuos sólidos:

1. Evaluación ambiental;
2. Diseño de cobertura final apropiada;
3. Control de gases;
- 4. Control y tratamiento de lixiviados;**
5. Programa de monitoreo ambiental;
6. Medidas de contingencia;
7. Proyecto de uso del área después de su cierre; y
8. Otros que la autoridad competente establezca.

**DECRETRO DE ALCALDIA N° 147: Reglamento de la Ordenanza N°295/MML “Sistema Metropolitano de Gestión de Residuos Sólidos” (10-12-2001)**

**Artículo 127, Capítulo IV, Título I, Parte IV: tratamiento del Lixiviado.-**  
Los lixiviados, serán recepcionados en una poza de captación apropiada en la cual se acumulará para su posterior tratamiento técnico adecuado.

## **2.8 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN:**

Se han encontrado experiencias prácticas (las cuales se han tomado como referencia) en países como México, Chile, Brasil, Estados Unidos. A continuación se explica brevemente cada uno de estos casos:

### **✓ Recirculación de lixiviados en México:**

Se ha efectuado estudios en laboratorios para determinar las bondades de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala.

✓ **Recirculación de lixiviados en Brasil:**

Actualmente se desarrolla una evaluación de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala laboratorio, para determinar el grado de afectación de la recirculación sobre fenómenos como el asentamiento, la generación de gases y el mejoramiento de la calidad del mismo.

Además se realiza la recirculación para determinar la reducción de los tiempos de estabilización en los Rellenos Sanitarios.

✓ **Recirculación de lixiviados en Estados Unidos:**

Se realizan investigaciones para determinar si la recirculación de los lixiviados en un relleno sanitario, permite que los mismos mejoren en su calidad (determinada a través de análisis físicos-químicos y bacteriológicos), lo que asegura un óptimo tratamiento de los mismos, evitando el riesgo de contaminación.

✓ **Recirculación de lixiviados en Chile:**

En el año 2000 se realizó un proyecto de investigación financiado por la Vicerrectoría de Investigación de Universidad Católica de Valparaíso denominado "Estudio a escala real del tratamiento de líquidos lixiviados mediante recirculación, para su aplicación en rellenos sanitarios de Chile". Este proyecto multidisciplinario fue desarrollado por académicos de las Facultades de Ingeniería, Agronomía y Ciencias Básicas y Matemáticas, además contó con la participación de investigadores de la Universidad de Calgary de Canadá

Asimismo; académicos de las Escuelas de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería bioquímica de la Universidad Católica de Valparaíso, realizaron un estudio a escala denominado: "Asentamientos en un Vertedero Controlado a Escala con Recirculación de Líquidos Lixiviados"

## CAPITULO III

### MARCO TEORICO

#### 3.1 RESEÑA HISTORICA:

Desde tiempos muy antiguos la disposición de residuos sólidos en botaderos abiertos fue la práctica habitual para muchas ciudades. Incendios, contaminación del agua, malos olores, roedores, moscas y papeles eran los resultados más visibles de este sistema de disposición. El entierro de la basura redujo estos problemas, pero la mejora más importante se produjo con la compactación de las basuras en estratos y cubriéndolas con tierra al final de la operación del día. Este método, denominado relleno sanitario, fue usado por primera vez en California en 1934.

En la actualidad, la preocupación creciente por la protección del ambiente y la salud pública le confiere especial importancia a la disposición final de los residuos sólidos generados y en efecto el método conocido como relleno sanitario, es hoy en día el método de tratamiento final más aplicado en el mundo. Este método por la sencillez de la operación, por los costos involucrados y por la seguridad ambiental que ofrece, resulta atractivo tanto para países desarrollados como para países en vías de desarrollo.

Sin embargo, a pesar de que el relleno sanitario se ha convertido en una alternativa de disposición final de residuos sólidos ampliamente utilizada aún presenta problemas relacionados con la contención y el manejo adecuados de los volúmenes de lixiviados que se generan durante su operación. El peligro potencial de los lixiviados, es la contaminación de

suelos, aguas superficiales y subterráneas, que pueden darse por escurrimientos no controlados o por infiltración a través de formaciones permeables.

En la actualidad los métodos de manejo de los lixiviados están referidos a la implementación de tanques impermeabilizados que permiten acumular dichos líquidos para posteriormente bombearlos hacia plantas de tratamiento en las cuales se procede a su depuración. El costo de este sistema de tratamiento puede, en el caso de ciudades de pequeño tamaño, ser sumamente elevado, lo cual impide una adecuada operación del Relleno sanitario.

### **3.2 LIXIVIADOS:**

Se llama lixiviado, a los líquidos que se generan en el módulo de un Relleno Sanitario debido a la degradación de la materia orgánica y como producto de la infiltración del agua de lluvia, que, al atravesar ("percolar") la masa de residuos sólidos, disuelve, extrae y transporta ("lixivia") los distintos componentes sólidos, líquidos o gaseosos presentes en los residuos dispuestos.

#### **Características de los Lixiviados:**

- ✓ El lixiviado contiene materiales orgánicos e inorgánicos en forma soluble, suspendida o miscible, además de microorganismos patógenos.
- ✓ En magnitud, pueden llegar a representar 100 veces mas la contaminación orgánica presente en un agua residual típica.
- ✓ La calidad del lixiviado depende de factores tales como la composición de la basura y las condiciones en que opera el relleno: grado de compactación, grado de humedad, etc.
- ✓ Como producto de la actividad biológica que se desarrolla dentro del relleno, la calidad del lixiviado, varía en el tiempo, tendiendo con el transcurso de los años y la estabilización de la basura a concentraciones cada vez menores de contaminantes.

### Clasificación de los Lixiviados:

Los lixiviados se pueden clasificar, de acuerdo a la actividad biológica que se desarrolle en el Relleno Sanitario:

- ✓ Lixiviados Biodegradables (DBO/DQO>0.3))
- ✓ Lixiviados Maduros (DBO/DQO 0.1--0.3)
- ✓ Lixiviados Estabilizados (DBO/DQO<0.1)

Según esta clasificación puede ampliarse con la siguiente tabla:

DBO/DQO Tipo de Lixiviado	>0.3 Biodegradable	0.1-0.3 Maduro	<0.1 Estabilizado
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DQO (g/L)	> 10	< 10	< 5
DQO/COT	< 2.7	2.0-2.7	> 2.0
AGV (%COT)	70-90	20-30	5
SH(%COT)	----	----	> 60
TRATAMIENTOS	EFICIENCIA		
Biológicos	Buena	Favorable	Pobre
Precipitación Química	Favorable-Pobre	Favorable	Pobre
Oxidación Química	Favorable-Pobre	Favorable	Buena
Carbón Activado	Favorable-Pobre	Buena-Favorable	Buena
Coagulación	Favorable-Pobre	Buena-Favorable	Buena
Ósmosis Inversa	Favorable	Buena	Buena

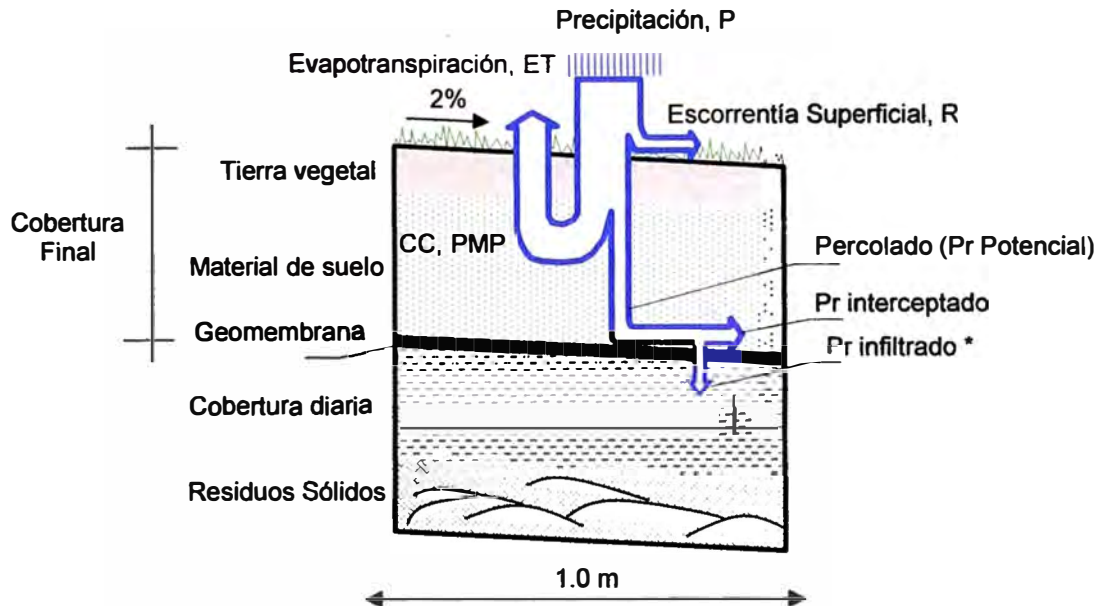
### 3.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS:

Los principales factores que gobiernan la formación de lixiviados, son los siguientes:

- ✓ Agua Disponible: Precipitación pluvial, presencia de agua superficial, recirculación de lixiviados e irrigación de cobertura.
- ✓ Características de la cubierta de los residuos: Tipo de suelo y vegetación, grado de compactación del material de cubierta y pendientes de las superficies finales.
- ✓ Características del tipo de residuos: Compactación, composición y contenido de humedad de los residuos cuando fueron dispuestos.



- ✓ Impermeabilización empleada: Tipo de material empleado (natural o artificial), tanto en el fondo como en la cubierta final del confinamiento.



### 3.4 EL PROBLEMA DE LA GENERACIÓN DE LOS LIXIVIADOS EN LA OPERACION DE LOS RELLENOS SANITARIOS:

Los lixiviados son una fuente de contaminación sobre la cual no se tiene un control adecuado, esto se debe a diversas razones:

1. Cada uno de los lixiviados que se producen en los diferentes Rellenos Sanitarios tiene distintos tipos de contaminantes. Las cargas orgánicas y de otros contaminantes presentes en los lixiviados, tienden a incrementarse por el crecimiento que últimamente han experimentado las tasas de residuos sólidos que ingresan a los Rellenos Sanitarios, debido tanto al incremento poblacional, como a los elevados índices de consumismo que se han venido registrando desde hace dos décadas; además de la "peligrosidad potencial" que presentan en la actualidad estos productos consumidos con respecto al pasado, como las pinturas, solventes, baterías y otros materiales que ya son comunes en la composición típica de los residuos sólidos domésticos.

2. Desconocimiento por parte de las Empresas Prestadoras de Servicio de Residuos Sólidos de una alternativa de tratamiento o disposición final que sea técnica y económicamente viable.

3. Costos elevados de los sistemas de tratamiento de lixiviados.

Es por ello que en la actualidad, la tecnología que se considere para el diseño y la operación de cualquier sistema de disposición final de residuos sólidos, debe privilegiar sobremanera los dispositivos que permitan eliminar cualquier posibilidad de contaminación tanto del suelo, como agua superficial o subterránea.

Para dar un mejor enfoque a los efectos y causas de un Manejo Inadecuado de los Lixiviados, se presenta el siguiente Árbol de Problemas (Ver Fig.Nº1):

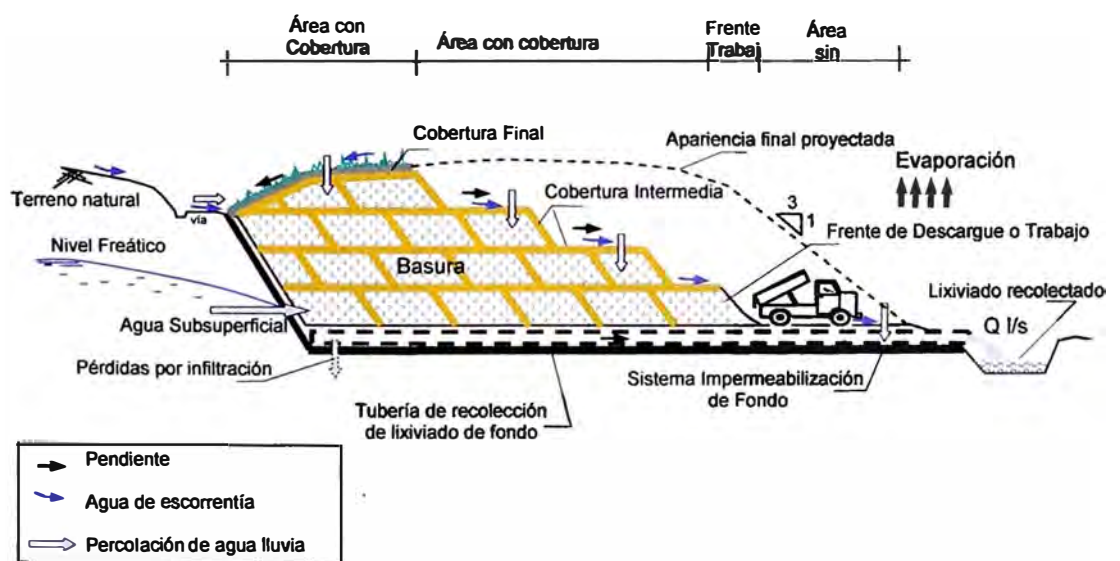
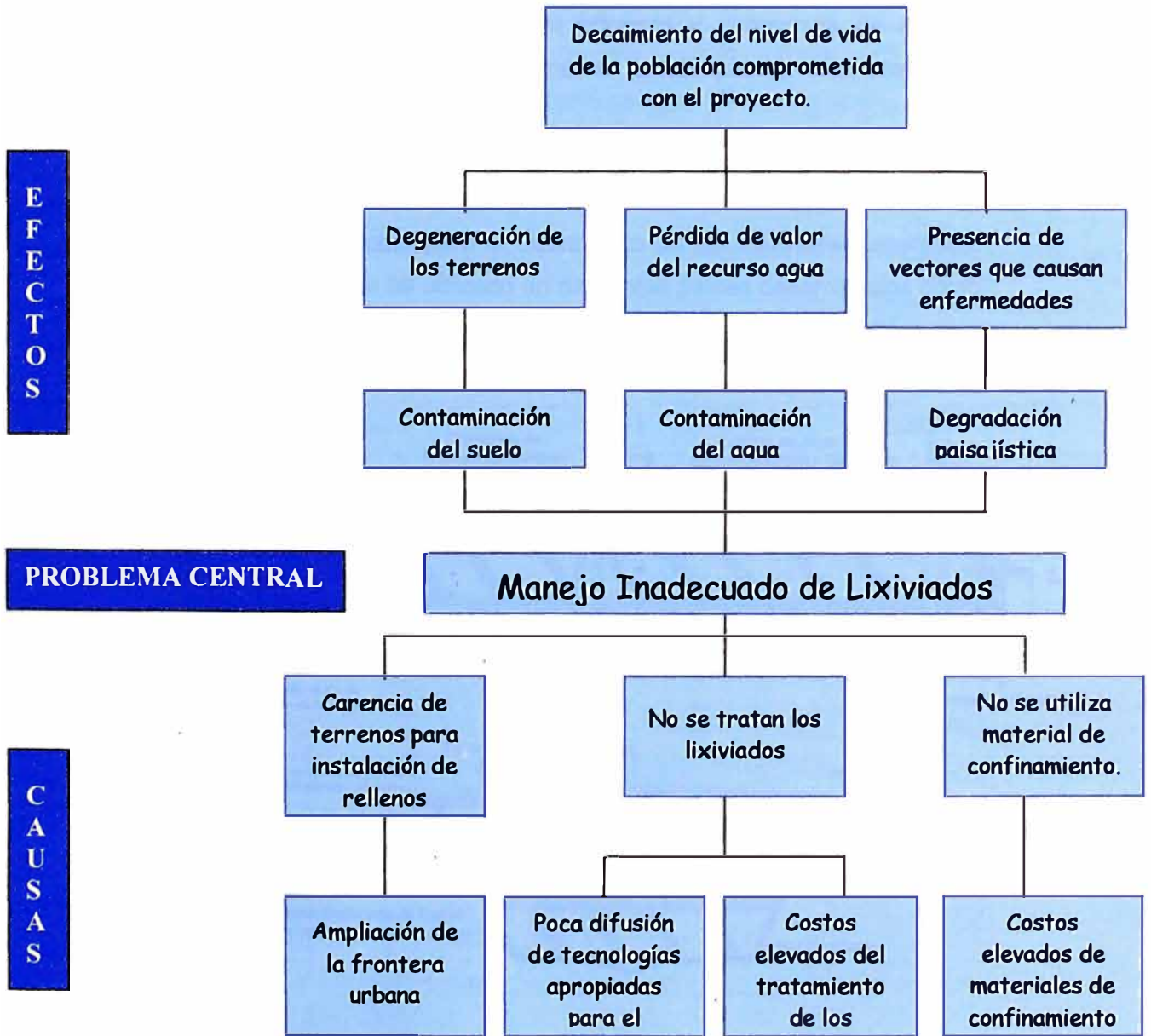


Fig. N°1: Manejo Inadecuado de los Lixiviados

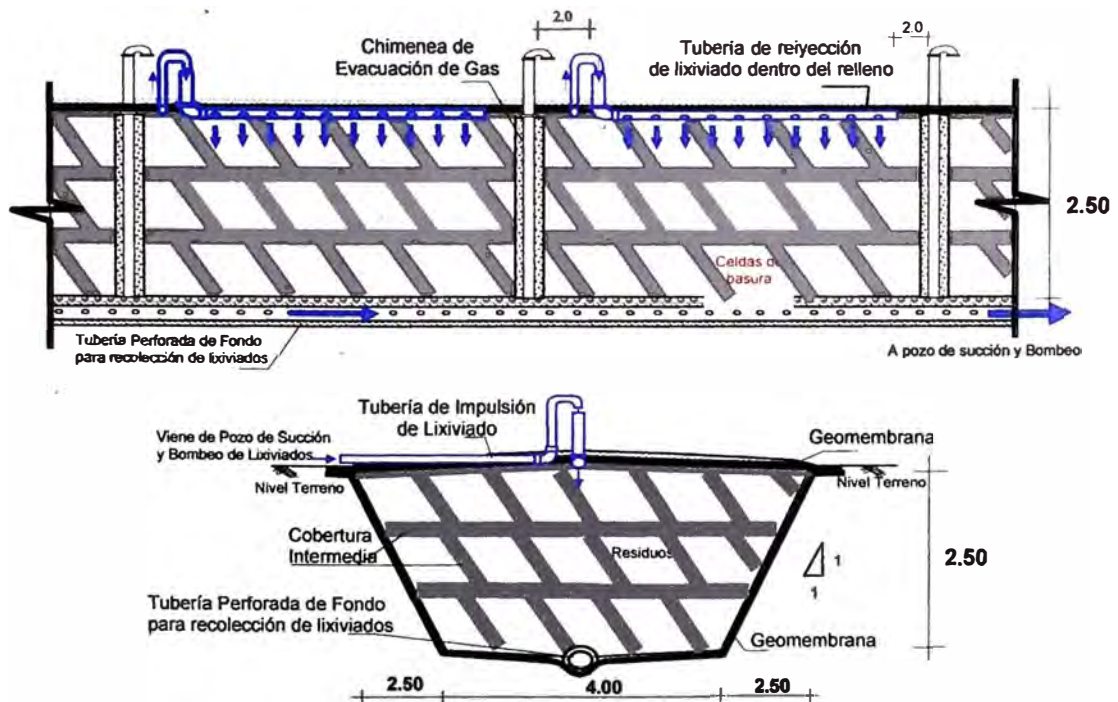
ARBOL DE PROBLEMAS



### 3.5 RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS: UNA POSIBLE SOLUCIÓN

Una tecnología que se ha estado aplicando en los últimos años en muchos países<sup>(1)</sup>, y que une los conceptos de control ambiental y optimización de la operación de un relleno sanitario, es la recirculación de los lixiviados al relleno, el cual, si bien no constituye un sistema de manejo final de los lixiviados, representa una alternativa eficiente y económica de manejo primario, aunque debe necesariamente contemplarse una etapa de tratamiento posterior.

La recirculación es una técnica que supone el uso del Relleno Sanitario como un filtro anaerobio para el tratamiento de los lixiviados generados. Este procedimiento se ha utilizado en diferentes países desarrollados como Holanda, Australia, EE.UU., Italia, Inglaterra y Alemania entre otros.



(1) Mayores detalles en el Capítulo II – 2.8 “Antecedentes de la Investigación”

El material dispuesto en un relleno sanitario sufre pérdidas de masa y variaciones en sus características, debido fundamentalmente a la descomposición de los residuos sólidos y a esfuerzos mecánicos, dando lugar a asentamientos que pueden prolongarse por varios años.

La recirculación como mecanismo de optimización en la operación de los rellenos sanitarios plantea ventajas comparativas para aprovechar al máximo el volumen útil disponible basados básicamente en dos principios: el aumento en la densidad del relleno sanitario y la aceleración de los procesos de degradación de la materia orgánica presente, sumado a estos los efectos convencionales conferidos por los esfuerzos mecánicos producto del peso del material dispuesto.

Sobre lo antes mencionado se pueden identificar dos tipos de asentamientos, los de carácter inmediato o primarios, que dependen de las cargas que se le imponga a los residuos sólidos dispuestos y los asentamientos de mediático o secundarios, debidos principalmente a los fenómenos de descomposición de la materia orgánica biodegradable contenida en los residuos sólidos.

#### **a) ASIENTOS INMEDIATOS O PRIMARIOS**

Este tipo de asentamiento está referido a aquellos producidos por el efecto conjunto del arrastre y reacomodo de las partículas menores en los huecos que estén disponibles en el relleno sanitario y por el peso mismo conferido por el material dispuesto.

En cuanto al arrastre y reacomodo de partículas menores, es causado por el flujo de líquidos que se percolan a través del relleno. Este fenómeno es conocido como COLAPSO y corresponde a una disminución espontánea de volumen que experimentan los suelos acompañada de un cambio considerable en su estructura interna, sin que existan variaciones en las presiones externas aplicadas.

Uno de los tipos de colapso mas conocidos es el originado por inundación de un suelo semisaturado en el que la desaparición de las tensiones capilares existentes entre los granos y por tanto la brusca variación de las presiones del fluido intersticial, 'provoca la disminución efectiva del terreno y consecuente un asiento adicional al ya originado por el peso propio o la carga aplicada.

#### **b) ASIENTOS MEDIATICOS O SECUNDARIOS:**

Hacen mención netamente a los asientos que se producen en el tiempo y por largos periodos del tiempo asignados a los procesos de degradación de la materia orgánica de los residuos sólidos. Esta degradación se realiza en dos etapas iniciando con una aerobia y manteniéndose en el tiempo en una etapa anaerobia.

En condiciones normales, la fase de descomposición aerobia se extiende entre 10 y 50 días, hasta que se agota el oxigeno que esta en los poros del relleno. En cambio la fase de descomposición anaerobia tiene un periodo de duración bastante prolongado y se suceden cuatro etapas conocida como las fases: hidrolítica, acidogénica, metanogénica y de maduración.

En la recirculación, el paso de los lixiviados a través de la masa de residuos incrementa la actividad biológica y se acelera la sucesión de la fase anaerobia en la operación de un relleno sanitario. Se ha comprobado que la degradación biológica de la materia orgánica del relleno, mejora notablemente cuando su contenido de humedad se encuentra entre el 50% y 70%. Este método es una opción muy apropiada para rellenos sanitarios ubicados en zonas de pluviométrica baja, como es el caso de la Costa Peruana.

Los mejores resultados se logran cuando el pH se mantiene en 7, ya que la variación del mismo origina una caída en la actividad microbiana. La porosidad, la estructura y densidad del relleno son importantes para

asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y evitar la formación de canales preferenciales a través del relleno.

- Además de los asentamientos propiamente dichos y el consiguiente mejor aprovechamiento de los espacios destinados a rellenos sanitarios, la recirculación de los lixiviados introduce también el concepto de la reducción de los lixiviados por efectos de la evaporación.
- Por otro lado el incremento de la actividad biológica que se alcanza reduce la carga contaminante del lixiviado, aumenta la generación de biogás e incrementa la mineralización de los residuos. Esto es, la recirculación de los lixiviados representa una alternativa de tratamiento preliminar de los lixiviados; asimismo, un catalizador en el proceso de estabilización de los rellenos sanitarios. <sup>(2)</sup>

### **3.6 PROCESOS ASOCIADOS A LA RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS - DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La Digestión anaeróbica es un proceso en el cual un conjunto de diferentes tipos de microorganismos en ausencia de oxígeno molecular promueve la transformación de compuestos orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos), en productos más simples como metano y gas carbónico. Los microorganismos involucrados en la digestión anaeróbica son muy especializados ya cada uno actúa en reacciones específicas.

---

<sup>(2)</sup> En un relleno sanitario se desarrolla el proceso de fermentación anaeróbica en una de sus primeras fases se desarrollan los organismos de la llamada "fermentación ácida o acidogénesis" con una alta tasa de crecimiento; aunque con menores tasas de crecimiento se desarrollan las bacterias productoras de metano. Esta tendencia cambia en el tiempo hasta lograr un desarrollo equilibrado entre las bacterias acidogénicas y metanogénicas. Al alcanzar este estado se habrá alcanzado la estabilización de un relleno sanitario.

En los reactores anaeróbicos la formación de metano es altamente deseable, una vez que la materia orgánica generalmente medida como DBO es removida de la fase líquida, pues el metano presenta baja solubilidad en el agua. Asimismo la conversión de los compuestos orgánicos en metano es eficaz en la remoción del material orgánico a pesar de no promover su oxidación completa.

En los sistemas de tratamiento anaeróbico, se procura acelerar el proceso de la digestión, promoviendo condiciones favorables. Estas condiciones se refieren tanto al proyecto de tratamiento como a las condiciones operacionales de los rellenos sanitarios. Con relación a lo mencionado, se debe mantener una alta masa de bacterias activas que actúan en el proceso de digestión anaeróbica y debe promoverse un contacto intenso entre el material orgánico presente en los lixiviados y la masa bacteriana del sistema. Los factores operacionales mas influyentes son la temperatura, el pH, la presencia de nutrientes y la ausencia de materiales tóxicos en los lixiviados.

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico complejo, compuesto por varias reacciones secuenciales, cada una con poblaciones bacterianas específicas. Para la digestión anaeróbica del material orgánico complejo como proteínas, carbohidratos y lípidos (la mayor parte de la composición del material orgánico en aguas residuales tiene estos compuestos), pueden distinguirse cuatro etapas diferentes en el proceso de conversión que se presentan a continuación:

**HIDRÓLISIS:** En este proceso, el material orgánico particulado es convertido en compuestos disueltos de menor peso molecular. El proceso requiere interferencias de las llamadas exoenzimas que son excretadas por las bacterias fermentativas. Las proteínas son degradadas por medio de polipéptidos para formar aminoácidos. Los carbohidratos se transforman en azúcares solubles (mono y disacáridos) y los lípidos son convertidos en ácidos grasos de larga cadena de carbono y glicerina. En muchos casos, en la práctica, la



velocidad de hidrólisis puede ser la etapa limitante para todo el proceso de digestión anaeróbica, pues las demás fases son efectivas una vez hidrolizado el material particulado.

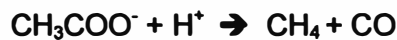
- **ACIDOGENESIS:** Los compuestos disueltos, generados en el proceso de hidrólisis, son absorbidos en las células de las bacterias fermentativas e después de la acidogénesis excretadas como sustancias orgánicas simples como ácidos grasos volátiles de cadena corta, alcoholes, ácido láctico y compuestos minerales como anhídrido carbónico, hidrógeno, amoníaco, ácido sulfhídrico, etc. La fermentación acidogénica es realizada por un grupo diversificado de bacterias de las cuales la mayoría son anaeróbicas. Entre tanto, algunas especies son facultativas y pueden metabolizar el material orgánico por oxidación. Eso es importante en los sistemas de tratamiento anaeróbicos de lixiviados, porque el oxígeno disuelto, eventualmente presente, podría tomarse en sustancias tóxicas para las bacterias metanogénicas siendo removido por las bacterias acidogénicas facultativas.
- **ACETOGENESIS:** La acetogénesis es la conversión de los productos de la acidogénesis en compuestos que forman los sustratos para la producción de metano: acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Aproximadamente el 70% de la DQO digerida es concentrado en el hidrógeno formado.

Por la estequiometría, dependiendo del estado de oxidación del material orgánico a ser digerido, la formación de ácido acético puede ser acompañada por el surgimiento de dióxido de carbono o hidrógeno. Entre tanto, el dióxido de carbono también es generado en la propia metanogénesis. En presencia de dióxido de carbono e hidrógeno, un tercer proceso de acetogénesis puede llevarse a cabo: la homoacetogénesis, es decir, la reducción del dióxido de carbono en ácido acético por acción del hidrógeno; sin embargo este fenómeno es poco probable de suceder pues las bacterias acetogénicas son superadas por las bacterias metanogénicas utilizadoras de hidrógeno.

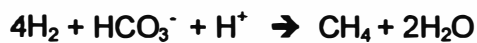
- **METANOGENESIS:** El metano es producido por las bacterias acetotróficas, a partir de la reducción del ácido acético, o por las bacterias hidrogenotróficas, a partir de la reducción de dióxido de carbono.

A continuación se presentan las reacciones que tienen lugar en estos procesos:

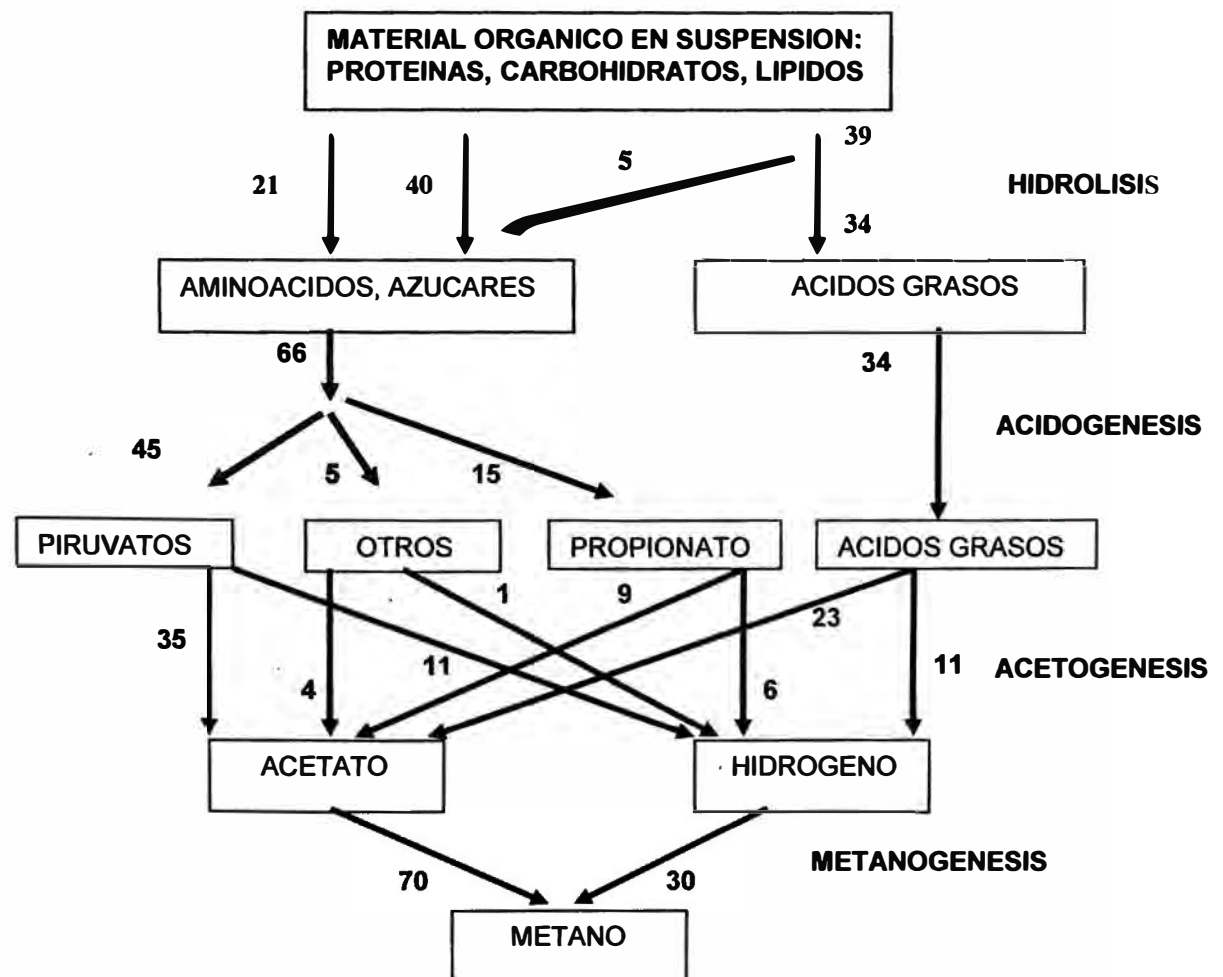
- **Metanogénesis acetotrófica o acetoclástica:**



- **Metanogénesis hidrogenotrófica:**



Las bacterias que producen metano a partir de hidrógeno crecen más rápidamente que aquellas que usan ácido acético, de modo que las metanogénicas acetotróficas generalmente limitan la transformación del material orgánico complejo.



## CAPITULO IV

## METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

## 4.1 UBICACIÓN DE LAS CELDAS PILOTO

Para el desarrollo de ésta investigación se ha construido dos tanques, que en adelante serán denominadas "Celdas Piloto", las cuales simularán las celdas de un Relleno Sanitario. Estas Celdas Piloto, han sido ubicadas en un área colindante, en dirección Norte a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI – UNITRAR, al costado de su cerco perimétrico (Ver Fig. N° 4.1).

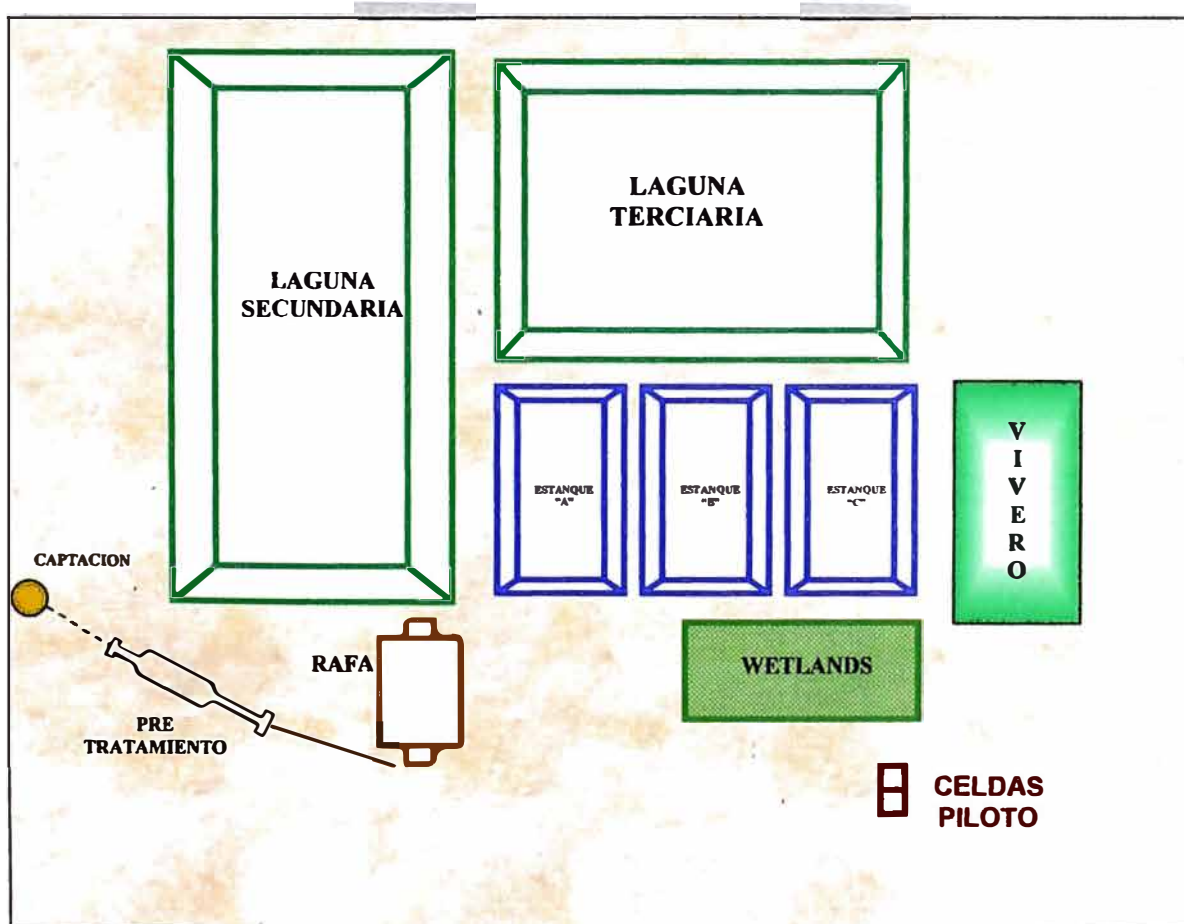


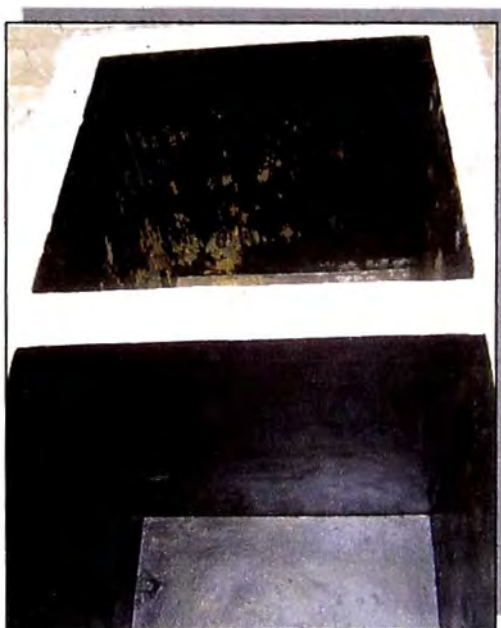
Fig. N° 4.1: Ubicación de las celdas piloto

#### 4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CELDAS PILOTO

Las Celdas Piloto tienen una altura neta de 1.20m y 1m<sup>2</sup> de área interna (1.0x1.0m), constan de paredes de albañilería, tarrajeadas interiormente con una mezcla de concreto simple y revestidas con un impermeabilizante (sicca). Adicionalmente, se revistió interiormente con una capa de pintura epóxica, para evitar los posibles problemas de corrosión.



**Foto N° 4.2.1: Vista exterior de las Celdas Piloto**



**Foto N° 4.2.2: Celdas Piloto revestidas interiormente con una capa de pintura epóxica**

La base fue construida de concreto armado, la cual tiene una pendiente lateral de 2.0%, terminando en un canal central para drenar los lixiviados producidos.

Con la finalidad de captar los gases producidos por la degradación de los residuos sólidos, se ha acondicionado una chimenea en la parte central colocada verticalmente partiendo de la base y terminando 20cm sobre la superficie de las Celdas Piloto.

Para la medición del asentamiento se han dispuesto 9 dispositivos cuadrados trabajados en triplay de 10cm. de lado, enumerados y dispuestos de manera equidistante en la superficie de las Celdas Piloto, considerando igual área de influencia para cada uno de ellos.

Cada una de las Celdas Piloto consta de 3 capas diferenciadas, que en orden ascendente son las siguientes:

- ✓ Una capa de grava de 10 cm que permite la conducción de los lixiviados generados hacia el canal de drenaje.
- ✓ Una capa de 1.0m de Residuos Sólidos con una compactación de  $0.67\text{Tn/m}^3$ , en la celda N° 01 (con recirculación) y  $0.69\text{Tn/m}^3$  en la celda N° 02 (sin recirculación).
- ✓ Una capa de material inerte (Piedra chancada, arena y tierra) de 5cm para la cobertura.

**4.3. MATERIALES DE FABRICACIÓN:** Atendiendo a la especialidad y/o ambientes en los que fueron usados los diferentes materiales, podemos clasificarlos en:

➤ **OBRAS CIVILES:**

- ✓ Cemento Pórtland Tipo I
- ✓ Arena Gruesa
- ✓ Arena Fina

- ✓ Ladrillo King Kong, tipo pandereta (9x14x24cm)
- ✓ Piedra Chancada de ½"
- ✓ Alambre Negro Recocido Nº 8
- ✓ Acero de Refuerzo ½" (Fy = 4200 Kg/cm2)
- ✓ Clavos de Acero 2"
- ✓ Impermeabilizante (sicca)
- ✓ Pintura epóxica

➤ **INSTALACIONES DEL SISTEMA DE MONITOREO:**

- ✓ Tubería de PVC D=1"
- ✓ Tubería de PVC D=½ "
- ✓ Válvula Tipo Compuerta Plástica D=1"
- ✓ Codos de PVC D=½ "
- ✓ Dispositivos de medición de asentamientos trabajados en triplay de forma cuadrada de 10cm. de lado

➤ **MATERIALES DE DRENAJE, COBERTURA Y RECOLECCIÓN**

- ✓ Grava de ½" A 2"
- ✓ Material inerte (Piedra chancada, arena y tierra)
- ✓ Arena Gruesa

**4.4. CRITERIOS DE DISEÑO:**

**4.4.1. Criterios Estructurales:**

Para la construcción de las Celdas Piloto, se optó por materiales de concreto y albañilería. Esta elección se fundamenta en:

- ✓ Control de Parámetros de Operación: A fin de conseguir un adecuado seguimiento de los diferentes parámetros considerados en el presente estudio, se necesita un material consistente y de forma geométrica favorable para llevar a cabo tales objetivos. Las

celdas construidas en concreto y material de albañilería, confieren estas ventajas pues tienen la resistencia necesaria para operaciones de compactación y su forma cúbica permiten mantener precisión en las mediciones de longitud realizadas.

Además de ello, el costo a esta escala es menor utilizando concreto y albañilería en comparación con otros materiales del mercado, tales como polietileno, fibra de vidrio, etc.

#### **4.4.2. Criterios de Diseño Sanitarios:**

- ✓ Para asegurar una adecuada captación de los lixiviados se tuvo en consideración que los canales de recolección de lixiviados tuvieran pendientes tanto laterales como centrales de 1.5% a 3%.
- ✓ Para el drenaje de los lixiviados, se dispuso una capa de 10cm de espesor conformada por grava seleccionada.
- ✓ Para garantizar la evacuación de gases producidos, se ha previsto de una tubería perforada en cuyo interior se ha colocado grava. Esta tubería atraviesa toda la capa de residuos sólidos en sentido vertical desde el sistema de drenaje y termina en un quemador que garantiza la combustión de los gases,
- ✓ Para controlar la emisión de malos olores y evitar la presencia de insectos y otros vectores, se acondicionó una capa de cobertura de material inerte de 5 a 10 cms., de espesor.
- ✓ La distribución de los líquidos a recircular, se realizó a través de tuberías de PVC, dispuestas transversalmente, con orificios equidistantes entre si 10cm.

#### **4.4.3. Consideraciones Durante el Proceso Constructivo:**

- ✓ El sistema de recolección de lixiviados a realizar por la parte inferior de las Celdas Piloto, debe ser totalmente hermético, para evitar perdidas del material a colectar.

- ✓ Es necesaria la realización de una prueba hidráulica de la infraestructura antes de disponer los residuos sólidos durante un tiempo considerable para asegurar la impermeabilización de fondo y paredes; asimismo, la hermeticidad de las válvulas de compuerta usadas para la recolección.

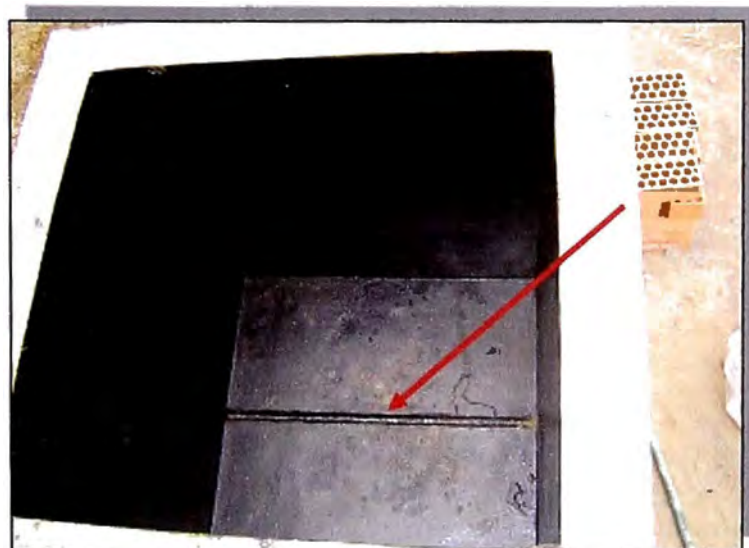
#### 4.5. FORMA, PARTES Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS CELDAS PILOTO:

Cada una de las celdas en forma indistinta consta de los siguientes componentes, cuyas características de forma y dimensionamiento se mencionan a continuación:

##### **PRIMERO: Canal de Recolección de Lixiviado**

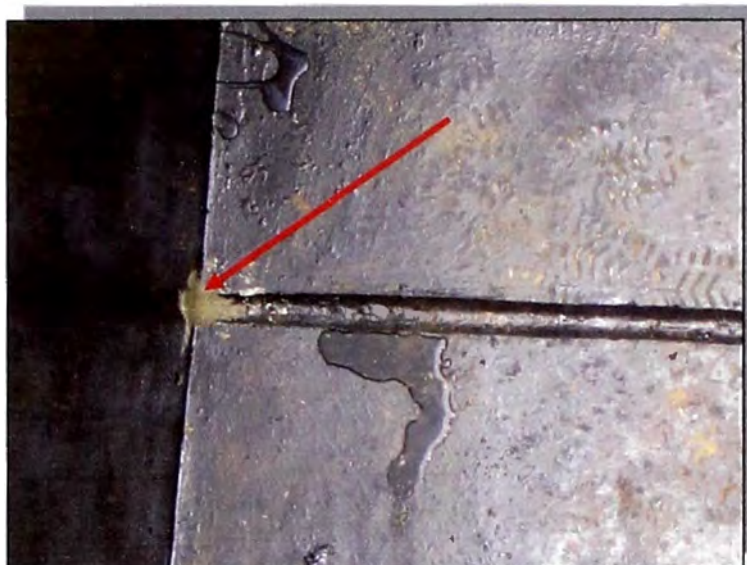
Este canal está ubicado en la parte central inferior de las Celdas Piloto, y atraviesa toda la estructura de cada una de ellas, teniendo una longitud de 1m y una sección de 1pulg<sup>2</sup>.

Para asegurar una adecuada recolección de los lixiviados se ha provisto de pendientes laterales de 2%, los cuales terminan en el canal antes descrito que tiene igual pendiente.



**Foto N° 4.5.1: Canal central de recolección de lixiviados D=1", S=2%**





**Foto N° 4.5.2: Parte final del canal de recolección de lixiviados.**

En la parte terminal se ha colocado un niple de PVC D=1" de diámetro en el que se ha conectado una válvula tipo compuerta para la evacuación de los lixiviados generados.



**Foto N° 4.5.3: Válvula tipo compuerta para la recolección de lixiviados**



**Foto N° 4.5.4: Válvulas colocadas en ambas Celdas Piloto para la recolección de lixiviados**

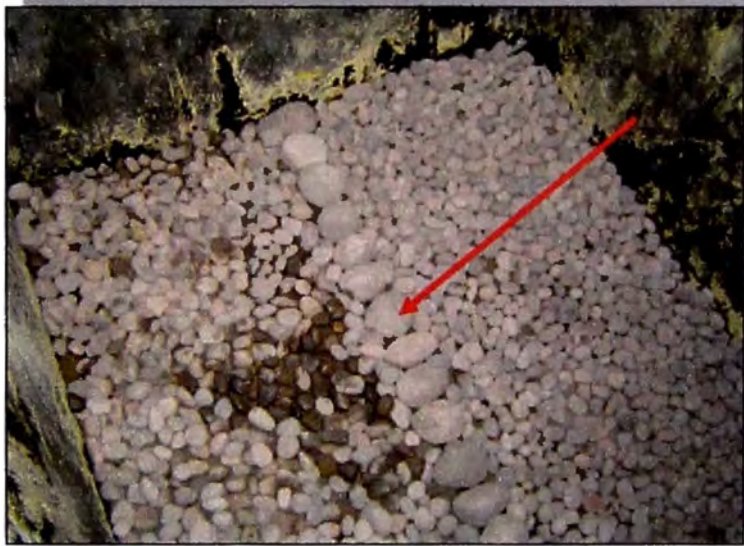
#### **SEGUNDO: Sistema de Drenaje**

Para el drenaje se consideró una capa de 10 cm. de espesor, conformada por piedras o gravas no solubles, con granos de  $\frac{1}{2}$ " a 2" de diámetro. Este sistema de drenaje permite la conducción de los lixiviados hacia el canal central de recolección.



**Foto N° 4.5.5: Colocación de grava para el drenaje de los lixiviados.**

Según muestra la Foto N° 4.5.6 la grava ha sido dispuesta de modo tal que, en la parte central se ubicó la grava de mayor tamaño a fin de asegurar que el canal central no sea obstruido y evitar el arrastre de materiales distintos al lixiviado a recolectar.



**Foto N° 4.5.6: Grava dispuesta para el drenaje, en la parte central van las de mayor tamaño para asegurar la continuidad del flujo en el canal de recolección.**

En los laterales del canal central se inició colocando grava de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y conforme se alcanzaba niveles superiores (10cm), se iba disponiendo grava de mayor tamaño, hasta alcanzar 2" de diámetro.



**Foto N° 4.5.7: Vista de las Celdas Piloto con la capa de 10cm de grava dispuesta para el drenaje de lixiviados.**

### TERCERO: Capa de Residuos Sólidos Domésticos

En esta zona de las Celdas Piloto, se van a desarrollar todos los procesos biológicos, teniendo como resultado la producción de lixiviado. Para la conformación de esta zona, se agregaron Residuos Sólidos procedentes de un camión recolector del Distrito de Comas (Ver ítem 4.6: Implementación de Celdas Piloto).

Se colocó un volumen de  $1\text{m}^3$  ( $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ ) de residuos sólidos, para una mayor facilidad en el manejo de los resultados y proyección a una escala real.

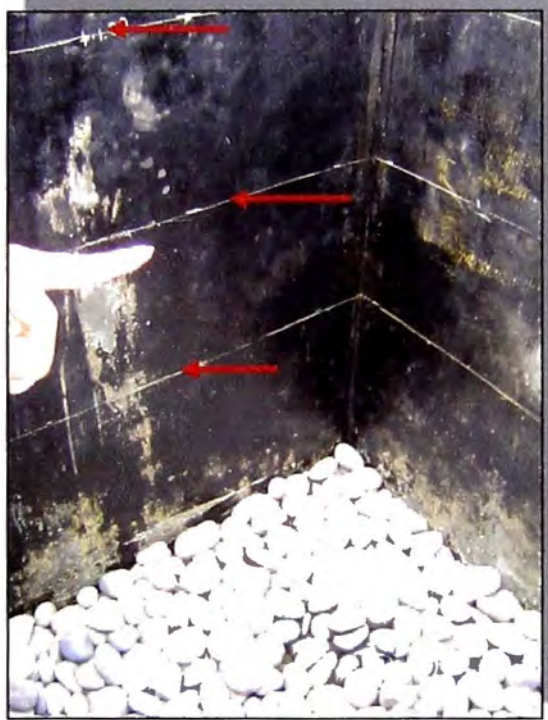
Los residuos sólidos estuvieron sometidos a un proceso de segregación que tuvo como base la composición representativa de los Residuos Sólidos generados por las viviendas de la zona Norte de Lima -elaborada por la ONG "Alternativa"- (Ver ítem 4.6: Implementación de Celdas Piloto).

Los residuos sólidos dispuestos en las Celdas Piloto sufrieron un proceso de compactación, logrando valores de densidad comprendidos entre 0.5 y  $0.7\text{ Ton/m}^3$  <sup>(2)</sup>. Para lograr dichos valores de densidad, la compactación se realizó en tres (03) capas, que en forma ascendente tuvieron espesores de 0.40m, 0.30 y 0.30 m., respectivamente.

A continuación se muestran las densidades que se lograron en cada una de las Celdas por capas:

CELDA N°01			
ALTURA (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	MASA DE RESIDUOS (Kg)	DENSIDAD (Tn/m <sup>3</sup> )
hasta 0,4	0,40	279,0	0,70
de 0,4 a 0,7	0,30	206,5	0,69
de 0,7 a 1	0,30	209,5	0,70
Promedio			0,695
CELDA N°02			
ALTURA (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	MASA DE RESIDUOS (Kg)	DENSIDAD (Tn/m <sup>3</sup> )
0,40	0,40	270,0	0,68
0,70	0,30	197,0	0,66
1,00	0,30	206,0	0,69
Promedio			0,673

<sup>(2)</sup> Es la densidad que existe en los Rellenos Sanitarios cuando los residuos sólidos están recién dispuestos.



**Foto N° 4.5.8: Vista de las 3 capas en la que se compactarán los residuos Sólidos.**



**Foto N° 4.5.9: Llenado de la 1° Capa de 40cm de Residuos Sólidos.**



**Foto N° 4.5.10: Proceso de Compactación de Residuos de la 1º Capa.**



**Foto N° 4.5.11: Residuos Sólidos dispuestos para la 2º Capa.**



**Foto N° 4.5.12: Proceso de compactación en última capa, haciendo uso de un pisón manual, densidad esperada comprendida entre 0.5 y 0.7 Ton/m<sup>3</sup>**

#### **CUARTO: Sistema de Recolección de Gases**

Entre los subproductos de la degradación de la materia orgánica presente en los Residuos Sólidos, se encuentran, además de los lixiviados, los gases generados tales como metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, amoníaco, monóxido de carbono entre otros.

Para garantizar la evacuación continua de éstos gases, se dispuso de un sistema de recolección y evacuación de gases, consistente en una tubería de PVC D=1" perforada. Esta tubería atraviesa en sentido vertical la capa de Residuos Sólidos y sobresale 0.50m por encima del material de cobertura.

Los orificios de la tubería fueron de ½" de diámetro y dispuestos cada 10cm. a lo largo de la tubería.



**Foto N°4.5.13: Tubería de PVC, perforada que recolecta los gases producidos.**



**Foto N° 4.5.14: Parte final de la tubería de evacuación de gases generados en Celdas Piloto.**



**QUINTO: Sistema de distribución de lixiviados a recircular:**

Después de la compactación de los residuos sólidos y la instalación de la tubería de evacuación de gases, se procedió a la ubicación de las tuberías que formarían parte del sistema de distribución de lixiviados a recircular.

Este sistema está conformado por cuatro (04) tuberías de PVC de 1.0m de largo, las cuales atraviesan todo el ancho de las Celdas Piloto y están dispuestas en la superficie de modo tal que cada una tiene la misma área de influencia. Las tuberías fueron perforadas antes de su instalación, presentando orificios de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y equidistantes cada 10cm.

**Foto N° 4.5.15: Orificios de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y espaciadas cada 10cm.**



**Foto N° 4.5.16: Tuberías de distribución de lixiviados.**



Las tuberías están dispuestas de tal manera que presentan una pendiente de 2% para permitir la adecuada distribución de los lixiviados a recircular.



**Foto N° 4.5.17: Pendiente de las tuberías de distribución de lixiviado recirculado.**

Asimismo, en uno de los lados se dispuso de un codo de PVC de 90° de 1.0" de diámetro, seguido de una tubería de 25cm de PVC de 1.0" de diámetro colocada verticalmente. Todo el sistema permite la distribución de los lixiviados a recircular en toda la masa de residuos sólidos colocados.



**Foto N° 4.5.18: Codos de PVC para la distribución de lixiviado recirculado.**



**Foto N° 4.5.19: Tuberías de 25cm de PVC para la distribución de lixiviado recirculado.**

#### **SEXTO: Cobertura**

Una de las diferencias que existe entre un Relleno Sanitario y un botadero a cielo abierto, es que en el primero, se tiene en cuenta la utilización de material de cobertura para separar adecuadamente los residuos sólidos del ambiente exterior y confinarlos.

Teniendo en consideración lo estipulado en el Reglamento del Sistema Metropolitano de Gestión de Residuos Sólidos (Decreto de Alcaldía N° 147)<sup>(3)</sup>, se dispuso 5.0cm de material de cobertura, el cual estuvo compuesto de material inerte (tierra, arena y piedra chancada) de un diámetro no mayor de 20mm.

Esta capa tiene la función de proteger al relleno de insectos y roedores, además de orientar los gases hacia las chimeneas y minimizar los malos olores.

---

<sup>(3)</sup> La altura máxima de la capa no será mayor de 4m., la cual se recubrirá con material de cobertura de un espesor de 0.20 a 0.30 m. (Parte IV, Capítulo IV, Artículo N° 126, inciso b del Decreto de Alcaldía N°147: Reglamento de la Ordenanza N°295/MML "Sistema Metropolitano de Gestión de Residuos Sólidos" / 10-12-2001)



**Foto N° 4.5.20: Conformación de la cobertura de las Celdas Piloto.**



**Foto N° 4.5.21: Material de cobertura en la parte superior de las celdas piloto, compuesto de tierra y material granular.**

**SEPTIMO: Sistema de Medición de Asentamientos**

Debido a que uno de los objetivos del presente trabajo es averiguar el grado de asentamiento producido por la recirculación, se ha considerado la ubicación de nueve (09) piezas cuadradas enumeradas y distribuidas en forma equidistantemente en toda la superficie de modo tal que cada uno de estas tengan una misma área de influencia. Estos discos han sido fijados en la superficie de las Celdas Piloto con alambre N° 8.



**Foto N° 4.5.22: Dispositivos de medición de asentamientos distribuidos en forma equidistante en la superficie de las celdas piloto.**

**4.6. IMPLEMENTACIÓN DE LAS CELDAS PILOTOS:**

Los trabajos realizados con relación a la implementación de las celdas piloto, están referidas al acondicionamiento de la capa de residuos sólidos domésticos para cuyo fin se realizó lo siguiente:

**4.6.1. Composición típica de los Residuos Sólidos Domésticos:**

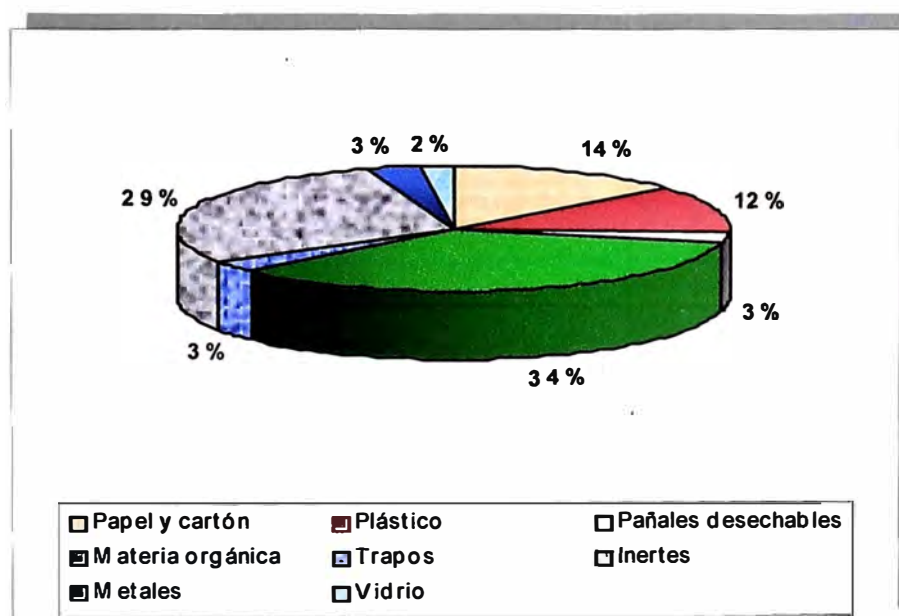
La Organización no Gubernamental ALTERNATIVA, en el marco del Programa de Lucha Contra la Pobreza en las Zonas Urbano-Marginales de Lima Metropolitana, PROPOLI, un resultado de un convenio entre la Unión Europea y el Gobierno Peruano,

representado por el Ministerio de la Mujer y Desarrollo Social (Mimdes), preparó un Estudio de Línea Base referido a Salud y Saneamiento en el cual se estipula la composición de los residuos sólidos en 10 distritos que comprenden el área de Lima Metropolitana, entre los cuales se muestra el Estudio de Composición de los Residuos Sólidos del Distrito de Comas. Este estudio ha sido tomado como base para la composición de los residuos sólidos de las celdas piloto del proyecto del presente documento y corresponde a las características siguientes:

**Tabla 4.1: Composición Física de los Residuos Sólidos domiciliarios del Distrito de Comas**

Número	Componente	%
1	Papel y Cartón	14
2	Materia orgánica	34
3	Metales	3
4	Plástico	12
5	Trapos	3
6	Vidrio	2
7	Pañales desechables	3
8	Inertes	29
<b>Total</b>		<b>100</b>

Fuente: ONG Alternativa



**Fig. Nº 4.6.1: Composición de los Residuos Sólidos Domiciliarios del Distrito de Comas**

En base a las características de la composición mostrada (Residuos sólidos del distrito de Comas) y de acuerdo al grado de compactación preestablecido (0.50 - 0.70 Tn/m<sup>3</sup>), se consideraron las siguientes proporciones en peso para cada una de las celdas piloto:

**Tabla N° 4.2: Composición Física de los Residuos Sólidos en las Celdas Piloto**

N°	COMPONENTE	CELDA N° 01		CELDA N° 02	
		PESO (Kg)	%	PESO (Kg)	%
1	Papel y Cartón	97	14	94	14
2	Materia Organica	236	34	230	34
3	Metales	21	3	20	3
4	Plásticos	83	12	81	12
5	Trapos	21	3	20	3
6	Vidrios	14	2	13	2
7	Pañales Desechables	21	3	20	3
8	Materiales Inertes	202	29	195	29
<b>TOTALES</b>		<b>695</b>	<b>100</b>	<b>673</b>	<b>100</b>

#### 4.6.2. Selección y Acondicionamiento de la Capa de Residuos Sólidos Domésticos:

Para obtener una muestra representativa de residuos sólidos se eligió una muestra de aproximadamente dos toneladas, tomadas de un camión recolector tipo baranda que realizaba operaciones de recolección para la Municipalidad del Distrito de Comas y cuya disposición final la realizaba en el Relleno Sanitario de Ancón (CASREN).



**Foto N° 4.6.1: Inicio de la Descarga de Residuos Sólidos.**



**Foto N° 4.6.2: Descarga de Residuos Sólidos, haciendo uso de rastrillos.**

A partir de esta muestra se han realizado las operaciones siguientes:

- ☞ La muestra elegida fue esparcida en una membrana plástica sobre la cual se realizó un cuarteo a fin de permitir un mejor manejo y segregación de los residuos sólidos.



**Foto N° 4.6.3: Previo a la clasificación de los residuos sólidos se realizó un cuarteo para tener una muestra más manejable.**



- ☞ Se realizó la segregación manual de los componentes según la clasificación propuesta en la Tabla N° 4.2:



**Fig. N° 4.6.4: Materiales segregados:**

1. Papel y Cartón: 14%
2. Metales: 3%
3. Vidrio: 2%
4. Inertes: 29%



**Foto N° 4.6.5: Materiales segregados:**  
5. **Materia Orgánica: 29%**  
6. **Plásticos: 12%**  
7. **Pañales: 3%**  
8. **Trapos: 3%**

- ☞ Las fracciones segregadas fueron trasladadas hasta el lugar de ubicación de las Celdas piloto y pesadas antes de ser dispuestas, manteniendo en todo momento la proporción propuesta para los diferentes componentes. Obteniendo al final de la jornada los pesos, porcentajes y grados de compactación mostrados en la Tabla N° 4.2.



**Foto N° 4.6.6: Pesaje de las fracciones segregadas previo a su disposición en las Celdas piloto.**

- ☞ Una vez realizados la segregación y el pesaje de los residuos sólidos domésticos, se procedió a su disposición en las celdas piloto, teniendo en consideración:

Se propusieron tres capas de 0.40, 0.30 y 0.30 metros de espesor en forma ascendente, a fin de garantizar un adecuado control en los parámetros de composición y compactación requeridos.

Cada capa en forma independiente, mantiene los pesos antes mostrados de cada uno de los componentes, garantizando una composición homogénea.

#### 4.7. PRUEBAS REALIZADAS

De acuerdo al emplazamiento en el que tuvieron lugar las distintas pruebas, se han clasificado en el siguiente orden:

**4.7.1 PRUEBAS DE CAMPO:** Están referidas a aquellas que tuvieron lugar en los ambientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI -UNITRAR

##### **A) Prueba Hidráulica:**

Esta prueba fue realizada a fin de determinar el grado de hermeticidad en paredes e interconexiones de la estructura de las celdas piloto y así garantizar la minimización de pérdidas en el volumen de lixiviados producidos en el ensayo propiamente dicho.

Para la realización de esta prueba, se llenaron las celdas piloto con agua por un lapso de dos días, comprobando así la funcionalidad hermética de las estructuras contraídas.



**Foto N° 4.7.1: Prueba Hidráulica.**

**B) Medición De Asentamientos:**

Estas pruebas han sido realizadas en función a la instalación de nueve puntos de monitoreo, ubicados en la superficie de la cobertura de las Celdas piloto.

El monitoreo de los asentamientos ha sido realizado con una frecuencia semanal en un periodo de tiempo comprendido entre el 02 de agosto del 2005, hasta el 04 de marzo del 2006, acumulando un periodo efectivo de siete meses. (Ver resultados en el Capítulo V).

Esta prueba ha sido realizada con ayuda de herramientas manuales consistentes en:

- ✓ **01 Plomada:** Usada para garantizar mayor precisión en la medición de los desplazamientos verticales.
- ✓ **01 Wincha:** A partir de la cual se precisaron las mediciones en unidades métricas.
- ✓ **Regla Metálica:** Usada a fin de garantizar las mediciones a partir de un mismo punto a partir de la vertical.



**Foto N° 4.7.2: Materiales usados en la medición de asentamientos en las Celdas Piloto.**

**C) Recirculación de Lixiviados:**

Estas pruebas han sido realizadas a partir de la toma de muestras a la salida de de los lixiviados a través de las válvulas de control instalada en la parte inferior de las Celdas piloto.

Las muestras colectadas han sido devueltas a la celda destinada para la recirculación de los lixiviados (Celda N° 01), en el caso de la celda sin recirculación (Celda N° 02), las muestras colectadas han sido desechadas.



**Foto N° 4.7.3: Distribución de las celdas piloto**

De acuerdo a la fotografía N° 4.7.3., se puede observar al lado izquierdo la celda preparada para la recirculación de lixiviados, al lado derecho la celda sin recirculación y en la parte inferior de cada una las válvulas de control para la toma de muestras.

La recirculación de los lixiviados ha sido realizada con una frecuencia semanal en un periodo de tiempo comprendido entre el 09 de diciembre del 2005, hasta el 03 de marzo del 2006, acumulando un periodo efectivo de doce semanas. (Ver resultados en el Capítulo V).

El proceso de recirculación ha sido realizado usando materiales plásticos, consistentes en:

- ✓ 01 Embudo Plástico
- ✓ 01 Vaso de Precipitado de Plástico 1.0 Lts
- ✓ Recipientes para recolección de lixiviados (baldes y similares).
- ✓ Guantes de jebe.



**Foto N° 4.7.4: Materiales usados para la recirculación de lixiviados.**

Los lixiviados producidos durante periodos semanales, en primera instancia han sido recolectados en cubetas plásticas. Una vez cesada la recolección, con la ayuda del embudo y vaso de precipitado se procedió a la disposición de lixiviados en las celdas piloto a través de las tuberías de distribución.



**Foto N° 4.7.5: Recolección del lixiviado generado en la Celda Piloto.**



**Foto N° 4.7.6: Recirculación manual de los lixiviados en las celdas a través de las tuberías de distribución.**



**D) Determinación de Ph y Temperatura de los Lixiviados:** Estas magnitudes, han sido determinadas mediante el uso de un peachímetro y un termómetro, durante la realización de la recolección de las muestras previo a su análisis en el laboratorio.

El monitoreo de estos parámetros ha sido realizado con frecuencia semanal en un periodo de tiempo comprendido entre el 09 de diciembre del 2005, hasta el 03 de marzo del 2006, acumulando un periodo efectivo de doce semanas. (Ver resultados en el Capítulo V).

**E) Determinación de la Temperatura Ambiental:** La temperatura ambiental en el área de trabajo, ha sido obtenida mediante el uso de un termómetro ambiental ubicado en la parte central de la Celda N° 02.

El monitoreo de este parámetro ha sido realizado con frecuencia diaria en un periodo de tiempo comprendido entre el 09 de diciembre del 2005, hasta el 16 de marzo del 2006, acumulando un periodo efectivo de catorce semanas. (Ver resultados en el Capítulo V).



**Foto N° 4.7.4: Termómetro ambiental ubicado en la Celda N° 02.**

**4.7.2 PRUEBAS DE LABORATORIO:** Están referidas a aquellas que tuvieron lugar en los ambientes del Laboratorio N° 20 de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI, entre los que mencionamos:

✓ **Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O):**

La DBO, se define usualmente como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias mientras reestabiliza la materia orgánica putrescible bajo condiciones aeróbicas.

La determinación de este parámetro ha sido realizado a través de resultados preliminares de oxígeno disuelto, mediante el método de Winkler.

Esta prueba depende del factor que el oxígeno oxida  $Mn^{++}$  a un alto estado de valencia bajo condiciones alcalinas y que el Mn en alto de valencia es capaz de oxidar  $I^-$  a  $I_2$  libre, bajo condiciones ácida. Así la cantidad de  $I_2$  libre liberado es equivalente al OD originalmente presente disuelto en la sustancia líquida. El Yodo libre se titula con una solución valorada de tiosulfato de sodio empleando almidón como indicador.

Se ajusta la normalidad del tiosulfato para que 1ml equivalga a 1mg/lit de OD, cuando se titula 200 ml de la muestra.

Obtenidos los resultados de oxígeno disuelto requeridos al inicio y final de un periodo de incubación de cinco días, la DBO es obtenida mediante:

$$DBO \text{ (mg/lit)} = ((ODb - ODi) * (\text{Vol. de botella/ml de muestra}))$$

Donde:

ODb = Oxígeno disuelto del blanco, a fin del periodo de incubación

ODi = Oxígeno disuelto en la dilución de muestra al fin del periodo de incubación

✓ **Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.)**

La DQO, es la medida del oxígeno equivalente a la porción de materia orgánica de la muestra susceptible a oxidación por una oxidante químico fuerte, sin la intervención de organismos vivos.

En el presente estudio la determinación se ha realizado en función a diluciones debido a las características de la muestra por presentar elevada fracción orgánica y a través de sustancias reductoras contenidas en los denominados viales de alto rango.

Un mililitro de la muestra diluida se coloca al interior de los viales a fin de promover la reacción que tornará a la sustancia a un color celeste para luego de dos horas dar la lectura con el equipo de espectrofotometría.

El calculo de la DQO, resulta del producto entre del factor de dilución y la lectura obtenida del equipo después de dos horas.

✓ **Determinación de Sólidos**

- **Sólidos Totales (ST):** La determinación de sólidos totales ha sido realizada por evaporación y secado de una muestra medida en una cápsula de porcelana previamente tarada. Estrictamente a este parámetro le corresponde toda la materia exceptuando el agua contenida en materiales líquidas.
- **Sólidos Disueltos (SD):** Este componente de los sólidos esta constituido principalmente por sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos.

- **Sólidos Suspendidos (SS):** Esta determinación es de gran valor en los análisis de aguas poluídas. Es uno de los mayores parámetros usados para evaluar la concentración de desagües y para determinar la eficiencia del tratamiento aplicado al tratamiento. Este parámetro es considerado plenamente tan significativo como la DBO.

Los sólidos suspendidos son determinados mediante filtración usando papel filtro y pasando a través de este 50ml o menos de la muestra en estudio.

El filtrado es recibido en un crisol Goch y es sometido a evaporación.

Los sólidos suspendidos resultan de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos contenidos en el filtrado.

- **Sólidos Fijos y Volátiles:** El principal objetivo que se persigue al realizar la determinación de sólidos en desagües, es obtener una medida de la cantidad orgánica presente. Esta prueba es realizada por combustión, en el que la materia orgánica es convertida en anhídrido carbónico y agua, mientras que la temperatura es controlada para prevenir la descomposición y volatilización de las sustancias inorgánicas tanto como sean consistentes con oxidación completa de la materia orgánica. La pérdida de peso se interpreta en términos de materia orgánica.

El procedimiento normal es el de llevar la ignición a 600 °C, esta es la menor temperatura cerca al cual la materia orgánica, particularmente residuos de carbón resultan de la descomposición química por el calor de carbohidratos y otras materias orgánicas.

## CAPITULO V

### RESULTADOS OBTENIDOS

#### 5.1 RESULTADOS DE MEDICIONES DE TEMPERATURA AMBIENTAL

Las mediciones de la temperatura ambiental se realizaron utilizando un termómetro (Ver Foto N° 5.1) y se iniciaron el 09 de Diciembre del 2005 y culminaron el 16 de Marzo del 2006.

El monitoreo de los lixiviados se realizó durante ésta época del año debido a que las temperaturas elevadas tendrían una mayor incidencia en la aceleración de la degradación de la materia orgánica presente en el Relleno Sanitario Piloto.

Las mediciones se realizaban alrededor de las 12:00 pm y generalmente de lunes a viernes. Los valores obtenidos se muestran en el Cuadro N° 5.1.

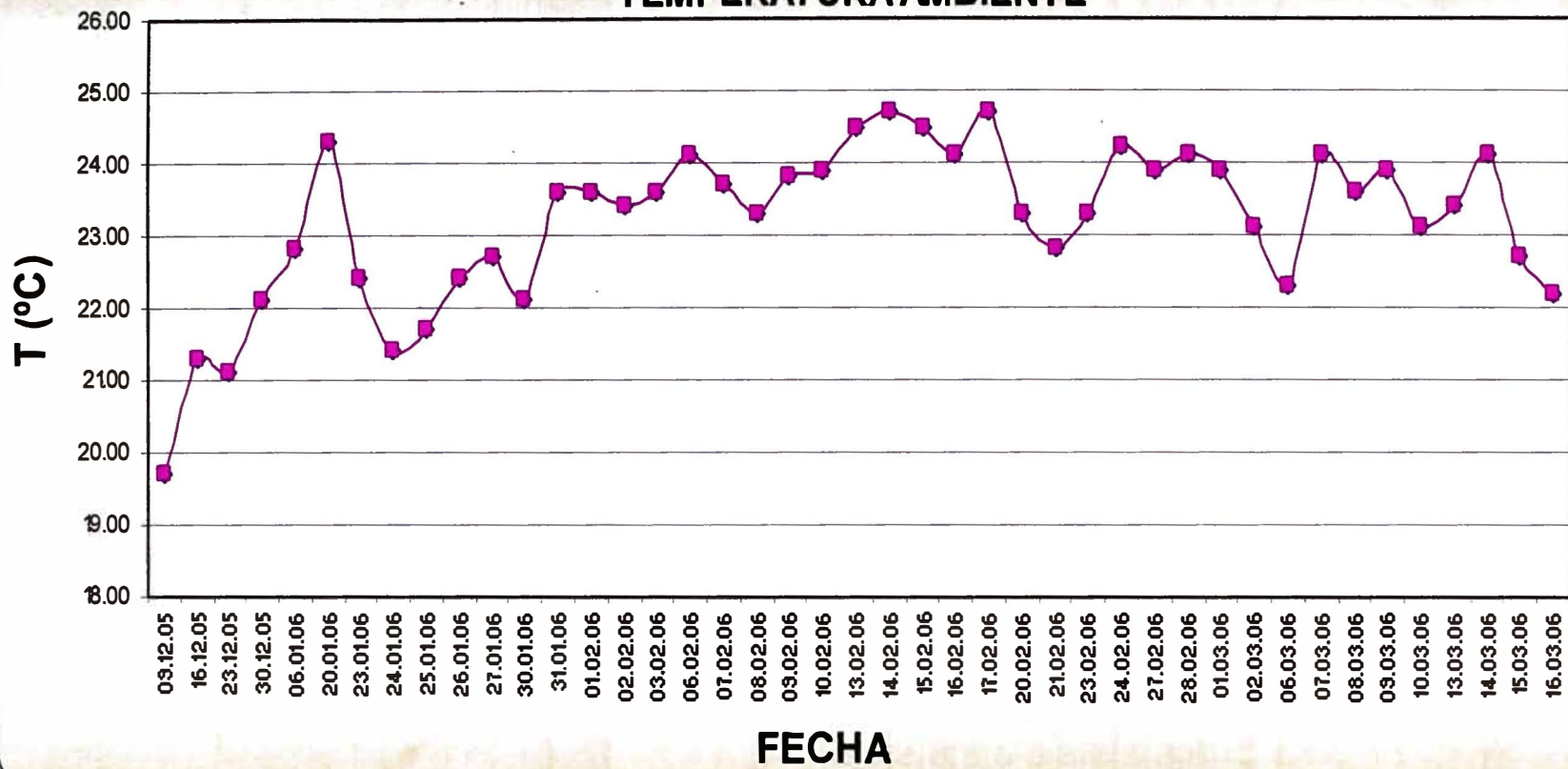


Foto 5.1.1 Termómetro instalado en el Relleno Sanitario Piloto

**Cuadro 5.1.1**  
**TEMPERATURA AMBIENTAL**

<b>Nº</b>	<b>DIA</b>	<b>FECHA</b>	<b>Tº</b>
1	Viernes	09.12.05	19.70
2	Viernes	16.12.05	21.30
3	Viernes	23.12.05	21.10
4	Viernes	30.12.05	22.10
5	Viernes	06.01.06	22.80
7	Viernes	20.01.06	24.30
8	Lunes	23.01.06	22.40
9	Martes	24.01.06	21.40
10	Miércoles	25.01.06	21.70
11	Jueves	26.01.06	22.40
12	Viernes	27.01.06	22.70
13	Lunes	30.01.06	22.10
14	Martes	31.01.06	23.60
15	Miércoles	01.02.06	23.60
16	Jueves	02.02.06	23.40
17	Viernes	03.02.06	23.60
18	Lunes	06.02.06	24.10
19	Martes	07.02.06	23.70
20	Miércoles	08.02.06	23.30
21	Jueves	09.02.06	23.80
22	Viernes	10.02.06	23.90
23	Lunes	13.02.06	24.50
24	Martes	14.02.06	24.70
25	Miércoles	15.02.06	24.50
26	Jueves	16.02.06	24.12
27	Viernes	17.02.06	24.70
28	Lunes	20.02.06	23.30
29	Martes	21.02.06	22.80
31	Jueves	23.02.06	23.30
32	Viernes	24.02.06	24.22
33	Lunes	27.02.06	23.90
34	Martes	28.02.06	24.10
35	Miércoles	01.03.06	23.90
36	Jueves	02.03.06	23.10
38	Lunes	06.03.06	22.30
39	Martes	07.03.06	24.10
40	Miércoles	08.03.06	23.60
41	Jueves	09.03.06	23.90
42	Viernes	10.03.06	23.10
43	Lunes	13.03.06	23.40
44	Martes	14.03.06	24.10
45	Miércoles	15.03.06	22.70
46	Jueves	16.03.06	22.20

### TEMPERATURA AMBIENTE



## 5.2 RESULTADOS DE LA MEDICION DE LA TEMPERATURA DEL LIXIVIADO PRODUCIDO

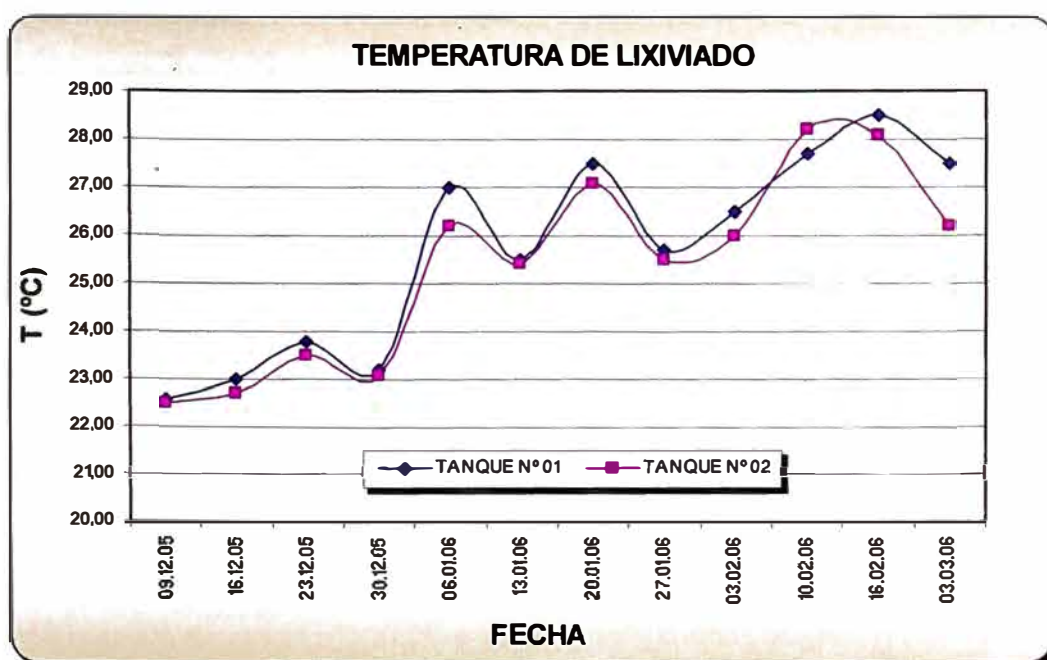
A continuación se muestra los resultados de las temperaturas medidas en los lixiviados de ambos tanques.

Cuadro 5.2.1

### TEMPERATURA DE LIXIVIADO

Nº	DIA	FECHA	TANQUE Nº 01	TANQUE Nº 02
1	Viernes	09.12.05	22,60	22,50
2	Viernes	16.12.05	23,00	22,70
3	Viernes	23.12.05	23,80	23,50
4	Viernes	30.12.05	23,20	23,10
5	Viernes	06.01.06	27,00	26,20
6	Viernes	13.01.06	25,50	25,40
7	Viernes	20.01.06	27,50	27,10
8	Viernes	27.01.06	25,70	25,50
9	Viernes	03.02.06	26,50	26,00
10	Viernes	10.02.06	27,70	28,20
11	Jueves	16.02.06	28,50	28,10
12	Viernes	03.03.06	27,50	26,20

Como se puede apreciar la temperatura producida por el lixiviado del tanque Nº 01, es mayor que la producida por el tanque Nº 02.





### 5.3 RESULTADOS DE LA MEDICION DEL PH DEL LIXIVIADO PRODUCIDO

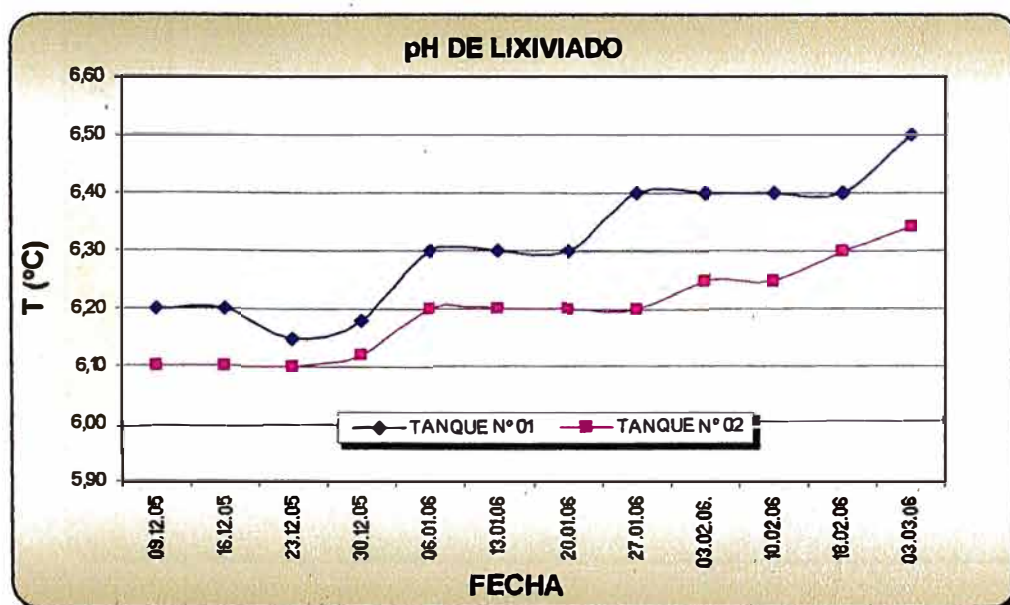
A continuación se muestra los resultados de pH medidos en los lixiviados de ambos tanques.

**Cuadro 5.3.1**

#### pH DE LIXIVIADO

Nº	DIA	FECHA	TANQUE N° 01	TANQUE N° 02
1	Viernes	09.12.05	6,20	6,10
2	Viernes	16.12.05	6,20	6,10
3	Viernes	23.12.05	6,15	6,10
4	Viernes	30.12.05	6,18	6,12
5	Viernes	06.01.06	6,30	6,20
6	Viernes	13.01.06	6,30	6,20
7	Viernes	20.01.06	6,30	6,20
8	Viernes	27.01.06	6,40	6,20
9	Viernes	03.02.06.	6,40	6,25
10	Viernes	10.02.06	6,40	6,25
11	Jueves	16.02.06	6,40	6,30
12	Viernes	03.03.06	6,50	6,34

Como se puede apreciar el pH del lixiviado producido en ambos tanques va incrementándose a través del tiempo; es necesario señalar que el pH del lixiviado en el Tanque N° 01 es mayor que el del Tanque N° 02.



#### 5.4 RESULTADOS DE LA MEDICION DE LA DBO DEL LIXIVIADO PRODUCIDO

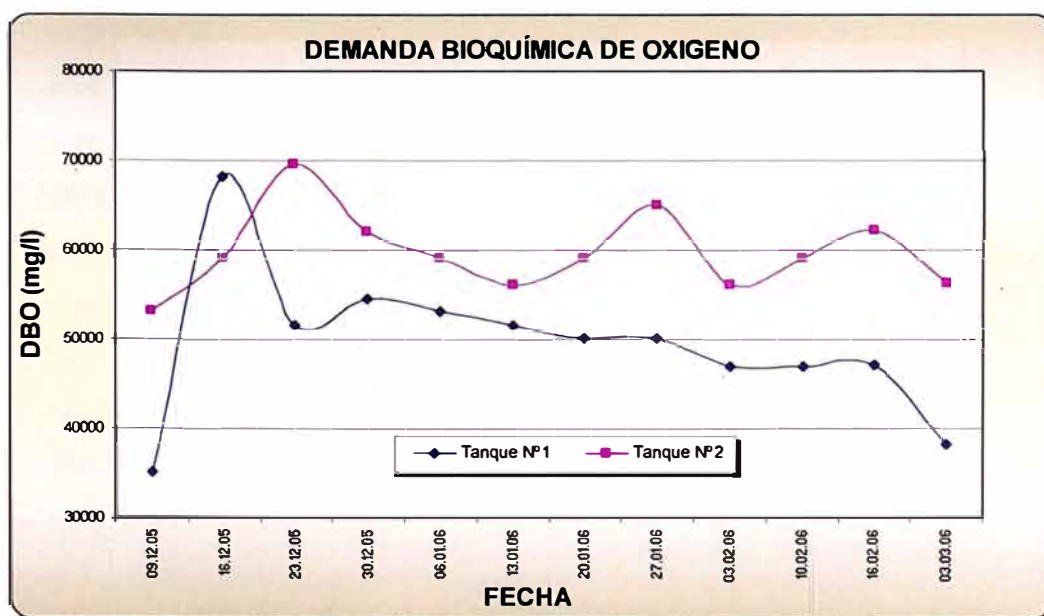
A continuación se muestra los resultados de la DBO medidos en los lixiviados de ambos tanques.

Cuadro 5.4.1

#### DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

Nº	DIA	FECHA	TANQUE Nº 01	TANQUE Nº 02
1	Viernes	09.12.05	35160	53160
2	Viernes	16.12.05	68190	59180
3	Viernes	23.12.05	51650	69700
4	Viernes	30.12.05	54620	62120
5	Viernes	06.01.06	53130	59130
6	Viernes	13.01.06	51580	56080
7	Viernes	20.01.06	50180	59160
8	Viernes	27.01.06	50110	65110
9	Viernes	03.02.06	47100	56150
10	Viernes	10.02.06	47100	59130
11	Jueves	16.02.06	47260	62270
12	Viernes	03.03.06	38200	56300

Los valores de la DBO de ambos lixiviados van en descenso, aunque podemos apreciar que la DBO del lixiviado del Tanque Nº 01 disminuye con mayor velocidad respecto al lixiviado del Tanque Nº 02.



## 5.5 RESULTADOS DE MEDICIONES DE LA DQO DEL LIXIVIADO PRODUCIDO

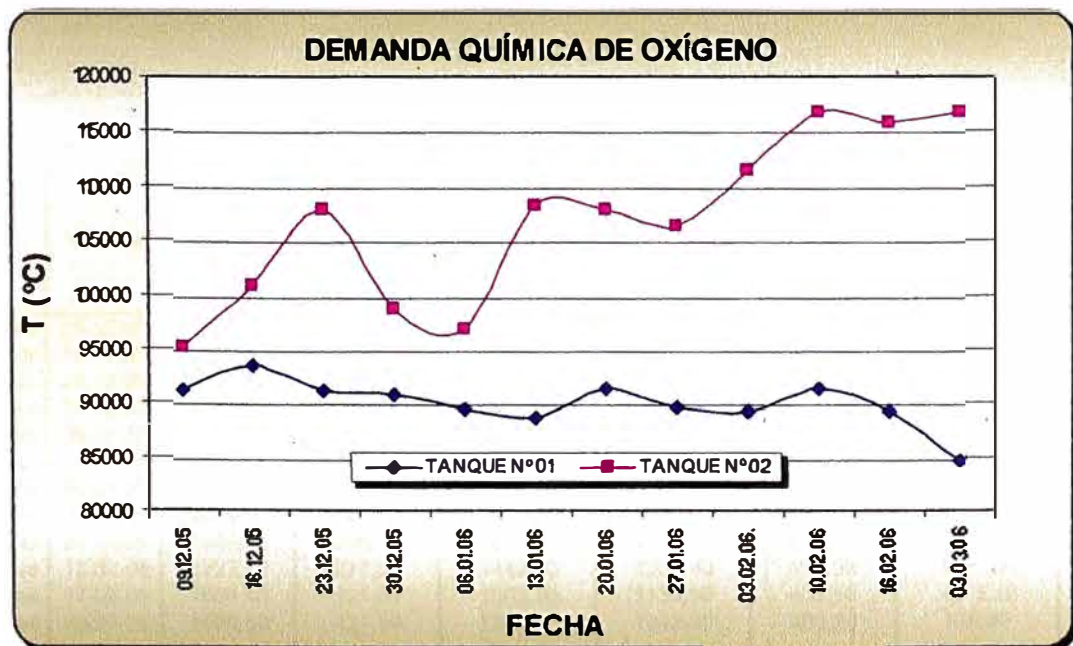
A continuación se muestra los resultados de la DQO medidas en los lixiviados producidos en ambos tanques:

**Cuadro 5.5.1**

### DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Nº	DIA	FECHA	TANQUE N° 01	TANQUE N° 02
1	Viernes	09.12.05	91400	95400
2	Viernes	16.12.05	93600	101000
3	Viernes	23.12.05	91400	108000
4	Viernes	30.12.05	91000	99000
5	Viernes	06.01.06	89600	97000
6	Viernes	13.01.06	89000	108400
7	Viernes	20.01.06	91600	108000
8	Viernes	27.01.06	89800	106600
9	Viernes	03.02.06.	89400	111600
10	Viernes	10.02.06	91600	117000
11	Jueves	16.02.06	89400	116000
12	Viernes	03.03.06	85000	117000

Los valores de la DQO del lixiviado del Tanque N° 01 va en decremento a través del tiempo, mientras que la del Tanque N° 02 va en ascenso.



## 5.6 RESULTADOS DE MEDICIONES DE LOS SÓLIDOS EN EL LIXIVIADO PRODUCIDO

Se han realizado mediciones de Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos, Sólidos Disueltos, Sólidos Volátiles y Fijos. A continuación se muestran los resultados de dichas mediciones en ambas Celdas:

**Cuadro 5.6.1**

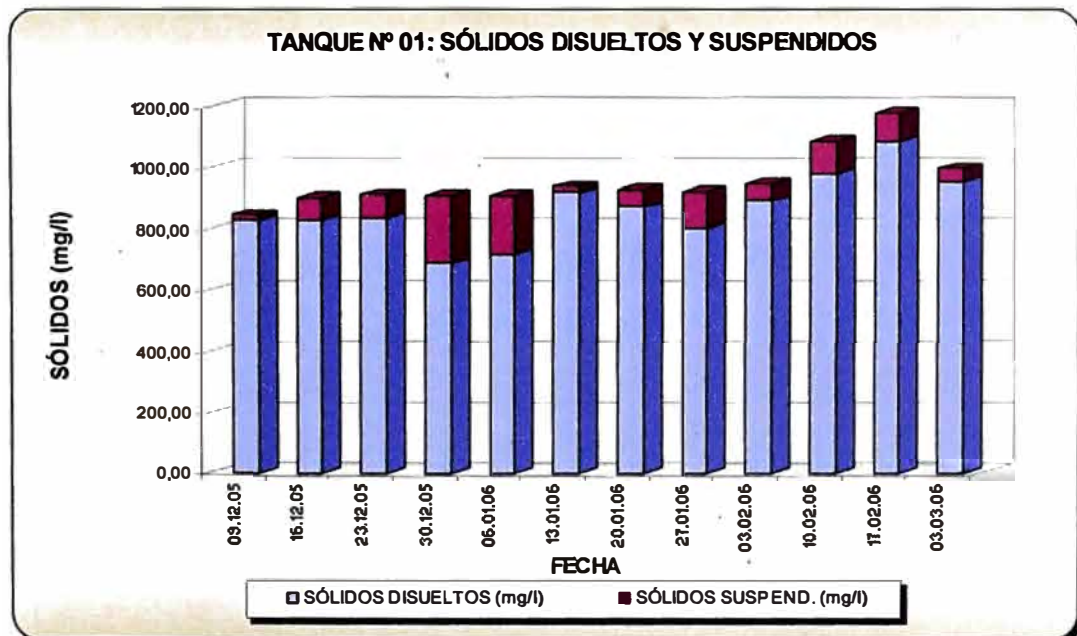
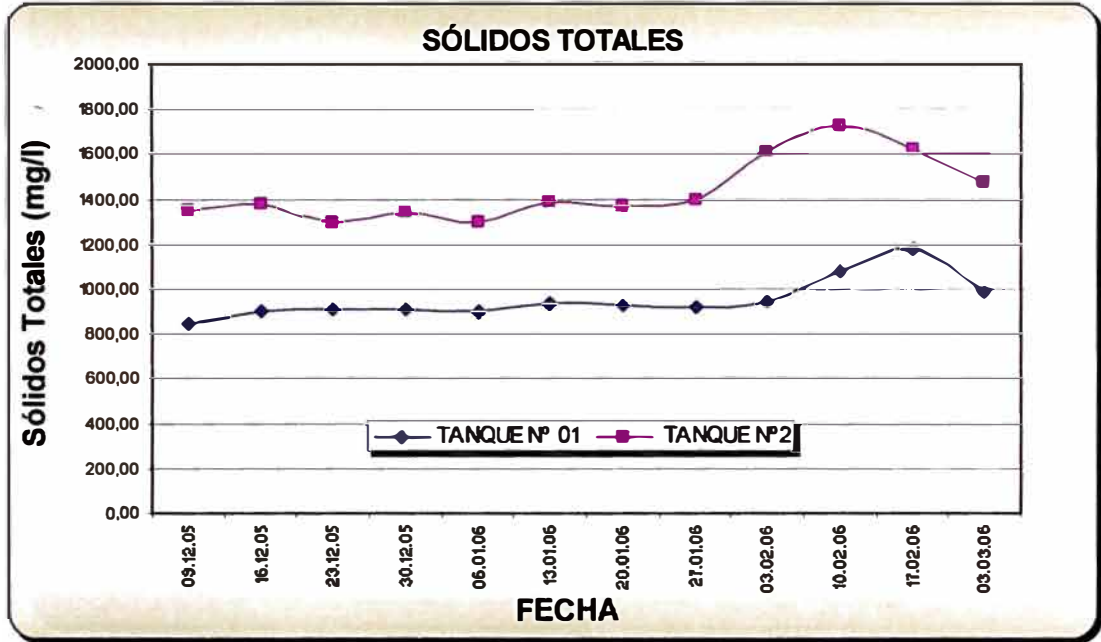
### Resultados de las Mediciones de Sólidos en la Celda N°1

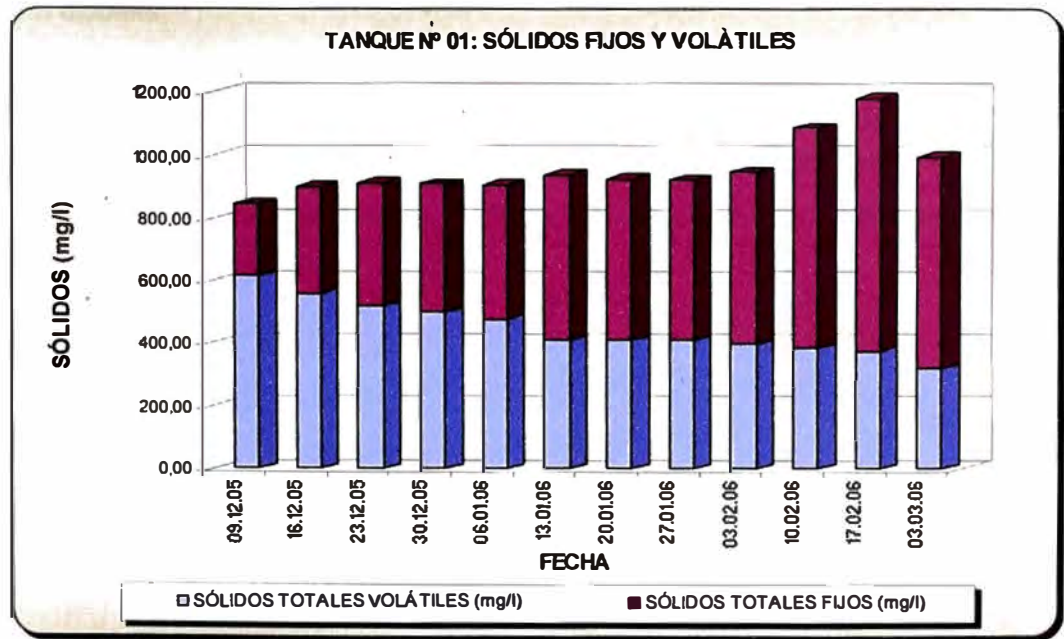
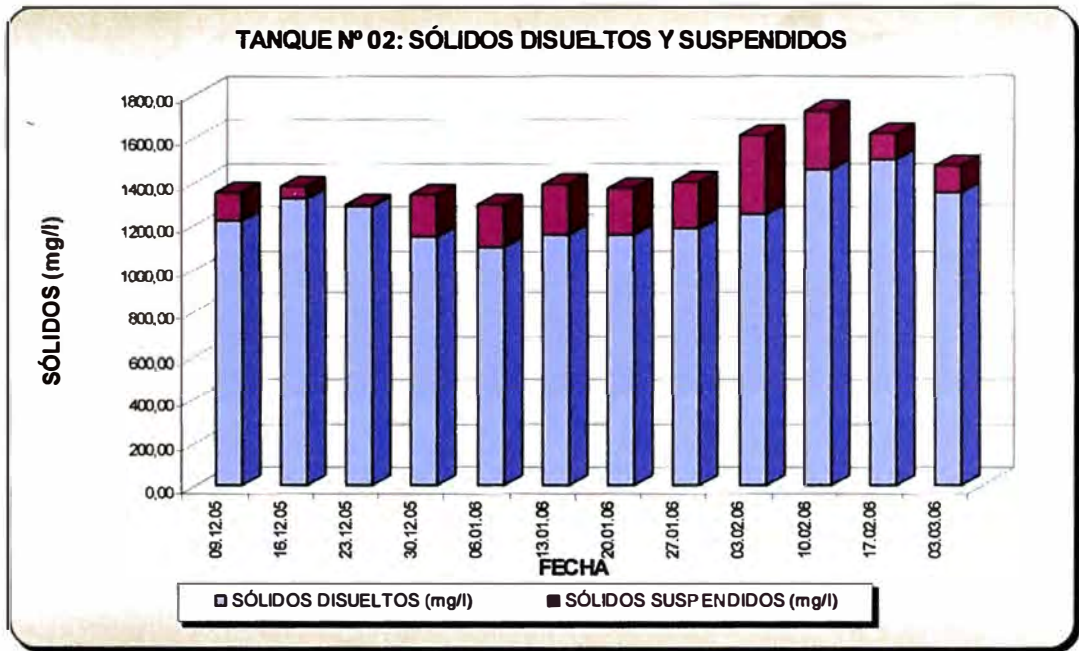
N°	DIA	FECHA	TANQUE N° 01						
			SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	SÓLIDOS SUSPEND. (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS (mg/l)	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES (mg/l)	SÓLIDOS TOTALES FIJOS (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS VOLÁTILES (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS FIJOS (mg/l)
1	Viernes	09.12.05	844,40	19,00	825,40	613,00	231,40	587,20	238,20
2	Viernes	16.12.05	898,50	71,60	826,90	557,40	341,10	562,80	264,10
3	Viernes	23.12.05	909,30	74,20	835,10	517,60	391,70	539,30	295,80
4	Viernes	30.12.05	905,70	219,30	686,40	497,40	408,30	528,30	158,10
5	Viernes	06.01.06	904,60	190,19	714,41	474,90	429,70	519,01	195,40
6	Viernes	13.01.06	935,00	18,20	916,80	408,40	526,60	496,50	420,30
7	Viernes	20.01.06	924,60	55,90	868,70	407,10	517,50	482,60	386,10
8	Viernes	27.01.06	918,70	117,90	800,80	408,00	510,70	436,30	364,50
9	Viernes	03.02.06	944,10	55,40	888,70	394,90	549,20	406,50	482,20
10	Viernes	10.02.06	1084,90	106,80	978,10	381,60	703,30	401,90	576,20
11	Viernes	17.02.06	1177,30	95,20	1082,10	372,70	804,60	420,40	661,70
12	Viernes	03.03.06	995,00	42,60	952,40	317,50	677,50	444,90	507,50

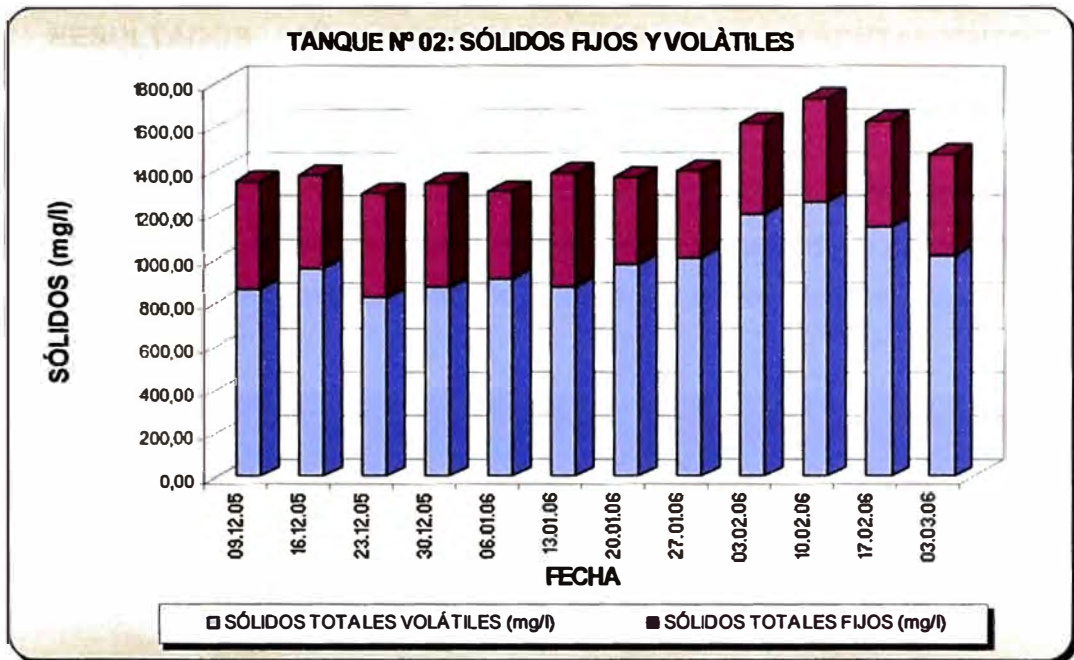
**Cuadro 5.6.2**

### Resultados de las Mediciones de Sólidos en la Celda N°2

N°	DIA	FECHA	TANQUE N° 02						
			SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	SÓLIDOS SUSPEND. (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS (mg/l)	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES (mg/l)	SÓLIDOS TOTALES FIJOS (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS VOLÁTILES (mg/l)	SÓLIDOS DISUELTOS FIJOS (mg/l)
1	Viernes	09.12.05	1352,80	127,60	1225,20	859,20	493,60	787,40	437,80
2	Viernes	16.12.05	1375,60	48,40	1327,20	951,70	423,90	931,10	396,10
3	Viernes	23.12.05	1292,90	5,60	1287,30	814,40	478,50	784,00	503,30
4	Viernes	30.12.05	1340,60	192,20	1148,40	861,70	478,90	722,60	425,80
5	Viernes	06.01.06	1299,70	199,30	1100,40	905,90	393,80	709,90	390,50
6	Viernes	13.01.06	1386,10	230,70	1155,40	867,40	518,70	504,20	651,20
7	Viernes	20.01.06	1368,10	214,50	1153,60	971,00	397,10	828,60	325,00
8	Viernes	27.01.06	1400,50	214,70	1185,80	998,80	401,70	651,40	534,40
9	Viernes	03.02.06	1616,30	366,10	1250,20	1198,00	418,30	939,30	310,90
10	Viernes	10.02.06	1727,20	277,80	1449,40	1256,90	470,30	1031,90	417,50
11	Viernes	17.02.06	1624,40	121,60	1502,80	1139,30	485,10	1017,10	485,70
12	Viernes	03.03.06	1475,50	121,90	1353,60	1012,30	463,20	939,50	414,10







La Celda N°2 presenta mayor contenido de Sólidos Totales durante todo el experimento, en comparación con la Celda N°1. Además podemos observar según los gráficos presentados, que los sólidos presentes en el lixiviado generado en ambas Celdas Piloto son en su mayor porcentaje provenientes de materia disuelta.

En cuanto a las mediciones de sólidos fijos y volátiles, notamos claramente que mientras en la Celda N°1, los sólidos volátiles tienden a disminuir, producto de la remoción de la materia orgánica, en la Celda N°2, los valores no obedecen a un comportamiento homogéneo.

## 5.7 RESULTADOS DE MEDICIONES DE LOS ASENTAMIENTOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO PILOTO

Como ya se indicó en el capítulo anterior, la medición de asentamientos se realizó con la ayuda de una plomada, wincha, y una regla de metal. A continuación se muestran fotos de la medición en los Rellenos Sanitarios Pilotos:

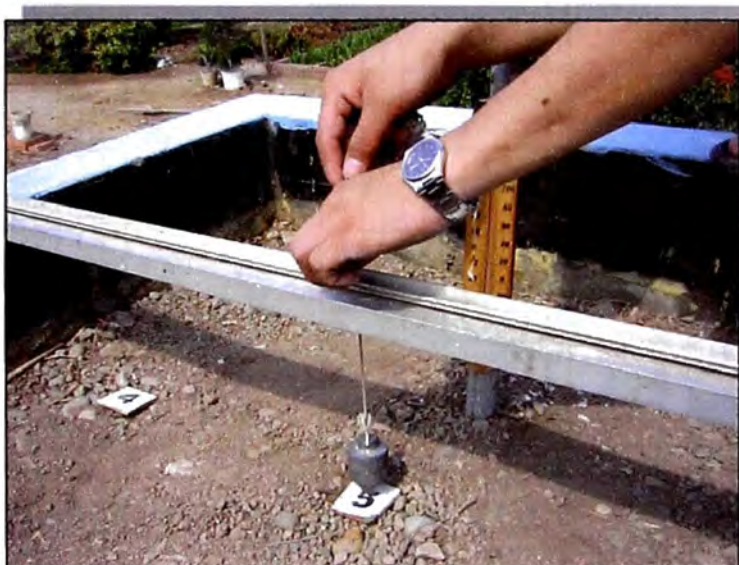


Foto 5.7.1 Medición de asentamientos en las celdas piloto.



Foto 5.7.2 La medición de asentamientos se realizó en cada uno de los puntos ubicados en las celdas piloto.



TANQUE N° 1

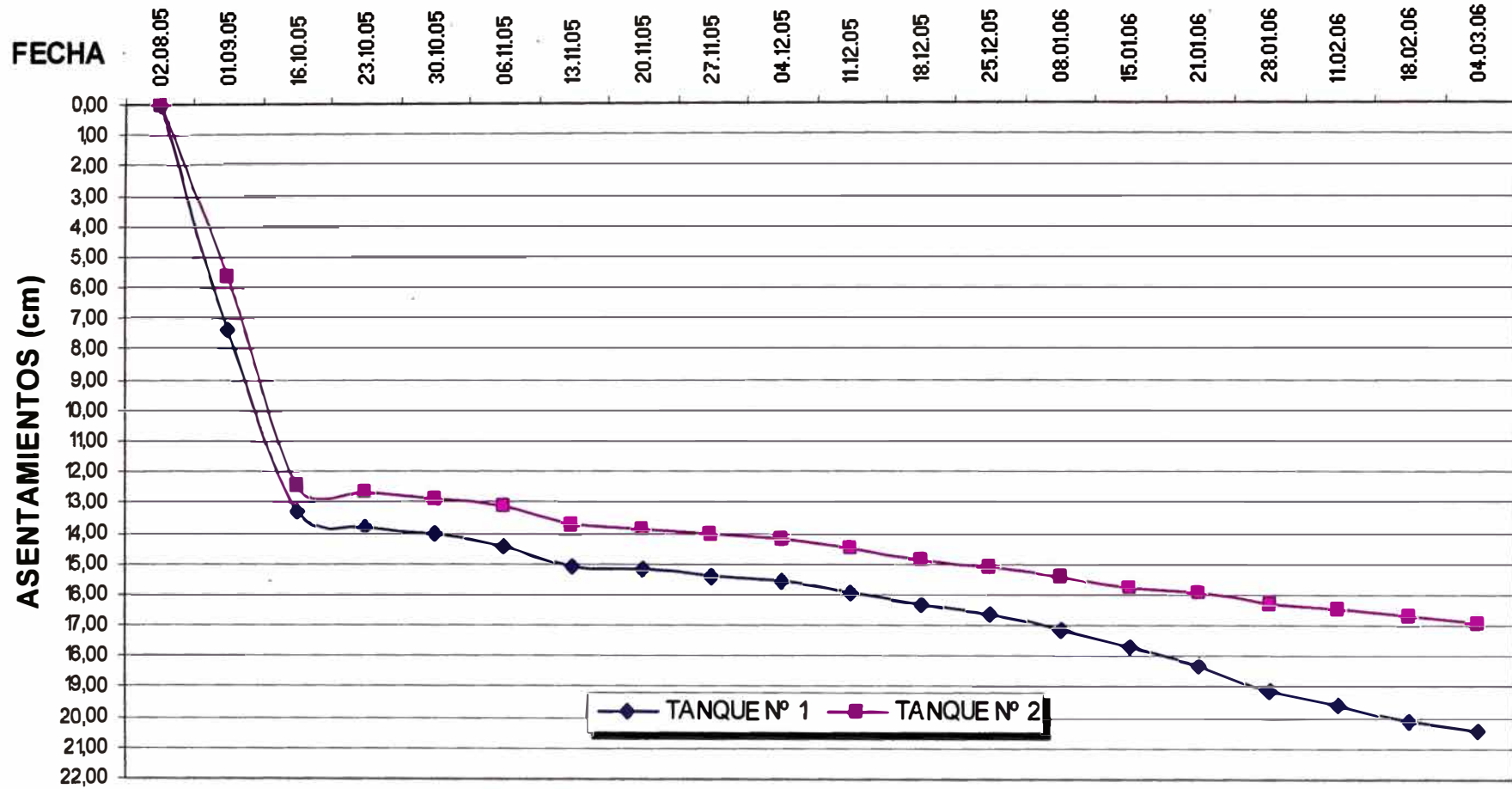
PUNTO N°	TANQUE N° 1	02.08.05	01.09.05	18.10.05	23.10.05	30.10.05	06.11.05	13.11.05	20.11.05	27.11.05	04.12.05	11.12.05	18.12.05	25.12.05	08.01.06	15.01.06	21.01.06	28.01.06	11.02.06	18.02.06	04.03.06
1	1	0.00	5.05	11.70	11.50	12.20	12.30	13.10	13.3	13.5	13.60	13.14	14.20	14.60	14.80	15.30	15.60	22.50	18.80	17.20	17.90
2	1	0.00	6.40	12.50	12.70	13.00	13.10	13.40	13.6	13.9	14.20	14.70	15.20	15.20	15.50	15.80	16.20	22.80	17.10	17.50	18.00
3	1	0.00	8.10	14.10	14.70	14.80	15.40	15.40	15.6	15.9	16.30	16.90	16.90	16.90	17.00	17.40	17.70	24.30	18.90	19.20	20.50
4	1	0.00	7.10	13.30	13.70	14.00	14.20	14.60	14.7	14.8	14.90	15.70	15.70	15.90	16.20	18.50	16.90	24.00	18.60	19.00	20.40
5	1	0.00	7.50	13.20	14.20	14.20	14.80	14.80	14.8	15.2	15.20	15.30	15.70	15.80	16.30	16.60	17.00	23.60	18.20	18.50	19.90
6	1	0.00	7.50	13.40	13.70	14.30	14.70	15.40	15.5	15.8	16.00	16.40	16.80	16.80	17.10	17.60	17.80	24.60	18.70	19.40	20.30
7	1	0.00	8.10	14.10	14.60	14.70	14.90	16.20	16.5	16.9	17.20	17.50	18.00	18.40	18.50	18.90	19.30	26.00	20.20	20.60	21.60
8	1	0.00	8.40	14.40	14.70	14.80	15.60	16.80	16.8	16.9	16.90	17.30	17.40	18.00	18.10	18.20	18.40	25.00	19.30	19.70	21.30
9	1	0.00	7.90	13.10	14.20	14.30	14.80	15.90	15.8	15.9	16.00	16.60	16.90	16.90	17.10	17.40	17.70	24.50	18.60	19.20	20.30
		0.06	7.34	13.31	13.78	14.03	14.42	16.07	16.18	16.42	16.69	16.95	16.31	16.60	16.73	17.08	17.40	24.14	18.48	18.92	20.02

TANQUE N° 2

PUNTO N°	TANQUE N° 2	02.08.05	01.09.05	18.10.05	23.10.05	30.10.05	06.11.05	13.11.05	20.11.05	27.11.05	04.12.05	11.12.05	18.12.05	25.12.05	08.01.06	15.01.06	21.01.06	28.01.06	11.02.06	18.02.06	04.03.06
1	2	0.00	3.50	11.10	10.80	11.10	11.40	11.60	11.8	12.5	12.90	12.80	13.20	13.20	13.40	13.90	14.30	21.30	15.10	15.70	16.10
2	2	0.00	5.60	12.80	12.90	13.10	13.40	13.30	13.5	13.9	14.20	14.40	14.70	15.30	15.70	15.90	16.10	22.70	16.70	17.00	17.90
3	2	0.00	6.40	13.50	13.60	13.70	14.20	14.40	14.6	14.9	15.30	15.70	15.90	16.10	16.30	16.60	16.80	23.60	17.80	17.80	18.90
4	2	0.00	4.40	11.20	11.40	11.80	11.90	13.20	13.4	13.3	13.30	13.80	14.30	14.40	14.70	14.90	15.40	21.90	16.20	16.20	17.10
5	2	0.00	5.60	12.20	12.20	12.40	12.60	13.70	13.7	13.7	13.70	14.20	14.30	14.30	14.50	14.80	15.00	21.80	15.70	16.30	17.30
6	2	0.00	7.40	14.00	14.80	14.60	14.80	15.50	15.5	15.5	15.60	15.90	16.50	16.50	16.90	17.50	17.80	24.50	18.40	18.80	19.30
7	2	0.00	5.10	11.80	12.40	12.60	12.90	13.50	13.6	13.6	13.80	14.20	14.20	14.90	15.40	15.90	16.10	22.70	16.80	17.20	18.10
8	2	0.00	5.20	12.10	12.30	12.60	12.80	13.40	13.5	13.5	13.80	14.30	14.70	14.80	15.20	15.50	15.70	22.50	16.60	16.80	17.00
9	2	0.00	7.10	13.20	13.70	14.00	14.20	15.20	15.2	15.2	15.20	15.20	15.70	16.20	16.50	16.90	17.40	24.40	18.30	19.20	19.70
		0.00	6.69	12.43	12.68	12.88	13.13	13.78	13.87	14.01	14.20	14.50	14.83	15.08	15.40	15.77	16.07	22.82	16.84	17.22	17.93

Según los resultados mostrados, debido al proceso de recirculación realizado en la Celda N°1, se presenta un mayor y acelerado descenso en comparación con la curva de la Celda N°2.

# ASENTAMIENTOS



## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

#### 6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PLAN PILOTO:

##### 6.1.1 TEMPERATURA AMBIENTAL

La temperatura es uno de los factores ambientales más importantes en la digestión anaeróbica, que influye fundamentalmente en la velocidad del metabolismo de las bacterias, asimismo, en la solubilidad de los sustratos, principalmente los lípidos.

En el experimento realizado, los resultados obtenidos para este parámetro oscilan entre los 29°C (registrada el viernes 27 de enero del 2006), y los 47°C (registrado el martes 14 de marzo del 2006). Este rango constituye un factor favorable, puesto que el metabolismo de las bacterias y la solubilidad de los sustratos, constituyen una alta eficiencia para temperaturas por sobre los 20°C y 25°C <sup>(1)</sup>.

En este sentido y para el caso de la ciudad de Lima, debe tenerse en consideración que durante el periodo de monitoreo, las temperaturas registradas son las máximas anuales, por lo tanto, debe esperarse que para las estaciones restantes del año, la eficiencia en la digestión anaeróbica de los residuos sólidos tienda a disminuir.

---

<sup>1)</sup> Tratamento do Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbico e Disposição controlada no solo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB (José Roberto Campos – 1999)

Esta disminución de la eficiencia en la digestión anaeróbica, puede explicarse debido a que temperaturas por debajo de los 20°C no permite la disponibilidad suficiente de sustrato para posibilitar el crecimiento bacteriano. Esta disposición de sustrato decae debido que un 40 a 50% de la materia orgánica esta constituida por materiales particulados cuya solubilización es muy lenta a bajas temperaturas.

#### **6.1.1 TEMPERATURA DEL LIXIVIADO PRODUCIDO**

La temperatura del lixiviado guarda estrecha relación con las tendencias mostradas por la temperatura ambiental y su influencia en el proceso de fermentación anaeróbica de la materia orgánica de los residuos sólidos es similar.

#### **6.1.2 PH DEL LIXIVIADO PRODUCIDO**

Según los resultados del Capítulo V, podemos observar un comportamiento homogéneo en la variación del pH, con tendencias ascendentes, para la celda N° 01 de 6.20 a 6.50 y para la celda N° 02 de 6.10 a 6.34.

En ambos casos se puede notar un proceso de descompensación entre la fase ácida y metanogénica, correspondiendo los valores obtenidos a una fase ácida y a un lixiviado biodegradable (pH < 6.5), según se anotara en capítulos anteriores; sin embargo, pueden notarse ciertas distinciones para las celdas piloto, referidas al grado existente entre las diferentes fases del proceso de digestión anaeróbica.

En el caso de la Celda N° 01, el incremento del pH, ha tenido un mayor incremento hasta alcanzar valores de hasta 6.5, lo cual nos permite afirmar que en esta celda han sido superadas tanto la etapa de hidrólisis y acidogénesis, correspondiendo a los muestreos finales a una transición entre la fase de acetogénesis y metanogénica, toda vez que, esta última fase se desarrolla a partir

de pH superiores a 6.5 y corresponden a un lixiviado en proceso de maduración.

En el caso de la Celda N° 02, el incremento del pH, ha tenido un incremento más controlado hasta un valor máximo de 6.34, lo cual evidencia la superación de la etapa de hidrólisis, correspondiendo a los muestreos finales a una transición entre la fase de acidogénesis y acetogénesis, sobre esta mención, recordemos que valores por debajo de 6.4, favorecen la producción de ácidos grasos, propios de la fase de acidogénesis.

Los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, guardan estrecha relación con la literatura que ha servido de soporte en el presente documento.

### **6.1.3 DBO DEL LIXIVIADO PRODUCIDO**

Con relación a este parámetro podemos diferenciar dos etapas.

#### **PRIMERA ETAPA:**

Durante las primeras semanas (entre los días 09.12.05 y 23.12.05) podemos notar un acelerado incremento de DBO, tendencia que es común para ambas celdas piloto.

- ✓ Con relación a la Celda N° 01, este periodo comprende desde el 09.12.05 y el 16.12.05, con un incremento de 33030 mg/Lt,
- ✓ Con relación a la Celda N° 02, este periodo comprende desde el 09.12.05 y el 23.12.05, con un incremento de 16540 mg/Lt,

Para este periodo los valores de pH, son de 6.20 para la celda N° 01 y de 6.10 para la celda N° 02. Valores inferiores a 6.4,

determinan la producción de ácidos grasos que contribuyen al incremento de la carga orgánica.

#### **SEGUNDA ETAPA:**

Que ha tenido lugar a partir de la segunda y tercera semana de monitoreo, para las celdas N° 01 y 02, respectivamente, en la cual se ha podido notar una disminución de la DBO, tendencia que es común para ambas celdas piloto.

- ✓ Con relación a la Celda N° 01, este periodo comprende a partir de la segunda semana del monitoreo, con una disminución de 29990 mg/Lt,
  
- ✓ Con relación a la Celda N° 02, este periodo comprende a partir de la tercera semana del monitoreo, con una disminución de 13400 mg/Lt,

Este descenso en los valores de la DBO son indicio de un proceso de estabilización de la materia orgánica, que acompañan a sendos incrementos en los valores del pH, representando desde sus valores máximos, para la celda piloto N° 01, una reducción en la DBO del 44.79% y del 19.23% para la celda N° 02, en un periodo total de monitoreo comprendido entre el 9 de diciembre del 2005 y el 3 de marzo del 2006.

#### **6.1.5 DQO DEL LIXIVIADO PRODUCIDO:**

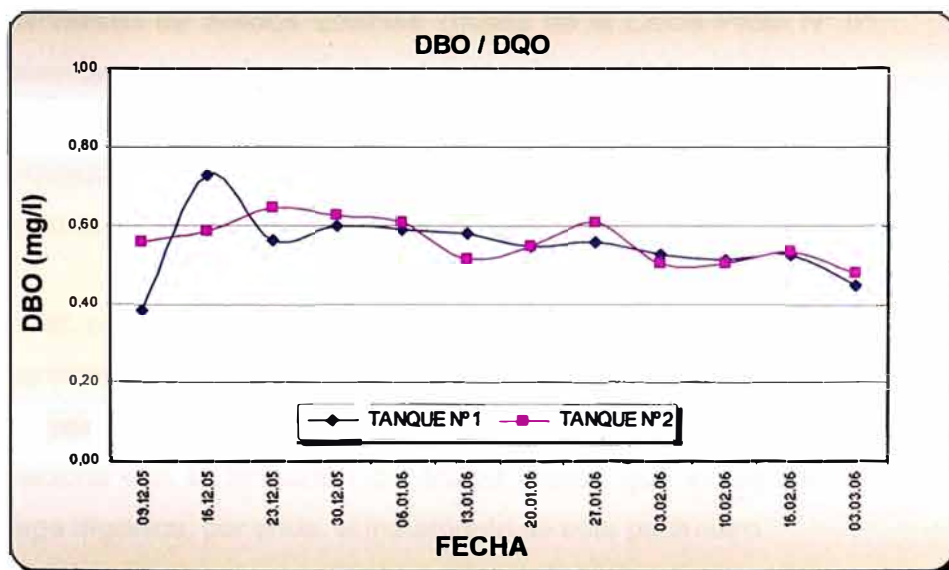
Los resultados registrados para este parámetro registrado en las celdas piloto, muestra comportamientos opuestos pues, mientras en la Celda N° 01, la tendencia es decreciente durante el periodo de monitoreo, la Celda N° 02 muestra una tendencia heterogénea ascendente.

La tendencia esperada para este parámetro ha sido similar a la mostrada por la Demanda Bioquímica de Oxígeno, comportamiento que ha sido conseguido solamente en la celda N° 01.

La celda N° 01, registra para este parámetro, valores que oscilan entre 93600 mg/l y 85000 mg/l, representando una disminución del 9.18%.

La celda N° 02, registra para este parámetro, valores con tendencia ascendente que oscilan entre 95400 mg/l y 117 000 mg/l. Esta tendencia podría explicarse por la intromisión de agentes distorcionantes como el ácido acético o compuestos nitrogenados que pudieran estar presentes en cantidades considerables en las muestras tomadas de esta celda. La presencia del ácido acético podría sustentarse debido a que los valores del pH, para esta celda, presumen una transición entre las fases acidogénica y acetogénica, al mantener registros de pH por debajo de 6.4, en las cuales hay producción de este compuesto.

Con relación al cociente DBO/DQO, se presentan los resultados siguientes:



De los resultados mostrados, la relación DBO/DQO, se mantienen por encima de 0.3, lo cual involucra a un lixiviado de carácter biodegradable, según la clasificación presentada en capítulos anteriores.

#### **6.1.4 SÓLIDOS PRESENTES EN EL LIXIVIADO PRODUCIDO:**

Este grupo de parámetros, resulta de práctica aplicación para la medición del porcentaje de materia orgánica presente en lixiviados.

Podemos observar que en los lixiviados extraídos de las Celdas Piloto se presentan mayor proporción de Sólidos disueltos totales. Además se puede observar valores mayores de Sólidos volátiles totales con respecto a los Fijos, lo cual es un indicio que en el lixiviado producido hay una mayor cantidad de materia de origen orgánico.

El alto valor inicial de los sólidos disueltos del lixiviado nos muestra el elevado grado de polución presente en el lixiviado.

Los valores de Sólidos Volátiles Totales de la Celda Piloto N° 01, presentan valores decrecientes durante el periodo de monitoreo con valores que oscilan entre 613.00 mg/lit y 317.50 mg/lit., lo cual evidencia una tendencia creciente en la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

En el caso de la celda N° 02, no se presenta una tendencia ligeramente orientada al incremento de Sólidos Volátiles Totales con valores que oscilan entre 859.20 mg/lit y 1012.30 mg/lit, esto se relaciona con la formación de ácidos grasos que incrementan la carga orgánica, por ende, el incremento de este parámetro.

Las tendencias a sufrir incrementos y disminuciones en los valores de Sólidos Suspendidos Totales y la DBO guardan similitud, con la



diferencia de que para el caso de los Sólidos Suspendidos estas variaciones se manifiestan en un mayor periodo de tiempo. Esto puede explicarse debido que la DBO contabiliza la degradación de la materia orgánica a efectos de la actividad de los microorganismos vivos y la acción directa de estos sobre el sustrato, lo cual establece una relación de dependencia entre la efectividad de estos y la disminución de la DBO; en cambio, sin importar las fases de vida de las bacterias, ni el estrato en el cual actúan, los sólidos suspendidos miden el aglomerado orgánico (bacterias + sustrato + gases disueltos orgánicos), cuya variación si bien se hace efectiva en el tiempo, no es tan sensible como lo es la DBO.

#### **6.1.7 ASENTAMIENTOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO PILOTO**

Según la gráfica mostrada en el Capítulo V, se observa un marcado decremento del nivel del terreno de las Celdas Piloto. Comparando ambas curvas, notamos que la velocidad de disminución del nivel de la Celda N° 1 es mayor que la N° 2 en todo el periodo de monitoreo de los asentamientos; asimismo, es necesario diferenciar dos etapas bien definidas:

Primera Etapa: Esta etapa se diferencia de la otra, ya que fue necesario añadir agua a fin de generar condiciones adecuadas para producir la degradación de la materia orgánica (Ver Capítulo IV), debido a este factor externo, la velocidad de disminución del nivel de terreno de ambas Celdas Piloto fue mayor en un 10.21%, generándose una disminución para el caso de la Celda N° 1 de 14.03cm en 89 días, mientras que en la Celda N° 2 se presentó un descenso de 12.73cm en el mismo periodo.

**Tabla N°1: Velocidad de Asentamiento**

<b>Celda Piloto</b>	<b>Velocidad de Asentamiento (cm/día)</b>
<b>N° 1</b>	<b>0,158</b>
<b>N° 2</b>	<b>0,143</b>

**Segunda Etapa:** Según la gráfica podemos observar que esta etapa se inicia el 30.10.05, en la cual se observa, un descenso de los niveles de terreno de ambas Celdas Piloto, a diferencia que la velocidad de descenso es menor que en la primera etapa.

Es así, que para la Celda Piloto N°1 se registró un descenso de 5.99cm en 125 días, mientras que para la Celda Piloto N°2 se obtuvo un descenso de 4.41cm en el mismo periodo de tiempo. Estos datos equivalen a descensos mayores en un 35.83% más en la Celda Piloto N°1 con relación a la Celda N°2.

**Tabla N°2: Velocidad de Asentamiento**

Celda Piloto	Velocidad de Asentamiento (cm/día)
N° 1	0,048
N° 2	0,035

Asimismo, es necesario resaltar que la Celda Piloto N°1 presenta un mayor descenso con respecto de la Celda N°2.

## 6.2 COMPROBACIÓN DE HIPOTESIS

De acuerdo a los resultados y al análisis presentado anteriormente, podemos afirmar que:

- ✓ Debido a la recirculación de los lixiviados producidos en una Celda Piloto conteniendo residuos sólidos domésticos, se logra un incremento en los asentamientos de la superficie, debido a la disminución del volumen ocupado. Es así que en el presente experimento se obtuvo un descenso del nivel superficial de 35.83% mas con respecto a la celda sin recirculación.
- ✓ Asimismo, producto de la recirculación de los lixiviados se logra una disminución de la carga orgánica presente. En el presente estudio, se obtuvo en la Celda Piloto N°1, una remoción del 43.98% con respecto a la Celda Piloto N°2 en la que se obtuvo solo una remoción del 19.23%.

### 6.3 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE RESCIRCULACION:

#### - VENTAJAS COMPARATIVAS REFERIDAS A LA GENERACION DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE EL PROCESOS DE RECIRCULACION:

Estos beneficios vienen dado de acuerdo al mejoramiento en la eficiencia del volumen de residuos sólidos a disponer:

a) Determinando el volumen producido diario a disponer:

$$V_{ANUAL} = DS_P / D_{RSM} \times 365$$

Donde:

$V_{ANUAL}$  = Volumen de residuos sólidos a disponer en un día (m<sup>3</sup>/día)

$DS_P$  = Cantidad de residuos sólidos producidos (Kg/día)

$D_{RSM}$  = Densidad de los desechos sólidos

b) Determinando el volumen del relleno sanitario:

$$V_{RS} = V_{ANUAL} / MC$$

Donde:

$V_{RS}$  = Volumen del relleno sanitario (m<sup>3</sup>/año)

$MC$  = Factor del material de cobertura (1.20 - 1.25)

c) Determinando el área requerida en el relleno sanitario:

$$A_{RS} = V_{RS} / H_{RS}$$

Donde:

$V_{RS}$  = Volumen del relleno sanitario (m<sup>3</sup>/año)

$A_{RS}$  = Area a rellenar (m<sup>2</sup>)

$H_{RS}$  = Altura o profundidad media del relleno sanitario

→ De los datos obtenidos en el presente experimento, independientemente de las variables presentadas, es de particular

interés la densidad conseguida a través del proceso de recirculación para el periodo de monitoreo: Así:

- Diferenciando las etapas de asentamientos una vez iniciada la recirculación:

**Primera Etapa:** en la que se ha añadido agua y que puede ser comparado al periodo en el cual se inicia la recirculación en un relleno sanitario. En este periodo de aproximadamente tres meses se produce un asentamiento por arraste cuyas tasas son las siguientes:

Celda Piloto	Velocidad de Asentamiento (cm/día)
Nº 1	0,158
Nº 2	0,143

**Segunda Etapa:** En la que la densidad adopta un comportamiento con tendencias de asentamiento menores y cuyas tasas son las siguientes:

Celda Piloto	Velocidad de Asentamiento (cm/día)
Nº 1	0,048
Nº 2	0,035

- Así en el primer año de operación, partiendo en una altura inicial de 1.0 m. y para las condiciones unitarias de las celdas piloto construidas tenemos:

$$D_{RSM(CELDA)} = W_{RSD}/Ac \times (h-(i_1*t_1)-(i_2*t_2))$$

Donde:

$D_{RSM(CELDA)}$  = Densidad de residuos sólidos en celda piloto (Kg/m<sup>3</sup>)

$W_{RSD}$  = Peso residuos sólidos dispuestos (Kg)

$Ac$  = Área de Celda Piloto ( $Ac = 1.0 \text{ m}^2$ )

- h** = Altura de Celda Piloto (h=1.0 m)  
**i1** = Tasa de de asentamientos por arrastre (m/s)  
**t1** = Periodo de asentamientos por arrastre  
**i2** = Tasa de asentamientos menores a partir del tercer mes (m/s)  
**t2** = Periodo de asentamientos menores

→ Reemplazando para celda N° 01:

$$D_{RSM (CELDA 01)} = W_{RSD} / 1.0 \times (1.0 - (0.00143 \cdot 90) - (0.00035 \cdot 275))$$

$$D_{RSM (CELDA 01)} = 1.38 * W_{RSD}$$

→ Reemplazando para celda N° 02:

$$D_{RSM (CELDA 02)} = W_{RSD} / 1.0 \times (1.0 - (0.00158 \cdot 90) - (0.00048 \cdot 275))$$

$$D_{RSM (CELDA 02)} = 1.29 * W_{RSD}$$

- A partir del segundo año las tasas de asentamientos corresponden a los denominados asentamientos menores, reemplazando tenemos:

→ Reemplazando para celda N° 01:

$$D^*_{RSM (CELDA 01)} = W_{RSD} / (1.0 \times (1.0 - (0.00035 \cdot 365)))$$

$$D^*_{RSM (CELDA 01)} = 1.15 * W_{RSD}$$

→ Reemplazando para celda N° 02:

$$D^*_{RSM (CELDA 02)} = W_{RSD} / (1.0 \times (1.0 - (0.00048 \cdot 275)))$$

$$D^*_{RSM (CELDA 02)} = 1.10 * W_{RSD}$$

- ☞ Con los resultados obtenidos y según las formulas planteadas para el calculo del área requerida de un relleno sanitario, mostramos para ambos casos los resultados siguientes:

**AREA REQUERIDA CON PROCESO DE RECIRCULACION:****PRIMER AÑO:**

$$A_{RS} = 0.72 * V_{RS} / H_{RS}$$

**A PARTIR DEL SEGUNDO AÑO:**

$$A_{RS} = 0.87 * V_{RS} / H_{RS}$$

**AREA REQUERIDA SIN PROCESO DE RECIRCULACION:****PRIMER AÑO:****A PARTIR**

$$A'_{RS} = 0.78 * V_{RS} / H_{RS}$$

**DEL SEGUNDO AÑO:**

$$A'_{RS} = 0.91 * V_{RS} / H_{RS}$$

- ☞ Finalmente la diferencia obtenida entre las áreas requeridas en un relleno operado con recirculación con relación a uno sin la realización de este procedimiento, para un numero "n" de años comprendidos en el periodo de diseño queda expresado por:

$$\Delta A_{RS} = 0.06 * V_{RS} / H_{RS} - n (0.04 * V_{RS} / H_{RS})$$

- ☞ Debe entenderse que "n", esta referido al número de años en para los cuales el relleno sanitario alcanzara su estado de estabilización, pues a partir de este periodo las tasas de asentamientos serán menores a los presentados en el presente documento.
- ☞ Con relación a los resultados obtenidos y asumiendo un periodo de estabilización de dos años, el valor para n=1 y el porcentaje de diferencia en el requerimiento del área para la instalación de un rellenos sanitario seria del 10%. Esta disminución en el área de un relleno sanitario, en un análisis de costo – beneficio, deberá ser

cotejado con los gastos para un periodo de (n+1) años del soporte técnico y los equipos a utilizar para jornadas que dependerán directamente de la producción de lixiviados del relleno sanitario.

- ☞ Cabe mencionar que estos resultados obedecen a las condiciones unitarias de las celdas habilitadas en el presente experimento. Estas ventajas, podrían reportar resultados más alentadores a escala real, debido a que los asentamientos por arrastre podrían ser mayores debido a que las alturas promedio de las celdas en un relleno sanitario a escala real resultan ser mayores a la altura considerada en el presente experimento, reportando valores de cargas verticales mayores. Por consiguiente podrían ajustarse los valores presentados.

**- VENTAJAS COMPARATIVAS REFERIDAS A LA DISMINUCION DE LA CARGA ORGANICA MEDIANTE EL PROCESOS DE RECIRCULACION:** Estos beneficios vienen dado de acuerdo al mejoramiento en la eficiencia de la remoción de la DBO de los lixiviados producidos.

Los resultados referidos a este parámetro inciden directamente en:

La elección de la tecnología a utilizar en el tratamiento de los lixiviados. Mejoras en la calidad de los lixiviados posibilitan la elección de tecnología más simplificada y de menor costo.

En el caso del tratamiento convencional usado en nuestro país a través de sistema de lagunas de estabilización, que por las características de los lixiviados obedecerían a lagunas de carácter anaeróbico, las ventajas de la disminución de la DBO, inciden directamente en el área requerida para la instalación de estos sistemas de tratamiento.

De acuerdo a este punto y dado que las condiciones de carga volumétrica y carga orgánica, que son los parámetros que definen el

área requerida, están directamente relacionadas con la DBO, podemos establecer para los resultados obtenidos:

a) Determinando la carga orgánica:

$$C_{ORG} = Q \times DBO$$

Donde:

$C_{ORG}$  = Carga Orgánica (KgDBO)

$Q$  = Caudal de lixiviados producidos (lps)

$DBO$  = Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)

b) Determinando la carga volumétrica:

$$C_{VOL} = 250 \cdot T^{\wedge}$$

Donde:

$C_{VOL}$  = Carga Volumétrica (KgDBO/)

$T$  = Temperatura promedio del mes mas frío

c) Determinando el área requerida:

$$A_{REQ} = C_{ORG} / C_{VOL}$$

Donde:

$A_{REQ}$  = Área requerida (Ha)

☞ Con los resultados obtenidos y según las formulas planteadas para el calculo del área requerida para el sistema de tratamiento por sistema de lagunas anaeróbicas, mostramos para ambos casos los resultados siguientes:

**AREA REQUERIDA CON PROCESO DE RECIRCULACION:**

$$A_{REQ} = 0.552 * C_{ORG} / C_{VOL}$$



**AREA REQUERIDA SIN PROCESO DE RECIRCULACION:**

$$A'_{REQ} = 0.807 * C_{ORG} / C_{VOL}$$

- ☞ Finalmente, para los resultados obtenidos en el monitoreo, la diferencia obtenida entre las áreas requeridas, queda expresado por:

$$\Delta A_{REQ} = 0.255 * C_{ORG} / C_{VOL}$$

- ❖ La posibilidad de utilizar métodos más simplificados implican necesariamente la posibilidad de ser operados por personal con capacitación básica, de allí el beneficio de poder extender el uso de los procesos de recirculación y posterior tratamiento al área rural.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSIONES**

- 1. Independientemente del proceso de recirculación, las celdas piloto montadas en el presente experimento, de acuerdo a los resultados obtenidos, han tenido un comportamiento afín a un reactor de tipo anaeróbico describiendo las etapas de una digestión anaeróbica en sus fases de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y de transición hacia la etapa de estabilización o llamada también metanogénica.**
- 2. La recirculación de los lixiviados a través de la capa de residuos sólidos ha servido como un factor catalizador de las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, acelerando el proceso de estabilización de la materia orgánica, situación que se puede observar en los procesos y características registrados durante el monitoreo del presente experimento.**
- 3. Como producto de la realización sistemática del proceso de recirculación en periodos semanales para un periodo de tres meses, se ha conseguido un mayor rendimiento en la remoción de la carga orgánica en la Celda Piloto con este proceso, en relación a la Celda Piloto sin recirculación; significando un 24.56% adicional de remoción de la DBO, en la Celda N° 01 con relación a la Celda N° 02.**
- 4. La utilidad de una mayor remoción de carga orgánica de los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios es que posibilita:**

- La habilitación de procesos de tratamiento menos costosos.
  - La simplificación de tecnologías a utilizar en el proceso de un probable tratamiento posterior, lo cual posibilita una mayor difusión en el ámbito nacional, no circunscribiendo su aplicación a la zonas netamente urbanas debido al requerimiento de personal calificado.
  - La utilización de menores espacios para la construcción de infraestructura de tratamiento.
  - Promueve de manera efectiva al cuidado del medio ambiente.
5. Durante la operación de un relleno sanitario, una vez producidos los lixiviados, el proceso de recirculación cumple un doble papel debido a que a la vez que significa un proceso de tratamiento preliminar, permite al operador dotarse de tecnología apropiada y de menor costo para el tratamiento posterior de los lixiviados, evitando así los problemas generados por su almacenamiento y/o disposición inadecuados. Sin embargo debe entenderse que el proceso de recirculación no constituye un tratamiento definitivo para los lixiviados.
6. La realización sistemática del proceso de recirculación en periodos semanales para un periodo de tres meses, se ha conseguido un mayor rendimiento en los asentamientos de la capa de residuos sólidos e la Celda Piloto con este proceso, en relación a la Celda Piloto sin recirculación; significando un 35.83% adicional de asentamiento generados, en la Celda N° 01 con relación a la Celda N° 02.
7. La utilidad del proceso de recirculación referida a los asentamientos producidos en la capa de residuos sólidos tiene su mayor importancia en el mejoramiento y aceleración en los

asentamientos fundamentalmente primarios por el proceso de colapso y aquellos ocasionados en la fase de hidrólisis de la fracción orgánica, siendo este un parámetro cuantificable en periodos cortos de tiempo y de aplicación directa en los diseños de rellenos sanitarios. Los asentamientos secundarios que corresponden netamente a la degradación orgánica, no constituyen un factor relevante en la cuantificación de asentamientos pues son menores y su determinación es determinada en periodos largos de tiempo.

8. La diferenciación de las distintas fases de la digestión anaeróbica a llevarse a cabo en un relleno sanitario con o sin recirculación viene dado fundamentalmente por el pH, dado que además de su fácil obtención, guarda estrecha relación directa con la actividad de los microorganismos que definen cada una de estas; así, valores por debajo de 6.4, nos revelarán la fase acidogénica; valores comprendido entre 6.4 y 6.5, nos revelarán la fase acetogénica y valores comprendidos entre 6.5 y 7.5, nos revelaran la fase metanogénica en su etapa inestable en un primer momento y estable con el transcurso del tiempo.
9. La importancia de cuantificar los asentamientos y la degradación de la materia orgánica en las celdas piloto y su posible aplicación a escala real, radica en que no solamente se puede conocer la capacidad real del relleno sanitario o elegir tecnologías alternativas y de menor costo en el tratamiento de los lixiviados, sino también se pueden realizar las previsiones a realizar durante la fase de diseño, y proyectar las utilidades comparativas con relación a un sistema proyectado sin el proceso de recirculación.

## CAPÍTULO IX

### RECOMENDACIONES

1. En el caso que se considere la implementación de un sistema de tratamiento para los lixiviados, posterior al proceso de recirculación, este debería ser implementado una vez conseguida la estabilización de la materia orgánica, esto es cuando se suscite la fase metanogénica en su etapa estable, toda vez, que para esta etapa los cambios en la calidad de los lixiviados son menores permitiendo una mayor capacidad en la operación de los métodos de tratamiento, además de significar por constituirse hasta esta instancia importantes ventajas económicas durante un periodo que puede extenderse hasta por algunos años.
2. Los datos cuantitativos registrados en el presente experimento, presumen la aplicación de los criterios de asentamientos y degradación de la materia orgánica reforzados por el proceso de recirculación, en el proceso de diseño de rellenos sanitarios a escala real, que cuenten con estos sistemas.
3. Si bien los asentamientos denominados secundarios, producidos en los rellenos sanitarios no son tan representativos como los asentamientos producidos por arrastre o por hidrólisis, son persistentes en el tiempo y deben ser un factor a tener en cuenta en usos posteriores de estas áreas para cuyos casos el uso prioritario estaría referido a la implementación de áreas verdes

fundamentalmente, restringiendo aquellos uso susceptibles a estos desplazamiento como es el caso de las edificaciones.

4. Dado que los procesos biológicos suscitados en un relleno sanitario son netamente anaeróbicos, el material de cobertura tiene un rol preponderante, debiendo poner especial énfasis en su elección y garantizar la dotación de este material durante el periodo de vida útil del proyecto.
5. Es de significativa importancia la realización y cuantificación de experiencias similares a escala real, a fin de determinar con mayor precisión los beneficios de la práctica de la recirculación mostrados en el presente documento. Estos beneficios en relación a la generación de asentamientos serían presumiblemente mayores debido a los mayores factores de carga vertical a la que están sometidos los residuos sólidos en un relleno sanitario a escala real.
6. Un tema que requiere estudios a mayor plazo lo constituye la determinación del tiempo de estabilización de la fracción orgánica en un relleno sanitario, a partir del cual se pueden determinar con mayor precisión los rangos de asentamiento de los residuos sólidos y tratabilidad de los lixiviados. Asimismo, el presente estudio puede reforzarse a través de estudios de carácter biológico determinando la fauna microbiana presente en cada una de las fases del proceso de digestión anaeróbica suscitada al interior de los residuos sólidos en un relleno sanitario.

**BIBLIOGRAFIA****a. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:**

- **Caracterização dos Líquidos Percolados Gerados por Disposição de Lixo Urbano;** Cristina Filomêna Pereira Rosa / Blundi, Carlos Eduardo; Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; AIDIS – 2000.
- **Atenuación Natural de Contaminantes Producidos en Rellenos Sanitarios;** Espinoza, Carlos / González, Andrea; Río de Janeiro-2000.
- **Metodología para la Estimación de la Producción y Concentración de Lixiviado de un Relleno Sanitario;** Borzacconi, Liliana / López, Iván / Anido, Carlos; Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental N° 25; México - 1996.
- **Reducción de los Tiempos de Estabilización en Rellenos Sanitarios Operados con Recirculación de Lixiviados Tratados;** Palma, Juan H. / Valenzuela. Pamela I.; Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-1999
- **Método de Balance de Agua para la Estimación de la Generación de Lixiviados en Rellenos Sanitarios;** Orta Ledesma, Ma. Teresa / Sánchez Gómez, Jorge / Cruz Rivera, Reynaldo / Rojas Valencia, María Neptalí; AIDIS 2000
- **Cantidad y Contenidos de Lixiviados de Desechos Domésticos /** Dr. Ing. Hans Jürgen Ehrig / Traducción de la Academia Tica de Español / Noviembre 1992.

- ⌘ **Identification, Detection, and Spatial Resolution of Clostridium Populations Responsible for Cellulose Degradation in a Methanogenic Landfill Leachate Bioreactor / P.C. Burrell, C.O. Sullivan, H. Song, W.P. Clarke and L.L. Blackall / American Society for Microbiology - 2004**
  
- ⌘ **Análisis de Agua y Desagüe; Jimeno Blasco, Enrique / Centro de Estudiantes de la Facultad de Ingeniería Ambiental – UNI.**
  
- ⌘ **Tratamento do Esgotos Sanitarios por Processo Anaeróbio e Disposicao Controlada no Solo / Programa de Pesquisa em Saneamiento Básico – PROSAB / José Roberto Campos -1999**
  
- ⌘ **Recuperación de Gas Metano de un Relleno Sanitario / Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental / Noviembre 1982.**

**b. REFERENCIAS EN LA WEB:**

- ⌘ [http://icc.ucv.cl/geotecnia/05\\_publicaciones/publicaciones.htm](http://icc.ucv.cl/geotecnia/05_publicaciones/publicaciones.htm)