



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO.**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**“DISEÑO A ESCALA LABORATORIO DE UN BIORREACTOR EN SUSTRATO  
SÓLIDO.**

**TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO.**

**PRESENTA:**

**VICTOR MANUEL FLORES ACOSTA.**

**ASESOR INTERNO:**

**M.C. GABRIEL MARTINEZ HERRERA.**

**ASESOR EXTERNO:**

**DRA. LILIANA MARQUEZ BENAVIDES.**

**MORELIA MICHOACAN, OCTUBRE 2006.**



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por guiarme, por cuidarme siempre donde quiera que me encuentre, por darme sabiduría para terminar mi carrera, por darme fuerzas, fe, esperanza y vida. GRACIAS.

Quiero agradecer a mi MADRE por las menciones que me da día con día, por su confianza que me dio, por la oportunidad de sacar mi carrera y creer en mi todo el tiempo. GRACIAS.

Quiero agradecer a mi PADRE por todo tu apoyo que me das, la confianza y nunca haber perdido las esperanzas en mí. GRACIAS.

A mi PADRE y a mi MADRE infinitamente gracias por haberme concebido, me siento tan orgulloso de tenerlos como mis Padres pues gracias a ustedes me han educado, me han apoyado, me han reprendido, me han forjado a ser lo que soy ahora. Los AMO a los dos, y a los dos les dedico mi titulo. GRACIAS.

Quiero agradecer a todos mis HERMANOS: ALBERTO, EDUARDO, MIGUEL ANGEL y CARLOS; por todo su apoyo y ayuda que me brindaron para terminar mi carrera y aun lo siguen haciendo para que pueda tener un futuro mejor gracias a todos y a mis HERMANAS: LETICIA, MARIA DEL CARMEN, GUADALUPE, LUZ MARIA; al igual que mis hermanos gracias por todo el apoyo y por toda la ayuda que me brindaron, en especial a Lupita que me ayudo cada quincena sin esperar nada a cambio GRACIAS. Quiero agradecer a mis CUÑADAS: LILIA, MALENA, CHELA, y EVE y CUÑADOS: MARTIN, SALVADOR, ALEJANDRO y ARMANDO que han comprendido a su pareja dejándolos dar algo de su ingreso que para mi fue muy grande GRACIAS.

Quiero dar gracias en especial a la persona más importante de mi vida y sin ella no hubiera podido lograrlo, DIANA, por todo tu apoyo incondicional, tu confianza, tu cariño, tu comprensión y toda tu fortaleza para esperarme a culminar una etapa de mi vida y así poder trabajar en nuestro futuro, te dedico a ti este titulo, y a toda su FAMILIA por haberme permitido entrar en su hogar y conocer a su hija tan especial para mi GRACIAS.

Quiero dar gracias a todos mis maestros de la facultad de Ingeniería Química por darme su tiempo para enseñarme todos sus conocimientos que adquirí de ellos en general sin excepción, agradeciendo a mi asesor de tesis M.C. GABRIEL MARTINEZ HERRERA, por darme la oportunidad de obtener mi título ayudándome en mi tesis GRACIAS.

Quiero agradecer especialmente a mi asesor externo Dra. LILIANA MARQUEZ BENAVIDES, quien me dio todo su apoyo, me enseñó y me dio sus conocimientos en la realización de mi tesis solo usted sabe cuanto me ayudo. GRACIAS.

Quiero finalmente agradecer a todos mis compañeros de la facultad que nombrarlos sería muchos pero cada uno de ellos saben quienes son, y nunca los olvidare a todos sin excepción alguna. GRACIAS.

## CAPITULO 1

## INDICE.

|                                                                           |          |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>INDICE.....</b>                                                        | <b>4</b> |
| <b>GLOSARIO .....</b>                                                     | <b>6</b> |
| <b>RELACION DE TABLAS Y FIGURAS.....</b>                                  | <b>8</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                 | <b>9</b> |
| 4.1. RESIDUOS SÓLIDOS.....                                                | 9        |
| 4.1.1. <i>Residuos Sólidos.</i> .....                                     | 9        |
| 4.1.2. <i>Tipos De Residuo.</i> .....                                     | 9        |
| 4.1.3. <i>Producción en México.</i> .....                                 | 10       |
| 4.1.4. <i>Tratamiento.</i> .....                                          | 12       |
| 4.2. METODOS DEL TRATAMIENTO.....                                         | 14       |
| 4.2.1. PROCESOS FISICOS.....                                              | 14       |
| 4.2.1.1. <i>Separación.</i> .....                                         | 14       |
| 4.2.1.2. <i>Trituración.</i> .....                                        | 14       |
| 4.2.1.3. <i>Compactación</i> .....                                        | 14       |
| 4.2.2. PROCESOS MECANICOS.....                                            | 15       |
| 4.2.2.1. <i>Vertedero Controlado.</i> .....                               | 15       |
| 4.2.2.2. <i>Rellenos Sanitarios.</i> .....                                | 15       |
| 4.2.3. PROCESOS TERMICOS.....                                             | 16       |
| 4.2.3.1. <i>Incineración.</i> .....                                       | 16       |
| 4.2.3.2. <i>Pirolisis.</i> .....                                          | 16       |
| 4.2.4. PROCESO QUÍMICO.....                                               | 16       |
| 4.2.4.1. <i>Tratamiento Químico.</i> .....                                | 16       |
| 4.2.5. PROCESO BIOLOGICO.....                                             | 17       |
| 4.2.5.1. <i>Compostaje.</i> .....                                         | 17       |
| 4.2.5.2. <i>Digestión Anaerobia.</i> .....                                | 17       |
| 4.3. BIORREACTORES.....                                                   | 18       |
| 4.3.1. <i>Definición.</i> .....                                           | 18       |
| 4.3.2. <i>Clasificación de los Biorreactores.</i> .....                   | 19       |
| 4.4. PROCESOS AERÓBICOS.....                                              | 22       |
| 4.4.1. <i>Digestión Aerobia.</i> .....                                    | 22       |
| 4.5. PROCESOS ANAERÓBICOS.....                                            | 23       |
| 4.5.1. <i>Digestión Anaerobia.</i> .....                                  | 23       |
| 4.5.2. <i>Digestión Anaerobia De Sólidos En Baja Concentración.</i> ..... | 25       |
| 4.5.3. <i>Digestión Anaerobia De Sólidos En Alta Concentración.</i> ..... | 25       |
| 4.5.4. <i>Etapa de Digestión.</i> .....                                   | 26       |
| 4.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIODIGESTORES.....                     | 27       |
| 4.7. COMPOSTEO.....                                                       | 28       |
| 4.7.1. <i>Objetivos Principales del Composteo.</i> .....                  | 28       |
| 4.7.2. <i>Procesos Fundamentales.</i> .....                               | 28       |
| 4.8. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LODOS RESIDUALES.....                 | 29       |
| 4.8.1. <i>Lodos Primarios.</i> .....                                      | 29       |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.8.2. Lodos Secundarios. ....                                                            | 29        |
| 4.8.3. Lodos Mixtos. ....                                                                 | 29        |
| 4.8.4. Lodos Químicos. ....                                                               | 29        |
| 4.9. COMPOSICIÓN GENERAL DE LODOS RESIDUALES. ....                                        | 30        |
| <b>ANTECEDENTES</b> .....                                                                 | <b>31</b> |
| <b>JUSTIFICACION</b> .....                                                                | <b>35</b> |
| <b>OBJETIVO</b> .....                                                                     | <b>36</b> |
| <b>HIPOTESIS</b> .....                                                                    | <b>37</b> |
| <b>DESARROLLO</b> .....                                                                   | <b>38</b> |
| 9.1. FASE I. DISEÑO DE EQUIPO. ....                                                       | 40        |
| <i>Actividad 1. Planificación de los Equipos a Construir.</i> ....                        | 40        |
| <i>Actividad 2. Diseño de cabina anaerobia.</i> ....                                      | 43        |
| <i>Actividad 3. Diagrama de los Equipos.</i> ....                                         | 54        |
| 9.2. FASE II. OBTENCIÓN DE MATERIALES. ....                                               | 58        |
| <i>Actividad 1. Adquisición de los Equipos.</i> ....                                      | 58        |
| <i>Actividad 2. Recolección de Muestras.</i> ....                                         | 59        |
| <i>Actividad 3. Llenado de Biorreactores.</i> ....                                        | 59        |
| 9.3. FASE III. EVALUACION DE COSTOS. ....                                                 | 60        |
| 9.4. FASE IV. SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES A CONTROLAR PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO. .... | 64        |
| <i>Actividad 1. Determinación de pH:</i> ....                                             | 64        |
| <i>Actividad 2. Determinación de Humedad:</i> ....                                        | 64        |
| <i>Actividad 3. Determinación de Sólidos Totales:</i> ....                                | 64        |
| <i>Actividad 4. Determinación de Sólidos Totales Volátiles:</i> ....                      | 64        |
| <i>Actividad 4. Determinación de metano:</i> ....                                         | 65        |
| 9.5. FASE V. MONTAJE Y SEGUIMIENTO .....                                                  | 65        |
| <i>Actividad 1. Montaje de los Reactores.</i> ....                                        | 65        |
| <i>Actividad 2. Alimento de los Biorreactores</i> ....                                    | 66        |
| <b>RESULTADOS Y ANALISIS</b> .....                                                        | <b>67</b> |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....                                                                 | <b>80</b> |
| <b>SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS</b> .....                                            | <b>82</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                                                 | <b>83</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....                                                                       | <b>85</b> |
| 15.1. ANEXO I .....                                                                       | 85        |
| 15.2. ANEXO II .....                                                                      | 87        |
| 15.4. ANEXO IV. ....                                                                      | 98        |
| 15.5. ANEXO V. ....                                                                       | 102       |

## CAPITULO 2

## GLOSARIO

**ANAEROBIO:** adj. y m. biol. Se aplica al organismo que puede vivir y desarrollarse en ausencia completa o casi completa de oxígeno molecular libre: hay organismos anaerobios facultativos y obligados. Es lo contrario de aerobio.

**AGUA RESIDUAL:** biol. La que procede de viviendas, poblaciones o zonas industriales y arrastra suciedad y heces.

**AEROBIO:** Proceso que tiene lugar en presencia de oxígeno. En las zonas de las plantas depuradoras en las que tiene lugar este proceso se mantiene el agua fuertemente agitada para que haya abundante oxígeno en el agua y las bacterias puedan realizar sus procesos metabólicos.

**ASBESTO:** Mineral formado por fibras de silicato de origen natural. Se usa como aislante pero es muy peligroso porque causa importantes daños a los pulmones, produciendo enfermedades como cáncer de pulmón o asbestosis (acumulación de zonas cicatrizadas en el tejido pulmonar).

**BIOMASA:** f. Suma total de la materia de los seres que viven en un ecosistema determinado, expresada habitualmente en peso estimado por unidad de área o de volumen.

**BIOGÁS:** Gas combustible, mezcla de metano con otras moléculas, formado en reacciones de descomposición de la materia orgánica (biomasa).

**DIGESTIÓN:** f. Conjunto de procesos que transforman los alimentos en sustancias más simples, asimilables por el organismo

**DIGESTOR ANAERÓBICO:** Depósito cerrado en el que se mantiene un tiempo a los lodos procedentes de la fase aeróbica de la depuradora. En él actúan bacterias en ausencia de oxígeno y se termina de digerir la materia orgánica que traía el agua.

**GAS NATURAL:** El que procede de formaciones geológicas o aceites naturales.

**LODO RESIDUAL:** m. Mezcla de tierra y agua, especialmente la que resulta de las lluvias en el suelo.

**METANO:** Hidrocarburo gaseoso, incoloro, inodoro, poco soluble e inflamable, producido por la descomposición de sustancias orgánicas, siendo uno de los componentes del gas natural

**OPEP:** Organización de Países Exportadores de Petróleo.

$\Delta$ : Calor.

**S.R.A.:** Sistema de Reacción Anaerobia

**S.R.A.:** Cabina anaerobia + Biorreactores + Cámaras de incubación.

## CAPITULO 3

## RELACION DE TABLAS Y FIGURAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 1. DATOS CONTENIDOS DE HUMEDAD. _____                                                                                   | 85 |
| TABLA 2. PORCENTAJE DE SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES. _____                                                                       | 85 |
| TABLA 3. DATOS DE PH. _____                                                                                                   | 85 |
| TABLA 4. CONTENIDO DE HUMEDAD. _____                                                                                          | 86 |
| TABLA 5. PORCENTAJE DE SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES. _____                                                                       | 86 |
| TABLA 6. DATOS DE PH. _____                                                                                                   | 86 |
| TABLA 7. PROCESOS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS. _____                                                          | 87 |
|                                                                                                                               |    |
| FIGURA 1. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO 1995-2004. _____                                                      | 88 |
| FIGURA 2. CONSUMO FINAL PRIVADO, PRODUCTO INTERNO BRUTO (PIB) Y GENERACIÓN<br>DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPAL, 1992-2004. _____ | 89 |
| FIGURA 3. DIAGRAMA DE UN INCINERADOR. _____                                                                                   | 90 |
| FIGURA 4. DIAGRAMA DEL PROCESO DEL TRATAMIENTO QUÍMICO. _____                                                                 | 91 |
| FIGURA 5. DIGESTOR ANAEROBIO DE BAJA TASA. _____                                                                              | 92 |
| FIGURA 6. DIGESTOR ANAEROBIO DE ALTA TASA. _____                                                                              | 93 |
| FIGURA 7. ETAPA DE LA DIGESTIÓN. _____                                                                                        | 94 |
| FIGURA 8. INSTALACIÓN DE LA RESISTENCIA Y LÁMPARA PARA CADA UNA DE LAS CAJAS DE<br>MADERA. _____                              | 95 |
| FIGURA 9. TOMA DE MUESTRAS Y ALIMENTACIÓN DENTRO DE LA CABINA. _____                                                          | 96 |
| FIGURA 10. MONTAJE DE LOS REACTORES. _____                                                                                    | 97 |

**CAPITULO 4****INTRODUCCIÓN****4.1. RESIDUOS SÓLIDOS.****4.1.1. Residuos Sólidos.**

Un residuo sólido es cualquier material que posee suficiente consistencia para no fluir por si mismo, generado de los procesos de extracción beneficio, transformación, producción, consumo, utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo generó (NMX-AA-91-1985).

**4.1.2. Tipos De Residuo.**

NOM-052-SEMARNAT-1993, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Los residuos sólidos se clasifican en tres tipos como se presentan a continuación:

**Residuos Sólidos Urbanos:** Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

**Residuos de Manejo Especial:** Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

**Residuos Peligrosos:** Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad.

La generación de residuos abarca las actividades en la que los materiales son identificados como sin ningún valor adicional, y o bien son tirados o bien son recogidos juntos para la evacuación.

#### 4.1.3. Producción en México.

Tipos de generadores:

- **Micro generadores:**

Producen hasta 400 kilogramos de residuos peligrosos.

- **Generadores pequeños:**

Producen de 0.4 a menos de 10 toneladas.

- **Grandes generadores:**

Producen 10 o más toneladas anuales.

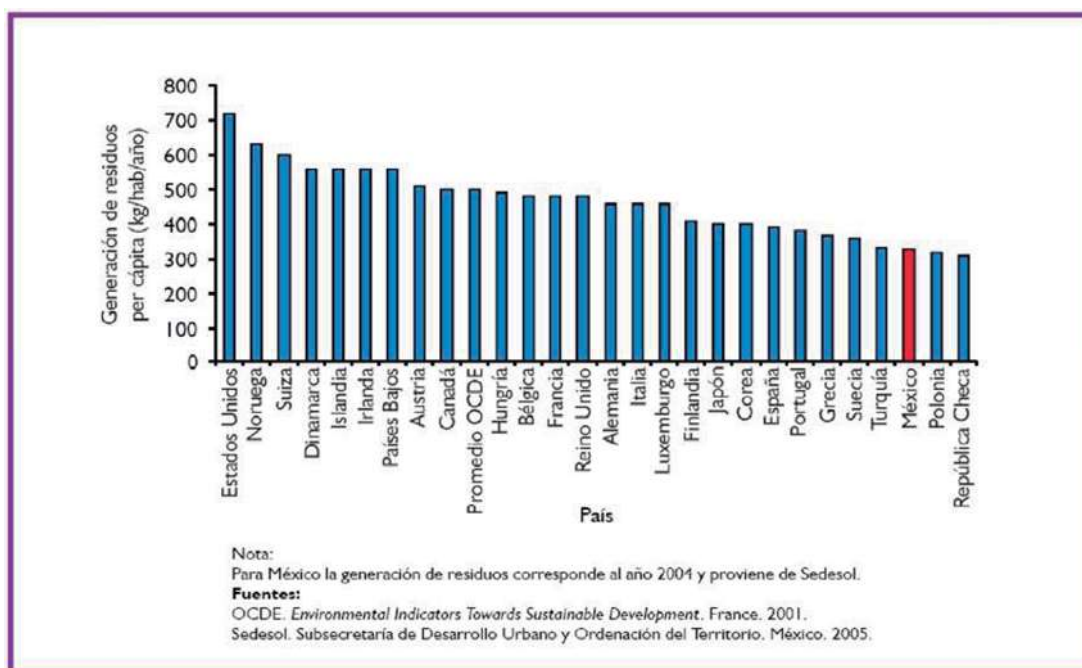
La composición de los RSU depende en gran medida de los niveles y patrones de consumo.

En México, poco más de la mitad de los residuos son de naturaleza orgánica (residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares), correspondiendo el 49% restante a residuos inorgánicos como el papel y cartón (15%), vidrio (6%), plástico (6%), textil (2%), metal (3%) y otros tipos de basura (17%). Ver **Figura 1. Anexo III. (Capítulo 15.3., pagina 82).**

El creciente volumen de residuos sólidos generados conlleva a problemáticas como la dificultad para su recolección y el agotamiento rápido de la vida útil de los rellenos sanitarios. De 1992 a 2004, la generación total de RSU se incrementó 57%, alcanzando 34.6 millones de toneladas en el ultimo año. Ver **Figura 2.**

**Anexo III. (Capítulo 15.3., pagina 83).**

Aunque los residuos sólidos urbanos (RSU) son tan sólo una parte de los residuos generados, por su importancia consumen alrededor de la tercera parte de los recursos invertidos por el sector público para abatir y controlar la contaminación. Ver **Figura 1**, siguiente, Generación de residuos sólidos municipales per cápita en países OCDE, finales de los años noventa.



**Figura 1. Generación de residuos sólidos municipales per cápita en países OCDE, finales de los años noventa.**

#### 4.1.4. Tratamiento.

El manejo integral y sustentable de los residuos sólidos combina flujos de residuos, métodos de recolección y procesamiento, de lo cual derivan beneficios ambientales, optimización económica y aceptación social en un sistema de manejo práctico para cualquier región. Esto se puede lograr combinando opciones de manejo que incluyen esfuerzos de reuso y reciclaje, tratamientos que involucran compostaje, biogasificación, incineración con recuperación de energía, así como la disposición final en rellenos sanitarios ver **Figura 2**, siguiente, Manejo integral y sustentable de los residuos sólidos. El punto clave no es cuántas opciones de tratamiento se utilicen, o si se aplican todas al mismo tiempo, sino que sean parte de una estrategia que responda a las necesidades y contextos locales o regionales, así como a los principios básicos de las políticas ambientales en la materia.

Así, por ejemplo, un sistema en una municipalidad que incorpore reciclado, incineración con recuperación de energía y relleno sanitario puede ser muy diferente al sistema prevaleciente en otra municipalidad que incluya reciclado, composta y relleno sanitario. Lo cual no tiene importancia, en tanto se alcance el objetivo principal del manejo integral de residuos sólidos, que es encontrar los medios económicos y ambientales más apropiados para desviar una cantidad óptima de residuos del relleno sanitario. El modelo descrito en la **Figura 2**, siguiente; Manejo integral y sustentable de los residuos sólidos. Hace hincapié en la interrelación de las partes del sistema y no intenta predecir cual es el mejor sistema.



**Figura 2. Manejo integral y sustentable de los residuos sólidos.**

El manejo integral de los residuos sólidos le da una nueva dimensión al enfoque comúnmente conocido como la jerarquía del manejo de residuos sólidos, el cual prioriza las opciones de manejo de residuos en un orden de preferencia que parte de la prevención de la generación, del rehúso, reciclaje o compostaje, de la incineración con recuperación de energía, de la incineración sin recuperación de energía, y del confinamiento en rellenos sanitarios como última opción. Este enfoque ha influido significativamente en las decisiones y estrategias de manejo de residuos a nivel local, nacional e internacional durante los últimos 25 años.

- 1.- Reducción de origen (reducción en la fuente).
- 2.- Reutilización (retornabilidad/rellenamiento).
- 3.- Compostaje y Biodegradación.
- 4.- Reciclaje.
- 5.- Incineración con recuperación de energía.
- 6.- Relleno sanitario.

## 4.2. METODOS DEL TRATAMIENTO.

Existen cuatro tipos de tratamiento descritos a continuación. Ver

**Tabla 7. Anexo II (capítulo 15.2. pagina 81).**

### 4.2.1. PROCESOS FISICOS.

#### 4.2.1.1. Separación.

Consiste en la separación de materiales constituyentes de la basura buscando mayor productividad de un procesamiento biológico o térmico subsecuente. Ejemplo: se separan materiales "ligeros" (plásticos, papeles) para ser incinerados o para que no perturben el proceso biológico de compostificación.

#### 4.2.1.2. Trituración.

Consiste en dividir, mezclar y homogenizar la basura favoreciendo:

- La descomposición bioquímica.
- El condensamiento y la estabilidad mecánica de los rellenos.
- La uniformidad y control de la acción térmica.

Consecuentemente, puede ser un proceso auxiliar para compostificación, relleno sanitario, pirolisis e incineración.

#### 4.2.1.3. Compactación

Disminuye los espacios vacíos condensando la basura a bajo costo, por lo que constituye un proceso auxiliar en el relleno sanitario, además de tener alta importancia económica en la recolección de basura. Aproximadamente el grado de compactación es de  $500 \text{ kg/m}^3$  y puede variar de acuerdo al tipo de compactadoras.

#### **4.2.2. PROCESOS MECANICOS.**

##### *4.2.2.1. Vertedero Controlado.*

Un vertedero controlado es un área profunda en el que se compacta e impermeabiliza tanto el fondo como los laterales. En estos vertederos la basura se coloca en capas y se recubre todos los días con 0.5 metros de tierra para prevenir la proliferación de ratas, malos olores, disminuir el riesgo de incendios, proteger la basura de que se esparza por el viento; proveer una vía de acceso a los vehículos y disminuir la contaminación visual.

En este tipo de vertederos se instalan sofisticados sistemas de drenaje para lixiviados y para los gases (metano+  $\text{CO}_2$  + $\text{N}_2$ ) que se producen. Los lixiviados se deben tratar en plantas depuradoras antes de ser vertidas a ríos o al mar y los gases que se recogen se puedan aprovechar en pequeñas plantas generadoras de energía que sirven para abastecer las necesidades de la planta de tratamiento de las basuras y, en ocasiones, pueden añadir energía a la red general. (Echarri. 1998).

##### *4.2.2.2. Rellenos Sanitarios.*

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería destinada a la disposición final de los residuos sólidos domésticos, los cuales se disponen en el suelo, en condiciones controladas que minimizan los efectos adversos sobre el medio ambiente y el riesgo para la salud de la población.

La obra de ingeniería consiste en preparar un terreno, colocar los residuos extenderlos en capas delgadas, compactarlos para reducir su volumen y cubrirlos al final de cada día de trabajo con una capa de tierra de espesor adecuado y monitorear el relleno sanitario cuando se cierre.

El relleno sanitario es un sistema de tratamiento y, a la vez disposición final de residuos sólidos en donde se establecen condiciones para que la actividad microbiana sea de tipo anaeróbico (ausencia de oxígeno).

### 4.2.3. PROCESOS TERMICOS.

#### 4.2.3.1. Incineración.

Proceso de oxidación química en el cual los residuos son quemados bajo condiciones controladas para oxidar el carbón e hidrógeno presentes en ellos, destruyendo con ello cualquier material con contenido de carbón, incluyendo los patógenos de los residuos biológicos infecciosos. Los gases de combustión son venteados a través de una chimenea, mientras que los residuos convertidos en cenizas son removidos periódicamente para su disposición final en el relleno sanitario. Ver **Figura 3. Anexo III (capítulo 15.3. pagina 85)**

#### 4.2.3.2. Pirolisis.

Proceso de inactivación de los microorganismos infecciosos por la descomposición química de sus moléculas, al ser sometidos los residuos biocontaminados a intenso calor en un ambiente controlado. Es una tecnología emergente donde se aplica calor sin oxidación de los residuos sólidos biocontaminados, para lograr una descomposición química de las moléculas orgánicas de los residuos a elementos simples (carbón, hidrogeno, etc.). En la cámara de acero inoxidable donde se realiza la pirolisis el calor es generado por resistencia eléctrica y las paredes de la cámara son enfriadas con agua. (Meloni 1998).

### 4.2.4. PROCESO QUÍMICO.

#### 4.2.4.1. Tratamiento Químico.

Proceso de destrucción de los patógenos provocada por la acción química de ciertos compuestos. Esta tecnología es útil para centros de salud y puestos de salud, establecimientos cuya generación no excede de 10 kilogramos diarios. Con esta técnica se logra la desinfección del residuo por contacto del mismo con un producto químico líquido desinfectante (cloro), que inactiva y mata a los agentes infecciosos. Luego de un periodo de contacto con el agente químico, estos son retirado y escurrido para luego ser transportados a un relleno sanitario. (Meloni 1998). Ver **Figura 4. Anexo III (Capítulo 15.3. pagina 86).**

#### **4.2.5. PROCESO BIOLOGICO.**

##### **4.2.5.1. Compostaje.**

La mayoría de las operaciones modernas del compostaje están constituidas por tres pasos básicos: 1) procesamiento de los residuos sólidos, 2) descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos, y 3) preparación y venta del compost final. En el procesamiento de los residuos sólidos urbanos para el compostaje son pasos esenciales la recepción, la separación de materiales recuperables, la reducción de tamaño y el ajuste de las propiedades de los residuos (por ejemplo, relación carbono-hidrogeno, adición de humedad y nutrientes). El grado de procesamiento depende de los procesos específicos de compostaje empleados y de las especificaciones para el compost final.

##### **4.2.5.2. Digestión Anaerobia.**

Es la solubilización y fermentación de sustancias orgánicas complejas por microorganismos en la ausencia de oxígeno. La porción biodegradable de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos se puede convertir biológicamente bajo condiciones anaerobias en un gas que contiene dióxido de carbono y metano. De esta forma los productos finales son: dióxido de carbono, metano, amoníaco, sulfuro de hidrogeno y materia orgánica resistente.

### 4.3. BIORREACTORES.

#### 4.3.1. Definición.

Hay dos tipos de Biorreactores: *Biorreactores aerobios* y *Biorreactores anaerobios*.

Los Biorreactores anaerobios son tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual se transforman por acción de los microorganismos en biogás (gas metano 60%) y bioabono. Es un sistema completamente carente de oxígeno donde la formación de metano ocurre a través de una fermentación que requiere del metabolismo coordinado y combinado de diferentes grupos de microorganismos, principalmente bacterias, que actúan secuencial y simultáneamente. La construcción de biorreactores se basa en un principio muy sencillo: hacer que los contaminantes se conviertan en el sustrato (alimento) de los microorganismos, y que éstos, al mismo tiempo que se alimentan y aumenta su población, descontaminan el agua residual.

Para la construcción de un biorreactor es necesario conocer el tipo de microorganismos con los que estamos trabajando y la curva de crecimiento característica de ellos. Las curvas de crecimiento microbiano, de forma general, poseen cuatro fases en el tiempo ver **Figura 3** pagina 15 curva de crecimiento bacteriano.

A. Fase de latencia.

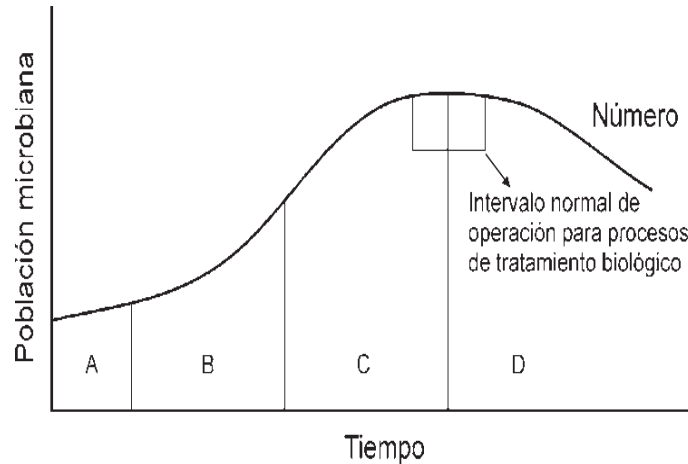
B. Fase de crecimiento logarítmico.

C. Fase de crecimiento menguante.

D. Fase endógena.

El factor clave de un biorreactor es lograr mantener a los microorganismos en la fase C la mayor parte del tiempo que sea posible, es decir, mantener a la población microbiana a su máximo nivel, para optimizar la eficiencia de los procesos de degradación. Esto se logra regulando las condiciones del medio

(temperatura, pH, aireación, etc.) y los flujos de entrada y salida, de manera que nunca falte alimento y no se llegue a la fase D. Dentro de los procesos biológicos empleados para la construcción biorreactores, existen dos tipos fundamentales de procesos: los procesos aeróbicos y los procesos anaeróbicos. (Fontúrbel *et al.*, 1999-2005)<sup>14</sup>.



**Figura 3. Curva de crecimiento bacteriano.**

#### 4.3.2. Clasificación de los Biorreactores.

En general, Los biorreactores se clasifican de la siguiente manera:

**A)** Atendiendo al diseño de construcción encontramos:

- 1.- Digestores horizontales.
- 2.- Digestores verticales.

##### *1.- Digestores Horizontales.*

Se caracterizan por su forma alargada horizontalmente, su alimentación y surealizan por los extremos.

##### *2.- Digestores Verticales.*

Son similares a los anteriores sólo difieren en el sentido vertical de su orientación su instalación es normalmente bajo tierra.

**B)** De acuerdo al tipo de proceso empleado, podemos encontrar dos de ellos.

- 1.- Digestores de carga continúa.
- 2.- Digestores de carga discontinua.

*1.- Digestores de carga continúa.*

Estos digestores son cargados y descargados en forma regular y periódica de producción de gas y efluente es permanente.

*2.- Digestores de carga discontinua, (batch):*

El ciclo de producción de gas y fertilizantes sólo puede ser continuado o reciclado vez que la carga y descarga del total del contenido de materia prima del digestor.

En otras palabras, estos sistemas son cargados entre lapsos relativamente largos, llegando inclusive a cargarlo sólo la primera vez y descargando cuando se haya producido todo el gas.

Podemos combinar las clasificaciones anteriores y tener:

1. Digestores continuos verticales.
2. Digestores discontinuos verticales.
3. Digestores continuos horizontales.
4. Digestores discontinuos horizontales

Otra clasificación de los biorreactores es de acuerdo a su sistema de agitación y en cuanto a los rangos de temperatura de operación.

**C)** Según su sistema de agitación, encontramos dos tipos de digestores:

- 1.- Digestores con sistemas de agitación natural.
- 2.- Digestores con sistema de agitación forzada.

*1.- Digestores con sistema de agitación natural.*

En estos digestores la agitación ocurre solamente por el movimiento de carga y descarga.

*2.- Digestores con sistema de agitación forzada.*

Este tipo de agitación se puede realizar de varios métodos.

**2.1. Agitación mecánica:**

Se realiza a través de un agitador del tipo tapón, es decir, el movimiento existe sólo en el lugar donde está instalado tal agitador.

### 2.2. Agitación hidráulica:

Esta agitación se desarrolla a través de bombas centrífugas que reciclan la materia orgánica en el proceso de digestión.

### 2.3. Agitación con biogás:

Esta se desarrolla por medio de tuberías que inyectan a presión el gas, produciendo, de acuerdo al diseño del digestor, una agitación total.

### **D)** Según el rango de temperatura a la cual trabaja:

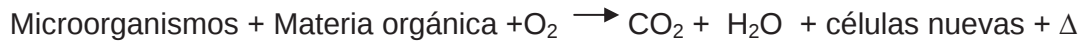
- 1.- Biorreactores con un rango de temperatura psicrófilico (entre 10 a 20°C)
- 2.- Biorreactores con un rango de temperatura mesófilico (entre 20 a 40°C)
- 3.- Biorreactores con un rango de temperatura termófilico (entre 40 a 60°C)

(Lobos. 1999)<sup>15</sup>.

#### 4.4. PROCESOS AERÓBICOS.

Los procesos aeróbicos son aquellos que necesitan de oxígeno. Existen procesos aeróbicos estrictos, que son aquellos que solamente pueden funcionar si hay oxígeno, y los procesos aeróbicos facultativos, que son los que pueden alternar con anaeróbicos, de acuerdo a la concentración de O<sub>2</sub> disponible.

De manera general, los procesos aeróbicos tienen la siguiente reacción:



Como se puede apreciar en la ecuación anterior, el metabolismo aeróbico se encarga de catalizar moléculas más grandes en CO<sub>2</sub> y agua, fundamentalmente. Los diferentes grupos de microorganismos tienen metabolismos diferentes, y por lo tanto son capaces de catalizar una amplia gama de sustancias, aunque algunas veces se obtienen otros productos secundarios además de los mencionados.

Los procesos aeróbicos son muy eficientes, funcionan con una amplia gama de sustancias posibles de degradar, en ciclos relativamente sencillos. (Fontúrbel *et al.*, 1999-2005)<sup>14</sup>.

##### 4.4.1. Digestión Aerobia.

Está basada en la respiración endógena, ocurre cuando hay poco sustrato disponible y continua la aeración de los lodos biológicos. Los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener energía para reacciones de mantenimiento de las células. (Cardoso *et al.*, 1998).

#### 4.5. PROCESOS ANAERÓBICOS.

Estos procesos se realizan en ausencia de oxígeno, que son realizados por dos grupos de bacterias heterótrofas, que en un proceso de licuefacción/gasificación convierten un 90% de la materia orgánica, primero en intermediarios y luego en metano y CO<sub>2</sub> gaseosos.

Es la solubilización y fermentación de sustancias orgánicas complejas por microorganismos en la ausencia de oxígeno. (Cardoso *et al.*, 1998).

En los biorreactores se suele aplicar una mayor temperatura los primeros 30 días para facilitar la putrefacción de la materia. La ventaja de este tipo de digestión es que genera energía en forma de metano y la producción de lodos es sólo del 10%. (Fontúrbel *et al.*, 1999-2005).

Microorganismos + materia orgánica  $\longrightarrow$  CH<sub>4</sub> + células nuevas + lodos

##### 4.5.1. Digestión Anaerobia.

Es la solubilización y fermentación de sustancias orgánicas complejas por microorganismos en la ausencia de oxígeno.

Los productos de la digestión anaerobia son:

Gases, células y lodos con una fracción mineral cercana al 60% (lodos estabilizados). (Cardoso *et al.*, 1998).

La digestión anaerobia puede hacerse en una o dos etapas. Generalmente, el hacerlo en dos etapas (digestores primarios y secundarios) produce mejores resultados. En los primarios, el fango se mezcla constantemente con el propio gas producido para favorecer la digestión, mientras que en el secundario simplemente se deja sedimentar el fango antes de extraerlo.

Los digestores anaerobios son de dos tipos:

- a) De baja tasa.
- b) De alta tasa.

#### a) Digestor de Baja Tasa

El digestor consiste en un tanque cilíndrico con una pendiente hacia el fondo y bóveda techada.

El lodo se introduce al tanque, no hay sistema de mezclado la estabilización se logra en condiciones estratificadas dentro del digestor. El gas metano se acumula en la bóveda, se extrae y se almacena para su uso.

Las natas se acumulan en el sobrenadante enviado al sedimentador primario. El lodo estabilizado sedimenta en el fondo del tanque. Ver **Figura 5. Anexo III (Capítulo 15.3. pagina 87).**

#### b) Digestor de Alta Tasa

Son operados en rangos de temperaturas mesofílicas y termofílicas, requieren un sistema de calefacción de lodo, deben estar aislados del medio. Requieren de un mezclado para mantener una distribución uniforme del contenido, la alimentación debe ser continua o por lotes en intervalos de 30 a 120 minutos. (Cardoso *et al.*, 1998). Ver **Figura 6. Anexo III (Capítulo 15.3. pagina 88).**

#### 4.5.2. Digestión Anaerobia De Sólidos En Baja Concentración.

La digestión anaerobia de sólidos en baja concentración es un proceso biológico en el cual se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos iguales o menores que el 4 a 8%. El proceso de fermentación anaerobio de sólidos en baja concentración se utiliza en muchas partes del mundo para generar gas metano a partir de los residuos humanos, animales y agrícolas, y a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Una de las desventajas del proceso de digestión anaerobia de sólidos en bajas concentraciones, tal como se aplica a los residuos sólidos, es que deberían añadirse considerables cantidades de agua a los residuos para que el contenido en sólidos llegue al rango requerido del 4 a 8%. La adición de agua produce un fango digerido muy diluido, que hay que deshidratar antes de su evacuación. La evacuación del efluente líquido producido por la deshidratación es una consideración importante en la selección del proceso de digestión de sólidos en baja concentración.

#### 4.5.3. Digestión Anaerobia De Sólidos En Alta Concentración.

La digestión anaerobia de sólidos en alta concentración es un proceso biológico en el que se produce la fermentación con un contenido de sólidos total de aproximadamente el 22% o más. La digestión anaerobia de sólidos en alta concentración es una tecnología relativamente nueva, y su aplicación para la recuperación de energía a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos todavía no se ha desarrollado completamente. Dos ventajas importantes que tiene el proceso de digestión anaerobia de sólidos en alta concentración son: más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de gas por unidad de volumen del tamaño del biorreactor. La mayor desventaja de este proceso es que de momento hay una limitada experiencia disponible en el funcionamiento real.

#### 4.5.4. Etapa de Digestión.

El proceso de degradación, es el desarrollo de un complejo de bacterias que atacan la materia orgánica original. Se dividen en dos etapas, principales ácidas y metanogénicas. Estas dos etapas se producen en formas simultáneas en los digestores, según las características:

##### - Fase ácida:

- ✓ Bacterias facultativas: pueden vivir en presencia de bajo contenidos de oxígeno
- ✓ Su producción final = ácidos orgánicos

Fase metanogénicas: no viven en presencia de oxígeno (bacterias anaeróbicas). Ver **Figura 7. Anexo III (Capítulo 15.3. pagina 89).**

Etapas de la digestión anaeróbica:

- ✓ Hidrólisis de los polímeros complejos
- ✓ Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes,  $H_2$  y  $CO_2$
- ✓ Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato,  $H_2$ ,  $CO_2$
- ✓ Metanogénesis a partir de  $H_2$ ,  $CO_2$ , acetato

#### 4.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIODIGESTORES.

##### Ventajas y desventajas del proceso anaerobio frente al aerobio:

| VENTAJAS<br>ANAEROBIO                           | DESVENTAJAS<br>ANAEROBIO                                                                                      |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fango con mejor capacidad de espesamiento.      | A temperatura ambiente el proceso ocurre muy lentamente. Requiere temperaturas elevadas.                      |
| Menor necesidad de nutrientes.                  | Requiere separación gas-fango.                                                                                |
| No necesita aireación.                          | Fango con peor clarificación                                                                                  |
| Producción de metano.                           | Recuperación más lenta frente a compuestos tóxicos.                                                           |
| Menor producción de fango.                      | Es más sensible frente a cambios operacionales de carga y caudal y cambios ambientales como pH y temperatura. |
| El fango producido es fácilmente deshidratable. | La puesta en marcha es muy lenta debido a la baja tasa de crecimiento.                                        |
| El fango está muy estabilizado.                 | En algunos casos es un pretratamiento, y antes de verter necesita un post tratamiento.                        |
|                                                 | Menos favorable económicamente a pequeña escala (economía de escala)                                          |
|                                                 | Menos favorable para bajas concentraciones de DBO5.                                                           |
|                                                 | En general tecnología más compleja. En consecuencia, mayores costes de inversión.                             |

#### **4.7. COMPOSTEO.**

Es la descomposición biológica del material orgánico, puede llevarse a cabo en fase aerobia o anaerobia. La mayoría de las operaciones busca mantener las condiciones aerobias.

El composteo aerobio es termofílico, la temperatura del proceso esta en el intervalo de la pasteurización (50 a 70°C), y destruye organismos patógenos.

##### **4.7.1. Objetivos Principales del Composteo.**

- a) Convertir materia orgánica putrefacta a formas estabilizadas.
- b) Eliminación de patógenos.
- c) Reducción de masa de la cantidad de lodo húmedo.

##### **4.7.2. Procesos Fundamentales.**

- 1 Mezclado de lodos y agentes abultantes.
- 2 Digestión aerobia termofílica.
- 3 Curado

###### *1.- Mezclado homogéneo.*

El lodo parcialmente secado se mezcla con un material acondicionador como el bagazo de caña, pedacería de madera u otros materiales orgánicos y porosos, con el fin de aumentar la porosidad, aumentar el contenido de sólidos un 40%.

###### *2.- Digestión aerobia termofílica.*

En esta etapa se realiza la estabilización del lodo por acción de los microorganismos termofílicos que elevan la temperatura por arriba de los 60°C. Las condiciones aerobias se mantienen por aeración mecánica o forzada.

###### *3.- El curado.*

Es una extensión del proceso de composteo, la mezcla se quita del área de composteo, ya no requiere aeración, las temperaturas iniciales son mayores a 40°C y después se estabilizan y se mantienen en el rango mesofílico. En esta etapa se asegura la completa estabilización de la composta y la remoción de tóxicos orgánicos. Tiene una duración de 30 días aproximadamente. (Cardoso et al., 1998).

#### 4.8. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LODOS RESIDUALES.

Los lodos de purga son una mezcla de sólidos sedimentables y agua, las concentraciones son variables dependiendo del tipo de lodo (primario, secundario, mixto o químico).

De acuerdo con el tren de tratamiento de lodos generados estos se clasifican en:

- ☐ Primarios
- ☐ Secundarios
- ☐ Lodos mixtos
- ☐ Lodos químicos

##### 4.8.1. Lodos Primarios.

Aquellos que se extraen de sedimentadores primarios. Consisten principalmente en arena fina, inorgánicos y sólidos orgánicos.

##### 4.8.2. Lodos Secundarios.

Lodos en exceso generados en tratamiento secundario biológico. Consisten en lodos biológicos, resultado de la conversión de productos de desechos solubles de efluentes primarios y partículas que escapan al tratamiento primario.

##### 4.8.3. Lodos Mixtos.

Son la combinación de lodos primarios y secundarios, que tendrán propiedades aproximadamente proporcionales a la respectiva composición de cada tipo.

##### 4.8.4. Lodos Químicos.

Resultan cuando se agregan sales de aluminio o fierro y/o cal, en tratamiento de agua residual para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos o para precipitar algún elemento de cada tipo. (Cardoso *et al.*, 1998).

#### 4.9. COMPOSICIÓN GENERAL DE LODOS RESIDUALES.

Las características específicas o parámetros de interés en los lodos están determinados por el tipo de proceso que se utilizará para su tratamiento. Ver

**Tabla 1.** Siguiente:

| Parámetros de interés                                      | Tratamiento                                                                        |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Medida de pH, alcalinidad y contenido de ácidos orgánicos. | Importantes en el control del proceso de digestión anaerobia.                      |
| Contenido de metales pesados, pesticidas e hidrocarburos   | Tienen que determinarse cuando se considera la incineración y aplicación en suelos |
| Contenido de energía                                       | Es importante si se contempla un proceso de reducción térmica                      |

**Tabla 1. Tipos de tratamiento de acuerdo al parámetro de interés.**

Las características de los lodos que afectan su aptitud para la aplicación en suelos y usos benéficos, incluyen contenido orgánico, nutrientes, patógenos, metales pesados y orgánicos tóxicos.

El valor fertilizante del lodo se basa, principalmente, en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.

El contenido de agua en los lodos es muy grande (94 a 98.5 %), por lo tanto es necesario concentrar más los sólidos antes de estabilizarlos; para ello se aplica el espesamiento. (Cardoso *et al.*, 1998).

## CAPITULO 5

## ANTECEDENTES

Rodríguez et al., (1995). Identificaron y compararon el rendimiento de las mezclas realizadas a través del método de desplazamiento del agua y el tiempo de quemado, por cada método se prepararon tres réplicas (para obtener promedio) de dos mezclas diferentes (3 kg de bora y 3 kg de estiércol) a un 90% de humedad e inoculadas con aguas servidas, y se vertieron en digestores de vidrio con capacidad de 18 litros para proceder a la fermentación durante 44 días.

En la actualidad, se sabe que el proceso consta de tres etapas: fermentativa, acetogénica y metanogénesis (BRYANT, 1979, citado por VALLES *et al.*, 1980). La conversión de desperdicios orgánicos, particularmente excrementos de animales, ha sido estudiado por muchos años (MARTINEZ, 1982). Su proceso de degradación microbial relacionado con la digestión anaeróbica fue investigado por BOSWELL (1947), GHOSH y POHLAND (1974) y GHOSH y KLASS (1976).

Comprobaron que, para reducir el tiempo de digestión se pueden suministrar condiciones óptimas a los microorganismos productores del ácido fórmico y metano a través de dos fases durante el sistema de digestión de los desperdicios orgánicos (POHLAND y GHOSH, 1971; SINGH, 1971; ANONIMOUS, 1976; JOHNSON, 1977). En algunos estudios sobre bioconversión de la bora, a metano se han requerido períodos largos de digestión de 90 a 120 días (WOLVERTON *et al.*, 1975). Sin embargo se ha logrado reducir el tiempo de digestión de 90 días a un promedio de 23 días (WOLVERTON, 1981). En este estudio, se comparó la producción y el rendimiento de biogás generado por la digestión de la bora, el estiércol de ganado.

Rodríguez *et al.*, (1995). Obtuvo como resultado los siguientes datos:

#### Digestión del estiércol

Un incremento lineal significativo de los litros de biogás se evidenció en los primeros 32 días de digestión del estiércol. Posteriormente, la producción de biogás disminuyó armónicamente hasta los 44 días de estudio.

#### Digestión de la bora

La producción de gas mediante la biodigestión de bora. Mientras que a los 44 días, la cantidad de biogás producida por ambas mezclas preparadas, tendió a ser similar.

Tanto el estiércol como la cantidad de agua residual inoculada a la mezcla bora-estiércol, posiblemente ocasionaron un incremento de la flora bacteriana en el biodigestor, que contribuyó a una mayor producción de biogás que el generado por la bora inoculada con aguas residuales durante los 32 días iniciales (fase de producción lenta). En los días posteriores, ambos materiales preparados incrementaron bruscamente el volumen de biogás. Caso contrario se observó durante la biodigestión del estiércol inoculado con aguas residuales, el cual, durante los primeros 32 días del proceso produjo un incremento acelerado del volumen para luego descender en los días posteriores.

Por otra parte, Cisnero *et al.*, (1998). Presentó un trabajo que contiene un estudio bibliográfico sobre la situación de las energías renovables en el mundo y en Cuba, se hace énfasis en algunos aspectos relacionados con el Biogás, además se ofrece una metodología para calcular una planta de biogás que puede ser utilizado en comunidades de pocas densidades poblacionales para la cocción de alimentos. (Cisnero *et al.*, 1998).

Cisnero *et al.*, (1998). Plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos locales disponibles como son los residuos orgánicos (heces humanas, estiércoles y plantas), los cuales pueden ser usados

como simple medio para producir energía y biofertilizantes por medio de plantas de biogás. De esta manera se mejorará la vida de los campesinos, se incrementará la producción agrícola y se preservará el medio ambiente. (Cisnero *et al.*, 1998).

El diseño establecido garantiza el abastecimiento de biogás para la cocción de alimentos de una familia compuesta aproximadamente por cinco miembros.

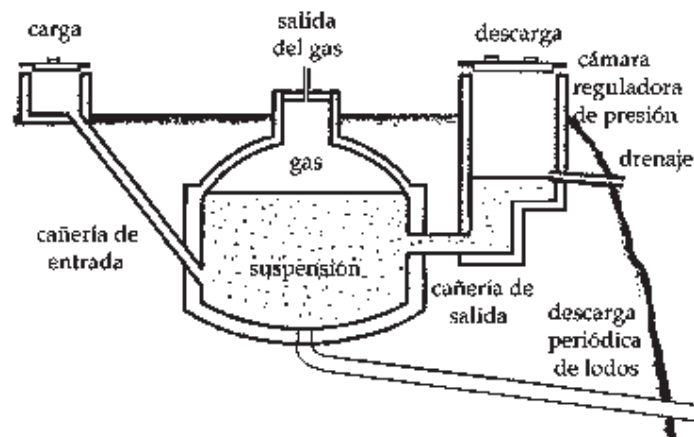
Conociendo la cantidad de excreta diaria podemos determinar la cantidad de biofertilizante diario a obtener en el digestor.

El plazo de recuperación de la inversión es relativamente corto.

El uso del biogás como combustible es más ecológico que la leña.

Construir la planta de biogás lo más cerca posible a los consumidores y donde reciba la mayor cantidad de sol durante el día. (Zamora *et al.*, 1998).

Carrillo (2003), propuso un digestor con cúpula fija como se muestra en la figura siguiente:



Comenta que el diseño de este digestor esta determinado por el contenido de sólidos totales volátiles y el tiempo de retención. Los materiales insolubles como la paja pueden requerir un tratamiento de día o incluso años, en su proyecto usa varios materiales que se puede usar para la generación de metano, como son:

Residuos de cosecha.

Residuos de origen animal.

Residuos de origen humano.

Residuos agroindustriales.

Manto forestal.

Plantas acuáticas.

Principalmente trabajó en residuos de cosecha y residuos agroindustriales. Sus resultados en la producción de biogás aparecen en la tabla siguiente:

| <b>Gases</b>    | <b>Desechos agrícolas</b> | <b>Desechos industriales</b> |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|
| Metano          | 50% - 80%                 | 50% - 70%                    |
| CO <sub>2</sub> | 50% 20                    | 50% - 30%                    |

**CAPITULO 6****JUSTIFICACION.**

La carga ambiental ocasionada por la creciente generación de residuos sólidos es evidente en nuestro país. Los residuos sólidos (agrícolas y/o municipales) se estudian en este trabajo, buscando proponer un inóculo apropiado para el arranque de un digestor anaerobio en sustrato sólido.

La digestión anaerobia es muy compleja, y necesita una amplia gama de reacciones y factores abióticos para llevarse a cabo. La disponibilidad del sustrato, la temperatura, la ausencia de oxígeno en el ambiente, el control del pH y la presencia de toxico en el sistema son algunos de los factores que dificultan el proceso de digestión anaerobia. Otra de las desventajas de los sistemas anaerobios son los prolongados tiempos de arranque y la carencia de un inóculo que permita formar la llamada “semilla de arranque”.

Este trabajo propone estudiar dos diferentes tipos de mezclas para obtener un inóculo anaerobio a escala laboratorio. El criterio en este caso será el de comparar la eficiencia de remoción de sólidos totales volátiles que cada mezcla logra en ambientes anaerobios puesto que se conoce que hay una relación directa entre la remoción de sólidos totales volátiles y la producción de biogás, y por ende de metano. Para realizar los estudios mencionados se diseñó un biorreactor anaerobio en sustrato sólido a escala laboratorio, mismo que le llamaremos más adelante Sistema de Reacción Anaerobio (S.R.A.), el cual consiste en Cabinas anaerobia, Biorreactores y Cámara de incubación. Por lo anterior expuesto el trabajo de investigación queda justificado, ya que los resultados obtenidos sean útiles en la reducción de la carga ambiental ocasionada por los residuos sólidos orgánicos.

**CAPITULO 7****OBJETIVO.**

Diseño y construcción de un Sistema de Reacción Anaerobio para comparar el desempeño de dos mezclas orgánicas en la producción de metano y posteriormente evaluar la eficiencia de dos tipos diferentes de mezclas como inóculo de arranque anaerobio, mediante el parámetro de eficiencia de remoción de sólidos totales volátiles.

***Objetivos particulares:***

- 1.- Diseñar y construir un Sistema de Reacción Anaerobio.
- 2.- Implementar el Sistema de Reacción Anaerobio para trabajar con sustrato sólido.
- 3.- Comparar la eficiencia de reacción con mezclas diferentes de inóculos.
- 4.- Evaluar los costos de construcción del S.R.A.

**CAPITULO 8****HIPOTESIS.**

La mezcla de materiales con propiedades metanogénicas puede producir un inóculo productor de metano, en condiciones de operación de anaerobiosis.

El suelo, la excreta de vaca, el aserrín y los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales, pueden constituir un inóculo anaerobio. La naturaleza de la mezcla y el régimen de temperatura influenciarán la remoción de sólidos totales volátiles y por ende la producción de metano.

**CAPITULO 9****DESARROLLO**

Los Sistemas de Reacción Anaerobio es un equipo que se utiliza para trabajar en ambientes controlados. En este caso, el diseño y construcción de la cabina tuvieron como objetivo el lograr un ambiente prácticamente libre de oxígeno (2% v/v). El inóculo a trabajar constaba de un consorcio microbiano anaerobio estricto, por lo que la manipulación debía de hacerse en un ambiente apropiado.

El desarrollo experimental consistió en las siguientes fases:

**9.1. Fase I. Diseño de los Equipos.**

Actividad 1: Planificación de los equipos a construir.

Actividad 2: Diseño de los equipos.

Actividad 3: Diagrama de diseño de los equipos.

**9.2. Fase II. Obtención de Materiales.**

Actividad 1: Adquisición de material para la construcción de los equipos.

Actividad 2: Recolección de muestras.

Actividad 3: Llenado de reactores.

**9.3. Fase III. Evaluación de Costos de los Equipos.**

**9.4. Fase IV. Seguimiento de las variables a controlar para la producción de metano.**

Actividad 1: Determinación de pH.

Actividad 2: Determinación de Humedad

Actividad 3: Determinación de Sólidos Totales.

Actividad 4: Determinación de Sólidos Totales Volátiles.

Actividad 5: Determinación de Lignina.

Actividad 6: Determinación de Celulosa.

**9.5. Fase V. Montaje y Seguimiento.**

Actividad 1: Montaje de todos los Reactores.

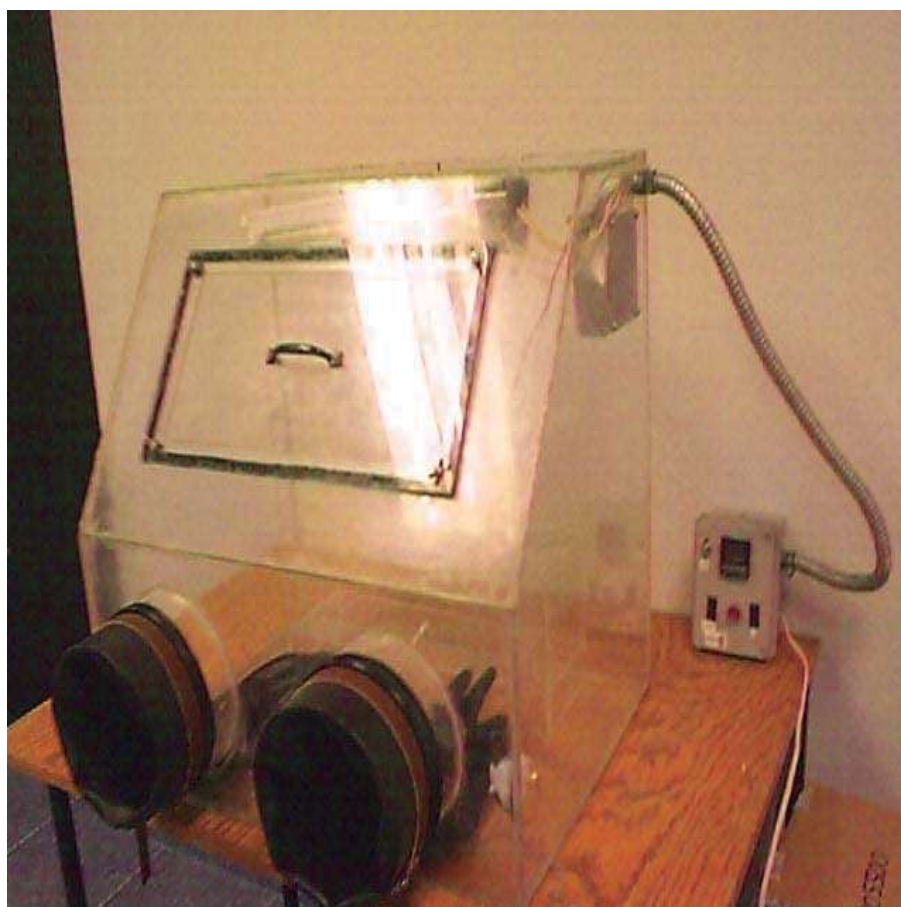
Actividad 2: Alimento de los Reactores.

### 9.1. Fase I. Diseño de Equipo.

#### **Actividad 1. Planificación de los Equipos a Construir.**

##### **Cabina Anaerobia:**

Para el armado de la Cabina anaerobia se considero una base de calculo de un volumen de 200 litros, y se comparo con uno de la Fabrica Labconco Corporation modelo 50600-00 el material que utilice fue Acrílico de un espesor de 6mm, se mando hacer los cortes y el pegado, se mandó hacer unos tubos que miden 15cm de longitud con un diámetro de 21cm que van dentro de los orificios esto es para sujetar los guantes, las medidas de la cabina se presentan en la siguiente **figura 4**, Cabina Anaerobia. El material utilizado para construcción fue mayoritariamente acrílico (6mm), cuyas características convenían a los fines de construcción. La descripción de las características del material, instalación eléctrica y manual de operación, se detalla en el Anexo IV capitulo 15.4.



**Figura 4. Cabina Anaerobia.**

### Biorreactores.

Para el armado del reactor utilice un frasco de vidrio de 2lt de capacidad con un diámetro interior de 6cm al reactor le coloque un tapón de hule perforado con 2 agujeros de 5mm de diámetro en el cual lleva un tubo de vidrio de 4mm de diámetro en cada uno de los orificios con 6 a 7cm de largo uno de los tubos de vidrio lleva una manguera de 5mm de diámetro y con una longitud de 25cm que va desde el reactor hacia el primer bidón de 5 litros y el segundo orificio es de toma de muestra/venteó ver **Figura 5**, Reactor. En el primer bidón lleva un tapón de hule con dos perforaciones de 5mm de diámetro en la primera perforación que viene del reactor lleva una manguera por dentro del bidón de 5mm de diámetro y una longitud de 30cm del otro tubo de vidrio va hacia el segundo bidón de 5 litros que tiene un tapón de hule con dos perforaciones de 5mm de diámetro y en la perforaciones va un tubo de vidrio de 4mm de diámetro y una manguera de 30cm de longitud y 5mm de diámetro y en el otro tubo de vidrio es la salida/venteó.



**Figura 5. Biorreactor.**

### Cámaras de Incubación.

Para el armado de las Cámaras de incubación se mandó hacer las medidas de acuerdo a las medidas de los biorreactores, de acuerdo que entraran cuatro biorreactores. Se instalaron a las cuatro cajas de madera controladores de temperatura del cual se requirió de un relevador, tubo sapa, cable, apagadores y una caja (tableplast 518). El controlador de temperatura se conecto al relevador y se conectaron los apagadores, se instalaron dentro de la caja (tableplast518) para el control del funcionamiento de la resistencia y la lámpara. Ver **Figura 6**, Cámaras de Incubación, siguiente.

Dentro de las cajas de madera se instalo la resistencia y la lámpara respectivamente como se muestra en la **Figura 8, Anexo III (Capitulo 15.3., pagina 103)**.



**Figura 6. Cámaras de incubación.**

**Actividad 2. Diseño de cabina anaerobia.**

Se hizo el cálculo del volumen por partes:

1.- Sacamos el volumen de un rectángulo:

$$V_{\text{RECTANGULO}} = a * b * c$$

Donde:

$$a = 70\text{cm}$$

$$b = 51\text{cm}$$

$$c = 64\text{cm}$$

$$V_{\text{RECTANGULO}} = 70\text{cm} * 51\text{cm} * 64\text{cm}$$

$$V_{\text{RECTANGULO}} = 228480\text{cm}^3$$

2.- Sacamos el volumen de los cilindros:

$$V_{\text{CILINDRO}} = \frac{\pi}{4} * d^2 * h$$

Donde:

$$d = 21\text{cm}$$

$$h = 15\text{cm}$$

$$V_{\text{CILINDRO}} = \frac{\pi}{4} (21\text{cm})^2 (15\text{cm})$$

$$V_{\text{CILINDRO}} = 5195.4089\text{cm}^3$$

Pero como son dos cilindros:

$$V_{\text{CILINDRO}} = 2 * 5195.4089\text{cm}^3$$

$$V_{\text{CILINDRO}} = 10390.8178\text{cm}^3$$

3.- Sacamos el volumen del prisma triangular:

$$V_{\text{PRISMA}} = \frac{1}{2} wh * l$$

Donde:

$$w = 43\text{cm}$$

$$l = 70\text{cm}$$

$$h = 26.5\text{cm}$$

$$s = 34\text{cm}$$

$$V_{\text{PRISMA}} = \frac{1}{2} 34 \text{ cm} * 26.5 \text{ cm} * 70 \text{ cm}$$

$$V_{\text{PRISMA}} = 31535 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto el Volumen total:

$$V_T = (V_{\text{RECTANGULO}} + V_{\text{CILINDRO}}) - V_{\text{PRISMA}}$$

$$V_T = (228480 \text{ cm}^3 + 10390.8178 \text{ cm}^3) - 31535 \text{ cm}^3$$

$$V_T = 207335.8178 \text{ cm}^3 = 207.335 \text{ litros}$$

### Descripción General de la Cabina Anaerobia:

La cabina anaerobia contiene un panel de control donde contiene un controlador de temperatura donde registra la temperatura a la que se encuentra dentro de la cabina anaerobia y permite no sobrepasar la temperatura que deseemos la cabina anaerobia esta diseñada para trabajar en condiciones máximas de 100°C ya que esta hecho de acrílico y su propiedad térmica no requiere más de esta temperatura, contiene en el panel swiches donde podemos operar la resistencia, el foco y el ventilador. Ver **figura 7**, Vista de frente de la cabina anaerobia junto con el panel de control.

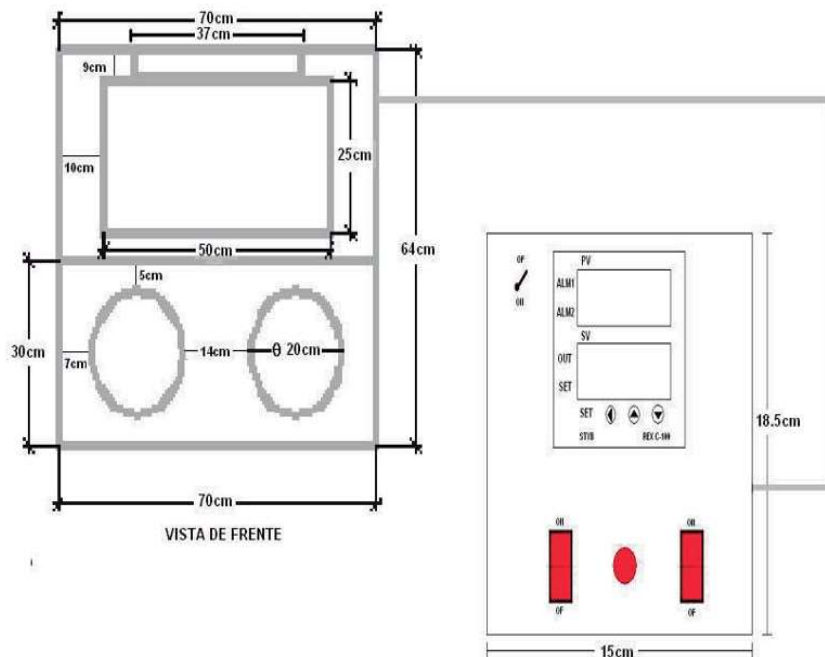


Figura 7. Vista de frente de la cabina anaerobia junto con el panel de control

**Introducción:**

La cabina anaerobia esta diseñada para trabajar en un ambiente anaerobio, con sistemas microbianos, permite el trabajo con microorganismos anaerobios de tal manera que se pueden destapar muestras dentro de la cabina sin riesgo de exposición para las bacterias y para el usuario. Provee un ambiente controlado libre de oxigeno para el desplazamiento de una corriente de gas de nitrógeno. La cabina anaerobia se puede manejar fácil y ergonómicamente si se encuentra a una altura de 75cm.

El equipo esta diseñado para trabajar en las siguientes condiciones:

✓ **Resistencia a la intemperie.**

Los acrílicos pueden estar expuestos a la intemperie por largos períodos de tiempo y no demuestran cambios significativos en color o propiedades físicas.

✓ **Ópticas.**

La transmisión de luz visible es del 92%, siendo igual a la del vidrio óptico.

✓ **Resistencia al Impacto.**

Para uso general una resistencia de 0.2 a 0.5 Libra-pie/pulgada, aproximadamente 6 veces mayor a la del vidrio.

✓ **Resistencia a Químicos.**

Es resistente al agua, álcalis, ácidos diluidos, ésteres simples, hidrocarburos alifáticos, pero no se recomienda para disolventes orgánicos, acetonas, hidrocarburos clorados y aromáticos.

✓ **Aislamiento Eléctrico.**

Tiene buenas propiedades aislantes y resistencia al paso de corriente.

✓ **Propiedades Térmicas.**

La temperatura de deflección varía de 72 a 100 grados centígrados con una temperatura de servicio típica de 80 grados centígrados, es 20% mejor aislante que el vidrio. La temperatura de operación para materiales biológicos normalmente no excede los 55°C, por lo que el material se considera apropiado.

✓ **Ligereza.**

Peso específico de 1.19 gr/cm cúbico, es 50% más ligero que el vidrio, 43% más ligero que el aluminio.

✓ **Dureza.**

Similar a la de los metales no ferrosos como el cobre y el latón. Dureza Barcol 50 unidades.

✓ **Flamabilidad**

Es combustible, pero a la velocidad de 1.2 cm. /min. Se puede formular con retardancia a la flama.

La cabina anaerobia consta de una serie de dispositivos, ver la siguiente **figura 8**, pagina 45, componentes de la cabina anaerobia, que se describen a continuación:

1. Válvula de aguja:

Entrada de gas de 3/8 de pulgada x 3/8 de pulgada, con dos niples campana y dos tuercas locas para gas de 3/8 de pulgada.

2. Tubos de acrílico:

De 15cm de largo con un diámetro de 20cm, para sujetar los guates de neopreno.

3. Guates de neopreno:

De 20cm de diámetro, 80cm de largo, para el manejo dentro de la cabina anaerobia.

#### 4. Puerta:

De 50cm x 25cm para depositar las muestras, bascula, etc. Con manija de acero inoxidable pintada en negro.

#### 5. Lámpara:

Fluorescente lineal de 37cm, 8W y 120V. Provee de luz interior para una mejor visualización.

#### 6. Ventilador:

Suministra aire en el interior para mantener una temperatura homogénea en toda la cabina anaerobia se encuentra directamente en la resistencia, de de 12 centímetros \* 12 centímetros y 120V.

#### 7. Resistencia:

De tira de 30cm, 500w y 120V, provee de calor la cual no debe ser mayor de 100°C debido al material con que se hizo.

#### 8. Termopar:

Tipo J de 1m determina la cantidad de calor que emite la resistencia y es registrada en el controlador de temperatura ubicada en el panel de control.

#### 9. Tubo sapa:

De ½ pulgada y 85cm con dos conectores de 3/8 de pulgada transporta todo el cable “pot” calibre 14, 600V, de la resistencia, la lámpara, el termopar y el ventilador hacia el panel de control.

#### 10. Panel de control:

Controla la resistencia la lámpara y el ventilador, contiene un controlador digital de temperatura, un relevador MGN de 2 Amperes y 120V, un apagador para la lámpara que se encuentra a un costado del controlador digital de temperatura, un apagador para el ventilador que se encuentra en la parte de abajo del lado

derecho, un apagador con una lámpara piloto color rojo para el controlador digital de temperatura y resistencia esta ubicada del lado izquierdo.

11. Controlador digital de temperatura:

Registra la temperatura deseada y la que esta dentro de la cabina anaerobia, este a su vez esta conectado a la resistencia para encenderla cuando este  $1^{\circ}\text{C}$  debajo del requerido y apagarla cuando este  $1^{\circ}\text{C}$  arriba del requerido.

12. Válvula de aguja:

Salida de gas de  $3/8$  de pulgada x  $3/8$  de pulgada, con dos niples campana y dos tuercas locas para gas de  $3/8$  de pulgada.

13. Asbesto:

Protege al acrílico de fundirlo por la resistencia debido al calor emitido por la misma, mide  $35\text{cm} \times 8\text{cm}$ .

14. Estantería:

Hecha de acrílico  $50\text{cm} \times 40\text{cm} \times 15\text{cm}$  de tres pisos para colocar muestras, espátulas, etc.

15. Varilla Roscada:

Detiene al asbesto junto con la resistencia contiene tuercas y rondanas galvanizadas de  $1/4$  mide  $10\text{cm}$  y  $1/4$  espesor, la separación de la resistencia y del asbesto es de  $4\text{cm}$  y el asbesto va pegado a la pared del acrílico.

16. Extractor de aire:

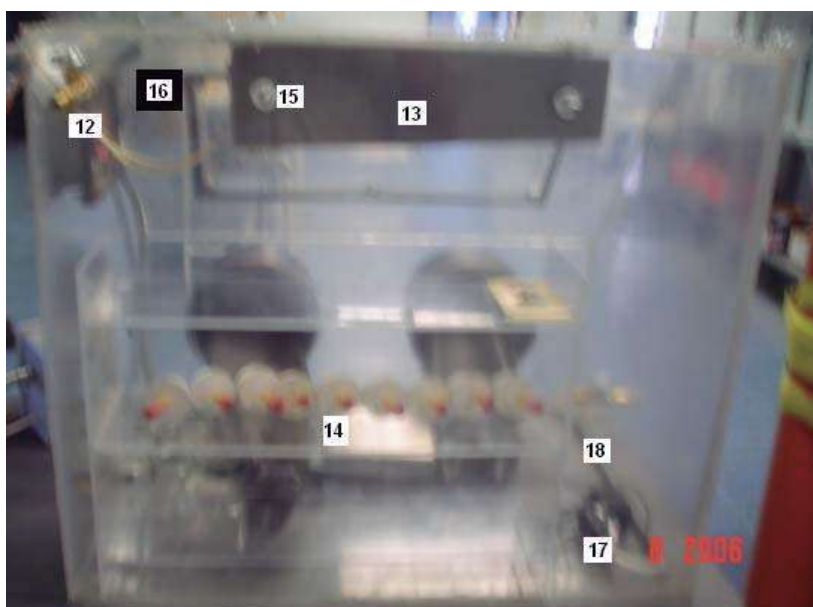
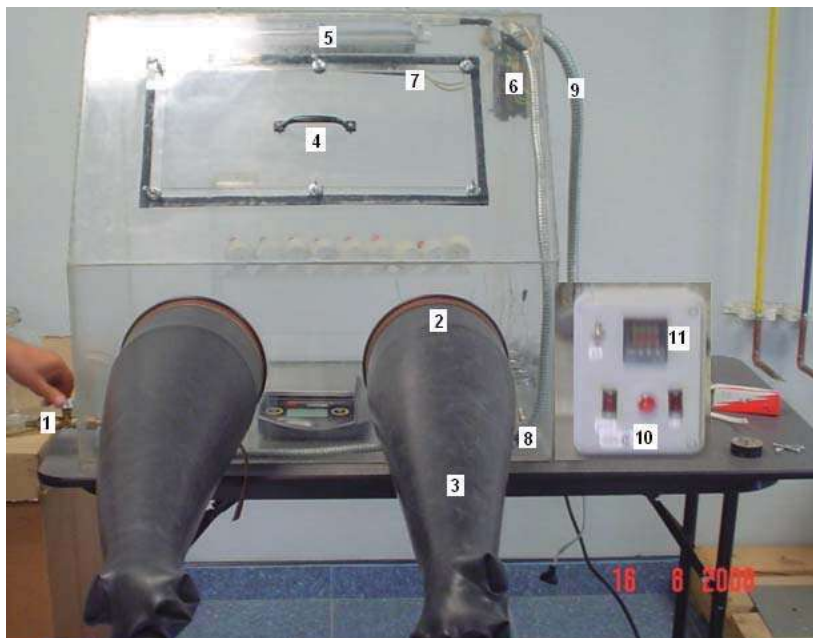
Expulsa todo el aire dentro de la cabina anaerobia para facilitar el barrido con nitrógeno y dejar sin oxígeno dentro de la misma.

**17. Enchufe:**

Sirve para encender algún aparato dentro de la cabina, el equipo más usual es básculas de laboratorio.

**18. Tubo Sapa:**

De ½ pulgada x 1 metro de largo. Conduce el cable para el enchufe y el termopar.



**Figura 8. Componentes de la cabina anaerobia.**

**Pruebas de Hermeticidad.**

Se realizó una prueba introduciendo aire comprimido y poniendo jabón para ver si en realidad la cabina anaerobia no tenía fuga alguna, para comprobar que la cabina no tenía fugas y retenía los gases observamos los guantes de plástico y el tiempo que tardo fue aproximadamente de 20min. El compresor de aire que utilizo para la prueba es el siguiente:

Marca: ALLTRADE.

Voltaje: 120 Volts.

Presión máxima de trabajo: 115psi máx.

Modelo: 481214.

Ciclo de servicio: 75%.

15 Amperes.

Ciclos: 60Hz.

Fase 1.

5 Galones.

Después se hizo un barrido con nitrógeno, al momento de hacer el barrido con nitrógeno se tardo aproximadamente de 30 a 45 minutos para dejar con un 10% de oxígeno registrado en un medidor de Oxígeno en aire marca lutron (DO-5510HA) cabe mencionar que el sistema de extracción de aire no estaba funcionando. Una vez conectado el sistema de extracción de aire las concentraciones de oxígeno fue alrededor del 2% en 15minutos.

La temperatura a la que se esta trabajando dentro de la cabina anaerobia registrada en el controlador de temperatura es de 35°C y para comparar esta temperatura que sea la correcta leemos la temperatura del aparato de medidor de oxígeno en aire que es similar.

**Diseño de las cámaras de incubación.****Descripción General de las Cámaras de Incubación:**

Las cámaras de incubación llevan un panel de control el cual contiene un controlador de temperatura donde registra la temperatura a la que se encuentra dentro de las cámaras de incubación y permite no sobrepasar la temperatura que deseemos en las cámaras incubadoras contiene en el panel swiches donde podemos operar la resistencia y el foco. Ver **Figura 9**.



**Figura 9. Cámaras de incubación.**

**Introducción:**

Las cámaras de incubación permiten trabajar en cualquier rango de temperatura no sobrepasando los 150°C, están diseñadas para trabajar cómodamente.

Las cámaras de incubación constan de una serie de dispositivos, que se describen a continuación, ver **figura 10** pagina 49:

**1. Puertas:**

Hechas con vidrio de 3mm de espesor y tienen una manija de acero inoxidable para abrir y cerrar fácilmente.

**2. Resistencia:**

De 60cm de largo, 750W y 120V, provee calor para dentro de toda la cámara de incubación.

**3. Asbesto:**

De 67cm de largo y 7cm de ancho, protege a la madera de calentarse y prenderla.

**4. Panel de control:**

Controla la resistencia la lámpara, contiene un controlador digital de temperatura, un relevador MGN de 2 Amperes y 120V, un apagador para la lámpara que se encuentra a un costado del controlador digital de temperatura, un apagador con una lámpara piloto color rojo para el controlador digital de temperatura y resistencia.

### 5. Termopar:

Tipo J de 1m determina la cantidad de calor que emite la resistencia y es registrada en el controlador de temperatura ubicada en el panel de control.

### 6. Controlador digital de temperatura:

Registra la temperatura deseada y la que esta dentro de la cabina anaerobia, este a su vez esta conectado a la resistencia para encenderla cuando este 1°C debajo del requerido y apagarla cuando este 1°C arriba del requerido.

### 7. Tubo Sapa:

De ½ pulgada y de 65cm de largo. Protege el cable de la resistencia, el termopar y el controlador digital de temperatura.



**Figura 10. Componentes de las Cámaras de incubación.**

Las fibras celulósicas se disponen en el interior de la madera unida entre sí, ordenadamente, formando regiones cristalinas, y dichos aglomerados cristalinos se unen a su vez entre sí por medio de fibras sobresalientes, creando entonces zonas amorfas de unión y zonas cristalinas. Las propiedades que hacen de la fibra celulósica el material idóneo para la confección del papel son las siguientes:

- Gran resistencia mecánica a tensión.
- Buena flexibilidad, natural y adquirida.
- Resistencia a la deformación plástica.
- Insolubilidad en agua de la fibra.
- Hidrófila
- Amplio rango de dimensiones.
- Facilidad inherente a enlazarse.
- Facilidad para absorber aditivos modificantes.
- Estable químicamente.
- Relativamente incolora.

### **Actividad 3. Diagrama de los Equipos.**

#### **Cabina Anaerobia:**

Se procedió a realzar la instalación de los siguientes aparatos para la Cabina Anaerobia:

Manija para la puerta.

Ventilador.

Lámpara.

Resistencia.

Controlador de temperatura.

Extractor de aire.

Asbesto.

El diagrama de la Cabina Anaerobia se muestra en la **figura 11**, pagina 51:

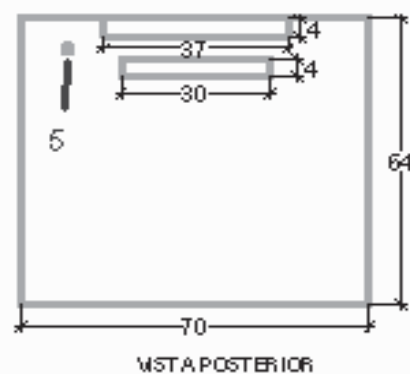
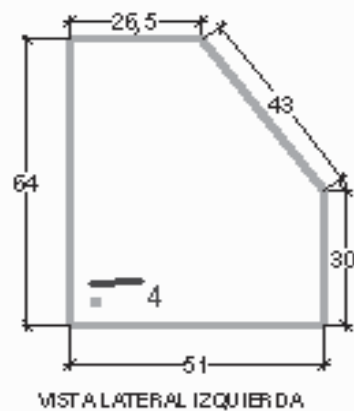
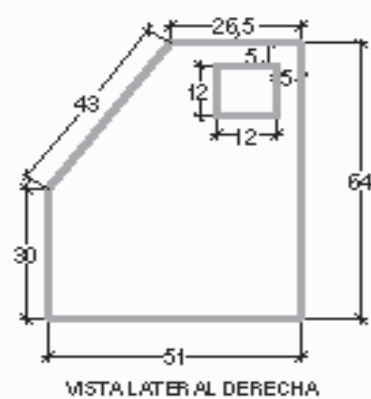
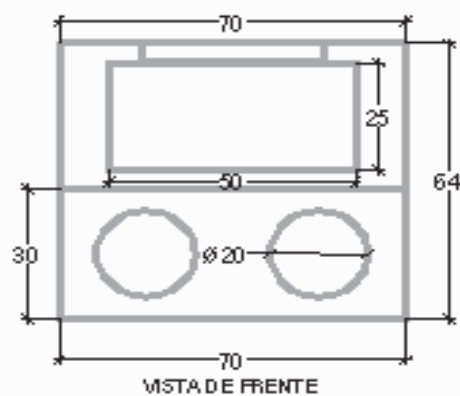
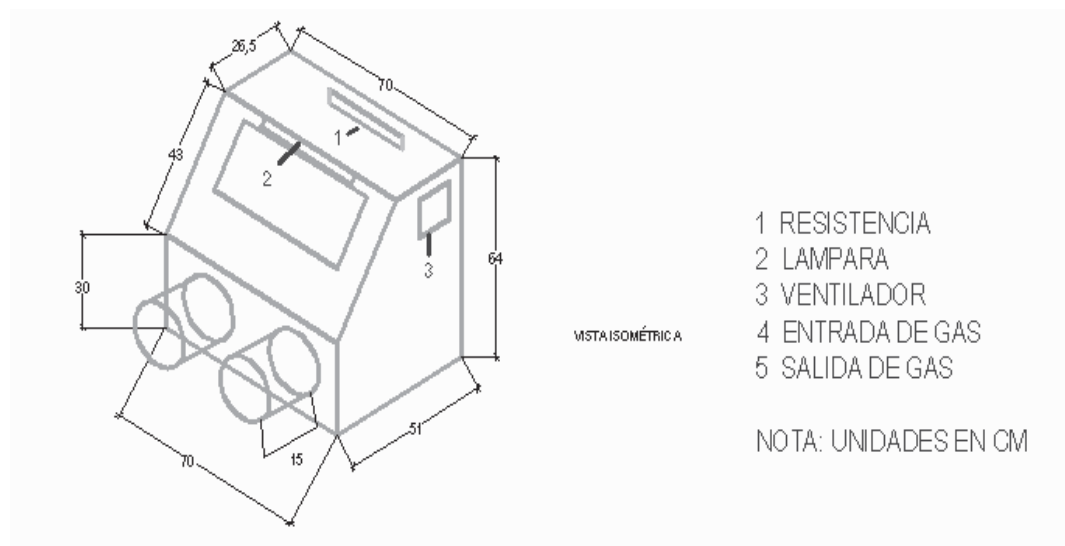


Figura 11. Diagrama de la cabina anaerobia.

**Biorreactores:**

Cada reactor estará conectado a un sistema de medición de biogás por litro. El sistema medidor de biogás consta de dos bidones de plástico interconectados, uno de ellos lleno con una solución saturada (200 gr / L) de sal (NaCl), se les ajusto el pH $\approx$ 4 con HCl, el diagrama de los biorreactores se muestra en la **figura 12**, siguiente:

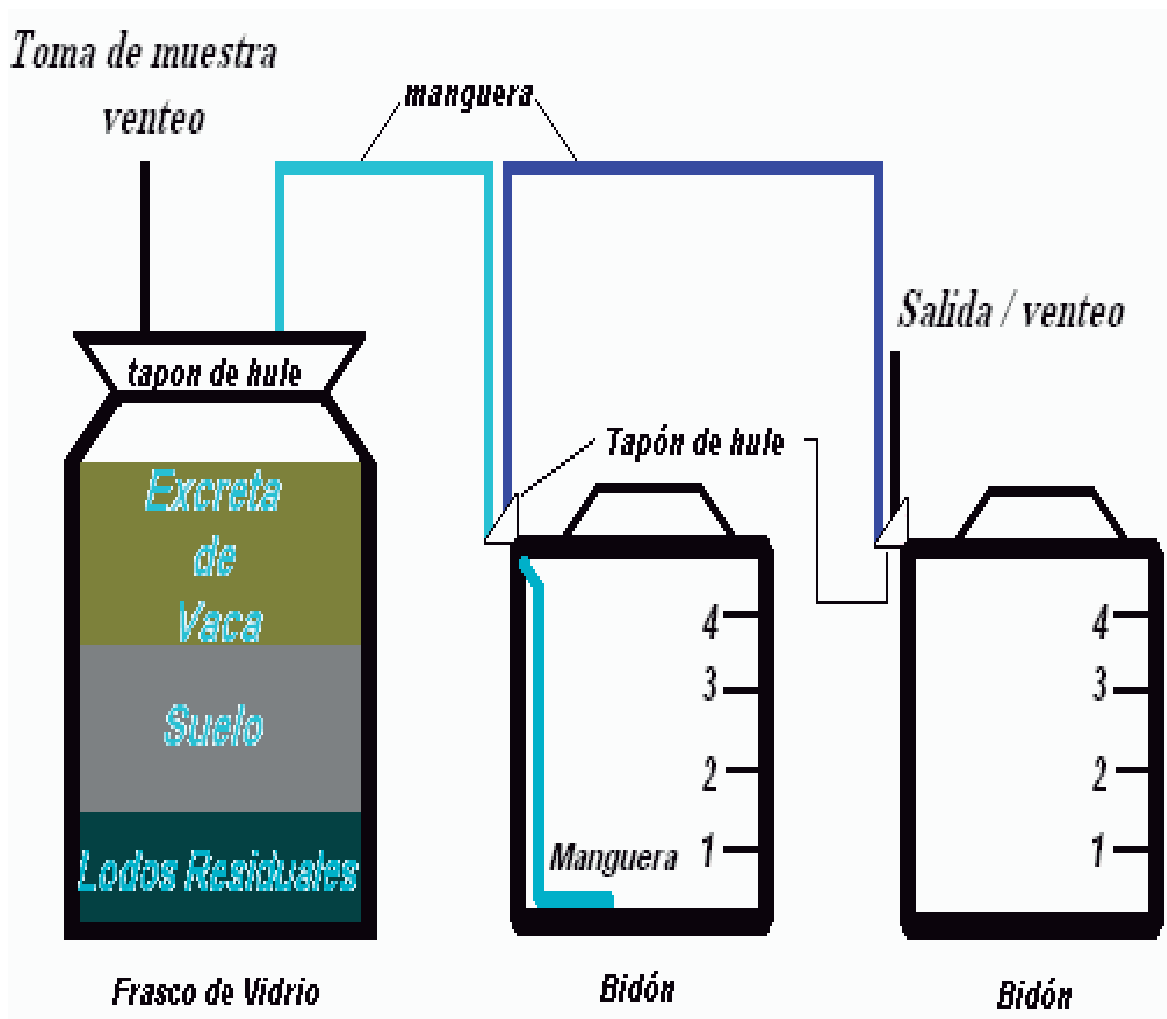


Figura 12. Diagrama de reactor.

### Cámaras de Incubación:

Se mandaron hacer cuatro Cajas de Madera con las medidas de 93.5cm de ancho por 107cm de alto. El diagrama de las cámaras de incubación se muestra en la **Figura 13**, siguiente:

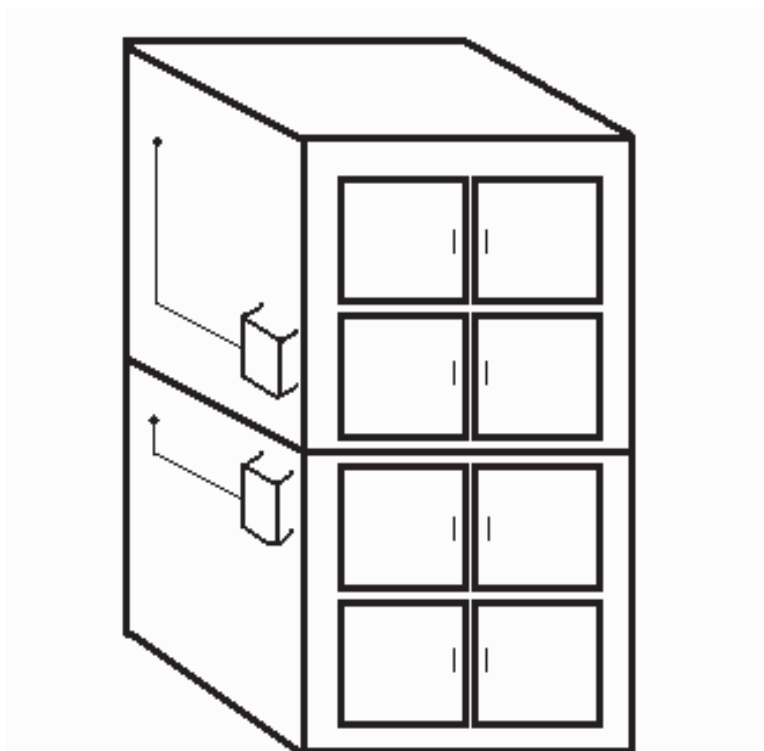
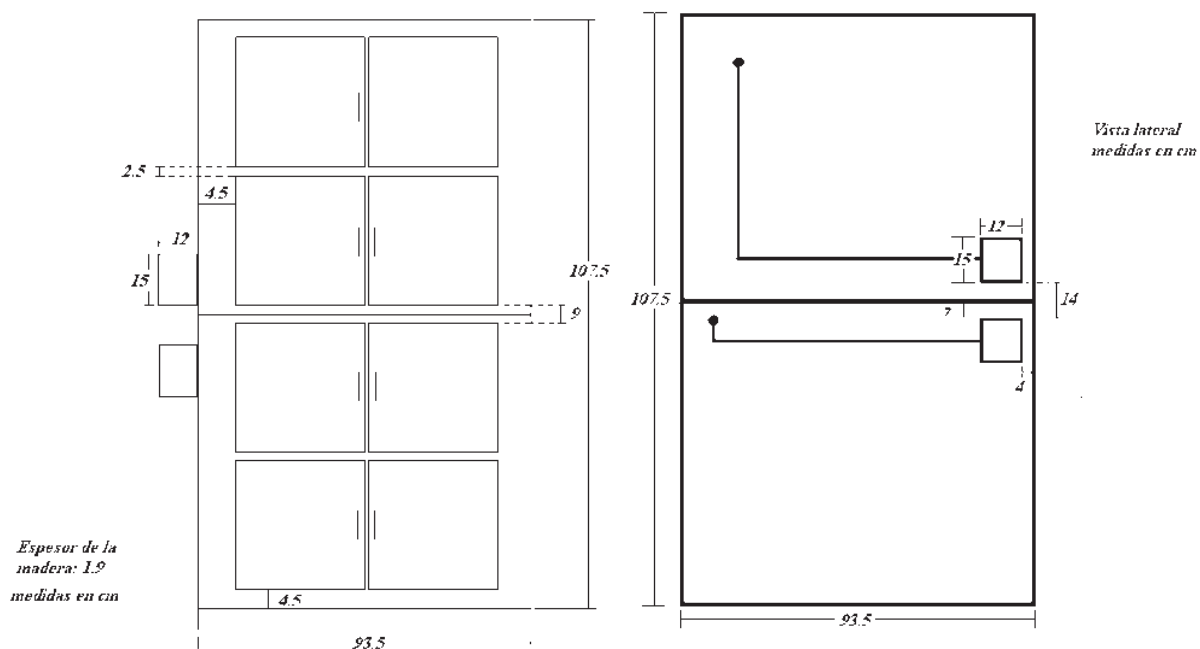


Figura 13. Diagrama de cajas de madera.

## 9.2. Fase II. Obtención de Materiales.

### **Actividad 1. Adquisición de los Equipos.**

Se obtuvieron los siguientes materiales para la construcción de la cabina anaerobia:

Acrílico

Lámpara.

Ventilador.

Resistencia.

Controlador de temperatura.

Guantes.

Válvulas.

Tubo Sapa.

Silicón.

Cable de Alta temperatura.

Para los biorreactores se obtuvieron los materiales siguientes:

Frascos de vidrio.

Tapones de hule.

Varillas de vidrio.

Mangueras de hule.

Cinchos.

Silicón.

Para las Cajas de Madera se obtuvieron los materiales siguientes:

Madera.

Asbesto.

Resistencia.

Controlador de temperatura.

Tubo Sapa.

Cable de Alta temperatura.

**Actividad 2. Recolección de Muestras.**

Se recolectaron cuatro tipos de muestra:

- 1.- Excreta de vaca.
- 2.- Lodos residuales.
- 3.- Suelo.
- 4.- Aserrín.

Para el llenado de nuestros digestores se realizo a recolectar excreta de vaca en una granja en la ciudad de Quiroga.

Para el suelo se recolecto dentro del Investigaciones sobre Recursos Naturales (INIRENA), a una profundidad de 15-30 centímetros. Y para el aserrín se recolecto en una maderería de la ciudad de Morelia.

Los lodos que utilizamos fueron traídos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Quiroga Michoacán, llamada Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA), en el cual primero llegan todas la aguas residuales de la ciudad de Quiroga Michoacán pasan por una rejilla la cual elimina toda la materia grande como bolsas, madera, comida, etc., después pasan por otra rejilla donde es eliminada la materia mas pequeña como son las hojas papel que se haya filtrado de la primera, etc., de ahí es bombeada hacia un desarenador donde es eliminada la arena mediante el proceso de sedimentación y por ultimo llega al reactor anaerobio de flujo ascendente donde sedimentan los lodos y el agua se usa para el sistema de riego de las cosechas, los lodos son previamente secados para después utilizarlos como abono en dichas cosechas.

**Actividad 3. Llenado de Biorreactores.**

Se llenaron dos tipos de biorreactores con mezclas de JAVAL (Jardín, excreta de vaca y Lodos residuales) y mezclas de AVAL (Aserrín, Excreta de vaca y Lodos residuales) con las cantidades siguientes:

● Para la muestra de JAVAL:

350 gr. de Suelo.

350 gr. de Excreta de Vaca.

350 gr. de Lodos Residuales.

3 gr. de Carbonato de Sodio.

3 gr. de Sacarosa.

● Para la muestras de AVAL:

50 gr. de Aserrín.

500 gr. de Excreta de Vaca.

500 gr. de Lodos Residuales.

3 gr. de Carbonato de Sodio.

3 gr. de Sacarosa.

### 9.3. FASE III. EVALUACION DE COSTOS.

A continuación se presentan cada uno de los costos de los componentes así como el costo total de Sistema de Reacción Anaerobio, para cada uno de los equipos.

#### Costo del Equipo de Cabina Anaerobia.

Costos de cada uno de los componentes de la cabina anaerobia:

| nombre                               | numero de partes | precio unitario | costo     |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|-----------|
| Acrílico 6mm                         | 1                | \$2163.47       | \$2163.47 |
| Resistencia 30cm                     | 1                | \$52            | \$52      |
| Asbesto 1/8                          | 1                | \$62.60         | \$62.60   |
| Lámpara 37cm                         | 1                | \$120.87        | \$120.87  |
| Ventilador 5pulgadas                 | 1                | \$95.65         | \$95.65   |
| Guantes de Neopreno<br>8pulgadas-1/2 | 2                | \$3682.40       | \$7364.8  |

| NOMBRE                                    | NUMERO DE PARTES | PRECIO UNITARIO | COSTO   |
|-------------------------------------------|------------------|-----------------|---------|
| Sujetadores para guantes de neopreno      | 2                | \$65            | \$130   |
| Base de Acrílico para guantes de neopreno | 2                | \$100           | \$200   |
| Tubo sapa ½ pulgada                       | 1metro           | \$5.49/metro    | \$5.49  |
| Conector para tubo sapa 3/8 de pulgada    | 2                | \$2.04          | \$4.08  |
| Válvula de aguja 3/8 de pulgada           | 4                | \$17.39         | \$69.56 |
| Niple campana 3/8 de pulgada              | 4                | \$5.22          | \$20.88 |
| Tuerca loca                               | 4                | \$5.65          | \$22.6  |
| Varilla roscada ¼                         | 1                | \$6.60          | \$6.60  |
| Tuerca galvanizada hexagonal ¼            | 10               | \$0.11          | \$1.1   |
| Rondana plana galvanizada ¼               | 12               | \$0.37          | \$4.44  |
| Termopar                                  | 1metro           | \$26.50/metro   | \$26.50 |
| Relevador MGN                             | 1                | \$120           | \$120   |
| Controlador digital de temperatura        | 1                | \$525           | \$525   |
| Cordón "pot" cal 14                       | 2metros          | \$4.27/metro    | \$8.54  |
| Extractor de aire                         | 1                | \$170           | \$170   |
| Switc de balancín                         | 1                | \$5.90          | \$5.90  |
| Lámpara piloto color rojo                 | 1                | \$16.06         | \$16.06 |

| NOMBRE                                   | NUMERO DE PARTES | PRECIO UNITARIO | COSTO                     |
|------------------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| Caja de piso<br>Tableplast gris          | 1                | \$81.84         | \$81.84                   |
| Cable silicón 200°C                      | 3metros          | \$4.00/metro    | \$12                      |
| Jaladera para puerta                     | 1                | \$14.35         | \$14.35                   |
| Perforaciones en caja<br>de acrílico     | 1                | \$100           | \$100                     |
| Tornillo cabeza de<br>gota 5/32 pulgadas | 4                | \$0.52          | \$2.08                    |
|                                          |                  |                 | <b>TOTAL= \$ 11406.41</b> |

### Costos de Biorreactor.

Costos de cada uno de los componentes de los Biorreactores.

| Material               | Precio(\$) |
|------------------------|------------|
| Frasco de vidrio       | \$17.39    |
| Tubo de latex          | \$19       |
| Tapón de hule No<br>15 | \$45.67    |
| Tubo de vidrio<br>12mm | \$22       |
| Bidón No 5             | \$7.96     |
| <b>TOTAL= \$111.35</b> |            |

**Costo de la Cámara de Incubación:**

| nombre                                 | numero de partes | precio unitario         | costo    |
|----------------------------------------|------------------|-------------------------|----------|
| Lámpara 37cm                           | 1                | \$120.87                | \$120.87 |
| Tubo sapa ½ pulgada                    | 1metro           | \$5.49/metro            | \$5.49   |
| Conector para tubo sapa 3/8 de pulgada | 2                | \$2.04                  | \$4.08   |
| Varilla roscada ¼                      | 1                | \$6.60                  | \$6.60   |
| Tuerca galvanizada hexagonal ¼         | 8                | \$0.11                  | \$0.88   |
| Rondana plana galvanizada ¼            | 8                | \$0.37                  | \$2.96   |
| Termopar                               | 1metro           | \$26.50/metro           | \$26.50  |
| Relevador MGN                          | 1                | \$120                   | \$120    |
| Controlador digital de temperatura     | 1                | \$525                   | \$525    |
| Cordón "pot" cal 14                    | 2metros          | \$4.27/metro            | \$8.54   |
| Swich de balancín                      | 1                | \$5.90                  | \$5.90   |
| Lámpara piloto color rojo              | 1                | \$16.06                 | \$16.06  |
| Caja de piso Tableplast gris           | 1                | \$81.84                 | \$81.84  |
| Cable silicón 200°C                    | 2metros          | \$4.00/metro            | \$8      |
| Caja de Madera                         | 1                | \$2125                  | \$2125   |
|                                        |                  | <b>TOTAL= \$3057.72</b> |          |

#### 9.4. FASE IV. Seguimiento de las variables a controlar para la producción de metano.

##### **Actividad 1. Determinación de pH:**

Para la determinación del pH se toma una muestra de 3gr y se disuelve con 15ml de agua destilada y se lee el pH, el medidor de pH que utilice es el UB-10 ultrabasic de la marca Denver Instrument, cabe mencionar que antes de empezar a tomar el pH de las muestras se tiene que calibrar al aparato el electrodo es del # 300728.1 Denver Instrument con una solución de cloruro de potasio 3M a una temperatura de 25°C.

##### **Actividad 2. Determinación de Humedad:**

1. De la muestra de 15gr que se saco del reactor sacamos tres partes de 4gr cada una poniéndolas en una capsula de porcelana anotando previamente solo el peso de la capsula de porcelana ( $W_c$ ), después pesamos el peso de la muestra húmeda ( $W_h$ ).
2. Estas tres muestras se secan a 105°C durante 24 horas, una vez concluido el secado se pesan las tres muestras y este es nuestro peso seco ( $W_s$ ).
3. Una vez seco se vuelve a pesar y se saca el %humedad para las tres muestras mediante la formula siguiente:

$$\%humedad = \frac{W_{muestra} - W_{seco}}{W_{muestra}} * 100$$

##### **Actividad 3. Determinación de Sólidos Totales:**

1. Después de obtener el %humedad sacamos %Sólidos totales para las tres muestras mediante:

$$\%ST = 100 - \%humedad$$

##### **Actividad 4. Determinación de Sólidos Totales Volátiles:**

1. Para la determinación de sólidos totales volátiles tomamos el  $W_s$ .
2. Se meten las tres muestras a la mufla y se calcina por a 550°C durante 3 horas, cuando haya transcurrido el tiempo se toma el peso calcinado ( $W_{calcinado}$ )

3. Por último determinamos el %Sólidos totales volátiles mediante la ecuación siguiente:

$$\%STV = \frac{Ws - W_{calcinado}}{Ws} * 100$$

**NOTA:** Este porcentaje es relativo al %ST

**Actividad 4. Determinación de metano:**

Para la el calculo de metano se usó el cromatógrafo de gases VARIAN CP 5800 el cual nos da la cantidad de metano que hay presente en la mezcla.

**9.5. FASE V. MONTAJE Y SEGUIMIENTO.**

**Actividad 1. Montaje de los Reactores.**

**1.- Reactor**

Para el armado del reactor se utilizó un frasco de vidrio de 2lt de capacidad con un diámetro interior de 6cm al reactor se colocó un tapón de hule perforado con 2 agujeros de 5mm de diámetro en el cual lleva un tubo de vidrio de 4mm de diámetro en cada uno de los orificios con 6 a 7cm de largo uno de los tubos de vidrio lleva una manguera de 5mm de diámetro y con una longitud de 25cm que va desde el reactor hacia el primer bidón de 5 litros y el segundo orificio es de toma de muestra/venteo. En el primer bidón lleva un tapón de hule con dos perforaciones de 5mm de diámetro en la primera perforación que viene del reactor lleva una manguera por dentro del bidón de 5mm de diámetro y una longitud de 30cm del otro tubo de vidrio va hacia el segundo bidón de 5 litros que tiene un tapón de hule con dos perforaciones de 5mm de diámetro y en la perforaciones va un tubo de vidrio de 4mm de diámetro y una manguera de 30cm de longitud y 5mm de diámetro y en el otro tubo de vidrio es la salida/venteo. Ver **Figura 10, Anexo III (capítulo 15.3., página 96).**

**Actividad 2. Alimento de los Biorreactores**

Los componentes secos de la alimentación de los reactores serán una mezcla 60% en peso de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Municipales y 40% en papel bond. Se le agregarán biosólidos de lodos activados convencionales de una planta de tratamiento de aguas (Ciudad de Quiroga) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA), en una proporción Residuos sólidos Municipales: biosólidos de 59:1 (Poggi-Varaldo, *et al.*, 1997)<sup>7</sup>. La mezcla resultante se secará en horno a 110° C durante 24 h. Una vez seca se molerá en un molino de rastrojo con una criba de tamaño 3 mm. Se guardará el polvo resultante en un lugar fresco y seco hasta su utilización. Los reactores serán alimentados cada semana con 21 gr. de la mezcla molida y seca de los Residuos Sólidos Municipales y 39 ml de H<sub>2</sub>O de. Se tomará al momento de la alimentación una muestra de 20 g para determinar pH, contenido de humedad, sólidos totales y sólidos totales volátiles.

## CAPITULO 10

## RESULTADOS Y ANALISIS.

**Cabina anaerobia***Pruebas de hermeticidad*

La metodología para probar hermeticidad se describió en Capítulo 9.5.3. Los resultados obtenidos demostraron que la cabina es capaz de retener un gas por 20 min. Después de este tiempo se observó que la presión interna disminuía (observable en los guantes de plástico). Sin embargo, el uso de la cabina requiere de un flujo constante de gas Nitrógeno (Grado industrial, INFRA). El desalojo de oxígeno de la cabina se probó primeramente solo con el desplazamiento de este gas por N<sub>2</sub>. Sin embargo, se requerían de un flujo de N<sub>2</sub> por 30-45 min para lograr concentraciones de 10% de oxígeno. Después, se decidió añadir un sistema de extracción de aire, con lo que se logró que las concentraciones de oxígeno fueran de alrededor de 2% en 15 min. de flujo de de Nitrógeno. Para medir la concentración de oxígeno dentro de la cabina se utilizó un medidor digital de oxígeno marca lutron serie DO-5510HA.

*Resultados de la cabina*

Una vez que se encuentra en concentraciones bajas de oxígeno, se utilizó la cabina para toma de muestra de las dos mezclas. Las tomas de muestras se hicieron dentro de la cabina como se aprecia en la **Figura 9, Anexo III (capítulo 15.3, página 96)**. El manual de operación se encuentra en el anexo IV capítulo 15.4.

***Mezcla de biorreactor (JAVAL y AVAL)***

Dos tipos de mezclas como inóculo se probaron, una llamada JAVAL (suelo de jardín, excreta de vaca y lodos residuales anaerobios) y otra llamada AVAL (aserrín, excreta de vaca y lodos residuales anaerobios). Ambos tipos de inóculo se incubaron tanto a régimen meso como termofílico (35 y 55C, respectivamente). Los resultados del seguimiento y análisis de ambos tipos de inóculos en los reactores anaerobios se describen a continuación.

**(a) Régimen Mesofílico (35°C).**

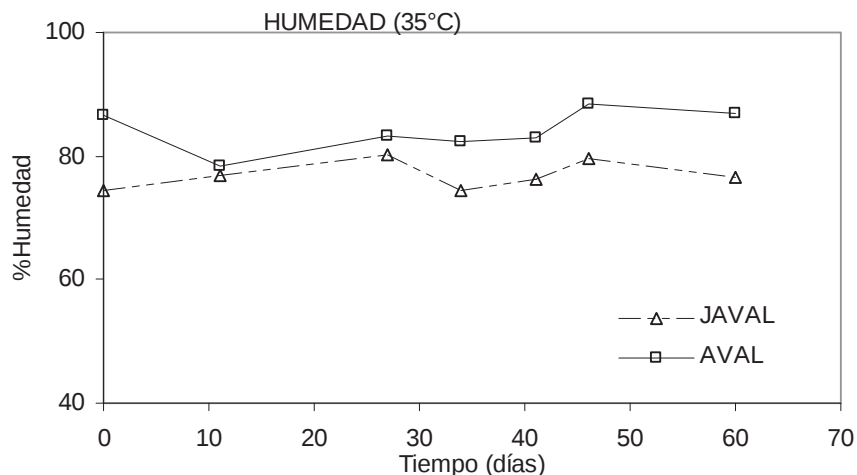
- *Estudios de contenido de Humedad*

La humedad del sistema se estuvo monitoreando a través de la experimentación y toma de muestras; la formula para calcular el contenido de humedad de encuentra en el capitulo 9.3 de técnicas analíticas.

Los sistemas productores de metano dependen fuertemente del contenido de humedad (Westlake, 1995)<sup>9</sup>, como cualquier sistema biológico. De hecho, la producción de metano está ligada a parámetros tales como:

- La composición del inóculo
- pH
- Tamaño de partícula
- Densidad
- Temperatura
- Presencia de sulfatos
- Presencia de tóxicos o inhibidores como el aire.

La determinación de humedad en ambos reactores muestra que el inóculo AVAL es capaz de mantener contenidos de humedad mayores que los del sistema JAVAL. Si bien, ambos son capaces de mantener una humedad similar tanto al inicio como al final de la experimentación **Grafica 1**, página siguiente, determinación de porcentaje de Humedad Régimen Mesofílico. Los reactores AVAL tuvieron un % de H inicial de 86.6 y de 86.7 al ultimo día de operación, entretanto los reactores JAVAL en promedio presentaron un contenido de humedad inicial de 74.3 y final de 76.4. Estos resultados demuestran que ambos reactores son capaces de mantener cierto porcentaje de humedad, a pesar de la alimentación periódica (2 veces por semana) de 65g de sólidos (ver descripción de alimentación en el capitulo 9.4.). Los reactores AVALES operaron en un régimen promedio de 15% de Sólidos Totales, los reactores JAVALES operaron en un régimen promedio de 25% de Sólidos Totales (conversión de alta tasa) (Tchobanoglous, 1998)<sup>3</sup>.

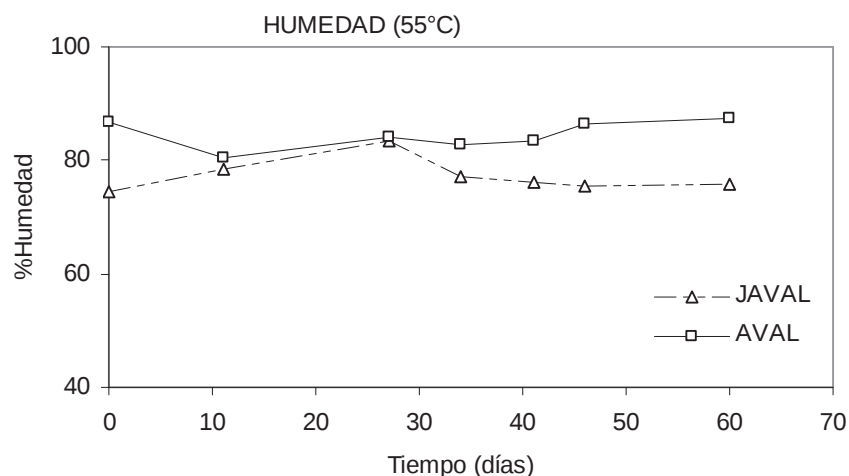


**Grafica 1. Determinación de Porcentaje de Humedad Régimen Mesofílico.**

**(b) Régimen Termofílico (55°C).**

• *Estudios de contenido de Humedad*

Los reactores AVAL tuvieron un porcentaje de humedad inicial de 86.6 y de 87.4 al finalizar, y para los reactores JAVAL 74.35 y 75.9 al inicio y al final respectivamente en esta grafica vemos que ocurre lo mismo que en el régimen mesofílico tienden a tener el mismo comportamiento. Los reactores AVALES operaron en un régimen promedio de 13% de Sólidos Totales, los reactores JAVALES operaron en un régimen promedio de 25% de Sólidos Totales Ver **Grafica 2**, siguiente, determinación de porcentaje de Humedad Régimen Termofílico.



**Grafica 2. Determinación de Porcentaje de Humedad Régimen Termofílico.**

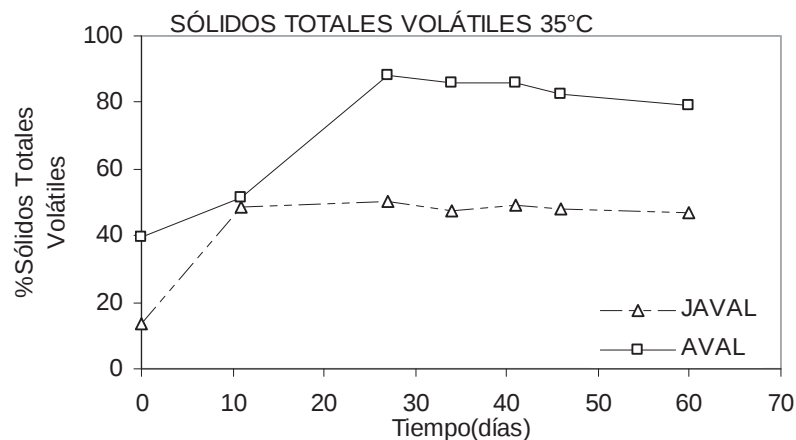
**(a) Régimen Mesofílico (35°C).**

- *Contenido de sólidos totales volátiles.*

Los sólidos totales volátiles (STV) son representativos del material disponible a degradarse dentro de un sistema anaerobio. Existen reportes que indican esta relación entre los STV y la producción de  $\text{CH}_4$ :

| Relación                         | Autor               |
|----------------------------------|---------------------|
| De 0.5-.75m <sup>3</sup> /kg STV | Tchobanoglous, 1998 |
| 0.6-1 m3/kg STV                  | Bagchi, 1994        |
| 0.41m3/kg STV                    | Gunnerson, 1982     |

Ambos tipos de inóculos presentan un patrón de presencia de sólidos totales similar, sin embargo, el inóculo AVAL presenta un periodo de estabilización de 27 días, mientras que su contraparte se estabilizó en 11 días ver **Grafica 3**, siguiente, determinación de sólidos totales volátiles régimen mesofílico. Después del período de estabilización, ambos inóculos mantienen constante el contenido de STV. Es importante mencionar que el inóculo AVAL mantiene dicho % alrededor de 80%, y el JAVAL de 50%. De la misma forma, la producción sostenida de metano es demostrada de forma indirecta por esta grafica, puesto que a pesar de que la alimentación semanal, ambos inóculos fueron capaces de degradar su alimentación y sostener uniformemente los Sólidos Totales Volátiles.

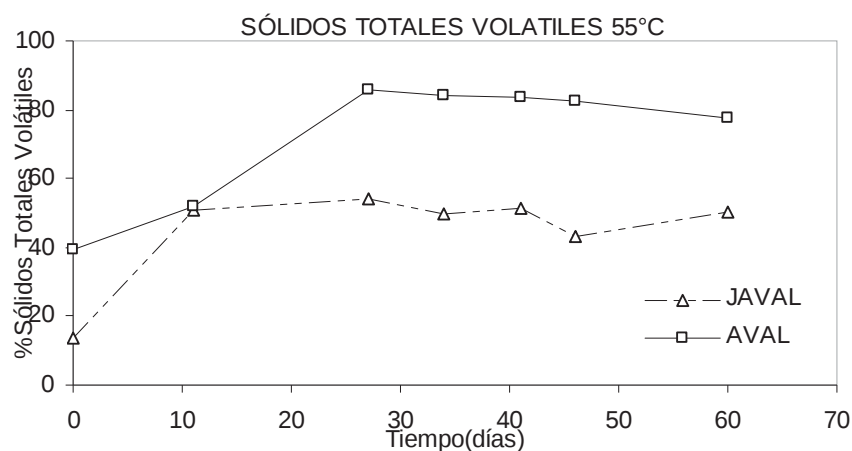


**Grafica 3. Determinación de Porcentaje de Sólidos Totales Volátiles Régimen Mesofílico.**

**(b) Régimen Termofílico (55°C).**

- *Contenido de sólidos totales volátiles.*

En esta grafica podemos observar que es similar el comportamiento al régimen mesofílico, cabe mencionar que la mezcla AVAL tiene un porcentaje de sólidos totales volátiles del 79% y la mezcla JAVAL un 47%, en la mezcla AVAL se observa un incremento hasta el día 27, donde se estabilizo hasta el ultimo día de operación, en cuanto a la mezcla JAVAL hay un incremento hasta el día 11. Ver **Grafica 4**, siguiente, determinación de sólidos totales volátiles régimen termofílico.



**Grafica 4. Determinación Porcentaje de Sólidos Totales Volátiles.**

**(a) Régimen Mesofílico (35°C).**

- *Calculo de la eficiencia de remoción de STV*

Se calculó la eficiencia en la remoción de STV, para proponer la mezcla más apropiada para producción de biogás. La eficiencia de remoción de sólidos totales volátiles se obtuvo mediante la siguiente formula:

$$\eta = \left[ \frac{m_{sv,2} - m_{sv,1}}{m_{sv,2}} \right] * 100$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia

$m_{sv,2}$  = Masa de sólidos totales volátiles Final.

$m_{sv,1}$  = Masa de sólidos totales volátiles inicial.

| Reactor | Régimen Mesofílico 35°C (%) |
|---------|-----------------------------|
| JAVAL   | 71                          |
| AVAL    | 50                          |

**Tabla 2. Porcentaje de eficiencia de las dos mezclas.**

De acuerdo a los cálculos que obtuvimos en la **tabla 2**, anterior, porcentaje de eficiencia de las dos mezclas, la mejor mezcla para el régimen mesofílico es la de JAVAL esto es a que tiene una eficiencia de remoción de sólidos totales volátiles del 71%. Nuestros resultados están en concordancia por los publicados por Poggi et al (2005)<sup>7</sup> quien para reactores similares a los JAVAL reportó eficiencias de 80%, al igual que Valdes (1997)<sup>8</sup>, quien reportó eficiencias de remoción de STV de 67%.

**(b) Régimen Termofílico (55°C).**

- *Cálculo de la eficiencia de remoción de STV*

| Reactor | Regimen Termofílico 55°C (%) |
|---------|------------------------------|
| JAVAL   | 73                           |
| AVAL    | 49                           |

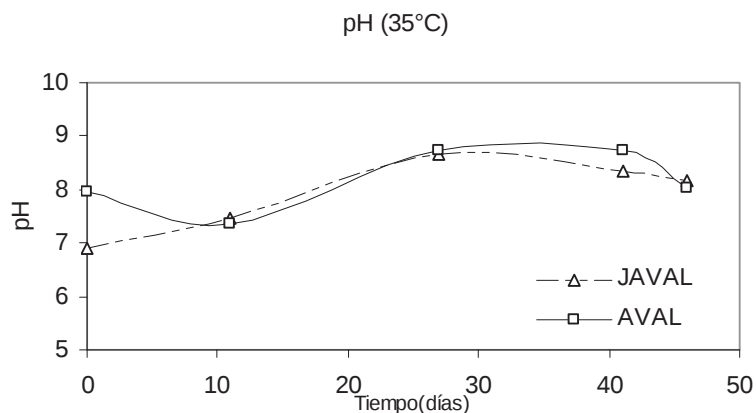
**Tabla 3. Porcentaje de eficiencia de las dos mezclas.**

En este calculo, de la **tabla 3**, porcentaje de eficiencia de las dos mezcla, podemos constatar que cualquiera de las dos mezclas es la más viable es la de JAVAL, comparando las dos vemos que son semejantes la eficiencia de remoción. Donde la eficiencia para JAVAL esta a mas o igual del 71% y la de AVAL menos o igual del 50%.

**(a) Régimen Mesofílico (35°C).**

- *Determinación de pH*

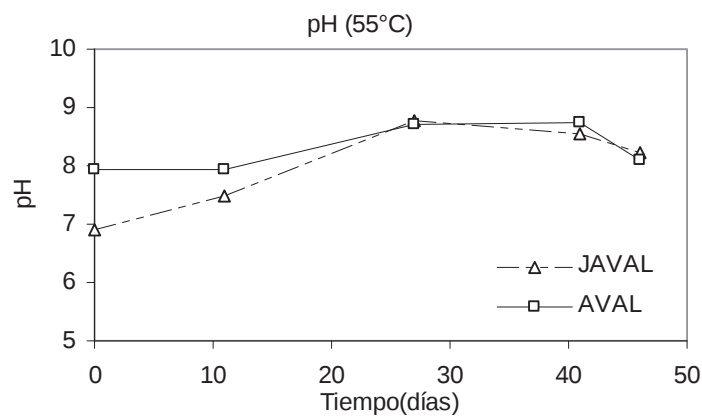
Los valores de pH en ambos reactores fueron similares para las dos mezclas. Los valores iniciales fueron de 7 y 8 para el reactor JAVAL y AVAL, respectivamente, ver **Grafica 5**, determinación de pH. Estos valores se incrementaron durante la experimentación, hasta alrededor de 9, estos valores son mayores que el sugerido como óptimo para los procesos anaerobios, pero es similar al obtenido por Cechi (1990)<sup>2</sup> al trabajar con digestores sólidos de desechos sólidos municipales como alimentación para un composteo anaerobio.

**Grafica 5. Determinación de pH.**

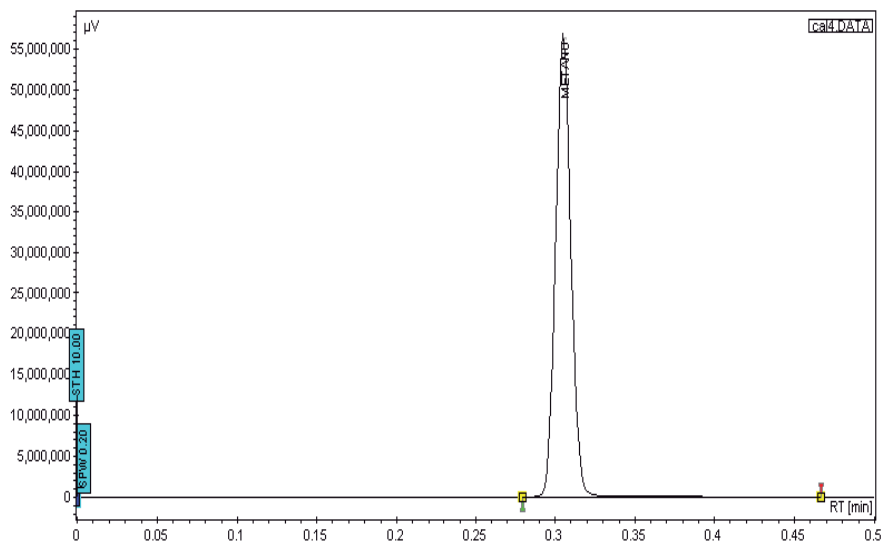
**(b) Régimen Termofílico (55°C).**

- *Determinación de pH*

En esta grafica al igual que en el otro régimen el rango de pH es de 7 a 8, ver **Grafica 6**, determinación de pH. Durante el periodo de experimentación los valores aumentan y disminuyen lo que nos indica que este rango la producción de biogás siempre va a existir, podemos observar que en la grafica para este régimen mesofílico se comportan casi iguales lo que podemos deducir que hay producción de biogás.



**Grafica 6. Determinación de pH**

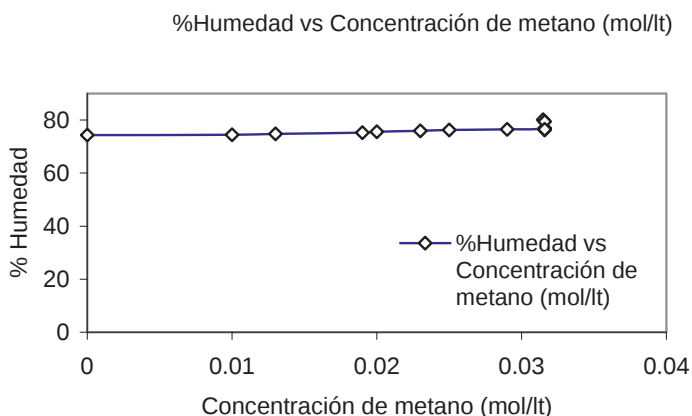


**Grafica 8. Cromatograma, cantidad de metano mezcla JAVAL**

Medición hecha con un Cromatógrafo de Gases (GC) VARIAN CP5800, con un detector FID y una columna empacada, las temperaturas de operación del inyector 200°C, del detector 210°C, de la columna 80°C y el gas de arrastre es de 35ml/min.

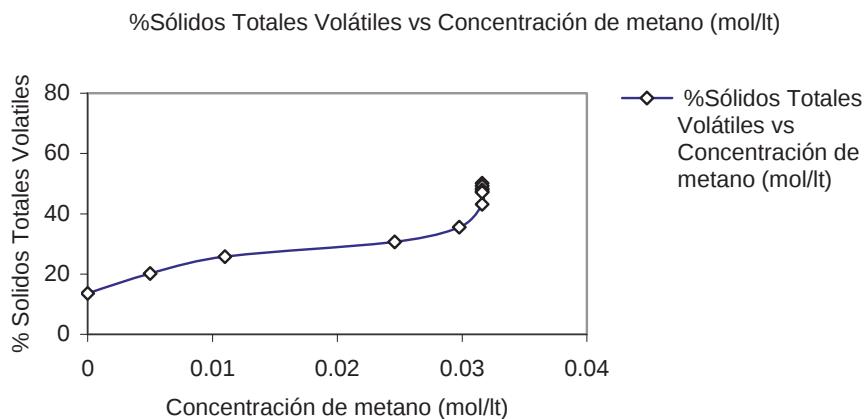
Del cromatograma de la **grafica 8**, se observa, en el pico, que para el reactor JAVAL se estuvo produciendo metano.

De la **grafica 9**, siguiente, podemos observar entre los rangos de 75% - 80% Humedad la concentración de metano es constante, se puede ver la linealidad entre dicho rango.



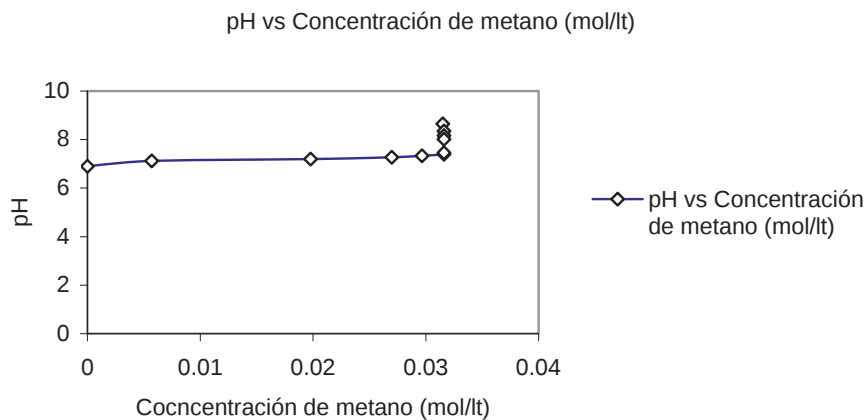
**Grafica 9. %Humedad vs Concentración.**

De la **grafica 10** comprobamos, como se incrementa la concentración de metano mientras exista mayos porcentaje de sólidos totales volátiles, podemos observar de 40% - 60% permanece constante nuestra producción de metano.



**Grafica 10. Porcentaje de Sólidos Totales Volátiles vs Concentración.**

De la **Grafica 11**, observamos que el pH en un rango de 7-9 se puede obtener metano, si el pH es más bajo o más alto no obtendremos metano (Márquez, 2000)<sup>6</sup>.



**Grafica 11. pH vs Concentración de metano (mol/l).**

La eficiencia de remoción de sólidos totales volátiles depende de la cantidad de biogás producido.

A continuación resolveremos un problema de acuerdo a los resultados obtenidos en nuestro proyecto para determinar la cantidad de gas producida a partir de la fracción orgánica, bajo condiciones anaerobias (Tchobanoglus 1998)<sup>3</sup>.

Ejemplo 1.- Se estimara la cantidad teórica de gas que podría producirse bajo condiciones anaerobias en un vertedero controlado por peso unitario de residuos sólidos. Suponiendo que los residuos tienen la composición con la que se trabajó en la parte experimental y que la formula para los constituyentes, es,  $C_{60}H_{94.3}O_{37.8}N$ .

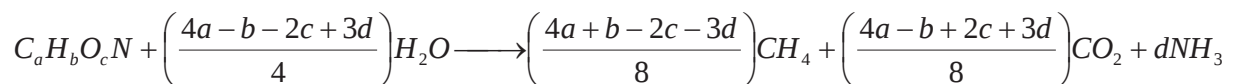
### Solución:

El peso total del material orgánico en 1.05kg de residuos sólidos.

Determinar la cantidad total de residuos orgánicos secos y degradables, suponiendo que el 5% del material degradado se quedará como cenizas.

Residuos orgánicos degradables (base seca)=0.2589kg (0.95)=0.246Kg

Utilizando la formula química  $C_{60}H_{94.3}O_{37.8}N$  estimar la cantidad de metano y dióxido de carbono que puede producirse, mediante la siguiente ecuación (ecuación tomada del libro Tchobanoglus 1998)<sup>3</sup>:



Para la formula química dada:

a= 60    b= 94.3    c= 37.8    d=1

La ecuación resultante es:



Determinar el peso del metano y dióxido de carbono:

$$Me\ tan\ o = \frac{511.4}{1433.1} (0.246Kg) = 0.0878Kg$$

$$Dioxidodecarbono = \frac{1233.8}{1433.1} (0.246Kg) = 0.2118Kg$$

Convertir el peso de los gases en volumen, suponiendo que los pesos específicos de Metano y Dióxido de carbono son 0.718 y 1.978 Kg/ m<sup>3</sup> respectivamente:

$$Me\ tan\ o = \frac{0.0878Kg}{0.718 \frac{Kg}{m^3}} = 0.123m^3$$

$$Dioxidodecarbono = \frac{0.2118Kg}{1.978 \frac{Kg}{m^3}} = 0.1071m^3$$

Determinar la composición porcentual de la mezcla de gas resultante:

$$Me\ tan\ o(\text{porcentaje}) = \frac{0.1223m^3}{(0.1223 + 0.1071)m^3} = 53.3\%$$

$$Dioxidodecarbono(\text{porcentaje}) = 100 - 53.3 = 46.7\%$$

Determinar la cantidad teórica del gas generado por peso unitario de residuos sólidos:

Basado en el peso seco del material orgánico, m<sup>3</sup>/Kg:

$$\frac{0.1223m^3 + 0.1071m^3}{0.246Kg} = 0.934 \frac{m^3}{Kg}$$

Basado en 1.05Kg

$$\frac{0.1223m^3 + 0.1071m^3}{1.05Kg} = 0.2185 \frac{m^3}{Kg}$$

**CAPITULO 11****CONCLUSIONES**

Las conclusiones generales se dividen en dos, una parte netamente experimental y otra relacionada al diseño de equipo.

**DESARROLLO EXPERIMENTAL***En relación al tipo de mezcla*

Se propusieron dos diferentes tipos de mezclas, **JAVAL** (suelo de jardín, excreta de vaca y lodos residuales de una planta tratadora de agua) y una tipo **AVAL** (donde se intercambió el suelo de jardín por aserrín). Por mediciones cromatográficas, se demostró puntualmente que ambos tipos de reactores fueron capaces de producir biogás (metano).

*En relación al pH*

Las mediciones de pH en ambos sistemas permitieron determinar que, aun cuando en ambos regimenes de temperatura, el valor de pH difirió inicialmente en 1 unidad, el pH de ambos inóculos se empató al final de la experimentación. Adicionalmente, el pH reportado en este trabajo estuvo en concordancia con lo reportado en la literatura como pH apropiado para la producción de biogás.

*En relación a la presencia de sólidos totales volátiles*

El patrón global de presencia de STV fue semejante para ambos inóculos, después de las fases iniciales de hidrólisis y degradación, ambos doblaron los porcentajes respectivos iniciales de STV. Sin embargo, el inóculo AVAL lo logró primero, después de lo cual ambos inóculos mantuvieron estable su contenido neto de STV, aún a pesar de añadir a cada inóculo 120 g de

alimentación/semana. Los valores netos de STV reportados en JAVAL (menores que AVAL) sugieren su metabolización.

*En relación a la eficiencia de remoción de sólidos volátiles*

Independiente de la temperatura, el inóculo JAVAL presentó una eficiencia de remoción de STV de 70%, contra 50% en su contraparte AVAL. Este dato permite recomendar el uso de mezclas tipo JAVAL para montaje de biorreactores productores de biogás.

*En relación a la temperatura*

Los resultados mostraron que las diferencias encontradas en la remoción de STV y por ende producción de biogás fueron atribuibles a la composición del inóculo, pero la temperatura mostró ser una variable independiente, es decir, no influyó en nuestro proceso. Con lo anterior se infiere que, bajo las condiciones de operación descritas y los tipos de mezclas mencionados, ambos tipos de consorcios microbianos (meso y termofílico) pudieron ser semejantes en robustez y condiciones metabólicas

## **DISEÑO DE EQUIPO**

*Sistema de reacción anaerobio*

Se construyó un sistema de reacción anaerobia, el cual consistió de una cámara anaerobia de ambiente controlado, un biorreactor anaerobio y una cámara de incubación con control de temperatura. El desarrollo del sistema fue exitoso, toda vez que se corroboró la producción de metano vía cromatografía de gases, y por medio de una sonda para medición de  $O_2$  en aire se comprobó que la cabina anaerobia pudo ser capaz de proveer un ambiente con solo 1-2% de  $O_2$ .

**CAPITULO 12****SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS**

Si se piensa seguir con el proyecto se recomienda tener en cuenta las siguientes variables que influyen para la producción de biogás:

- ✓ Temperatura.
- ✓ Acidez.
- ✓ Contenido en sólidos.
- ✓ Nutrientes.
- ✓ Tóxicos.
- ✓ Contenido de lignina/celulosa.

Dar seguimiento a la recolección de biogás por ejemplo poner un recolector de biogás que cuantifique cuanta cantidad de biogás se esta produciendo, así, como el tratamiento del biogás para dejar como producto principal el metano y la utilización de este mismo, ya que es un producto energético del cual puede ser utilizado en estufas, calderas etc.

También se propone dar un uso al inóculo o mezcla, una vez que se haya terminado de producir gas o cuando ya no es requerido pues esta mezcla es un excelente fertilizante.

**CAPITULO 13****BIBLIOGRAFIA.**

- 1.- Amalendu Bagchi 1994.  
Desing, Construcción and Monitoring of Landfill
- 2.- Cechi, F., Vallini G., And Mata Alvarez J. 1990.  
Anaerobic Digestion and composting in an integrated strategy for managing vegetables residues from agro-industries or sorted organic fraction of municipal solid wastes. Water Sci technol. 22(9): 33-41
- 3.- George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil 1998.  
Gestión integral de Residuos Sólidos Volumen I y II: 45-77
- 4.- Gunnerson G. Charles and Stukey C. David 1982.  
Anaerobic Digestion, Principles and Practices for Biogas System
- 5.- J. Glynn Henry, Gary W Heike 1999.  
Ingeniería Ambiental.
- 6.- Márquez B. L. 2000. Composición de residuos sólidos y medicamentos caducos en rellenos sanitarios acelerados. Tesis de Maestría en ciencias en la especialidad de biotecnología. Centro de investigación y de estudios avanzados de I.P.N. Mexico D.F.
- 7.- Poggi Varaldo H.M.,Gaviria Alzate L.,Nevarez Morillon V.G., Siejas Rinderknecht N. 2005. A side-by-side comparison of two systems of sequencing coupled reactors for anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid Waste

8.- Valdés L., L.A. 1997.

Digestión anaerobia en sustrato sólido de residuos industriales y municipales.

Tesis de maestría .CINVESTAV, IPN.

9.- Westlake kenneth, 1995.

Landfill waste pollation and control.

Albon Publishing limited ISBN 1-898563-08-x.

10.- Anónimo Gestión integral de Residuos Sólidos.

<http://www.giresol.org/cms/index.php?option=content&task=category&sectionid=9&id=78&Itemid=52> (Accesada en enero del 2006).

11.- Ing. Javier Y Falcón Sánchez e Ing. Eugenio Bellido Mamani 1998.

Tecnología de Tratamiento de Residuos Sólidos de Establecimientos de Salud

<http://www.minsa.gob.pe/publicaciones/pubs/Tecnologias/>

(Accesada en Enero del 2006).

12.- Anónimo Ciencia de la tierra y del medio Ambiente

<http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/13Residu/112VertC.htm>

(Accesada en Enero del 2006).

13.- Termotecnia taller N° 2 Rellenos sanitarios

<http://cipres.cec.uchile.cl/~edmunoz/rs1.html> (Accesada en Enero del 2006).

14.- Francisco Fontúrbel R. & Carlos Ibáñez N. 2004. El portal de Biología y

Ciencias de la Salud <http://www.biologia.org/?pid=5001&id=85> (Accesada en Enero del 2006).

15.-Cristhian J. Lobos1999. Biogás

<http://johan.jmc.utfsm.cl/pi/biogasdoc1.pdf> (Accesada en Enero del 2006)

## CAPITULO 15

## ANEXOS

## 15.1. ANEXO I.

## Tablas de resultados, Datos régimen mesofílico.

Tabla 1. Datos contenidos de %Humedad.

| Días | Promedio JAVAL<br>35°C (%) | Desviación<br>Estandar | Días | Promedio<br>AVAL 35°C (%) | Desviación<br>Estandar |
|------|----------------------------|------------------------|------|---------------------------|------------------------|
| 0    | 74.3                       | 0                      | 0    | 86.6                      | 0                      |
| 11   | 76.9                       | 0.4                    | 11   | 78.4                      | 7.4                    |
| 27   | 80.0                       | 1.3                    | 27   | 83.2                      | 0.5                    |
| 34   | 74.4                       | 0.8                    | 34   | 82.2                      | 0.5                    |
| 41   | 76.2                       | 0.6                    | 41   | 82.9                      | 0.5                    |
| 46   | 79.4                       | 0.8                    | 46   | 88.2                      | 1.2                    |
| 60   | 76.4                       | 1.1                    | 60   | 86.7                      | 0.6                    |

Tabla 2. Porcentaje de sólidos totales volátiles.

| Días | Promedio JAVAL<br>35°C (%) | Desviación<br>Estandar | Días | Promedio<br>AVAL 35°C (%) | Desviación<br>Estandar |
|------|----------------------------|------------------------|------|---------------------------|------------------------|
| 0    | 13.6                       | 0                      | 0    | 39.4                      | 0                      |
| 11   | 48.3                       | 0.9                    | 11   | 51.4                      | 3.9                    |
| 27   | 50.1                       | 1.0                    | 27   | 88.0                      | 0.4                    |
| 34   | 47.3                       | 1.6                    | 34   | 86.0                      | 1.4                    |
| 41   | 49.2                       | 1.3                    | 41   | 85.6                      | 0.7                    |
| 46   | 47.9                       | 1.9                    | 46   | 82.7                      | 4.7                    |
| 60   | 47.1                       | 1.0                    | 60   | 78.9                      | 2.1                    |

Tabla 3. Datos de pH.

| Días | Promedio JAVAL<br>35°C pH | Días | Promedio AVAL<br>35°C pH |
|------|---------------------------|------|--------------------------|
| 0    | 6.9                       | 0    | 7.9                      |
| 11   | 7.4                       | 11   | 7.3                      |
| 27   | 8.6                       | 27   | 8.7                      |
| 41   | 8.3                       | 41   | 8.7                      |
| 46   | 8.1                       | 46   | 8.0                      |
| 60   | 8.0                       | 60   | 8.0                      |

### Tablas de Resultados, Régimen Termofílico.

**Tabla 4. Contenido de %Humedad.**

| Días | Promedio JAVAL<br>55°C (%) | Desviación<br>Estandar | Días | Promedio AVAL<br>55°C (%) | Desviación<br>Estandar |
|------|----------------------------|------------------------|------|---------------------------|------------------------|
| 0    | 74.3                       | 0                      | 0    | 86.6                      | 0                      |
| 11   | 78.2                       | 1.5                    | 11   | 80.3                      | 3.8                    |
| 27   | 83.2                       | 1.3                    | 27   | 84                        | 0.7                    |
| 34   | 77.2                       | 0.5                    | 34   | 82.6                      | 1.0                    |
| 41   | 76.1                       | 0.6                    | 41   | 83.4                      | 0.4                    |
| 46   | 75.5                       | 0.6                    | 46   | 86.3                      | 4.7                    |
| 60   | 75.9                       | 2.1                    | 60   | 87.4                      | 0.4                    |

**Tabla 5. Porcentaje de sólidos totales Volátiles.**

| Días | Promedio JAVAL<br>55°C (%) | Desviación<br>Estandar | Días | Promedio AVAL<br>55°C (%) | Desviación<br>Estandar |
|------|----------------------------|------------------------|------|---------------------------|------------------------|
| 0    | 13.6                       | 0                      | 0    | 39.4                      | 0                      |
| 11   | 50.7                       | 0.9                    | 11   | 51.9                      | 4.6                    |
| 27   | 54.0                       | 1.8                    | 27   | 85.7                      | 0.3                    |
| 34   | 49.5                       | 0.8                    | 34   | 84.2                      | 1.8                    |
| 41   | 51.5                       | 3.2                    | 41   | 83.7                      | 0.4                    |
| 46   | 43.1                       | 0.6                    | 46   | 82.5                      | 2.2                    |
| 60   | 50.0                       | 5.5                    | 60   | 77.3                      | 0.1                    |

**Tabla 6. Datos de pH.**

| Días | Promedio<br>JAVAL 55°C pH | Días | Promedio AVAL<br>55°C pH |
|------|---------------------------|------|--------------------------|
| 0    | 6.9                       | 0    | 7.9                      |
| 11   | 7.5                       | 11   | 7.9                      |
| 27   | 8.7                       | 27   | 8.7                      |
| 41   | 8.5                       | 41   | 8.7                      |
| 46   | 8.2                       | 46   | 8.1                      |
| 60   | 8.1                       | 60   | 8.2                      |

**15.2. ANEXO II.****Tabla 7. Procesos para la gestión de residuos sólidos urbanos.**

|               |                                                                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Físicos.   | <ul style="list-style-type: none"><li>a. Separación</li><li>b. Trituración</li><li>c. Compactación</li></ul> |
| 2. Mecánicos. | <ul style="list-style-type: none"><li>a. Vertedero controlado</li><li>b. Relleno sanitario</li></ul>         |
| 3. Térmicos.  | <ul style="list-style-type: none"><li>a. Incineración</li><li>b. Pirolisis</li></ul>                         |
| 4. Químicos.  | <ul style="list-style-type: none"><li>a. Hidrólisis ácida o alcalina</li><li>b. Otros</li></ul>              |

## 15.3. ANEXO III.

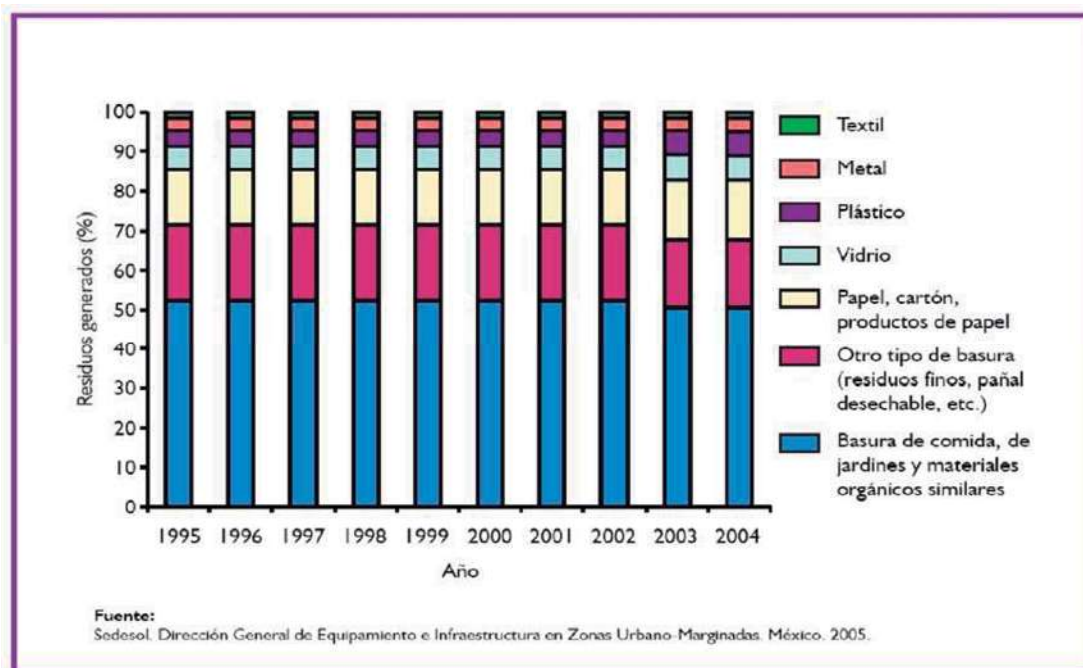


Figura 1. Composición de los residuos sólidos en México 1995-2004.

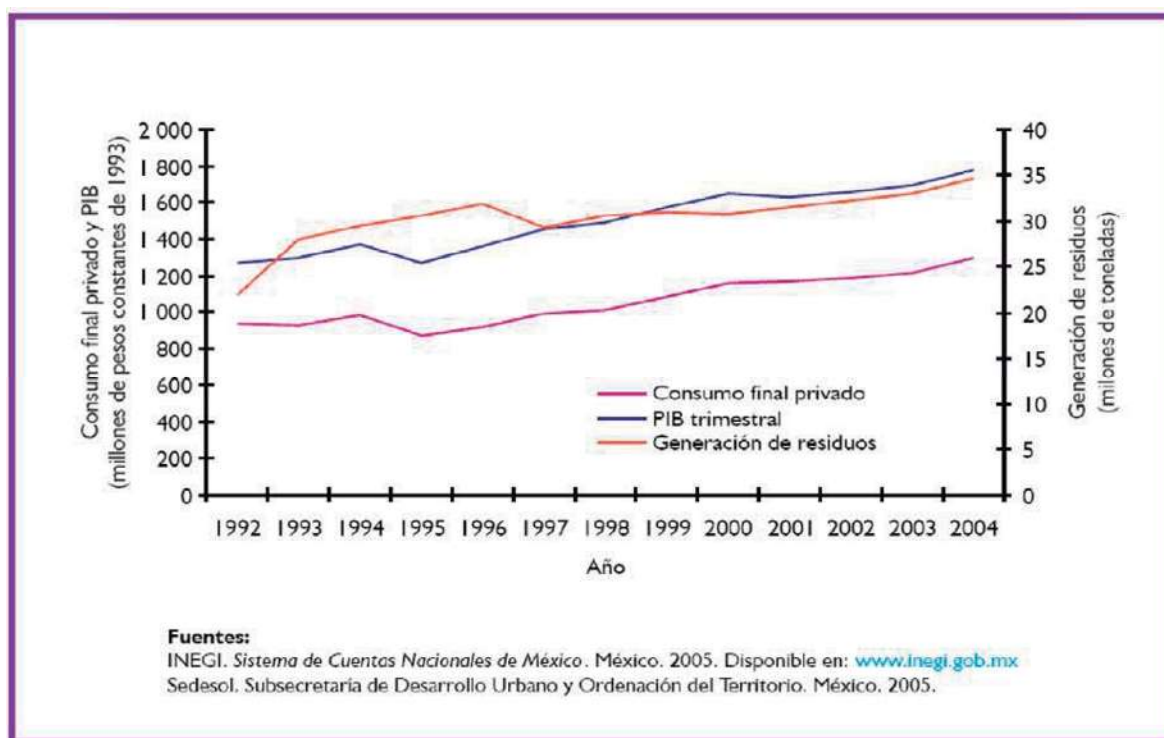


Figura 2. Consumo final privado, producto interno bruto (PIB) y generación de residuos sólidos municipal, 1992-2004.

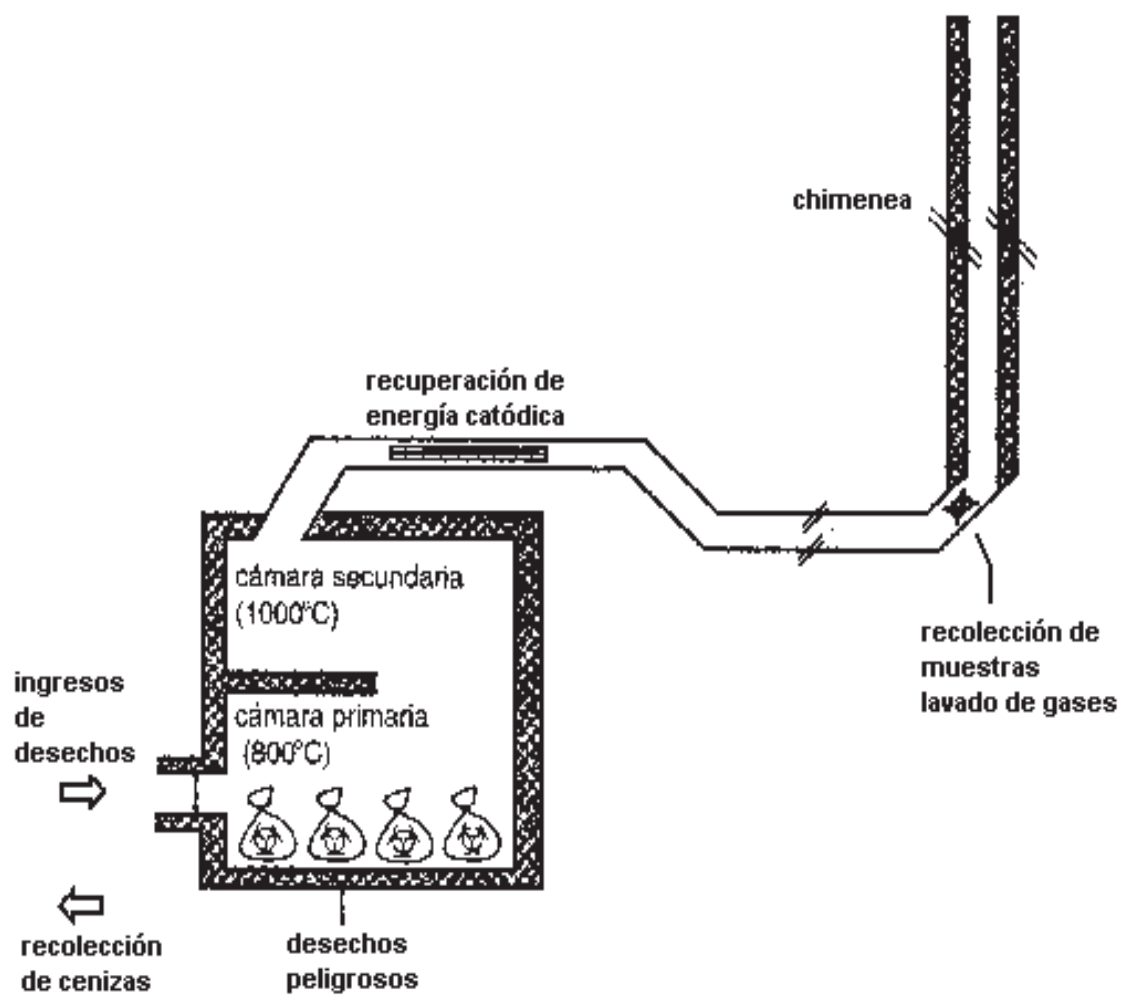


Figura 3. Diagrama de un incinerador.

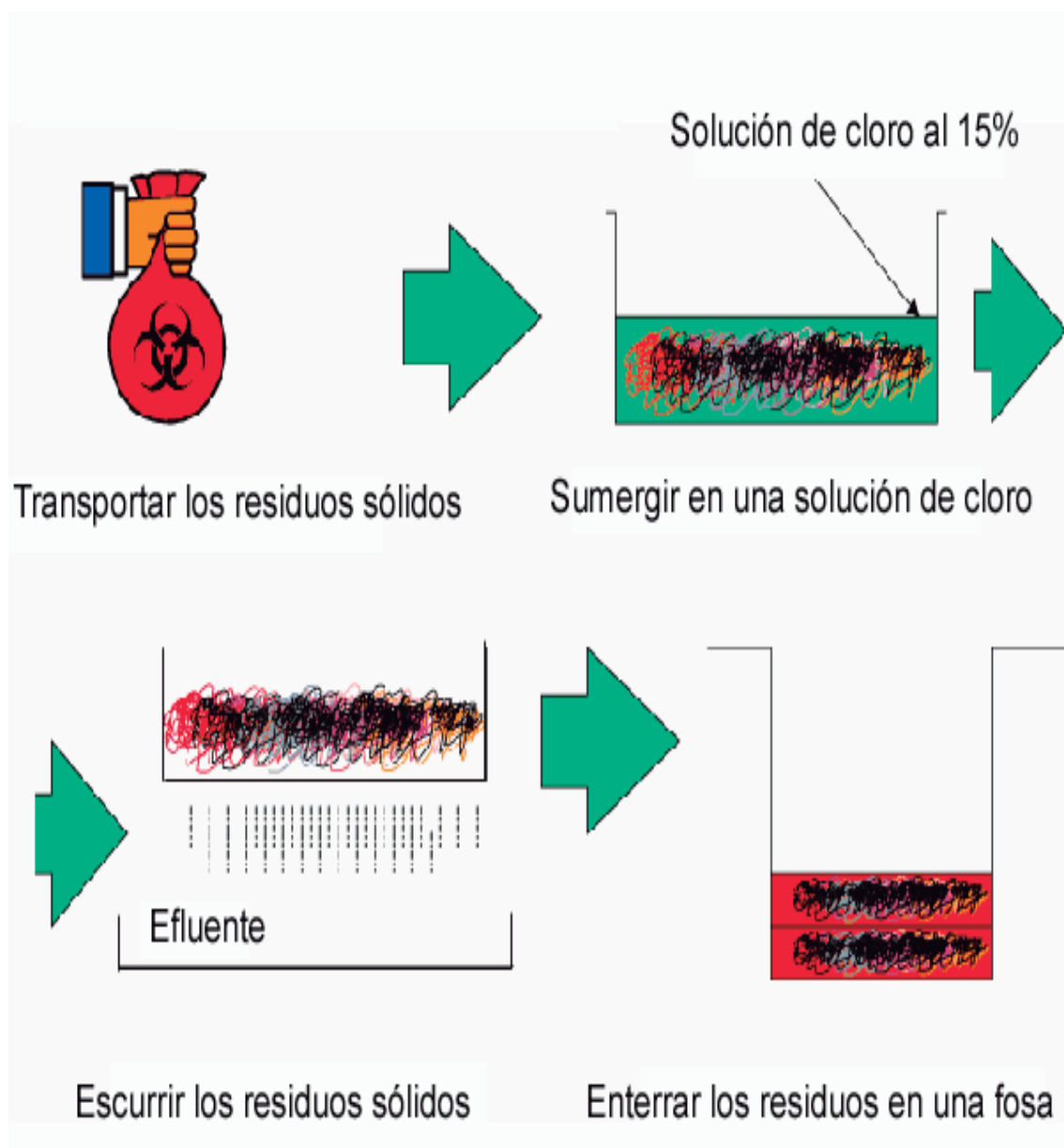


Figura 4. Diagrama del proceso del Tratamiento Químico.

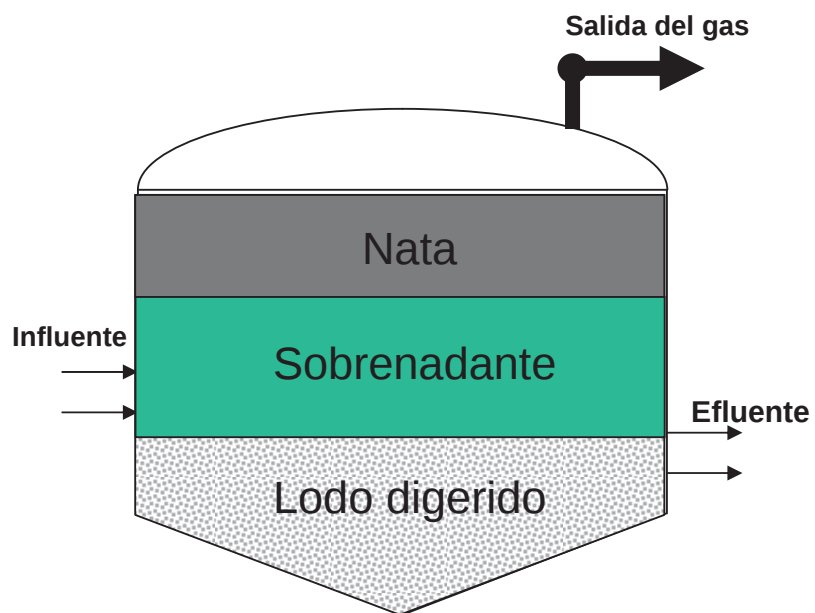
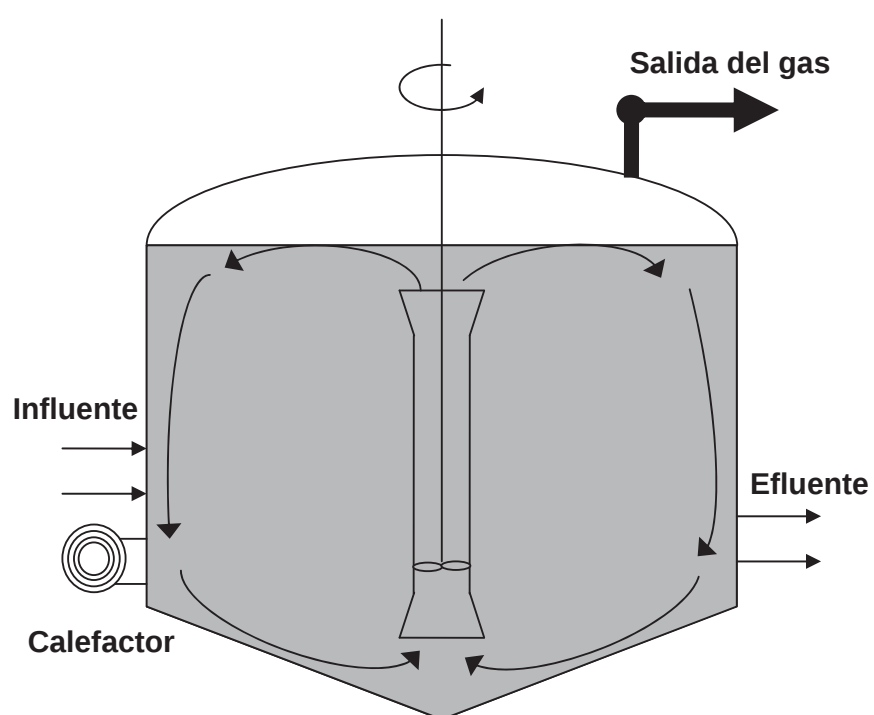
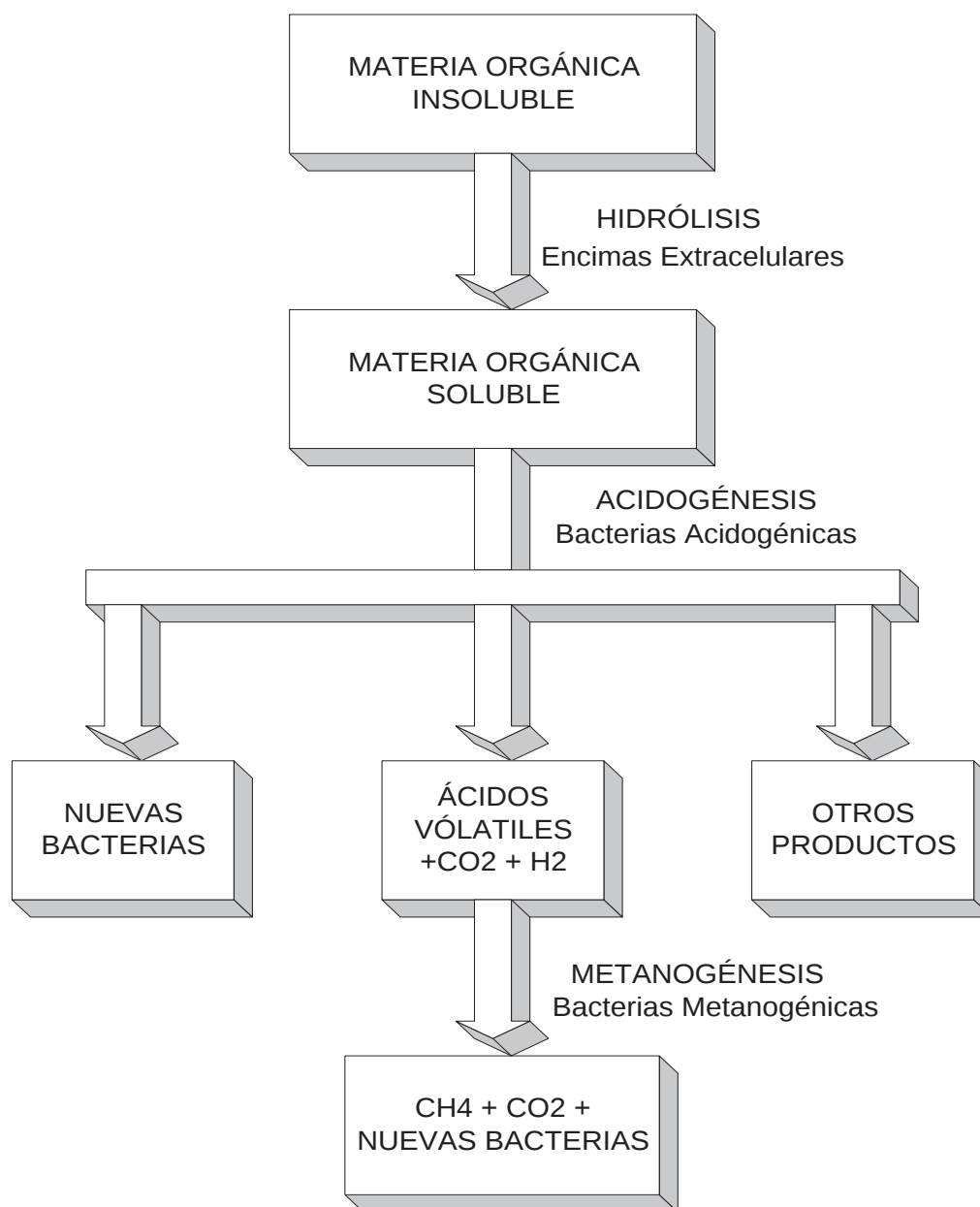


Figura 5. Digestor anaerobio de baja tasa.



**Figura 6. Digestor anaerobio de alta tasa.**



**Figura 7. Etapa de la Digestión.**



**Figura 8. Instalación de la resistencia y lámpara para cada una de las cajas de madera.**



Figura 9. Toma de muestras y alimentación dentro de la cabina.



**Figura 10. Montaje de los Reactores.**

## 15.4. ANEXO IV.

### MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CABINA ANAEROBIA.

#### INSTRUCCIONES PARA SU FUNCIONAMIENTO:

- 1.- Se abre la puerta principal quitando las tuercas de mariposa y separando de los tornillos.
- 2.- Se mete la muestra o material con el que se va a trabajar.
- 3.- Se cierra la puerta verificando que las tuercas de mariposa queden apretadas.
- 4.- Se conecta la manguera de nitrógeno a la válvula de entrada de gas.
- 5.- Se verifica que toda la cabina este cerrada, (sobre todo la válvula de entrada y salida de gas, y la puerta).
- 6.- Se prende el extractor de aire durante 30min. Después de este tiempo se apaga el extractor de aire.
- 7.- Se procede a abrir la válvula de entrada de gas.
- 8.- Se abre la válvula del tanque de nitrógeno poco a poco para que no suceda un accidente observando que no haya alguna fuga (nota: Si existe alguna fuga cerrar el tanque y purgarlo, y revisar donde se encuentra la fuga).
- 9.- Después de hacer un barrido con nitrógeno cerrar la válvula de entrada de gas.
- 10.- Cerrar la válvula del tanque de nitrógeno y purgarlo.
- 11.- Encender el panel de control y poner la temperatura deseada recordando que no debe ser mayor de 100°C.
- 12.- Encender el ventilador y la resistencia que se encuentra en el panel de control (Si se ocupa la lámpara encenderla del mismo panel).

**IMPORTANTE:** Nunca debe prender la resistencia sin el ventilador pues esta puede aumentar toda su carga y quemar la cabina.

**SEGURIDAD:**

- 1.- Antes de empezar a trabajar retirar el tanque de nitrógeno si no se va a utilizar.
- 2.- Si se utiliza el tanque de nitrógeno sujetarlo con cadena o cinturones de seguridad.
- 3.- Cuando ya se esta trabajando no tocar la resistencia con los guantes ya que puede fundirlos y provocarle una quemadura.
- 4.- No tocar los cables ni el ventilador aléjese lo más que pueda de ellos.
- 5.- Utilizar siempre bata de laboratorio y gafas protectoras.
- 6.- Una vez que haya terminado nunca deje prendido el panel de control verificar que este apagado para evitar una sobrecarga y revise que no este funcionando la lámpara, el ventilador, la resistencia y el controlador digital de temperatura y así evitar un incendio.
- 7.- No tocar ningún cable que conduzca electricidad ni el enchufe ya que puede sufrir una descarga eléctrica.
- 8.- Desenchufar el extractor de aire inmediatamente después de que se haya usado.
- 9.- No tocar ningún tornillo cerca de la resistencia pues estos están calientes

TABLA DE PROPIEDADES DEL ACRÍLICO

| Propiedades                               | Norma ASTM | Unidad                        | Acrílico      |
|-------------------------------------------|------------|-------------------------------|---------------|
| 1.- Resistencia a la tracción             | D 638      | P.S.I                         | 8000 - 11000  |
| 2.- Elongación %                          | D 638      | %                             | 2 - 7         |
| 3.- Resistencia a la compresión           | D 695      | P.S.I.                        | 11000 - 19000 |
| 4.- Resistencia a la flexión              | D 790      | P.S.I.                        | 12000 - 17000 |
| 5.- Peso específico                       | D 638      | g/cm <sup>3</sup>             | 1.17 - 1.20   |
| 6.- Conductividad térmica                 | C 177      | 10E-1 cal/seg/cm <sup>2</sup> | 4.6           |
| 7.- Calor específico                      | -          | Cal/°C/gm                     | 0.35          |
| 8.- Resistencia al calor continuo         | -          | °C                            | 60 - 93       |
| 9.- Resistencia arco voltaico             | D 495      | Seg.                          | no surca      |
| 10.- Absorción de agua (24 hr. 1/8" esp.) | D 570      | %                             | 0.2 - 0.4     |
| 11.- Efecto de los rayos solares          | -          | -                             | Ninguna       |
| 12.- Resistencia a los ácidos leves       | D 543      | -                             | Buena         |
| 13.- Resistencia a los ácidos fuertes     | D 543      | -                             | (a)           |
| 14.- Resistencia a las bases débiles      | D 543      | -                             | Buena         |
| 15.- Resistencia a bases fuertes          | D 543      | -                             | Buena (b)     |
| 16.- Resistencia a solventes orgánicos    | D 543      | -                             | (c)           |

|                                                                                                                                                                         |   |     |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|---|
| 17.- Pérdida por abrasión                                                                                                                                               | - | Mg. | - |
| (a) Atacado solamente por alta concentración de ácidos oxidantes.<br>(b) Atacado por NH <sub>3</sub><br>(c) Soluble en acetona, esteres, aromatizantes e hidrocarburos. |   |     |   |

## **15.5. ANEXO V.**

### **MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CAMARAS DE INCUBACIÓN.**

#### **INSTRUCCIONES PARA SU FUNCIONAMIENTO:**

1. Se abre la puerta principal (solamente en la que se vaya a trabajar de las cuatro).
2. Se mete la muestra que desea incubar.
3. Se cierran las puertas cuidando no azotarlas.
4. Se prende el controlador de temperatura que se encuentra en el panel de control.
5. Se programa a la temperatura deseada.

Si hay poca luz se puede prender la lámpara desde el panel de control.

#### **SEGURIDAD:**

1. No poner objetos cerca de la resistencia.
2. No tocar nunca la resistencia (en caso de que sea necesario esperar hasta que este totalmente fría).
3. Tener cuidado de golpear el panel de control y revisar periódicamente que este funcionando correctamente y en la temperatura deseada:
4. No azotar las puertas de las cámaras de incubación ya que tienen material de vidrio y se puede quebrar fácilmente.
5. Usar bata y gafas protectoras cuando se vaya a meter o sacar alguna muestra.
6. Al momento de sacar o meter alguna muestra usar siempre el carro para facilitar la transportación y poder abrir con cuidado las puertas.
7. No jalar los cables que van al panel de control, ni a la resistencia.

Humedad.

La madera contiene agua de constitución, inerte a su naturaleza orgánica, agua de saturación, que impregna las paredes de los elementos leñosos, y agua libre, absorbida por capilaridad por los vasos.

Como la madera es higroscópica, absorbe o desprende humedad, según el medio ambiente. El agua libre desaparece totalmente al cabo de un cierto tiempo, quedando, además del agua de constitución, el agua de saturación correspondiente a la humedad de la atmósfera que rodee a la madera, hasta conseguir un equilibrio, diciéndose que la madera esta secada al aire.

La humedad de la madera varía entre límites muy amplios. En la madera recién cortada oscila entre el 50 y 60 por ciento, y por imbibición puede llegar hasta el 250 y 300 por ciento. La madera secada al aire contiene del 10 al 15 por ciento de su peso de agua, y como las distintas mediciones físicas están afectadas por el tanto por ciento de humedad, se ha convenido en referir los diversos ensayos a una humedad media internacional de 15 por ciento.

La humedad de las maderas se aprecia, además del procedimiento de pesadas, de probetas, húmedas y desecadas, y el colorimétrico, por la conductividad eléctrica, empleando girómetros eléctricos. Estas variaciones de humedad hacen que la madera se hinche o contraiga, variando su volumen y, por consiguiente, su densidad.

#### Densidad.

La densidad real de las maderas es sensiblemente igual para todas las especies, aproximadamente 1,56. La densidad aparente varía no solo de unas especies a otras, sino aún en la misma con el grado de humedad y sitio del árbol, y para hallar la densidad media de un árbol hay que sacar probetas de varios sitios.

Como la densidad aparente comprende el volumen de los huecos y los macizos, cuanto mayor sea la densidad aparente de una madera, mayor será la superficie de sus elementos resistentes y menor el de sus poros.

Las maderas se clasifican por su densidad aparente en:

- - Pesadas, si es mayor de 0.8.
- - Ligeras, si esta comprendida entre 0.5 y 0.7.
- - Muy ligeras, las menores de 0.5.

#### Contracción e Hinchamiento.

La madera cambia de volumen según la humedad que contiene. Cuando pierde agua, se contrae o merma, siendo mínima en la dirección axial o de las fibras, no pasa del 0.8 por ciento; de 1 a 7.8 por ciento, en dirección radial, y de 5 a 11.5 por ciento, en la tangencial.

La contracción es mayor en la albura que en el corazón, originando tensiones por desecación que agrietan y alabea la madera.

El hinchamiento se produce cuando absorbe humedad. La madera sumergida aumenta poco de volumen en sentido axial o de las fibras, y de un 2.5 al 6 por ciento en sentido perpendicular; pero en peso, el aumento oscila del 50 al 150 por ciento. La madera aumenta de volumen hasta el punto de saturación (20 a 25 por ciento de agua), y a partir de él no aumenta más de volumen, aunque siga absorbiendo agua. Hay que tener muy presente estas variaciones de volumen en las piezas que hayan de estar sometidas a oscilaciones de sequedad y humedad, dejando espacios necesarios para que los empujes que se produzcan no comprometan la estabilidad de la obra.

#### Dureza.

La dureza de la madera es la resistencia que opone al desgaste, rayado, clavar, etc. Depende de su densidad, edad, estructura y si se trabaja en sentido de sus fibras o en el perpendicular. Cuanta más vieja y dura es, mayor la resistencia que opone. La madera de corazón tiene mayor resistencia que la de albura: la crecida lentamente obtiene una mayor resistencia que la madera que crece de prisa.

Por su dureza se clasifican en:

- - Muy duras; ebano, serbal, encina y tejo.
- - Bastante duras; roble, arce, fresno, álamo, acacia, cerezo, almendro.
- - Algo duras; castaño, haya, nogal, peral.
- - Blanda; Abeto, alerce, pino, sauce.

- - Muy blandas; tilo, chopo.

#### Hendibilidad.

Se llama también facilidad a la raja y es la aptitud de las maderas a dividirse en el sentido longitudinal bajo la acción de una cuña. El rajado es más fácil, en sentido de los radios.

Como madera muy hendible se acostumbra citar el castaño, como madera hendible, el roble, y como madera poco hendible, el carpe.

#### Conductividad.

La madera seca es mala conductora del calor y electricidad, no así cuando esta húmeda.

La conductividad es mayor en el sentido longitudinal que en radial o transversal, y más en las maderas pesadas que en las ligeras o porosas, por lo cual se emplean como aisladores térmicos en los pavimentos y paredes.

#### **Dilatación térmica.**

El coeficiente de dilatación lineal de la madera es muy pequeño, pudiendo ser despreciado.

#### **Duración**

La duración de la madera varía mucho con la clase y medio. A la intemperie, y sin impregnar depende de las alternativas de sequedad y humedad: el roble dura 100 años; álamo, sesenta a noventa años; pino, alerce, cuarenta a ochenta años; sauce dura treinta años.