



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA  
VALORIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS  
EN EL DISTRITO FEDERAL

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**SOFÍA PALACIOS GONZÁLEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara  
**VOCAL:** Profesor: M. en C. Rolando Salvador García Gómez  
**SECRETARIO:** Profesor: Dr. Alfonso Duran Moreno  
**1er. SUPLENTE:** Profesor: Dr. Agustín García Reynoso  
**2° SUPLENTE:** Profesor: M. en C. Gema Andraca Ayala

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO, ALA SUR**

**ASESOR DEL TEMA: DR. ALFONSO DURÁN MORENO**

(Nombre y firma)

**SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay): M.I. ABRIL MORENO GUTIÉRREZ**

(Nombre y firma)

**SUSTENTANTE (S): SOFÍA PALACIOS GONZÁLEZ**

(Nombre (s) y firma (s))

**“La Basura es un concepto humano;  
todo en la naturaleza es utilizado  
eventualmente.”**

---

## **Agradecimientos**

---

Aunque para la realización de esta tesis, se ha requerido de mucho esfuerzo y dedicación de mi parte, no me hubiera sido posible terminarla sin el apoyo de las personas que agradezco a continuación:

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Alfonso Durán, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo en su grupo de investigación, por confiar en mi capacidad y recibirme con los brazos abiertos en un grupo tan distinguido. Ha sido una fortuna trabajar al lado de un hombre con un conocimiento tan profundo del ámbito ambiental, comprometido con encontrar solución a los problemas ambientales que enfrenta México.

Quiero externar un especial agradecimiento a Abril Moreno, por su apoyo constante, el tiempo que me dedicó, y la paciencia que me tuvo en los meses que estuve trabajando. Desde el principio, me dio mucha seguridad contar con el apoyo de una mujer entregada y accesible, y con el paso del tiempo puedo afirmar que estas dos cualidades son vitales para el trabajo en equipo.

A mis compañeros de la torre, por ser siempre tan amables, y hacer que el día a día sea ameno; por compartir información y facilitarme el trabajo; por todas esas horas en estaciones de transferencia y todo lo que implicaron. Dicen por ahí que lo mejor de un equipo es la gente que lo conforma, y ustedes me lo confirmaron.

Al Fondo Mixto CONACyT – GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL por el financiamiento del proyecto No. DF-2008-C01-94261 “OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL DISTRITO FEDERAL”, proyecto marco en el cual se realizó este trabajo de tesis.

Agradezco a todos mis maestros, por haberme enseñado todo lo que me convirtió en una Ingeniera Química. En particular a todos los maestros del Departamento de Matemáticas, por impulsar mi pasión por los números y la solución a problemas, por incluirme en su dinámica y hacerme sentir parte de un equipo tan hermoso. Gracias César Rincón, por ser todo lo que quiero ser, una persona entregada, inteligente, alegre y llena de energía; por demostrar que la edad está en el espíritu y no en los años vividos; por apoyarme durante toda mi carrera, y ser un gran amigo.

Gracias a mis amigos. A Luki y Steph, por seguirme buscando aunque estaba desaparecida, por ayudarme con todo, y por estar siempre ahí. A Gabo, Chango, Kiki, Karen, y Charly, por todo lo compartido en la carrera, por hacer que los proyectos más pesados fueran divertidos, por todos los juegos de dominó, por hacerme reír tanto. A la Sangha, por ayudarme a crecer, por quitarme el mal humor y no dejar que me gane la rutina, por todo el cariño que me dan, y por impulsarme a seguir haciendo lo que más me gusta.

Por último, quisiera agradecer a mi familia, por haberme enseñado de forma continua, los últimos 25 años, mediante palabras y el ejemplo de sus acciones, que para que las cosas salgan bien tienes que entregarte por completo. Gracias a mis papás, Mariano y Ana, por darme la vida y enseñarme a vivirla. Gracias a mis hermanos, Mariano, Ana, María, Andrea, Paloma y José Luis, por brindarme un apoyo incondicional, por estar siempre presentes, por el amor que me dan a diario, expresado justo en la forma que lo necesito. Gracias a mis sobrinos, Fats, Sebas, Jero y María, por ser la luz de mi vida, por llenar mis días de ilusión y alegría, por ayudarme a ser niña otra vez.

¡En verdad no hubiera podido hacer esto sin ustedes!

---

# Índice

---

<i>i. Índice de gráficos</i>	7
<i>ii. Índice de fotografías</i>	7
<i>iii. Índice de diagramas</i>	8
<i>iv. Índice de tablas</i>	9
<i>v. Abreviaciones y Acrónimos</i>	10
1. Introducción	11
1.1. Objetivo General	12
1.2. Objetivos Específicos	12
1.3. Justificación	13
2. Marco Teórico	15
2.1. Clasificación de los residuos sólidos	15
2.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal	16
2.2.1. Generación	17
2.2.2. Recolección / Transporte	19
2.2.3. Transferencia	22
2.2.4. Tratamiento	23
i. Plantas de Selección	23
ii. Plantas de composta	23
2.2.5. Disposición Final	31
2.3. Estimación de la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Distrito Federal	31
2.4. Resumen de las Tecnologías de Conversión	32
2.4.1. Procesos de conversión Termoquímicos	33
i. Incineración	33
ii. Pirólisis	35
iii. Gasificación	36
2.4.2. Procesos de conversión Bioquímicos	38
iv. Compostaje	38
v. Digestión Anaerobia	40
vi. Fermentación Alcohólica	41
2.4.3. Procesos de conversión Físicoquímicos	43

vii. Transesterificación	43
viii. Producción de comida para animales	45
3. Metodología	47
4. Resultados y Discusión	49
4.1. Evaluación de Viabilidad Técnica	49
4.1.1. Determinación de los criterios.	49
4.1.2. Asignación de valores a las alternativas.	51
4.1.3. Asignación de valores a los criterios:	52
4.1.4. Determinación de la función de Criterio	53
4.2. Resumen de Opciones Tecnológicas	54
4.2.1. Digestión Anaerobia	54
i. Sistema húmedo de una etapa	57
ii. Sistema seco de una etapa	59
iii. Sistemas multietapa	62
4.2.2. Compostaje	65
iv. Sistemas de compostaje abierto	67
v. Sistemas de compostaje cerrado	69
4.3. Evaluación de Opciones Tecnológicas	70
4.3.1. Determinación de los criterios	70
4.3.2. Asignación de valores a los criterios	73
4.3.3. Definición de las funciones de preferencia y sus parámetros	74
4.3.4. Determinación de la función de criterio	78
4.4. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada	82
5. Conclusiones	84
6. Bibliografía consultada	87
<i>Anexo I. Generación de Energía con Biogás</i>	93
<i>Anexo II. Emisiones de gases de efecto invernadero</i>	94
<i>Anexo III. Consideraciones para calcular el costo de operación de plantas de     digestión anaerobia</i>	97
<i>Anexo IV. Cálculo del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno</i>	98



---

## **i. Índice de gráficos**

---

Gráfico 1. Residuos sólidos urbanos recolectados en las rutas de recolección separada en los años 2004 a 2008	21
Gráfico 2. Comparación de flujos de preferencia netos de sistemas de digestión anaerobia.	80

---

## **ii. Índice de fotografías**

---

Fotografía 1. Operadores triturando residuos que entran a la planta de composta de Bordo Poniente	27
Fotografía 2. Trituradora de la planta de composta de Bordo Poniente	27
Fotografía 3. Acumulación de troncos en la zona de descarga de materia prima, en la planta de composta de Bordo Poniente	28
Fotografía 4. Materia orgánica triturada, antes de ser llevada a las pilas.	29
Fotografía 5. Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente	30
Fotografía 6. Sistema de compostaje abierto	67
Fotografía 7. Sistema de compostaje cerrado	69

---

### **iii. Índice de diagramas**

---

Diagrama 1 Diagrama de flujo de los RSU en el D.F.	17
Diagrama 2. Proceso de incineración	34
Diagrama 3. Proceso de pirólisis	35
Diagrama 4. Proceso de gasificación	37
Diagrama 5. Proceso de compostaje	39
Diagrama 6. Proceso de digestión anaerobia	40
Diagrama 7. Proceso de fermentación alcohólica	42
Diagrama 8. Proceso de transesterificación	44
Diagrama 9 Proceso de producción de comida para animales	45
Diagrama 10. Metodología seguida para la selección de la mejor alternativa tecnológica	48
Diagrama 11. Pasos en la digestión anaerobia	55
Diagrama 12. Proceso de digestión anaerobia en un sistema húmedo de una etapa	58
Diagrama 13. Proceso de digestión anaerobia en un sistema seco de una etapa	60
Diagrama 14. Proceso de digestión anaerobia en un sistema multietapa	63
Diagrama 15. Ingresos y egresos de la planta de tratamiento	98

---

## iv. Índice de tablas

---

Tabla 1. Comparación de la generación de RSU en México por zona.	18
Tabla 2. Comparación de generación de RSU en distintos países.	18
Tabla 3. Avances en la instrumentación de rutas de recolección separada de los años 2004 a 2008.	20
Tabla 4. Comparación entre el aumento anual de rutas de recolección separada y el aumento anual de residuos que se separa	21
Tabla 5. Características principales de las plantas de composta en el Distrito Federal	25
Tabla 6. Capacidad de las plantas de composta del Distrito Federal para los años 2006, 2007 y 2008	26
Tabla 7. Resumen de las tecnologías de conversión	50
Tabla 8. Bases para la asignación de valores a las tecnologías de conversión	51
Tabla 9. Valores asignados a las tecnologías de conversión	52
Tabla 10. Valores porcentuales asignados a los criterios de evaluación	52
Tabla 11. Resultados de la matriz de decisiones	53
Tabla 12. Plantas en operación de sistemas húmedos de una etapa	58
Tabla 13. Plantas en operación de sistemas secos de una etapa	60
Tabla 14. Plantas en operación de sistemas multietapa	64
Tabla 15. Resumen de criterios utilizados para la evaluación técnica, económica y ambiental de opciones tecnológicas.	72
Tabla 16. Criterios de evaluación de las opciones tecnológicas	73
Tabla 17. Funciones de preferencia	75
Tabla 18. Parámetros utilizados en el software Decision Lab ®	77
Tabla 19. Flujos netos de preferencia para las evaluaciones de opciones tecnológicas	78
Tabla 20. Flujos de preferencia para la evaluación final	79
Tabla 21. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada	82
Tabla 22. Generación de energía eléctrica con Biogás	93
Tabla 23. Equivalencias de CO <sub>2</sub> para sistemas de Digestión Anaerobia	95
Tabla 24. Equivalencias de CO <sub>2</sub> para sistemas de Compostaje	96
Tabla 25. Resumen de los cálculos de costo de operación de plantas de digestión anaerobia	97
Tabla 26. Cálculos de costo de operación para plantas de compostaje	99

## v. Abreviaciones y Acrónimos

USD\$	Dólares Americanos
USD¢	Centavos de dólar
$\Phi$	Flujos netos de preferencia
$\Phi+$	Flujos de preferencia positivos
$\Phi-$	Flujos de preferencia negativos
°C	Grados Celsius
C/N	Relación carbono/nitrógeno
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
d	Día
<i>d</i>	Desviación o diferencia entre evaluaciones de criterios
D.F.	Distrito Federal
DGSU	Dirección General de Servicios Urbanos, Gobierno del D.F., México
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de efecto invernadero
H <sub>2</sub> O	Agua
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
hab	Número de habitantes
kg	kilogramo
kg CO <sub>2</sub> eq	Equivalencia de GEI, expresada como CO <sub>2</sub>
kWh	kiloWatt hora
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
N <sub>2</sub> O	Monóxido de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
p	Límite de preferencia
P	Preferencia
PCG	Potencial de calentamiento global
q	Límite de indiferencia
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
s	Límite Gaussiano
SV	Sólidos volátiles
t	Tonelada métrica
TIR	Tasa Interna de Retorno
tpa	Toneladas por año
tpd	Toneladas por día
TRH	Tiempo de retención hidráulica
VPN	Valor presente neto

---

# 1. Introducción

---

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos residuos que se generan en una comunidad, exceptuando a los residuos industriales, y a los residuos de agricultura. Estos residuos incluyen los residuos domiciliarios (casas, unidades habitacionales, etc.), residuos comerciales (centros comerciales, mercados, hoteles, etc.) y residuos institucionales (escuelas, hospitales, etc.). El papel, cartón, residuos de alimento y residuos de jardinería, pueden clasificarse como residuos orgánicos o residuos biodegradables.

La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) representa el 43% del total de los RSU generados en el Distrito Federal (D.F.). Esta fracción es la responsable de la generación de gas metano en los rellenos sanitarios, como resultado de las reacciones microbianas. El metano tiene un potencial de calentamiento global que es más de veinte veces mayor que el del dióxido de carbono, por lo que es de vital importancia el tratamiento de la FORSU en un sistema de manejo integral de residuos, pues por una parte se puede tener un valor agregado, y por la otra, se reduce la toxicidad y el volumen de los RSU que se dispone en rellenos sanitarios.

Este trabajo evalúa diferentes tecnologías de conversión de la FORSU para determinar primeramente la competitividad tecnológica, y posteriormente la ambiental y la económica. Estas tecnologías incluyen procesos termoquímicos como la gasificación, la pirólisis y la incineración; procesos bioquímicos como la digestión anaerobia, la digestión aerobia y la fermentación alcohólica; y por último, procesos fisicoquímicos como la transesterificación y la producción de comida para animales a partir de la FORSU.

Se realizó una primera evaluación de tecnologías de conversión de la FORSU con los siguientes criterios aplicables a estas tecnologías: la viabilidad técnica de los procesos, el tipo de alimentación que pueden admitir, los productos que se obtienen, la experiencia, y la capacidad de plantas instaladas. A partir de las tecnologías identificadas con mayor potencial, se realizó una segunda evaluación con base en los siguientes criterios de evaluación: los costos de operación, los costos de instalación, el área requerida, las repercusiones ambientales y la generación de productos valorizables.

---

### 1.1. Objetivo General

---

Presentar el diseño conceptual de una alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU separada en sitio que actualmente no se aprovecha en el D.F.

---

### 1.2. Objetivos Específicos

---

- Analizar la valorización actual de la FORSU en el D.F.
- Analizar y evaluar las alternativas tecnológicas disponibles, para seleccionar la mejor alternativa, favoreciendo el uso de tecnologías limpias.
- Presentar un diseño conceptual de la propuesta tecnológica seleccionada para la valorización de la FORSU separada en sitio que hoy en día no se aprovecha en el D.F.

---

### 1.3. Justificación

---

En el Distrito Federal se generan aproximadamente 12,439 tpd de Residuos Sólidos Urbanos (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008), de los cuales el 43% corresponden a residuos orgánicos. Actualmente se emplea únicamente el 4.4%<sup>1</sup> de la FORSU para la generación de composta, y el resto (95.6%), es dispuesto en un relleno sanitario sin que estos tengan un valor agregado.

Lo anterior resulta ser un grave problema, ya que por una parte el relleno sanitario que se encuentra actualmente en operación, conocido como Bordo Poniente, ya rebasó el tiempo de vida para el cual fue diseñado (Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal 2007), lo que implica un riesgo inminente al ambiente, debido a que si la geomembrana, que se encuentra separando a los RSU del suelo, soporta más peso para el cual fue diseñada, ésta puede romperse y los lixiviados se infiltrarían hacia los mantos acuíferos subterráneos. Por otro lado, el cerrar el relleno sanitario actual sin contar con una alternativa para el destino final de los residuos, podría ocasionar serios problemas de salud, sociales y ambientales.

Dentro del Distrito Federal, no se cuenta con espacio disponible para crear otro relleno sanitario (Gasca Álvarez 2007), que cumpla con los requisitos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-1996. Si a lo anterior agregamos el hecho de que actualmente el Gobierno del Distrito Federal tiene un gasto público asociado a la disposición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), vs un ingreso, si los residuos se valorizaran por otro método, queda claro que es indispensable mejorar el estado actual del manejo integral de los residuos en el D.F.

---

<sup>1</sup> Este porcentaje fue calculado con la cantidad de producción de composta según el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008.

Generalmente cuando se habla de valorizar la Fracción Orgánica de los RSU, se piensa en compostaje, ya que esta tecnología es de las más simples y es la que actualmente se utiliza en el D.F., sin embargo, hay muchas otras tecnologías de valorización para la FORSU, mismas que originan productos con un mayor valor agregado.

Por lo anterior, es indispensable conocer las diferentes tecnologías disponibles, y proponer la mejor alternativa para el tratamiento de la FORSU en el D.F.



---

## 2. Marco Teórico

---

---

### 2.1. Clasificación de los residuos sólidos

---

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, clasifica a los residuos en dos tipos:

1. Residuos de manejo especial:

En su 3° artículo, fracción XXX define a los residuos de manejo especial como los que requieran sujetarse a planes de manejo específicos con el propósito de seleccionarlos, acopiarlos, transportarlos, aprovechar su valor o sujetarlos a tratamiento o disposición final de manera ambientalmente adecuada y controlada.

2. Residuos urbanos:

En su 3° artículo, fracción XXXI define a los residuos urbanos como los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares 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 provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados como residuos de manejo especial. Dentro de los residuos urbanos, se distinguen dos tipos de residuos:

2.1 Residuos orgánicos:

En su 3° artículo, fracción XXXII define a los residuos orgánicos como todo residuo sólido biodegradable.

## 2.2 Residuos inorgánicos:

En su 3° artículo, fracción XXXII define a los residuos orgánicos como todo residuo que no tenga características de residuo orgánico y que pueda ser susceptible a un proceso de valorización para su reutilización y reciclaje.

---

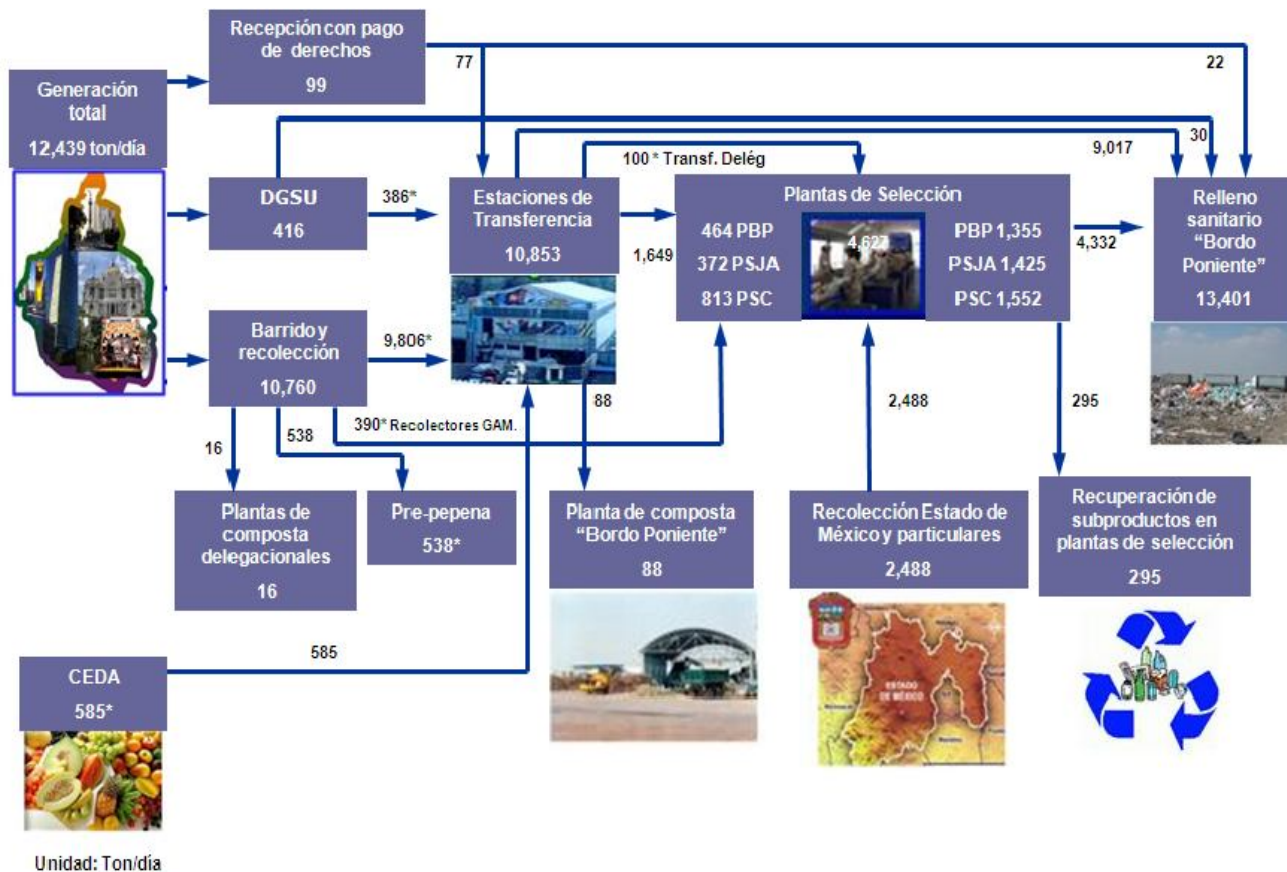
## 2.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal

---

La gestión integral de RSU comprende las siguientes etapas (Bertolino, y otros 2009):

1. Generación
2. Recolección
3. Transferencia / Transporte
4. Tratamiento
5. Disposición final.

En el diagrama 1 se presenta el flujo de los RSU generados en el D.F, donde se resumen las diferentes etapas de la gestión integral de los RSU



**Diagrama 1** Diagrama de flujo de los RSU en el D.F.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, 2008

### 2.2.1. Generación

A grandes rasgos, la generación de residuos y su composición es en función del tamaño de la población, el nivel de vida y grado de desarrollo económico, los hábitos de consumo, los métodos de acondicionamiento de los productos, la época del año, entre muchas otras variables (Bertolino, y otros 2009).

Es importante comparar la generación de residuos *per cápita*, entre países y entre distintas regiones de nuestro país, ya que como se menciono con anterioridad, la generación de RSU depende de factores como el nivel de vida, o los hábitos de consumo.

En la tabla 1 se compara la generación de residuos por zona en nuestro país, y en la tabla 2 se compara la generación de residuos en diferentes países.

**Tabla 1.** Comparación de la generación de RSU en México por zona.

Zona	kg/hab/día
Centro	0.788
DF	1.329
Norte	0.891
Sur	0.629
Fronteriza Norte	0.965
Promedio Nacional	0.853

*Fuente: (Muñoz Meza 2008)*

**Tabla 2.** Comparación de generación de RSU en distintos países.

País	kg/hab/día
E.U.A	1.97
Brasil (Sao Paulo)	1.35
Canadá	1.9
Argentina (Buenos Aires)	0.88
Finlandia	1.69
Chile (Santiago)	0.87
Suiza	1.3
México	0.853
Japón	1.12

*Fuente: (Muñoz Meza 2008)*

En la comparación anterior se observa una clara tendencia de una generación mayor de RSU en las zonas urbanas que en las zonas rurales. El Distrito Federal y la zona fronteriza del norte del país son las zonas más desarrolladas de México, y esto se refleja en la generación de basura. Si se comparan los países expuestos en la tabla 3, también se ve esta tendencia, ya que entre más

industrializado sea el país, mayor es la generación de basura, esto también está asociado a fenómenos culturales y geográficos.

En el conocimiento de la composición se debe basar la toma de decisiones referidas a los sistemas de tratamiento, y la composición depende del nivel de industrialización de la ciudad en cuestión. En el DF, en la década de los 90's los RSU presentaban en su composición 46.44% de fracción orgánica, y para la década de los 2000's este porcentaje se redujo a 42%(Ayala Hernández 2009).

Siguiendo estas tendencias, se puede concluir que conforme pase el tiempo, en el D.F. disminuirá la proporción de la FORSU, y aumentará la producción total de RSU.

---

### *2.2.2 Recolección / Transporte*

---

Las delegaciones tienen a su cargo la recolección de los residuos y su transporte a las estaciones de transferencia, a las plantas de selección o directamente al sitio de disposición final Bordo Poniente.

El D.F. cuenta con 1,737 rutas de recolección, de las cuales 450 son rutas con recolección separada. Para incrementar la separación de residuos, las delegaciones establecieron metas anuales para la instrumentación de rutas de recolección separadas, donde tenían una meta mínima, y una meta objetivo, a la que sería ideal llegar durante ese año. A continuación se muestra en la tabla 3, por delegación, los avances en la instrumentación de rutas con recolección separada de los años 2004 a 2008.

**Tabla 3.** Avances en la instrumentación de rutas de recolección separada de los años 2004 a 2008.

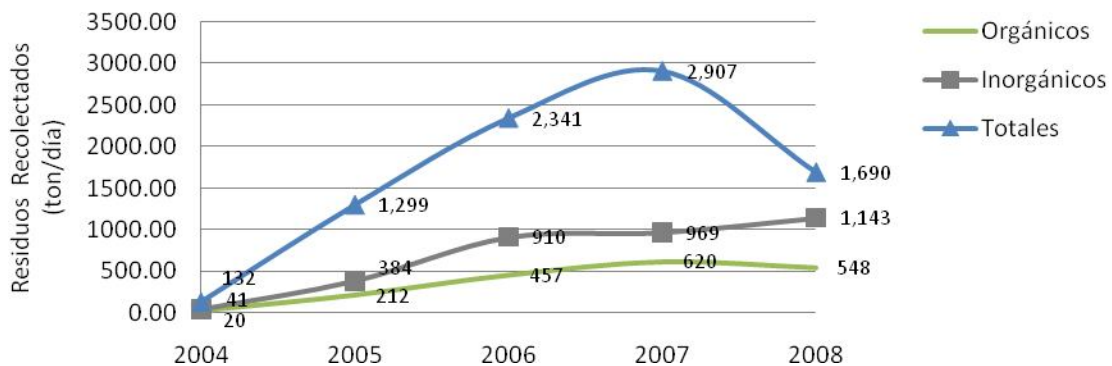
Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

Delegación	Colonias Totales	2004			2005				2006				2007				2008			
		Meta		Avance	Meta		Avance	Acumulado	Meta		Avance	Acumulado	Meta		Avance	Acumulado	Meta		Avance	Acumulado
		Min	Obj		Min	Obj			Min	Obj			Min	Obj						
Álvaro Obregón	257	15	30	4	45	75	32	36	89	134	0	36	149	209	23	59	224	298	1	60
Azcapotzalco	91	5	9	16	14	23	28	44	27	41	30	74	45	63	5	79	68	90	5	84
Benito Juárez	57	3	6	9	8	14	9	18	17	25	0	18	28	39	0	18	42	56	0	18
Coyoacán	140	6	13	0	19	32	20	20	38	57	-17	3	63	88	2	5	95	126	0	5
Cuajimalpa	41	3	5	41	8	13	-7	34	16	23	-23	11	26	36	6	17	39	52	-6	11
Cuauhtemoc	34	2	34	21	5	9	4	25	10	15	0	25	17	24	1	26	26	34	-3	23
Gustavo A. Madero	244	9	18	6	27	46	13	19	55	82	34	53	91	127	-23	30	137	182	-2	28
Iztacalco	36	2	4	1	5	9	2	3	11	16	3	6	18	25	1	7	27	36	1	8
Iztapalapa	157	11	21	0	32	54	0	0	64	96	39	39	107	150	26	65	161	214	-1	64
Magdalena Contreras	51	2	47	8	7	12	0	8	14	21	0	8	24	33	0	8	35	47	0	8
Miguel Hidalgo	81	4	9	7	13	22	2	9	26	40	0	9	44	62	17	26	66	88	14	40
Milpa Alta	12	1	3	2	4	7	10	12	9	13	2	14	15	20	1	15	22	29	-6	9
Tlahuac	72	4	8	4	13	21	6	10	25	38	2	12	42	59	4	16	63	84	16	32
Tlalpan	243	10	20	12	30	50	18	30	59	89	6	36	99	139	17	53	149	198	34	87
Venustiano Carranza	70	4	72	10	11	18	3	13	22	32	0	13	36	50	1	14	54	72	-1	13
Xochimilco	47	5	10	22	15	25	12	34	30	45	0	34	50	69	-11	23	74	99	18	41
<b>Total</b>	<b>1633</b>	<b>85</b>	<b>171</b>	<b>163</b>	<b>256</b>	<b>426</b>	<b>152</b>	<b>315</b>	<b>512</b>	<b>767</b>	<b>76</b>	<b>391</b>	<b>853</b>	<b>1194</b>	<b>70</b>	<b>461</b>	<b>1279</b>	<b>1705</b>	<b>70</b>	<b>531</b>

En la tabla 3 se puede observar que únicamente la delegación Azcapotzalco cubrió con el avance esperado en el año 2008 y que entre el 2004 y el 2008, se cerraron 107 rutas de recolección separada.

En el gráfico 1 se presenta la tendencia de la FORSU recolectada en las rutas de recolección separada en esos mismos años.

**Gráfico 1.** Residuos sólidos urbanos recolectados en las rutas de recolección separada en los años 2004 a 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

Al realizar un comparativo entre el aumento anual de las rutas de recolección separada, y el aumento anual de residuos que se separa, obtenemos los resultados expresados en la tabla 4.

**Tabla 4.** Comparación entre el aumento anual de rutas de recolección separada y el aumento anual de residuos que se separa

Periodo	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
Aumento en Recolección Separada (ton/día)	536	771	222	101
Aumento en rutas	152	76	70	70
ton/día por ruta nueva	3.5	10.1	3.2	1.4

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

Se puede resumir que entre los periodos 2005/2006, 2006/2007 y 2007/2008, aunque el aumento de rutas de recolección separada fue muy parecido, la proporción de residuos separados, por ruta nueva disminuyó significativamente.

Esto refleja que el problema no está necesariamente ligado a la falta de infraestructura de recolección. Puede haber problemas en otros aspectos del manejo de los residuos, tal como la falta de infraestructura para la valorización o transformación de la FORSU, que limite la separación de los residuos al no ser requerida esta fracción en etapas posteriores.

---

### *2.2.3 Transferencia*

---

La Ciudad de México cuenta con trece instalaciones denominadas Estaciones de Transferencia, las cuales son puntos intermedios entre las diversas fuentes generadoras de residuos sólidos, las plantas de aprovechamiento y el sitio de disposición final.

Estas se encuentran ubicadas en:

1. Central de Abasto
2. Delegación Álvaro Obregón
3. Delegación Azcapotzalco
4. Delegación Benito Juárez
5. Delegación Coyoacán
6. Delegación Cuauhtémoc
7. Delegación Gustavo A. Madero
8. Delegación Iztapalapa
9. Delegación Miguel Hidalgo
10. Delegación Milpa Alta
11. Delegación Tlalpan
12. Delegación Venustiano Carranza
13. Delegación Xochimilco



El principal objetivo de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia del servicio de recolección, por medio de la reducción en el número de transportes y la disminución del tiempo en la descarga de los residuos, la cual se realiza a cajas de transferencia remolcadas por tractocamiones con capacidad de recibir la carga de 4 a 5 vehículos recolectores (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal 2004).

---

#### *2.2.4 Tratamiento*

---

Actualmente se tienen dos tipos de plantas para el tratamiento de los RSU. Las primeras son plantas de selección, y las segundas son plantas de composta.

##### ***i. Plantas de Selección***

El Distrito Federal cuenta con tres plantas de selección de residuos mezclados, con capacidad instalada conjunta de 6,500 toneladas por día. Estas tres plantas se ubican en Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina, y en ellas se recuperan materiales reciclables (comercializables en la ciudad y sus alrededores), y los que no lo son, se transportan posteriormente a los sitios de disposición final.

##### ***ii. Plantas de composta***

Actualmente, el único uso que se le da a la FORSU, es el de materia prima para la producción de composta. Según el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito

Federal<sup>2</sup>, se procesan 96 tpd de residuos orgánicos en las plantas de composta, esto equivale al 1.67% de la FORSU.

Con anterioridad se indicó que el 9.5% de la FORSU es separada, y únicamente se aprovecha el 1.67%, siendo el resto mezclado con los RSU mixtos, para depositarse en el relleno sanitario.

Actualmente existen 9 plantas de Composta en operación, ubicadas en diferentes delegaciones del D.F., en la tabla 5 se presenta un resumen de las características principales de estas plantas.

---

<sup>2</sup> En 2010, se amplió la capacidad de la planta de composta de bordo poniente de 200 tpd a 500 tpd. Cabe mencionar que la capacidad instalada generalmente difiere de la capacidad de operación (López Jardinez 2010).

**Tabla 5.** Características principales de las plantas de composta en el Distrito Federal

Planta de composta	Tipo de proceso	Tiempo de producción (meses)	Materia Prima	Destino de la Composta
Álvaro Obregón	Pilas aerobias	4	Troncos, ramas y maleza, estiércol de caballo provenientes de: Luz y Fuerza, Jardines del Pedregal	Viveros, áreas verdes de la delegación, ciudadanía
Bordo Poniente	Pilas aerobias	4	Material de poda, hortalizas, lodos autorizados, alimentos caducos provenientes de: Central de Abasto, Delegaciones, generadores particulares en alto volumen, DGSU	Delegaciones, áreas verdes y viveros, actividades DGSU
Cuajimalpa de Morelos	Pilas aerobias	3	Poda proveniente de: Parques y jardines	Productores Agrícolas en suelos de conservación
Iztapalapa	Pilas aerobias	1	Poda proveniente de: Parques y jardines, Residuos de panteón	Áreas verdes de la delegación y del panteón San Lorenzo Tezonco.
Milpa Alta (4 plantas)	Pilas aerobias	3	Restos de nopal y verdura provenientes del Centro de Acopio del Nopal y la Verdura, poda de parques y jardines, Residuos orgánicos domiciliarios	Ciudadanía (cultivos agrícolas)
Xochimilco	Pilas aerobias	3	Material de poda y estiércol provenientes de: Parques y jardines, Caballerizas	Productores agrícolas

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (2006, 2007 y 2008)*

En la tabla 6 se muestra la capacidad de instalación y operación de dichas plantas para los años 2006, 2007 y 2008.

**Tabla 6.** Capacidad de las plantas de composta del Distrito Federal para los años 2006, 2007 y 2008

Planta de Composta	Capacidad Instalada 2006 (tpd)	Capacidad de Operación 2006 (tpd)	Capacidad Instalada 2007 (tpd)	Capacidad de Operación 2007 (tpd)	Capacidad Instalada 2008 (tpd)	Capacidad de Operación 2008 (tpd)
Álvaro Obregón	5.65	2.40	2	2.48	5.03	5.03
Bordo Poniente	200	100.00	200	45.20	200.00	80.60
Cuajimalpa de Morelos	1.32	1.32	3	2.37	3.29	2.63
Iztapalapa	140.50	6.18	4	3.71	3.95	3.09
Milpa Alta	0.45	0.31	4	3.78	3.78	3.78
Xochimilco	25.00	25.00	3	0.52	3.55	1.22
Total	373	135.21	216	58.06	219.59	96.35

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (2006, 2007 y 2008)*

En la tabla 6 se puede apreciar que la capacidad de operación total de las plantas es menor al 50% de la capacidad instalada total. Esto refleja un grave problema de organización, pues la capacidad de operación de las plantas de composta alcanza para tratar 40.1% de los residuos orgánicos separados, y únicamente se trata el 17.6%.

La planta de de Bordo Poniente es la de mayor capacidad, y ésta tiene algunos problemas de operación. Actualmente cuentan únicamente con una trituradora en operación, por lo que parte de esta operación se realiza de manera manual, para posteriormente enviar los trozos pequeños a la trituradora. En las fotografías 1 y 2 puede apreciarse esta situación.



**Fotografía 1.** Operadores triturando residuos que entran a la planta de composta de Bordo Poniente



**Fotografía 2.** Trituradora de la planta de composta de Bordo Poniente

Se evita introducir troncos muy grandes al tratamiento, y estos se van acumulando en la zona de descarga de materia prima. Esto puede apreciarse en la fotografía 3.



**Fotografía 3.** Acumulación de troncos en la zona de descarga de materia prima, en la planta de composta de Bordo Poniente

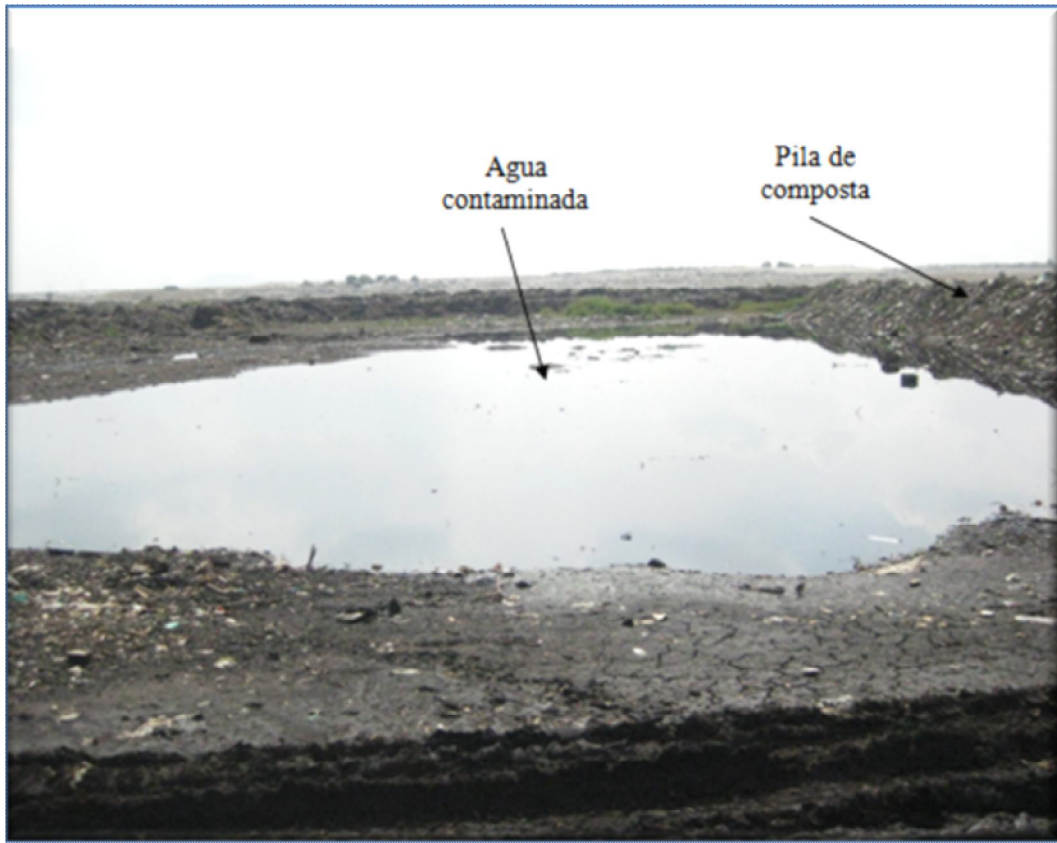
Una vez triturada la materia orgánica, esta es depositada en un cúmulo y camiones la recogen para llevarla a las pilas. Un inconveniente es que algunas veces los camiones tardan mucho en llevar la materia prima a las pilas, por lo que ésta comienza a digerirse de manera anaerobia, ya que en ese momento no se voltea y no se oxigena. En la fotografía 4, se puede apreciar un desprendimiento de vapores del cúmulo que será transportado.



**Fotografía 4.** Materia orgánica triturada, antes de ser llevada a las pilas.

Otro problema con el que cuenta la planta es la existencia de una sola máquina mezcladora, por lo que el tiempo que tarda una pila en airearse es aproximadamente de una semana. Debido a que se tienen muchas pilas en la planta, al no mezclarse continuamente, se empieza a perder el control de las condiciones de operación, tales como la temperatura y/o la cantidad de oxígeno presente. Esto provoca que en lugar de una digestión aerobia, se lleve a cabo una digestión anaerobia y se produzcan gas metano y algunos lixiviados. Como las pilas se encuentran al aire libre, las condiciones atmosféricas afectan tremendamente al proceso, algunas veces la planta se inunda con el agua de lluvia, y algunas otras las pilas se secan por estar al sol.

Cabe mencionar que la planta de composta no cuenta con una protección entre las pilas y el suelo, por lo que la mezcla de lixiviados y agua de lluvia con residuos orgánicos disueltos son infiltrados en el suelo, como se aprecia en la fotografía 5.



**Fotografía 5.** Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente

Como se puede apreciar, la planta de composta de Bordo Poniente necesita un mayor presupuesto para efectuar el mantenimiento e inversión en equipos nuevos, pues debido a la mala operación que se tiene actualmente de la planta, la composta que se obtiene en condiciones no controladas es de baja calidad. Por otro lado, es necesario asegurar que la planta de composta no se encuentre contaminando el suelo, los mantos acuíferos y la atmósfera, debido al desprendimiento de vapores antes de que la composta sea trasladada a las pilas, o a la infiltración de agua contaminada al subsuelo.



---

### *2.2.5 Disposición Final*

---

La Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) es la responsable de la operación del sitio disposición final de residuos sólidos generados en el Distrito Federal, denominado relleno sanitario Bordo Poniente IV etapa, el cual se ubica en la zona federal del lecho del antiguo lago de Texcoco.

Este relleno sanitario se dividió para su operación en cuatro etapas, de las cuales las tres primeras operadas a partir de 1985 y hasta 1994 sumaron una superficie efectiva acumulada de 260 hectáreas, mismas que han culminado su vida útil. La etapa actual en operación (IV), inició a principios de 1995, cuenta con una superficie de 420 hectáreas, ubicada al sur oeste del antiguo lago de Texcoco y al sur de las etapas anteriores separada de aquellas por la autopista México- Texcoco, tiene una recepción diaria de aproximadamente 12,000 toneladas al día (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal 2004). Como se mencionó en la justificación de este trabajo, el relleno sanitario de Bordo Poniente ya rebasó el tiempo de vida para el cual fue diseñado (Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal 2007).

---

### 2.3. Estimación de la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Distrito Federal

---

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, Según el Inventario de Residuos Sólidos del D.F. 2008, se disponen diariamente de 13,400 tpd de RSU en el relleno sanitario de Bordo Poniente, de las cuales, el 99.6% proviene de estaciones de transferencia y plantas de selección. Se estima que el 43% de los RSU del D.F. son orgánicos, por lo que la producción de la FORSU es aproximadamente de 5,762 tpd. Cabe mencionar que de esta fracción, sólo 548

tpd se recolectan de manera separada, lo que equivale a un 9.5% de la FORSU (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008).

Con la información señalada hasta el momento se puede concluir lo siguiente:

- Diariamente se generan 5,762 t de FORSU en el D.F.
- Conforme pase el tiempo, en el D.F. disminuirá la proporción de la FORSU, y aumentará la producción total de RSU.
- El gobierno del DF deberá aumentar la cantidad de rutas de recolección separadas, y al mismo tiempo deberá hacer una ardua campaña de concientización sobre los beneficios que pueden obtenerse si se separan los residuos.

---

## 2.4. Resumen de las Tecnologías de Conversión

---

La cantidad de RSU que hoy en día se disponen en diversos rellenos sanitarios, se puede reducir al convertirla en productos útiles por métodos químicos. La materia orgánica dispuesta en el relleno sanitario de Bordo Poniente representa un recurso con un contenido energético sustancial, que puede generar energía eléctrica, combustibles o productos químicos que sirvan como materia prima de otros procesos químicos y/o tecnológicos.

La conversión de materia orgánica puede llevarse a cabo mediante tres procesos principales:

- Procesos de conversión Termoquímicos
- Procesos de conversión Bioquímicos
- Procesos de conversión Fisicoquímicos

---

#### *2.4.1. Procesos de conversión Termoquímicos*

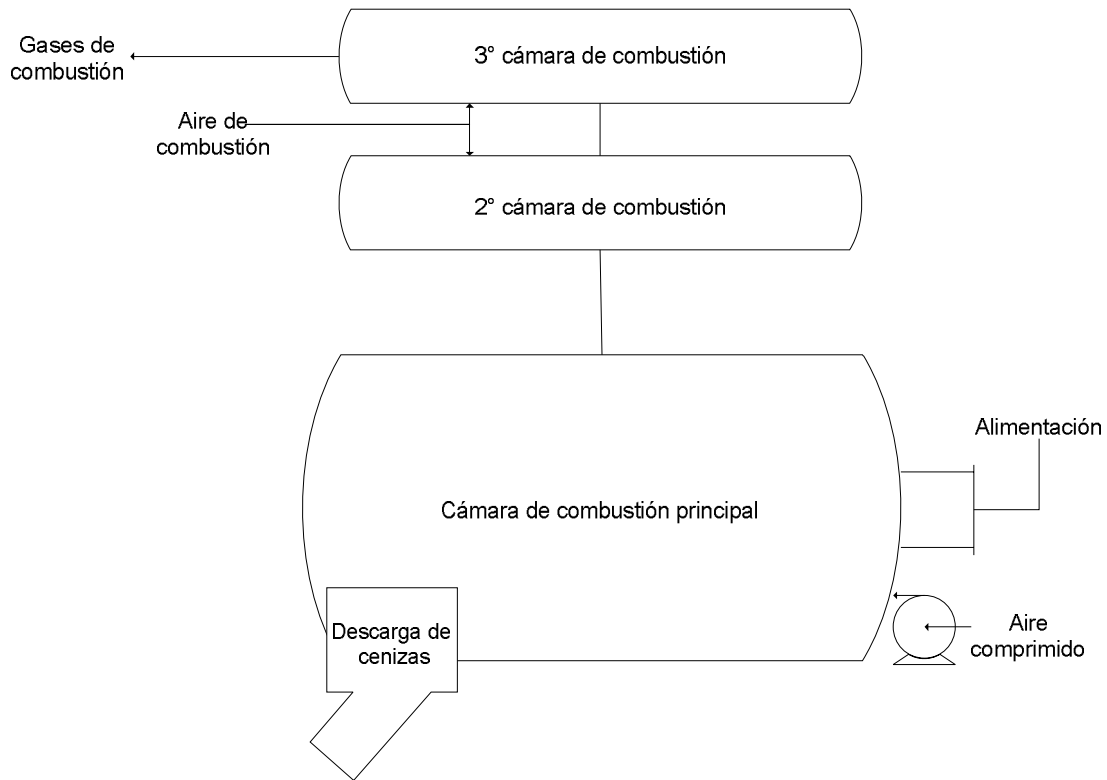
---

La conversión termoquímica se caracteriza por trabajar a mayores temperaturas y mayores velocidades de reacción que la mayoría de los procesos. Estas tecnologías abarcan procesos que van desde la descomposición térmica en un ambiente primordialmente no reactivo (conocido como pirólisis) hasta la descomposición en un ambiente químicamente reactivo (llamado gasificación cuando los productos son en su mayoría gases combustibles, o de combustión completa cuando los productos se encuentran totalmente oxidados)(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004).

##### **i. Incineración**

###### *a) Descripción del proceso*

La incineración es un proceso que se utiliza para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante la oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como son la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia y los parámetros ambientales previamente establecidos(Cortinas de Nava 2009). La temperatura de flama se encuentra generalmente en el rango de 815 a 1650 °C, esta será dependiente de parámetros como el tipo de combustible, el oxidante, la estequiometría, el diseño del horno y la pérdida de calor (Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004). En el diagrama 2 se puede observar una simplificación del proceso de incineración.



**Diagrama 2.** Proceso de incineración

*Fuente: adaptado de Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers, 2001.*

### *b) Características de la alimentación*

Puede incinerarse toda la fracción orgánica de los RSU. Dependiendo del tipo de incinerador, puede necesitar pretratamiento, como homogenización, sorteo de residuos y trituración.

### *c) Productos Principales*

Los productos principales son gases calientes de combustión, que incluyen Agua, Cenizas y especies oxidadas como  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . En este caso generalmente se recupera energía mediante el intercambio de calor utilizando los gases calientes de combustión.

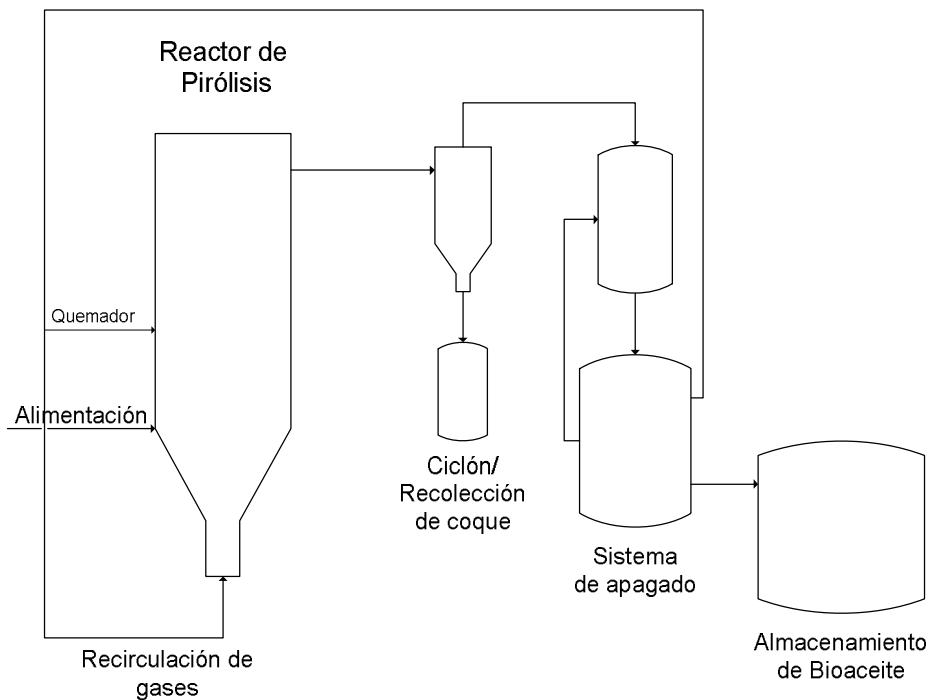
d) *Experiencia*

Se aplica a todos los RSU, no sólo a la FORSU.

**ii. Pirólisis**

a) *Descripción del proceso*

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica directa de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Balat 2009). El proceso de pirólisis es altamente endotérmico, y las temperaturas de operación oscilan entre los 400 y 815 °C(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004). Este proceso puede apreciarse en el diagrama 3.



**Diagrama 3.** Proceso de pirólisis

*Fuente: adaptado de Princeton University Blog Service, 2009.*

#### *b) Características de la alimentación*

Toda la FORSU puede someterse a pirólisis, pero es necesario reducir el contenido de humedad. Generalmente se trabaja con el 15% de humedad.

#### *c) Productos Principales*

En este proceso se producen tres fracciones importantes, la primera de ellas es una corriente gaseosa que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y otros gases. La segunda es una corriente líquida constituida por un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, metanol e hidrocarburos oxigenados. La tercera es el coque residual, formado en su mayoría por carbón casi puro y la fracción inorgánica que contenían originalmente los RSU. La fracción líquida puede ser utilizada como aceite combustible sintético, y si se procesa, puede producir adhesivos, productos químicos especializados entre otros(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004).

#### *d) Experiencia*

Es aplicable a todos los RSU, no sólo a la FORSU<sup>4</sup>.

### **iii. Gasificación**

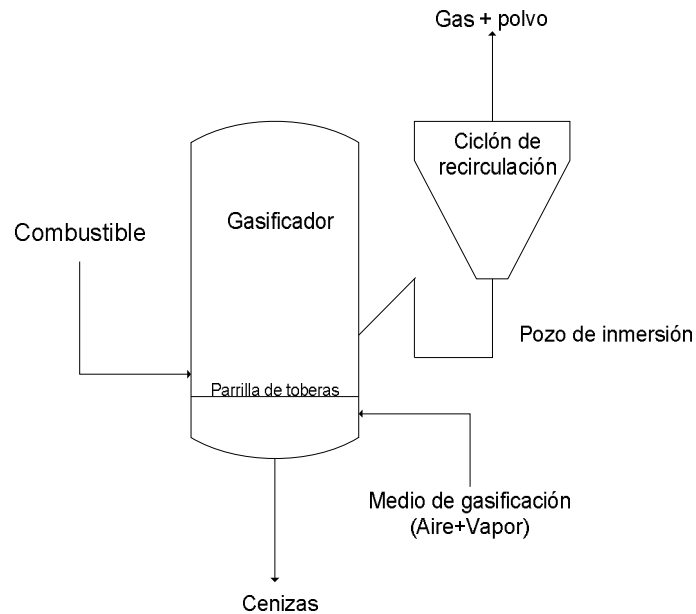
#### *a) Descripción del proceso*

La gasificación se refiere a la producción de gases de combustión mediante la conversión de materiales sólidos o líquidos con alto contenido de carbono por calentamiento interno directo procedente de la oxidación parcial utilizando cantidades subestequiométricas de oxígeno o aire. La temperatura de operación generalmente supera a los 705°C, y la presión va desde la presión atmosférica hasta por arriba de 5 atmósferas. En el diagrama 4 se presenta el proceso de

---

<sup>4</sup> Para consultar una lista de las plantas de pirólisis que utilicen RSU mixtos, revisar la pg. 40 de Colin Hackett, 2004.

gasificación. Para mayor información sobre los procesos de gasificación, consultar (Cabrera 2010)



**Diagrama 4.** Proceso de gasificación

*Fuente: adaptado de (Envirotherm GmbH s.f.)*

#### *b) Características de la alimentación*

Toda la FORSU puede gasificarse. Es importante que la alimentación tenga un bajo contenido de humedad, ya que entre más humedad contenga la materia prima, mayor será la energía necesaria para secarla y posteriormente gasificarla. Como parte del pretratamiento es necesario triturar la basura, asimismo conviene remover la fracción que no puede gasificarse (como vidrio o metales).

#### *c) Productos Principales*

Se producen principalmente CO, Hidrógeno, metano e hidrocarburos más ligeros, al igual que CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Los gases producidos pueden utilizarse en máquinas de combustión interna y externa, celdas de combustible y otras máquinas que producen calor, y energía mecánica o eléctrica. Si estos gases se procesan, se puede producir metanol, líquidos de Fischer-Tropsch (como gas LP, gasolina o

diesel), y otros productos químicos (como dimetileter o etanol)(Hackett y Williams 2004).

*d) Experiencia*

Hay experiencia en el tratamiento de biomasa en Alemania desde 1996 con una capacidad de 320 tpd(Gasification Technologies Council 2010).

---

*2.4.2. Procesos de conversión Bioquímicos*

---

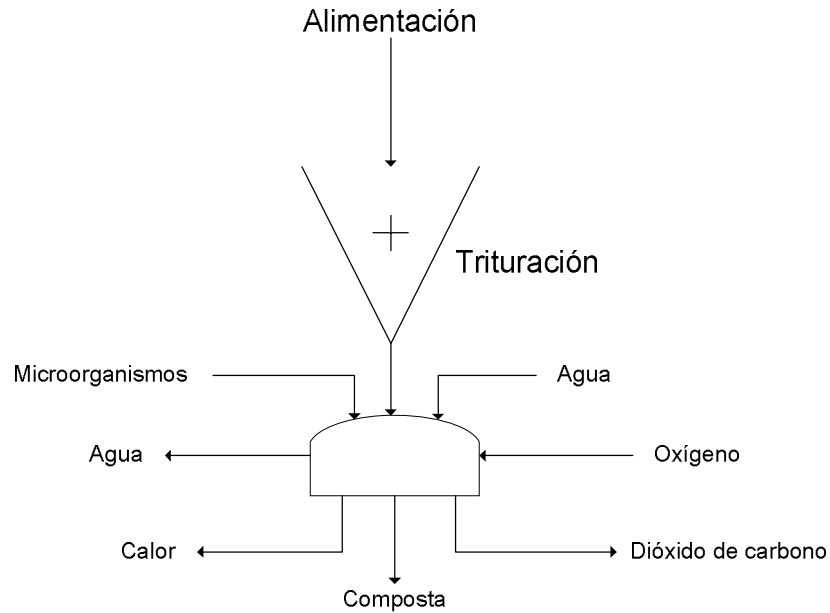
La conversión bioquímica opera a temperaturas bajas y la rapidez de reacción es lenta, lo que permite una mayor selectividad en los productos. Se prefiere que los RSU tengan un alto contenido de humedad si se tratan por un proceso bioquímico, y cabe mencionar que los productos no biodegradables, tales como la mayoría de los plásticos, no pueden ser convertidos mediante estos procesos.

**iv. Compostaje**

*a) Descripción del proceso*

Este tratamiento utiliza oxígeno o aire para soportar el metabolismo de microorganismos aerobios que degradan al sustrato. Es importante considerar los valores nutrimentales de los RSU para que el proceso pueda funcionar adecuadamente. Estos tratamientos pueden operar desde cerca del punto de congelamiento y hasta los 70°C. El diagrama 5 ejemplifica el proceso de compostaje.





**Diagrama 5.** Proceso de compostaje

*Fuente: elaboración propia.*

*b) Características de la alimentación*

Toda la FORSU puede ser sometida al compostaje.

*c) Productos Principales*

En el caso del compostaje, los materiales orgánicos son degradados a un producto parecido al humus, con un pH entre 6.5 y 8, que favorece el crecimiento de las plantas y tiene la capacidad de retención de agua. Cabe mencionar que durante el proceso también se obtiene CO<sub>2</sub>.

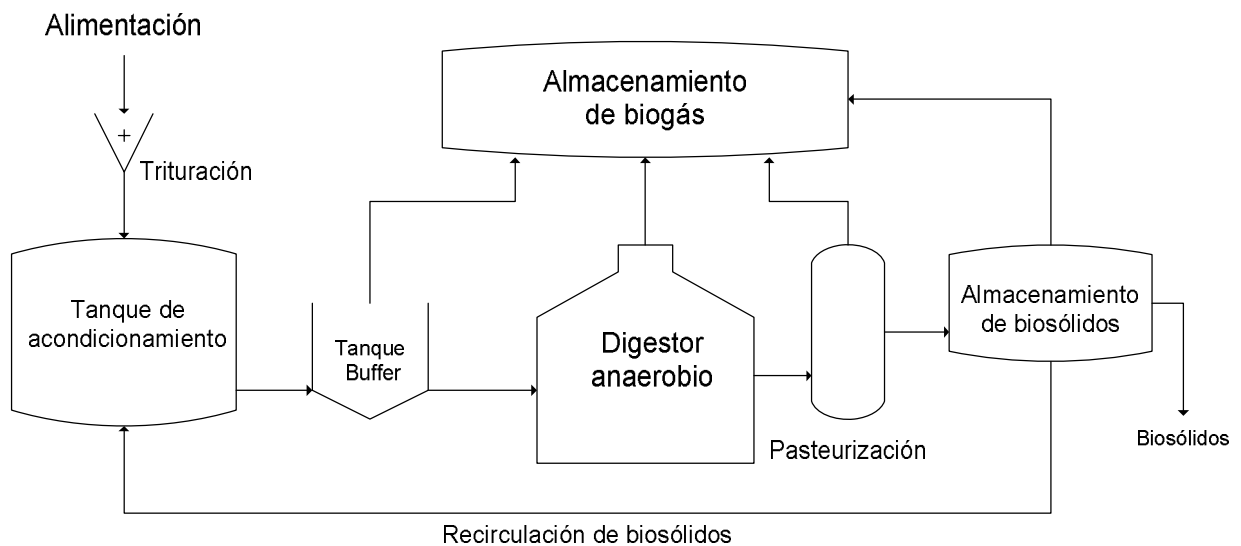
*d) Experiencia*

Hay plantas de compostaje en todo el mundo. La capacidad alcanza valores de hasta 1,200 tpd (Flukong Enterprise Inc. 2009).

## v. Digestión Anaerobia

### a) Descripción del proceso

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana, que opera en ausencia de oxígeno y produce biogás. Este proceso se lleva a cabo entre los 20 y los 65 °C (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Es importante poner cuidado en las necesidades nutrimentales manteniendo una temperatura adecuada para que las bacterias facultativas y las metanogénicas que degradan al sustrato, se encuentren en cantidades adecuadas para que el proceso se realice. En el diagrama 6 se esquematiza el proceso general de digestión anaerobia.



**Diagrama 6.** Proceso de digestión anaerobia

Fuente: adaptado de Renewable Energy Association, 2007.

### b) Características de la alimentación

Es conveniente que la FORSU tenga un contenido de humedad alto, y baja concentración de lignina para tener una mayor conversión.

### *c) Productos Principales*

El biogás contiene principalmente Metano y CO<sub>2</sub>, pero frecuentemente acarrea humedad, H<sub>2</sub>S y partículas sólidas que deben ser removidas antes de que se utilice. El biogás se puede utilizar (después de purificarlo) como combustible en máquinas, celdas de combustible, calentadores industriales, calderas y otros equipos, así como también en la fabricación de productos químicos(Hackett y Williams 2004).

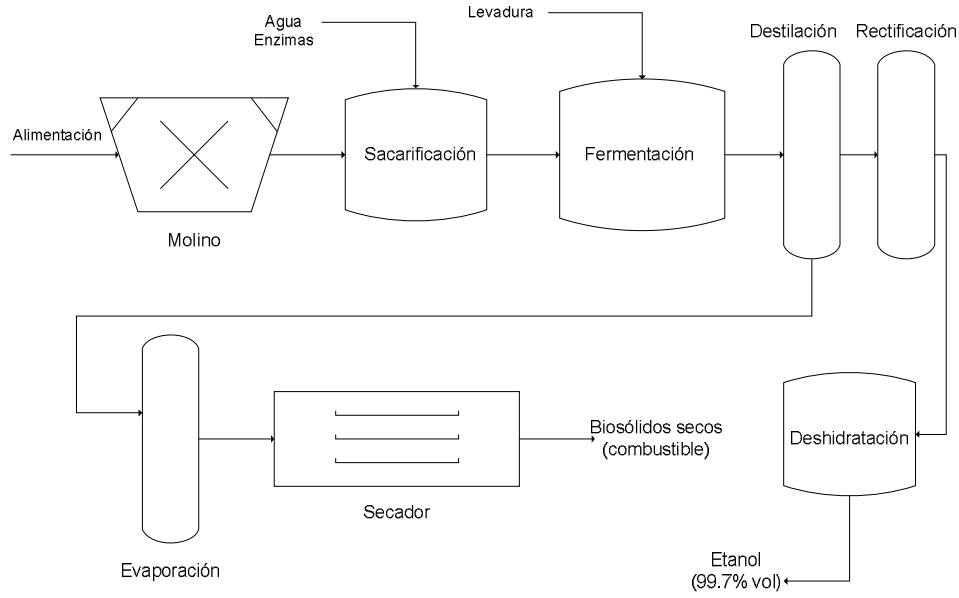
### *d) Experiencia*

Existen 115 plantas operando actualmente con la FORSU separada en sitio. Las capacidades de operación se encuentran entre 8 y 1,363 tpd, y principalmente se encuentran en Europa y en Japón(International Energy Agency 2008).

## **vi. Fermentación Alcohólica**

### *a) Descripción del proceso*

La fermentación generalmente se utiliza para convertir un sustrato (habitualmente glucosa) a etanol. Se requiere de un pretratamiento químico, físico o biológico de la materia prima para abrir la estructura de la biomasa, y convertir los carbohidratos complejos en azúcares simples. Posteriormente, se fermentan los azúcares mediante las levaduras o las bacterias, para producir etanol. Finalmente se destila el etanol obtenido para alcanzar un alto contenido de pureza. Es importante mencionar que la concentración de etanol inhibe el crecimiento microbiano, por lo que éste debe ser removido cuando se alcanza una concentración del 12% (concentración a la cual la fermentación se interrumpe durante el proceso)(Hackett y Williams 2004).



**Diagrama 7.** Proceso de fermentación alcohólica

*Fuente: adaptado de Crop Energies, 2010.*

#### *b) Características de la alimentación*

Es importante que la materia prima contenga un alto porcentaje de lignocelulosa o almidón, ya que ésta es la que puede producir mayor cantidad de azúcar, representando una mayor producción de etanol (Hackett y Williams 2004). Por lo anterior, los residuos sólidos orgánicos de origen urbano no son una buena opción de materia prima para este proceso, pues debido a que es más difícil hidrolizarlos requieren de un pretratamiento más exhaustivo.

#### *c) Productos Principales*

Etanol, Biosólidos.

#### *d) Experiencia*

En escala de laboratorio (Dogan, y otros 2008)

---

### *2.4.3. Procesos de conversión Físicoquímicos*

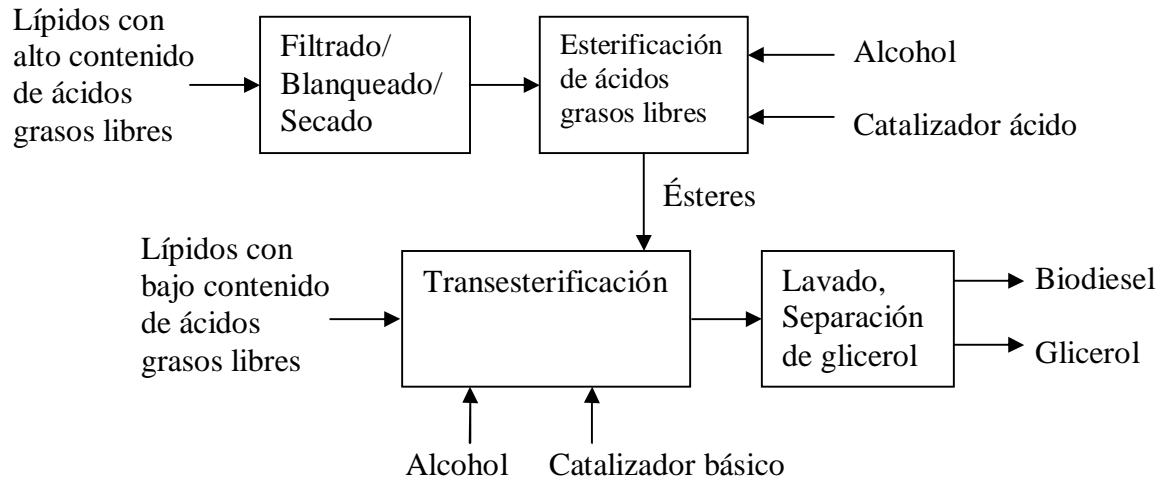
---

La conversión fisicoquímica es en la que se sintetizan productos químicos mediante procesos físicos y químicos que operan a temperaturas y presiones cercanas a las del ambiente. Se asocia principalmente a la transformación de grasas y aceites vegetales y animales a combustibles líquidos, tales como el biodiesel. Aquí se agrega también la producción de comida para animales, aunque en este caso no se sintetice un nuevo producto.

#### **vii. Transesterificación**

##### *a) Descripción del proceso*

La transesterificación es una reacción química catalizada por un álcali en la que un grupo R de un éster se cambia por un grupo R' de un alcohol, dando lugar a otro éster y otro alcohol. En el caso de aceites y grasas de desecho, se dificulta la transesterificación debido al alto contenido de ácidos grasos libres. Estos forman jabón en la reacción catalizada por el álcali, reduciendo la producción de Biodiesel, y dificultando la remoción final del glicerol. En este caso, se requiere un pretratamiento de secado y de limpieza, seguido por una esterificación de los ácidos grasos libres, para poder continuar con la reacción de transesterificación. Se trabaja con temperaturas en el rango de los 25 a los 65 °C. En el diagrama 8 se muestra el proceso de transesterificación, para la producción de biodiesel.



**Diagrama 8.** Proceso de transesterificación

*b) Características de la alimentación*

Aplica a grasas y aceites de la FORSU. Es recomendable que la alimentación tenga un bajo contenido de ácidos grasos libres.

*c) Productos Principales*

Biodiesel, Glicerol

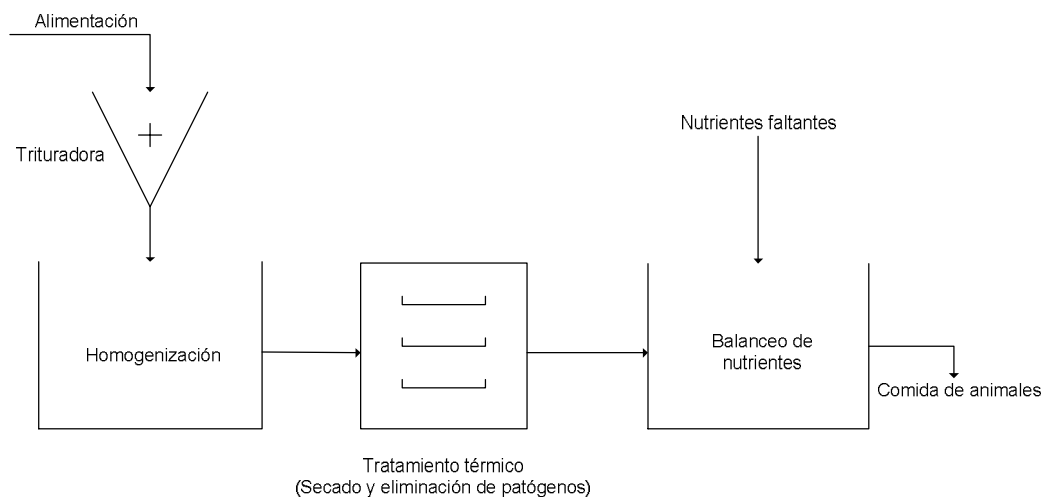
*d) Experiencia*

En Estados Unidos existen 13 plantas instaladas operando con aceites residuales como materia prima, y la capacidad de producción se encuentra entre 3,000 y 15,500 L/día de biodiesel (The National Biodiesel Board 2011).

### viii. Producción de comida para animales

#### a) Descripción del proceso

La fracción orgánica de los residuos sólidos se ha utilizado durante años como complemento en comida de animales, ya que tiene generalmente un alto nivel nutricional. Para que esta fracción se utilice como sustituto de alimento, y no como complemento, se debe asegurar que ciertos factores tales como las proteínas, las fibras, el extracto de éter y los minerales, se encuentren de manera balanceada. También se debe observar la normativa respectiva, pues generalmente depende del tipo de animal del que se trata (mascotas o animales para consumo humano) los límites máximos permisibles de ciertos compuestos. Es importante mencionar que se requiere de un tratamiento térmico para asegurar que los residuos se encuentren inocuos. En el diagrama 9 se ejemplifica el proceso que se sigue para producir comida de animales partiendo de FORSU.



**Diagrama 9** Proceso de producción de comida para animales

*b) Características de la alimentación*

Los residuos a utilizar deben provenir de mercados o tiendas de carne/pescado/frutas y verduras, ya que los residuos de restaurantes y los domiciliarios tienen un alto contenido de metales pesados tóxicos para los animales(García, y otros 2005).

*c) Productos principales*

Comida balanceada para animales. Se tiene referencias de comida para pollos (Vidales Olivo, y otros 2004) y cerdos(García, y otros 2005).

*d) Experiencia*

Escala laboratorio.



---

### 3. Metodología

---

Para poder seleccionar la mejor alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU, se realizaron dos etapas de selección.

La primera fue una evaluación de viabilidad técnica realizada por medio de una matriz de decisiones. Para el llenado de una matriz de decisiones, se siguió la metodología propuesta por (Corzo 1972):

1. Determinación de los criterios
2. Asignación de valores a las alternativas
3. Asignación de valores a los criterios
4. Determinación de la función de criterio

Con el apoyo de la matriz de decisiones se realizó la preselección de las tecnologías de conversión técnicamente viables. De estas tecnologías, se hizo una investigación más detallada sobre alternativas tecnológicas disponibles en el mercado.

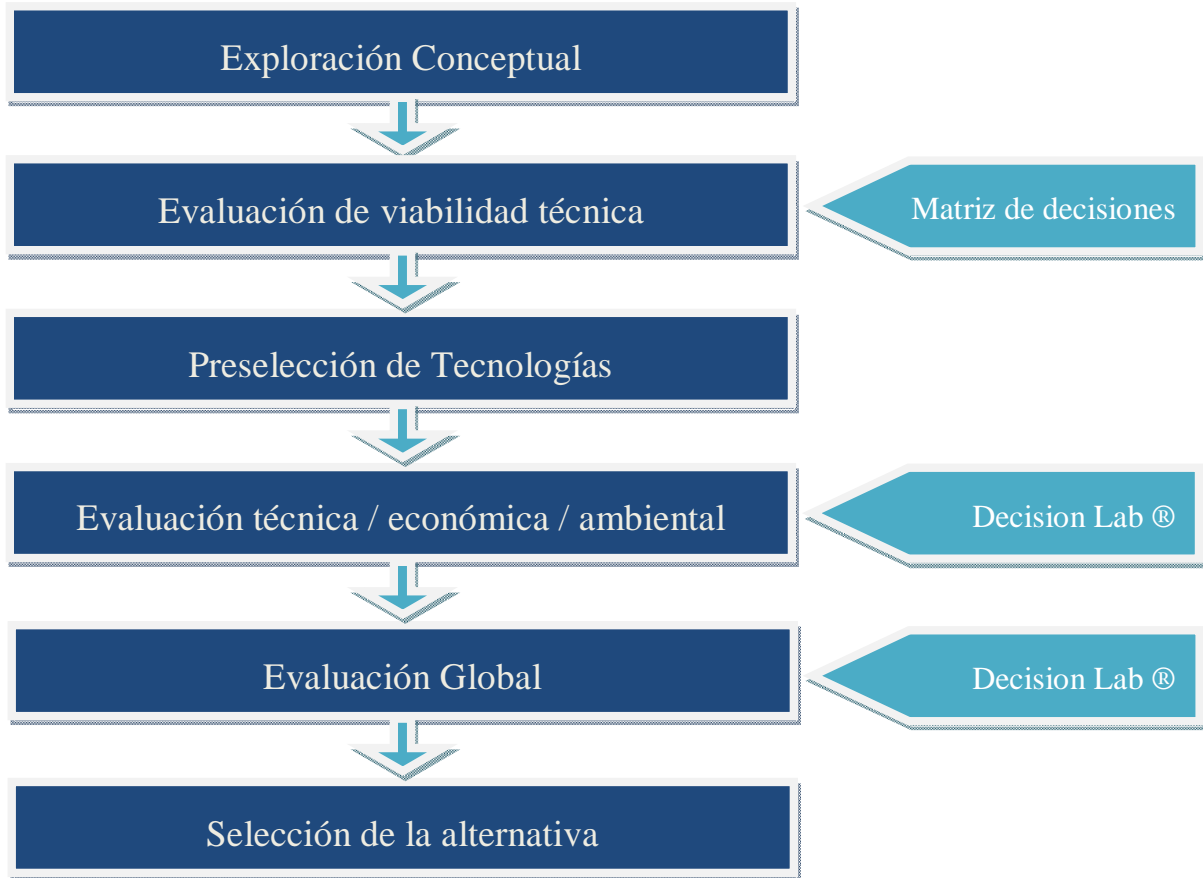
La segunda etapa de selección consistió en una evaluación técnica, económica y ambiental de estas alternativas tecnológicas. Esta se realizó con el soporte del software *Decision Lab*®, por lo que fue necesario seguir la siguiente metodología:

1. Determinación de los criterios
2. Asignación de valores a los criterios
3. Definición de la función de preferencia y sus parámetros
4. Determinación de la función de criterio

Con los resultados de estas tres evaluaciones, se procedió a una evaluación de desempeño global. El software *Decision Lab*® el cual arrojó los resultados

necesarios para determinar la mejor alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU separada en sitio del D.F.

Esta metodología se esquematiza en el diagrama 10.



**Diagrama 10.** Metodología seguida para la selección de la mejor alternativa tecnológica

---

## 4. Resultados y Discusión

---

En este capítulo, se da un seguimiento detallado a la aplicación de la metodología presentada con anterioridad, y los resultados que se obtienen de esta.

---

### 4.1. Evaluación de Viabilidad Técnica

---

Como se ha mencionado, la primera etapa de selección constó de una evaluación de viabilidad técnica, en la que se hizo uso de una matriz de decisiones. Para llenar la matriz de decisiones, se empleó la siguiente metodología (Corzo 1972):

---

#### *4.1.1. Determinación de los criterios.*

---

Para poder comparar las distintas alternativas (Tecnologías de Conversión), es necesario medirlas contra un patrón común. Para la evaluación técnica, los patrones, o criterios seleccionados son los que se muestran a continuación:

- a) Características en la alimentación: Se toma en cuenta si se puede tratar toda la FORSU, y la complejidad del pretratamiento necesario.
- b) Productos principales: Se toma en cuenta la valorización de los productos principales.
- c) Experiencia en FORSU separada: Contempla el número de plantas en operación que tratan únicamente la FORSU separada.
- d) Capacidad de operación: Considera la capacidad de las plantas en operación.

En la tabla 7 se presenta un resumen de los cuatro criterios a evaluar de las tecnologías consideradas en este trabajo.

**Tabla 7.** Resumen de las tecnologías de conversión

Tecnología de conversión	Características en la alimentación	Productos principales	Experiencia en FORSU Separada	Capacidad de operación
Incineración	Toda la FORSU	CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , ceniza y Agua	0	0
Pirólisis	Toda la FORSU	Biogás, bioaceite, coque	0	0
Gasificación	Es conveniente que tenga un bajo contenido de humedad	Gas de Síntesis	1	320 tpd
Compostaje	Toda la FORSU	Composta	Miles	Hasta 1,200 tpd
Digestión Anaerobia	Hasta 40% de sólidos, con bajo contenido de lignina	Biogás	134	De 2.7 a 740 tpd
Fermentación Alcohólica	Es conveniente que tenga un alto contenido de lignocelulosa o almidón.	Etanol	Escala de laboratorio	Escala laboratorio
Transesterificación	Únicamente residuos de aceites y grasas	Biodiesel	Si	De 3,000 a 15,500 L/día
Producción de comida para animales	Únicamente residuos de verduras y vegetales, o de industrias de pescado y carne. Necesitaría separación en sitio.	Comida de animales	Escala de laboratorio	Escala laboratorio

---

4.1.2. Asignación de valores a las alternativas.

---

Los valores asignados a cada alternativa se encontrarán entre 0 y 4. Para poder asignar los valores de cada criterio a las alternativas, se establecieron las bases que se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8.** Bases para la asignación de valores a las tecnologías de conversión

Valor	Criterios de Evaluación			
	Características en la alimentación	Productos principales	Experiencia en FORSU Separada	Capacidad de operación (tpd)
0	No aplica a la FORSU	No hay productos valorizables	No hay plantas instaladas	No hay plantas instaladas
1	No aplica a toda la FORSU, requiere pretratamiento	Los productos casi no tienen valor agregado	De 1 a 5 plantas	De 1 a 100
2	Aplica a toda la FORSU, requiere mucho pretratamiento	Los productos tienen un valor agregado bajo	De 5 a 10 plantas	De 100 a 250
3	Aplica a toda la FORSU, requiere pretratamiento	Los productos tienen un valor agregado medio	De 10 a 50 plantas	De 250 a 500
4	Aplica a toda la FORSU, no requiere mucho pretratamiento	Los productos tienen un valor agregado alto	Más de 50 plantas	Más de 500

Con estas bases, fueron asignados a las alternativas los valores que se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9.** Valores asignados a las tecnologías de conversión

Tecnología de conversión	Características en la alimentación	Productos principales	Experiencia en FORSU Separada	Capacidad de operación
Incineración	3	2	0	0
Pirólisis	3	4	0	0
Gasificación	2	4	1	3
Compostaje	4	1	4	4
Digestión Anaerobia	4	4	4	4
Fermentación Alcohólica	2	4	0	0
Transesterificación	1	4	2	1
Producción de comida para animales	1	2	0	0

---

#### 4.1.3. Asignación de valores a los criterios:

---

Debido a que los criterios considerados no tienen la misma importancia a la hora de garantizar la viabilidad técnica de las alternativas, se asignaron los valores porcentuales mostrados en la tabla 10 para poder jerarquizar a los criterios.

**Tabla 10.** Valores porcentuales asignados a los criterios de evaluación

Criterio de evaluación	Valor %	Razonamiento
Características en la alimentación	35	Es indispensable que se pueda tratar toda la FORSU, y que no se requiera de mucho pretratamiento.
Productos principales	15	Es recomendable que los productos que se generen en el proceso puedan ser comercializados.
Experiencia en FORSU Separada	30	Es necesario contar con experiencias previas para asegurar que el tratamiento en cuestión funcione a gran escala.
Capacidad	20	Es importante contar con experiencia que se acerque a la capacidad de operación solicitada (500 tpd).

---

#### 4.1.4. Determinación de la función de Criterio

---

La función de criterio es la ponderación de cada valor asignado a las alternativas por el valor porcentual asignado al criterio correspondiente. Para aprobar la primera etapa, las alternativas debieron tener un valor de por lo menos 2.4 puntos sobre 4.

En la tabla 11 se aprecian los resultados finales de la matriz de decisiones.

**Tabla 11.** Resultados de la matriz de decisiones

Tecnología de conversión	Características en la alimentación	Productos principales	Experiencia en FORSU Separada	Capacidad	Valor Total
Valor del criterio	35%	15%	30%	20%	
Incineración	1.05	0.3	0	0	1.35
Pirólisis	1.05	0.6	0	0	1.65
Gasificación	0.7	0.6	0.3	0.6	2.2
Compostaje	1.4	0.15	1.2	0.8	3.55
Digestión Anaerobia	1.4	0.6	1.2	0.8	4.0
Fermentación Alcohólica	0.7	0.6	0	0	1.3
Transesterificación	0.35	0.6	0.6	0.1	1.65
Producción de comida para animales	0.35	0.3	0	0	0.65

La segunda etapa de selección, fue una evaluación de las opciones tecnológicas disponibles de las tecnologías seleccionadas en la primera etapa. Para esta sección se realizó un breve análisis económico, técnico y de impacto ambiental, para seleccionar la mejor alternativa, contando con información de fuentes secundarias en lo que respecta a los costos y emisiones.

---

## 4.2. Resumen de Opciones Tecnológicas

---

Dentro de las tecnologías seleccionadas (Digestión anaerobia y compostaje), se han desarrollado varios diseños de plantas comerciales que presentan características distintas entre ellas. Cada una de estas opciones presenta ventajas y desventajas, que son exhibidas en este capítulo. A continuación se profundiza en las bases de estas tecnologías, y se presenta una breve descripción de las opciones tecnológicas para cada tecnología de conversión.

---

### 4.2.1. Digestión Anaerobia

---

La digestión anaerobia de la materia orgánica se lleva a cabo mediante un consorcio de bacterias que trabajan sinérgicamente. Esta se lleva a cabo en tres etapas principales:

1. Hidrólisis:

En esta etapa, se rompen las estructuras moleculares de la fracción biodegradable que contiene lípidos, proteínas y carbohidratos. Los lípidos se transforman en ácidos grasos volátiles y en aminoácidos. Las proteínas y carbohidratos hidrolizan en aminoácidos y azúcares, respectivamente.

2. Acetogénesis:

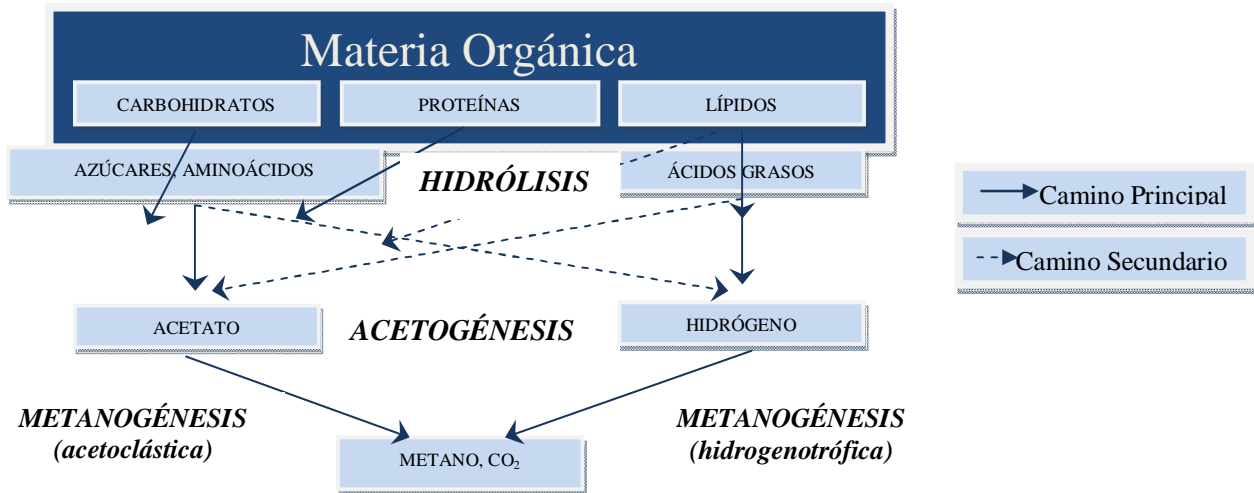
En la acetogénesis las bacterias productoras de ácido crean productos intermediarios como el propionato y butirato, que posteriormente son degradados a hidrógeno y acetato.

3. Metanogénesis:

Las bacterias metanogénicas consumen el hidrógeno y el acetato para producir metano y CO<sub>2</sub>.



En el diagrama 11 se aprecia un esquema representativo de la secuencia seguida durante la digestión anaerobia de la materia orgánica.



**Diagrama 11.** Pasos en la digestión anaerobia

Fuente: adaptado de Colin Hackett, 2004.

La digestión anaerobia opera en ausencia de oxígeno y produce biogás, que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono, y contiene ciertas impurezas como humedad, H<sub>2</sub>S y partículas sólidas. El biogás se puede utilizar como combustible para máquinas, gas para turbinas, celdas de combustible, calderas, calentadores industriales, u otros procesos.

Es importante prestar atención a los requerimientos nutrimentales de las bacterias encargadas de la degradación, en especial a la relación carbono/nitrógeno (C/N) que se considera óptima entre el rango de 20 y 30. El pH óptimo es entre 5.5 y 8.5, dependiendo de la etapa del proceso de digestión anaerobia (Verma 2002), pues cada tipo de bacteria tiene un pH óptimo.

Los sistemas de digestión anaerobia se clasifican según la entrada de la alimentación como procesos *batch* (en lote) o continuos. Estos, se clasifican a su vez según el número de etapas durante el proceso como sistemas de una etapa, o de etapas múltiples.

Los sistemas de una sola etapa son los más fáciles de operar, tienen menos componentes para mantenimiento/falla y conllevan a un menor costo capital. Los sistemas multietapa ofrecen la posibilidad de aumentar la producción de metano y la biodegradación de la materia orgánica, al separar y optimizar los diferentes pasos del proceso bioquímico.

Otro sistema de clasificación depende de la concentración de sólidos en el reactor, generalmente expresada como el porcentaje en peso de sólidos sobre el total alimentado al reactor. Los sistemas que trabajan con un contenido de sólidos menor al 15% son considerados sistemas de bajos sólidos o sistemas húmedos, mientras que los que trabajan con un contenido de sólidos mayor al 15% son considerados sistemas de altos sólidos o sistemas secos.

En base a las definiciones anteriores, podemos considerar para la evaluación los siguientes sistemas:

- i. Sistemas húmedos de una etapa
- ii. Sistemas secos de una etapa
- iii. Sistemas de etapas múltiples

### **i. Sistema húmedo de una etapa**

Este sistema consiste en un *pulper*<sup>5</sup> vertical, que recibe a la FORSU, la homogeniza la separa por densidad. La FORSU fraccionada por densidad, es bombeada a una precámara de un tanque de agitación continua, donde se inocula mediante una pequeña recirculación con la finalidad de prevenir la acumulación de ácido (Joshua Rapport 2008).

En este sistema, se degrada materia orgánica con un contenido de sólidos volátiles (SV) del 10-15%, consumiendo 1m<sup>3</sup> de agua por tonelada tratada (Verma 2002), puede operar en condiciones termofílicas o mesofílicas, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 10 a 20 días. La producción es de 100-150 m<sup>3</sup> de biogás /t de FORSU en dos reactores paralelos (Karagiannidis y Perkoulidis 2009), generando 546 kWh/t<sup>6</sup> y 28 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>/t<sup>7</sup> emitidos. También se generan 300 kg de composta por tonelada de FORSU (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Actualmente se cuenta con 6 plantas que operan con FORSU separada en sitio (listadas en la tabla 12), las capacidades de estas son de 8 a 41 tpd (International Energy Agency 2008), los requerimientos de espacio son de 91 m<sup>2</sup>/tpd (RIS International 2005). Los costos de instalación son de \$85,103<sup>8</sup> por tonelada al día (RWBeck 2004) y los de operación de \$20 por tonelada<sup>9</sup>. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%<sup>10</sup>, se tiene un VPN de \$35,399,291 y una TIR de 29%<sup>11</sup>.

---

<sup>5</sup> El pulper es un tanque donde se diluye la FORSU, se mezcla y se separa por densidad.

<sup>6</sup> En el Anexo I se explica cómo se calculó la generación de energía con biogás.

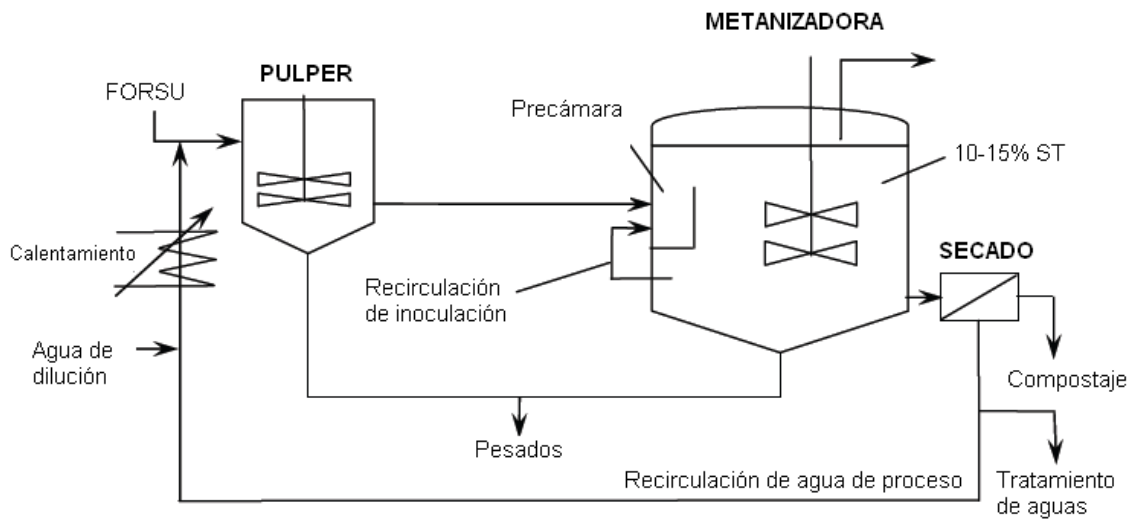
<sup>7</sup> En el Anexo II se muestra el procedimiento utilizado para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero.

<sup>8</sup> Todos los valores monetarios son en dólares americanos de Abril, 2010. Se utilizó el índice ENRCCI para convertir los valores de otros años a valor actual.

<sup>9</sup> En el Anexo III se mencionan los detalles del cálculo de costos de operación para plantas de digestión anaerobia.

<sup>10</sup> Esta es la tasa que se utiliza en el DF para residuos.

<sup>11</sup> En el Anexo IV se explica que herramientas se utilizaron para estos cálculos.



**Diagrama 12.** Proceso de digestión anaerobia en un sistema húmedo de una etapa

*Fuente: Adaptado de Joshua Rapport, 2008.*

En la tabla 12 se presentan las plantas en operación de estos sistemas:

**Tabla 12.** Plantas en operación de sistemas húmedos de una etapa

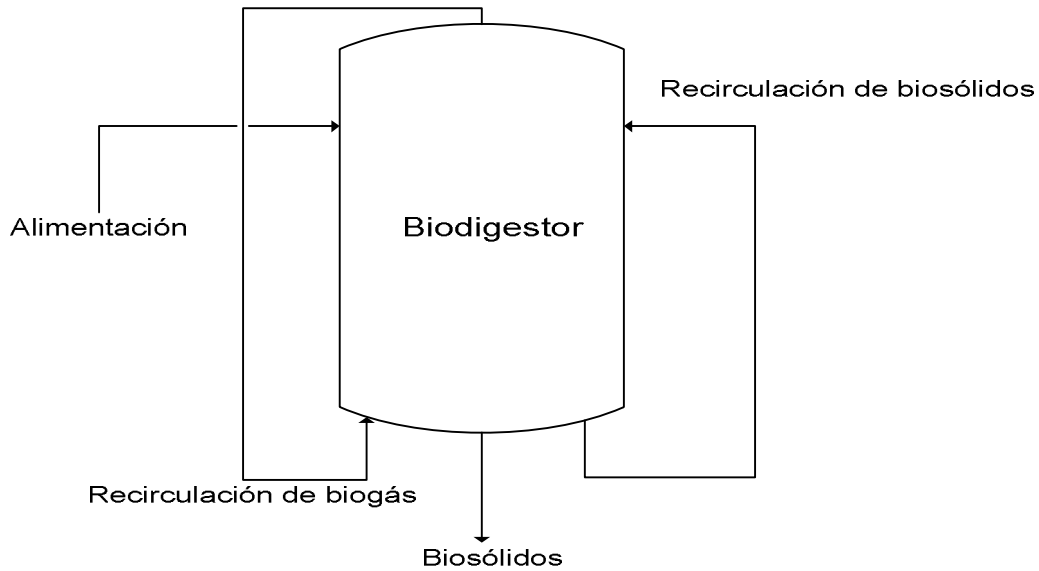
Sistema	País	Lugar	Alimentación	Capacidad (tpd)	Año
Waasa	Japón	Ikoma	FORSU Separada	8.2	2001
Waasa	Japón	Jouetsu	FORSU Separada	32.9	2001
Waasa	Japón	Shimonia	FORSU Separada	13.7	2001
Waasa	Suecia	Jönköping	FORSU Separada	41.1	2003
Waasa	Suecia	Kil	FORSU Separada	8.2	1998
Waasa	Alemania	Bottrop	FORSU Separada	17.8	1995

*Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency, 2008.*

## **ii. Sistema seco de una etapa**

Los sistemas secos de una etapa pueden ser verticales u horizontales, y operan en condiciones mesofílicas o termofílicas, dependiendo de las características de alimentación y de los requisitos económicos. Dependiendo del sistema comercial, estos pueden contar o no con un sistema de mezclado, y con recirculación de biosólidos y/o biogás.

Las plantas trabajan con un contenido de SV que va del 15-40%, consumiendo  $0.1\text{m}^3$  de agua por tonelada tratada (Verma 2002), tienen un TRH que oscila entre 15 y 20 días, y produciendo de 80 a  $200\text{ m}^3$  de biogás/t (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). A estas condiciones se generan 539 kWh/t, emitiendo 28 kg  $\text{CO}_2$  eq/ t, y se producen 277 kg de composta por tonelada de FORSU (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Actualmente se tienen 43 plantas en operación que tratan la FORSU separada en sitio, con capacidades de entre 27 y 1,363 tpd (International Energy Agency 2008), que ocupan  $107\text{ m}^2/\text{t}$  (RIS International 2005). Los costos de instalación son de \$213,127 por tonelada al día (RIS International 2005), y los de operación de \$30 por tonelada. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$11,978,410 y una TIR de 9%.



**Diagrama 13.** Proceso de digestión anaerobia en un sistema seco de una etapa

*Fuente: elaboración propia*

En la tabla 13 se aprecian las plantas en operación de estos sistemas:

**Tabla 13.** Plantas en operación de sistemas secos de una etapa

Sistema	País	Lugar	Alimentación	Capacidad (Tpd)	Año
Dranco	Austria	Siggerwiesen	FORSU Separada	54.8	1993
Dranco	Bélgica	Brecht I	FORSU Separada, papel	54.8	1992
Dranco	Bélgica	Brecht II	FORSU Separada, papel	137.0	2000
Dranco	Alemania	Leonberg	FORSU Separada	82.2	2004
Dranco	Corea	Pusan	FORSU Separada	191.8	2005
Dranco	España	Vitoria	FORSU Separada, RSU	328.8	2006
Dranco	Suiza	Villeneuve	FORSU Separada	27.4	1999
Kompogas	Austria	Lustenau	FORSU Separada	27.4	1996
Kompogas	Austria	Roppen	FORSU Separada	27.4	2001

Sistema	País	Lugar	Alimentación	Capacidad (Tpd)	Año
Kompogas	Caribe	Martinique	FORSU Separada	54.8	2005
Kompogas	Francia	Le Robert, Martinique	FORSU Separada	54.8	2006
Kompogas	Alemania	Alzey	FORSU Separada	71.2	1999
Kompogas	Alemania	Braunschweig	FORSU Separada	71.2	1997
Kompogas	Alemania	Frankfurt	FORSU Separada	41.1	1999
Kompogas	Alemania	Hunsrück	FORSU Separada	27.4	1997
Kompogas	Alemania	Kempton	FORSU Separada	27.4	1995
Kompogas	Alemania	München/Erding	FORSU Separada	71.2	1997
Kompogas	Alemania	Passau	FORSU Separada	106.8	2005
Kompogas	Alemania	Simmern	FORSU Separada	27.4	1997
Kompogas	Alemania	Weissenfels	FORSU Separada	34.2	2003
Kompogas	Japón	Kyoto	FORSU Separada	54.8	2004
Kompogas	España	Rioja	FORSU Separada	205.5	2005
Kompogas	Suiza	Aarberg	FORSU Separada	34.2	2006
Kompogas	Suiza	Bachenbülach	FORSU Separada	27.4	1994
Kompogas	Suiza	Jona	FORSU Separada	21.9	2005
Kompogas	Suiza	Lenzburg	FORSU Separada	13.7	2005
Kompogas	Suiza	Otelfingen	FORSU Separada	34.2	1996
Kompogas	Suiza	Ottenbach	FORSU Separada	43.8	2006
Kompogas	Suiza	Pratteln	FORSU Separada	34.2	2006
Kompogas	Suiza	Samstagern	FORSU Separada	27.4	1995
Kompogas	Suiza	Utzenstorf	FORSU Separada	34.2	2005
Kompogas	Suiza	Volketswil	FORSU Separada	13.7	2001
Valorga	China	Beijing	FORSU Separada	287.7	2007
Valorga	China	Shanghai	FORSU Separada,RSU	735.6	2007
Valorga	Francia	Calais	FORSU Separada, papel	74.0	2006
Valorga	Francia	Fos sur Mer	FORSU Separada,RSU	1363.3	2008

Sistema	País	Lugar	Alimentación	Capacidad (Tpd)	Año
Valorga	Alemania	Engelskirchen	FORSU Separada	95.9	1998
Valorga	Alemania	Freiburg	FORSU Separada	98.6	1999
Valorga	Italia	Bassano di Grappa	FORSU Separada,RSU	150.7	2003
Valorga	Países Bajos	Tilburg	FORSU Separada	142.5	1994
Valorga	Portugal	Tdela	FORSU Separada,RSU	95.9	2007
Valorga	España	Barcelona	FORSU Separada,RSU	657.5	2004
Valorga	Suiza	Geneva	FORSU Separada	27.4	2000

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency , 2008.

### **iii. Sistemas multietapa**

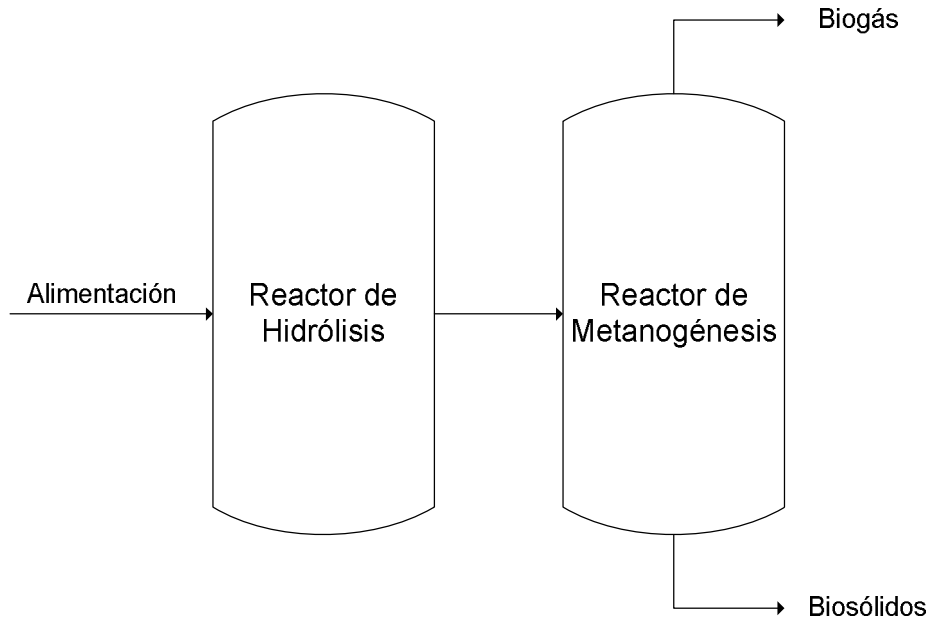
En los sistemas multietapa se llevan a cabo las etapas de reacción en diferentes reactores, con la finalidad de poder controlar mejor las condiciones de cada una de las etapas, y así reducir los tiempos de retención aumentando la producción de biogás. Generalmente se separan la hidrólisis de la metanogénesis, constando el sistema de dos etapas, para permitir un contenido de sólidos totales mayor, o mejorar la estabilidad del proceso.

Los sistemas analizados trabajan con un contenido de sólidos totales que van del 15 al 45%, consumiendo 0.1m<sup>3</sup> de agua por tonelada tratada (Verma 2002), con un TRH de aproximadamente 6 días, la producción de biogás oscila entre 100 y 150 m<sup>3</sup>/t (Joshua Rapport 2008). Con este biogás se generan 590kWh/t, se emiten 326 kg CO<sub>2</sub> eq/t, y se producen 280 kg de composta por tonelada de FORSU. Actualmente existen 20 plantas operando, con una capacidad que va de 8 a 233 tpd (International Energy Agency 2008) que necesitan 53m<sup>2</sup>/t (Verma 2002). Los costos de instalación son de \$179,182/tpd (RIS International 2005), y



los de operación son de \$28/t. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$9,054,131 y una TIR de 10%.

En el diagrama 14 se puede apreciar este proceso.



**Diagrama 14.** Proceso de digestión anaerobia en un sistema multietapa

*Fuente: Elaboración propia*

En la tabla 14 se presentan las plantas en operación de estos sistemas:

**Tabla 14.** Plantas en operación de sistemas multietapa

Sistema	País	Lugar	Alimentación	Capacidad (Tpd)	Año	Tipo
BTA	Bélgica	Leper	FORSU Separada	137.0	2003	Húmedo
BTA	Corea	Ko-Sung	FORSU Separada	8.2	2003	Húmedo
BTA	Alemania	Baden-Baden	FORSU Separada	13.7	1993	Húmedo
BTA	Alemania	Dietrichsdorf	FORSU Separada, ROI	46.6	1995	Húmedo
BTA	Alemania	Erkheim	FORSU Separada, ROI	31.5	1997	Húmedo
BTA	Alemania	Karlsruhe	FORSU Separada	21.9	1996	Húmedo
BTA	Alemania	Kirchstockach	FORSU Separada	54.8	1997	Húmedo
BTA	Alemania	Mertingen	FORSU Separada	30.1	2001	Húmedo
BTA	Alemania	Mühlheim	FORSU Separada, ROI	60.3	2003	Húmedo
BTA	Alemania	Schwabach	FORSU Separada	32.9	1996	Húmedo
BTA/MAT	Alemania	Kehlheim/ Volkenschwamm	FORSU Separada	35.6		Húmedo
BTA/MAT	Alemania	München	FORSU Separada	54.8	1997	Húmedo
BTA/Roediger	Alemania	Kaufbeuren	FORSU Separada, ROI	16.4	1992	Húmedo
Linde BRV/ Strabag BRV	Alemania	Lemgo	FORSU Separada, ROI	104.1	2000	Seco
Linde BRV/ Strabag BRV	Suiza	Baar	FORSU Separada	16.4	1994	Seco
Linde BRV/Strabag	Austria	Wels	FORSU Separada	41.1	1997	Húmedo
Linde KCA/ Strabag-KCA	Alemania	Fürstenwalde	FORSU Separada, Estiércol, ROI	232.9	1998	Húmedo
Linde/ Strabag	España	Valladolid	FORSU Separada	41.1	2001	
Linde/Strabag- BRV	Alemania	Hoppstätten- Weiersb.	FORSU Separada	63.0	2002	Seco
Linde-BRV/ Strabag-BRV	Alemania	Sagard (Rügen)	FORSU Separada, Estiércol, ROI	131.5	1996	Húmedo

ROI: Residuos Orgánicos Industriales

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency, 2008.

---

#### 4.2.2. Compostaje

---

El compostaje es un proceso que convierte residuos orgánicos en un material estable con bajo contenido de materia orgánica rápidamente biodegradable y sin fitotoxicidad para las plantas.

Generalmente se distinguen cuatro etapas principales durante el proceso de compostaje, dependiendo de la temperatura que llegue a alcanzar la pila de composta (Yong y Guang-Ming 2009). A continuación se da una breve descripción de cada una de ellas:

1. Etapa mesofílica:

Es dominada por microorganismos mesofílicos. Durante esta etapa la actividad metabólica produce un aumento de temperatura (40°C), y la producción de ácidos orgánicos disminuye el pH.

2. Etapa termofílica:

Es dominada por bacterias termofílicas y hongos. En esta etapa, como consecuencia del aumento de la temperatura, los hongos transforman el nitrógeno en amoníaco, produciendo un pH alcalino. Cerca de los 60°C, las bacterias esporígenas y actinomicetos descomponen las ceras, proteínas y hemicelulosas. Se debe mantener una temperatura entre los 40-60°C y un contenido de humedad entre el 50-60%, para asegurar la actividad biológica necesaria.

3. Etapa de enfriamiento:

Es dominada por microorganismos mesofílicos, cuando las temperaturas descienden de los 40°C estos reinician su actividad disminuyendo ligeramente el pH. En esta etapa la composta todavía no está madura, y puede tener un alto contenido de ácidos orgánicos, una proporción C/N alta, valores de pH extremos y un alto contenido de sales, que pueden matar a las plantas.

#### 4. Etapa de maduración:

Es dominada por microorganismos mesofílicos. La maduración es un indicador del grado de conversión de compuestos orgánicos a compuestos húmicos, que son resistentes a la degradación microbiana.

El proceso de compostaje requiere niveles óptimos de carbono, nitrógeno, oxígeno y agua. El tamaño de partículas debe ser apropiado para permitir un buen mezclado y un adecuado flujo de aire a través de la pila. Se puede trabajar con proporciones de C/N entre 20:1 y 40:1. El contenido óptimo de humedad va de 50-60%, pero bajo ciertas condiciones se puede trabajar con humedad del 40-65%(Sherman 2006).

Una clasificación de los sistemas de compostaje, separa a los que operan al aire libre (generalmente compostaje en pilas) de los que operan en un reactor cerrado (conocido como compostaje cerrado). Cabe mencionar que el tipo de compostaje que se evalúa en esta parte es únicamente el que se lleva a cabo por acción de bacterias y hongos, se deja de lado otros sistemas de producción de composta, como el vermicompostaje, ya que estos sistemas son difíciles de operar a gran escala por la delicadeza de los organismos que en ellos participan.

Algunas ventajas del sistema de pilas, si se compara con los sistemas cerrados, son el bajo costo de inversión, y la adaptabilidad al cambio en la alimentación. Por otro lado, estos sistemas requieren mucha área para operar, son sensibles al clima, y en caso de mala operación es difícil controlar olores si se comparan con los sistemas cerrados.

De acuerdo a la clasificación de este tipo de sistemas, se evaluaron las siguientes opciones tecnológicas:

- iv. Sistemas de compostaje abierto
- v. Sistemas de compostaje cerrado

#### **iv. Sistemas de compostaje abierto**

El compostaje abierto es comúnmente conocido como compostaje en pilas, debido a que se forman pilas con el material orgánico a tratar. Es importante el tamaño y la forma de las pilas, para permitir una correcta aireación, no perder demasiado calor, y controlar la humedad. Generalmente las pilas son de 3-4 metros de ancho y de 1-4 metros de alto al inicio del compostaje (Sherman 2006), y tienen una forma triangular para drenar el agua de lluvia. En meses secos, se puede aplanar la parte superior para retener más agua. En la fotografía 6 se presenta un sistema de compostaje abierto.



**Fotografía 6.** Sistema de compostaje abierto

*Fuente: Compost Canarias, 2011.*

Existen diferentes tipos de sistemas de compostaje abiertos, los cuales se diferencian principalmente por el sistema de aireación que tienen. Los sistemas de pilas con volteo se oxigenan mediante el mezclado periódico del material a tratar. Con este movimiento se controla la temperatura y la humedad de la pila.

Los sistemas de pilas con aireación pasiva incluyen la inserción de pipas de aireación dentro o debajo de las pilas; las pilas son ventiladas por convección natural, ya que el aire caliente que sube por el interior de las pilas crea un vacío parcial que arrastra el aire de abajo o de los lados. Las pilas con aireación forzada cuentan también con pipas de aireación insertadas a lo largo de la pila, pero a diferencia del sistema con aireación pasiva, la corriente de aire se debe a insuflado o succión por medio de un ventilador. Es importante tener una mezcla homogénea y el contenido óptimo de humedad, ya que generalmente estos sistemas no se voltean.

Generalmente los sistemas de compostaje en pilas tardan de 3 meses a un año en procesar la materia orgánica, trabajan con un contenido de sólidos totales entre 35 y 60%, consumiendo 0.35 m<sup>3</sup> de agua por tonelada tratada (Sustainability in Industry, Energy and Transport European IPPC Bureau 2005), y producen de 600 a 800 kg de composta por tonelada de FORSU (Farrell y Jones 2009). En el transcurso del proceso, liberando 300 kg CO<sub>2</sub> eq/t, y consumiendo 4 kWh/t (Brown, Kruger y Subler 2008). Hay miles de plantas de compostaje en pilas en todo el mundo, con capacidades que van desde 1 a 1200 tpd, ocupando 207 m<sup>2</sup>/t (Geesing y Paul s.f.). Los costos de operación para este tipo de plantas son en promedio de \$9/t, dependiendo del sistema (Environmental Protection Agency 1999) y los de instalación de \$13,349 a \$26,698/tpd (Kreith y Tchobanoglous 2002). Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$21,518,549 y sin una tasa interna de retorno.

### **v. Sistemas de compostaje cerrado**

Estos sistemas se caracterizan por llevar a cabo el compostaje en reactores cerrados, lo cual permite controlar de la mejor manera los diferentes parámetros del proceso y el desprendimiento de olores, contar con un menor tiempo de residencia y en algunos casos, operar de manera continua.

El diseño de estos reactores cubre una amplia gama, que incluyen reactores horizontales o verticales, mecanismos de aireación, forzada, volteo, o incluso sistemas estáticos, pero con modificaciones para proveer una mejor aireación, y evitar la formación de puntos calientes de digestión anaerobia(Aslam 2010). En la fotografía 7 se muestra un sistema de compostaje cerrado, con un reactor horizontal.



**Fotografía 7.** Sistema de compostaje cerrado

*Fuente: Advanced Technology Applications Corp., 2011.*

El proceso en el reactor es de 5 a 28 días(Center for a Competitive Waste Industry 2010), y para después madurar afuera cerca de un mes(Aslam 2010)(Aslam 2010), resultando en un tiempo de procesamiento es de 37 a 59 días. En la producción de composta se consumen en promedio  $0.33 \text{ m}^3$  de agua por tonelada tratada y  $90 \text{ kWh/t}$  de RSU. Se producen  $650 \text{ kg}$  de composta /t de

RSU, y se emiten a la atmósfera el equivalente a 445 kg de CO<sub>2</sub> (Brown, Kruger y Subler 2008). Actualmente hay 587 plantas en operación (Spencer 2007), con capacidades que van de 1 a 137 tpd y que necesitan 134 m<sup>2</sup>/tpd. Los costos de operación son de \$29/t (Block y Farrell 1998) y los de instalación de \$33,373 a \$66,746/tpd (Kreith y Tchobanoglous 2002). Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$62,472,708 y sin una TIR

---

### 4.3. Evaluación de Opciones Tecnológicas

---

En esta segunda etapa de selección se evaluaron por separado los criterios técnicos, económicos y ambientales, y posteriormente se realizó una evaluación global con los resultados anteriores. Cabe mencionar que para esta etapa de selección se utilizó como herramienta de jerarquización el software *Decision Lab*®, que utiliza el algoritmo de *PROMETHEE* para la evaluación de alternativas.

Para poder hacer uso del software *Decisión Lab*®, se siguió la metodología que se presenta a continuación:

---

#### 4.3.1. Determinación de los criterios

---

En esta segunda etapa, se realizaron tres evaluaciones, una técnica, una económica y una ambiental. En seguida se presentan los criterios utilizados para cada evaluación:

1. Evaluación Técnica:

- a) Área: Considera los metros cuadrados necesarios para tratar una tonelada de FORSU.



- b) Plantas: Contempla el número de plantas en operación para esa opción tecnológica.
- c) Capacidad máxima: Toma en cuenta la mayor capacidad de operación de las plantas para esa opción tecnológica
- d) Tiempo de procesamiento promedio: Considera el número de días necesarios para procesar a la FORSU.

## 2. Evaluación Ambiental:

- a) Gases de Efecto Invernadero: Contempla los kilogramos emitidos de gases de efecto invernadero, en equivalencia de potencial de calentamiento global a CO<sub>2</sub>, por tonelada de FORSU tratada.
- b) Consumo de agua: Considera los metros cúbicos de agua necesarios para tratar una tonelada de FORSU.

## 3. Evaluación Económica:

- a) Costo total: Toma en cuenta el costo necesario para tratar una tonelada de FORSU.
- b) Valor Presente Neto: Refleja las ganancias o pérdidas a tiempo actual, que representa el proyecto sobre una tasa de descuento del 12% (tasa propuesta por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público para los proyectos de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal).
- c) Tasa Interna de Retorno: Muestra la tasa a la que el proyecto no representaría ni una ganancia ni una pérdida económica.

En la tabla 15 se muestra un resumen de los criterios tomados en cuenta en las tres evaluaciones, para cada opción tecnológica presentada.

**Tabla 15.** Resumen de criterios utilizados para la evaluación técnica, económica y ambiental de opciones tecnológicas.

	Evaluación	Técnica				Económica			Ambiental	
	Característica	Área (m <sup>2</sup> /t)	Plantas	Capacidad máxima (tpd)	Tiempo de procesamiento promedio (días)	Costo total (\$/t)	VPN	TIR	Gases de Efecto Invernadero (kg CO <sub>2</sub> eq/t)	Consumo de agua (m <sup>3</sup> /t)
Compostaje	Compostaje Abierto	207	1000	1200	214	12	- 21,518,549	0	319.31	0.45
	Compostaje Cerrado	134	587	137	48	36	- 62,472,709	0	324.76	0.33
Digestión Anaerobia	Sistemas húmedos de una etapa	91	6	41	15	-42	35,399,292	29.00	27.95	1.00
	Sistemas multietapa	53	13	137	6	-27	-9,054,131	10.00	30.19	0.10
	Sistemas secos de una etapa	107	43	1363	20	-21	- 11,978,410	9.00	27.58	0.10

### 4.3.2. Asignación de valores a los criterios

Debido a que los criterios considerados no tienen la misma importancia a la hora de garantizar la viabilidad técnica, económica o ambiental de las opciones tecnológicas, se asignaron los valores porcentuales. Así mismo, a cada evaluación se le asignó un valor porcentual que refleja su peso en la evaluación global. Estos valores son mostrados en la tabla 16 para poder jerarquizar a los criterios.

**Tabla 16.** Criterios de evaluación de las opciones tecnológicas

Criterio	Porcentaje	Descripción
<b>Evaluación Técnica</b>	<b>40</b>	<b>Esta evaluación tiene un mayor peso que las otras dos, ya que lo primero que se debe asegurar del proyecto es la factibilidad técnica</b>
Área (m <sup>2</sup> /t)	45	Dentro de la evaluación técnica, el área requerida por tonelada a tratar es el criterio de mayor peso, ya que en el distrito federal es difícil y caro conseguir espacios muy extensos.
Plantas	15	El número de plantas en operación demuestra que el proceso tiene experiencia.
Capacidad máxima (tpd)	30	La capacidad máxima de plantas instaladas es de gran importancia, ya que ésta determina la facilidad de escalar el proyecto a la capacidad deseada (500 Tpd)
Tiempo de procesamiento promedio (días)	10	Tiempos de procesamiento grandes tienen consecuencias indeseables, como mayor requerimiento de área, más problemas en casos de paro de la planta, mayor requerimiento de personal, entre otros.
<b>Evaluación Ambiental</b>	<b>35</b>	<b>La evaluación ambiental es la segunda en importancia, ya que para este tipo de proyectos es indispensable minimizar el impacto ambiental, aún cuando esto implique que el proyecto no origine ganancias económicas.</b>
Gases de Efecto Invernadero (kg CO <sub>2</sub> eq/t)	70	Las emisiones de gases de efecto invernadero representan un impacto ambiental mayor en los tratamientos bioquímicos, que los efluentes. Por esta razón este criterio tiene un peso tan elevado.
Consumo de agua (m <sup>3</sup> /t)	30	El consumo de agua por tonelada refleja la cantidad de agua que se contamina en el proceso, y que posteriormente debe ser tratada. Como generalmente se da tratamiento al agua residual, ésta no representa un impacto tan alto al medio ambiente.
<b>Evaluación Económica</b>	<b>25</b>	<b>La evaluación económica refleja la viabilidad financiera del proyecto. Aunque es importante que el proyecto pueda ser rentable económicamente, primero se deben asegurar los dos aspectos anteriores.</b>
Costo total (\$/t)	30	El costo total refleja la viabilidad económica del proyecto, y aunque no es tan claro, es el que se utiliza generalmente en materia de residuos sólidos. Por estas razones tiene un peso menor que los otros criterios.
VPN	35	El valor presente neto refleja las ganancias o pérdidas del proyecto sobre la tasa de descuento de residuos sólidos (12%), a tiempo actual. Esta herramienta es más clara que el costo total, por eso tiene un peso mayor.
TIR	35	La TIR refleja a que tasa el proyecto no representaría ni pérdidas ni ganancias. En este caso, se desprecian las alternativas con TIR menor a la tasa de descuento de residuos sólidos.

---

### 4.3.3. Definición de las funciones de preferencia y sus parámetros

---

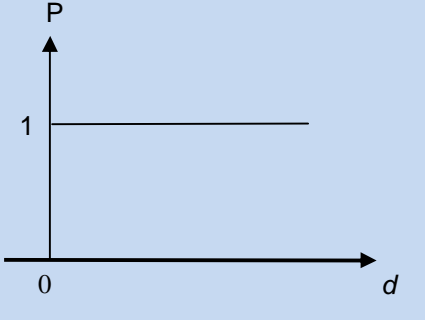
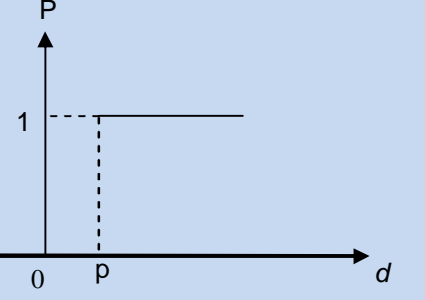
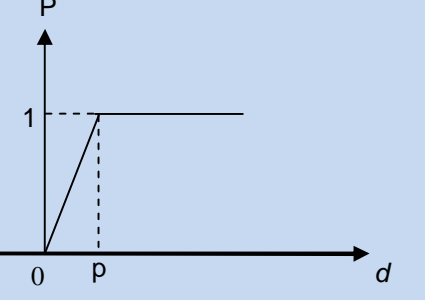
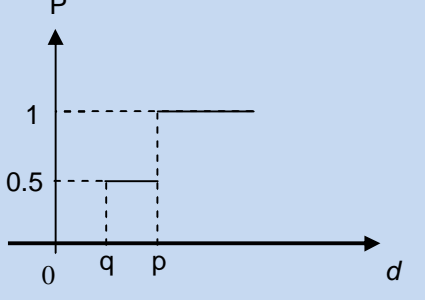
La estructura de preferencias del algoritmo *PROMETHEE* se basa en comparaciones de pares de alternativas evaluadas en los criterios. Se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el evaluador asignará una preferencia pequeña, o incluso puede decidir que no hay preferencia si la desviación es insignificante.

El algoritmo *PROMETHEE* considera que las preferencias son números reales, que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio, el evaluador tiene en mente una función de preferencia, basada en la desviación de las evaluaciones.

El software *Decision Lab*®, propone seis tipos de funciones de preferencia (que se muestran en la tabla 17), en las que se necesitan definir 0, 1 o 2 parámetros con un significado muy claro. (Brans y Mareschal 2005)

1. Límite de indiferencia ( $q$ ): es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
2. Límite estricto de preferencia ( $p$ ): es la desviación más pequeña que se considera como suficiente para generar una preferencia amplia.
3. Límite Gaussiano ( $s$ ): es un valor intermedio entre  $p$  y  $q$ , que define el punto de inflexión de la función de preferencia.

**Tabla 17. Funciones de preferencia**

Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
1 Usual	 <p>A graph with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1, starting from the vertical axis and extending to the right.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	--
2 Forma de U	 <p>A graph with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1, starting from a point 'p' on the horizontal axis and extending to the right. A dashed vertical line connects 'p' on the horizontal axis to the start of the horizontal line at P=1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
3 Forma de V	 <p>A graph with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A line segment starts at the origin (0,0) and goes up to a point (p,1). From (p,1), a horizontal line extends to the right. A dashed vertical line connects 'p' on the horizontal axis to the point (p,1).</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
4 Nivel	 <p>A graph with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=0.5, starting from a point 'q' on the horizontal axis and ending at a point 'p'. From (p,0.5), a horizontal line goes up to (p,1), and then another horizontal line extends to the right at P=1. Dashed vertical lines connect 'q' and 'p' on the horizontal axis to their respective points on the function.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q

Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
5 Lineal		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
6 Gaussiana		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Fuente: (Brans y Mareschal 2005)

Para todos los criterios, se utilizó la función de preferencia lineal. En las evaluaciones, los límites arriba mencionados se expresan como un porcentaje. Esto significa que si la desviación entre las alternativas representa un porcentaje menor a q, no habrá preferencia entre las alternativas, si el porcentaje cae dentro de q y p, la preferencia será lineal, y si es mayor a p, la preferencia será total. Para la evaluación global, los límites se expresan como un valor absoluto.

En seguida se muestran en la tabla 18 los parámetros utilizados en las diferentes evaluaciones:

**Tabla 18.** Parámetros utilizados en el software *Decision Lab* ®

Evaluación	Criterio	Función	Límite de Indiferencia (q)	Límite de Preferencia (p)
Técnica	Área	Minimizar	5%	100%
	Plantas	Maximizar	10%	150%
	Capacidad Máxima	Maximizar	5%	200%
	Tiempo de procesamiento	Minimizar	5%	100%
Económica	Costo Total	Minimizar	3%	100%
	VPN	Maximizar	3%	100%
	TIR	Maximizar	3%	100%
Ambiental	Gases de Efecto Invernadero	Minimizar	5%	100%
	Consumo de agua	Minimizar	5%	200%
Global	Técnica	Maximizar	0.001	2
	Económica	Maximizar	0.001	2
	Ambiental	Maximizar	0.001	2

Los límites de indiferencia, son las variaciones que en cada criterio se consideraron insignificantes. Para las variaciones económicas, se tomaron valores más pequeños, ya que al tratarse de sumas grandes, un cambio por encima del 3% ya resulta significativo. Para las demás evaluaciones, una variación por debajo del 5% se consideró despreciable.

Para la evaluación final, se tomó 0.001 como límite de indiferencia, esto representa un 0.5% de la desviación máxima que podrían tener las evaluaciones.

Los límites de preferencia, son las variaciones en cada criterio que se consideraron suficientemente grandes como para mostrar una preferencia total. En la mayoría de los criterios, una desviación del 100% fue suficiente, exceptuando los criterios en donde margen mayor de variación no representa un problema tan grande (como por ejemplo la capacidad máxima). Para la evaluación final, se tomó 2 como límite de preferencia, ya que esta desviación es la máxima que puede haber en las evaluaciones (recordando que los flujos de preferencia netos pueden tomar valores de -1 a 1) y esta desviación equivale a una preferencia total.

---

#### 4.3.4. Determinación de la función de criterio

---

Al realizar las evaluaciones utilizando el Software *Decision Lab*®, se obtuvieron los flujos netos de preferencia ( $\Phi$ ) que se aprecian en la tabla 19.

**Tabla 19.** Flujos netos de preferencia para las evaluaciones de opciones tecnológicas

	Técnico	Ambiental	Económico
Compostaje Abierto	0.0293	-0.5204	-0.6437
Compostaje Cerrado	-0.0883	-0.4938	-0.7378
Sistemas húmedos de una etapa	-0.3425	0.2126	0.9656
Sistemas multietapa	0.1567	0.3951	0.2797
Sistemas secos de una etapa	0.2447	0.4066	0.1361

Estos flujos marcan la diferencia entre los flujos de preferencia positivos ( $\Phi+$ ) y los flujos de preferencia negativos ( $\Phi-$ ). Los flujos de preferencia positivos miden en qué extensión esa acción es preferible que las demás, tomando valores de 0 cuando nunca se prefiera esa acción con respecto a las demás y de 1 cuando se prefiere completamente esta acción sobre las demás. Los flujos de preferencia negativos miden hasta qué punto otras acciones son preferidas que la acción en cuestión, tomando valores de cero cuando ninguna otra acción es preferida a la acción en cuestión, y valores de uno cuando todas las otras acciones son completamente preferidas a esa acción. Con estas definiciones, los flujos netos de preferencia ( $\Phi$ ) pueden tomar valores de -1 a 1, siendo mejores opciones las acciones que tienen valores cercanos a 1.

Con los datos mencionados anteriormente se realizó la evaluación final, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 20.

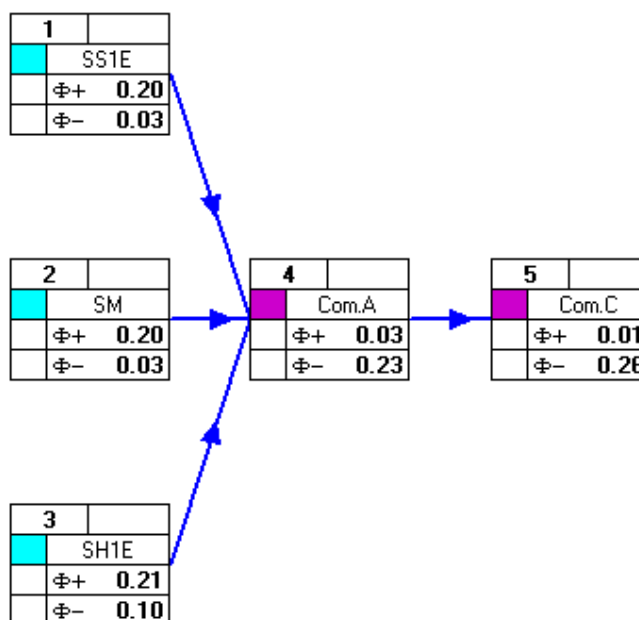


**Tabla 20.** Flujos de preferencia para la evaluación final

	$\phi+$	$\phi-$	$\phi$
Compostaje Abierto	0.0273	0.2342	-0.207
Compostaje Cerrado	0.0138	0.259	-0.2452
Sistemas húmedos de una etapa	0.2137	0.1019	0.1119
Sistemas multietapa	0.1954	0.0262	0.1691
Sistemas secos de una etapa	0.2015	0.0304	0.1711

El Software *Decision Lab*® cuenta con dos algoritmos de análisis, *PROMETHEE I* y *PROMETHEE II*. *PROMETHEE II* realiza una jerarquización completa, tomando en consideración los flujos netos de preferencia, esta evaluación es la presentada arriba, y muestra que la mejor opción es la digestión anaerobia de sistemas secos de una etapa.

El algoritmo *PROMETHEE I* realiza una jerarquización parcial, tomando en cuenta los flujos negativos y positivos de preferencia, que no siempre inducen a los mismos resultados. Con esta jerarquización, se obtienen los resultados que se muestran en el diagrama 15.



**Diagrama 15** PROMETHEE I Jerarquización Parcial

Fuente: Extracción de la evaluación total realizada en *Decision Lab*

Donde:

SS1E: Sistemas Secos de una Etapa

SH1E: Sistemas Húmedos de una Etapa

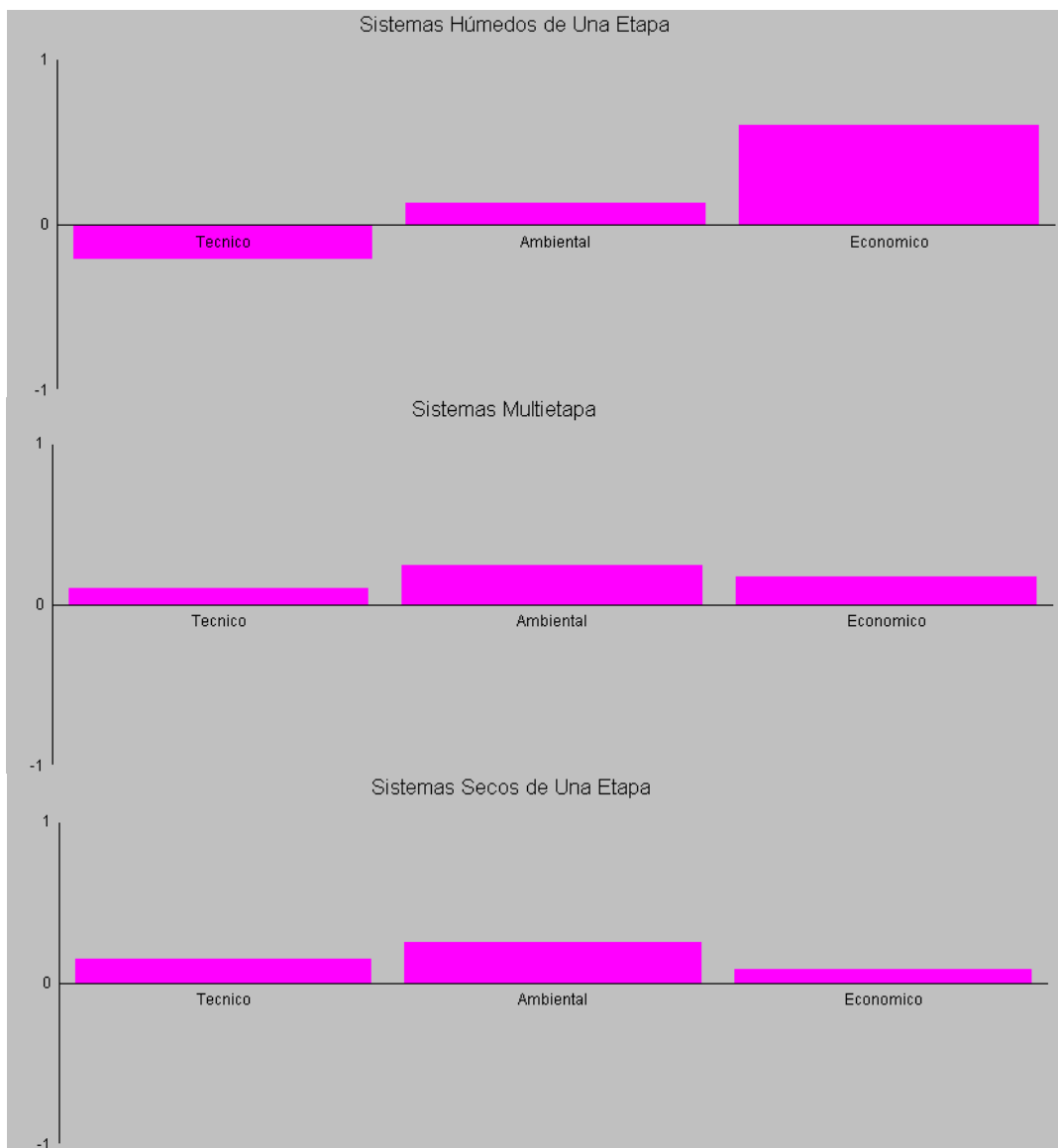
SM: Sistemas de etapas Múltiples

Comp.A: Compostaje Abierto

Comp.C: Compostaje Cerrado

El algoritmo *PROMETHEE I* plantea que los sistemas de digestión anaerobia son comparables como primera opción, ya que las fortalezas de un sistema en un criterio contrarrestan sus debilidades en otro. En el gráfico 2 se comparan los flujos de preferencia netos para los tres sistemas.

**Gráfico 2.** Comparación de flujos de preferencia netos de sistemas de digestión anaerobia.



En el gráfico 2 se aprecia que tanto los sistemas multietapa, como los sistemas secos de una etapa tienen un  $\Phi$  positivo en todos los aspectos evaluados (técnicos, económicos y ambientales). La diferencia entre estos sistemas radica en que los sistemas multietapa son preferidos en el aspecto económico y los sistemas secos de una etapa son preferidos en el aspecto técnico. Por el otro lado, los sistemas húmedos de una etapa, tienen un  $\Phi$  negativo en el aspecto técnico, pero este se contrarresta al tener un  $\Phi$  cercano a 1 en el aspecto económico.

Esta evaluación considera incomparables a los sistemas de digestión anaerobia, pues la información proporcionada por los flujos de preferencia no es consistente. Esto se debe a que en el criterio en los que una alternativa es fuerte, las otras son débiles, y viceversa.

Por esta razón, el resultado tomado en cuenta para seleccionar al sistema comercial preferido es el del algoritmo *PROMETHEE II*.

Con estos argumentos, de este capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Las tecnologías de conversión bioquímicas son las más aptas para el tratamiento de la FORSU, ya que como esta fracción tiene un alto contenido de humedad las tecnologías termoquímicas se vuelven muy costosas, y no toda la fracción orgánica puede ser utilizada en tratamientos fisicoquímicos.
- La digestión anaerobia es la mejor tecnología de conversión para la FORSU separada en sitio, pues genera productos de alto valor agregado, puede tratar a toda la fracción orgánica, y no implica costos tan altos como las tecnologías de conversión termoquímicas.
- Dentro de las opciones tecnológicas de digestión anaerobia, los sistemas secos de una etapa presentan el mejor desempeño global, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos, basándonos en la jerarquía mencionada durante este capítulo.

---

#### 4.4. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada

---

En el capítulo anterior, se concluyó que la mejor alternativa para tratar la FORSU del Distrito Federal es la digestión anaerobia, en un sistema seco de una etapa. A continuación se muestra la tabla 21, donde se resumen de las características que tendría esta planta.

**Tabla 21.** Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada

Alternativa tecnológica	Digestión anaerobia
Opción tecnológica	Sistema seco de una etapa
Tipo de residuos	FORSU separada en sitio
Capacidad (tpd)	500
Espacio requerido (m <sup>2</sup> )	53,288
Costo de instalación (dólares)	79,504,164
Costo de operación (dólares/año)	3,681,844
Energía eléctrica <sup>12</sup> (kWh/año)	48,887,749
Composta como producto secundario (tpa)	54,369
Ganancias por venta de productos (dólares/año)	13,217,799
Ahorro por desviación de RSU a relleno sanitario (dólares/año)	1,523,516
Valor Presente Neto (dólares)	-11,978,410
Tasa Interna de Retorno (%)	9.00

De la tabla 21 se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Tomando una TIR del 12%, que corresponde a la TIR mínima de acuerdo a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, para los proyectos de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal, el proyecto no implicaría un incremento en la riqueza, pues el valor presente neto es negativo.

---

<sup>12</sup> En el Anexo I se muestran los parámetros utilizados para calcular la energía eléctrica que se genera por medio de biogás.

- El proyecto puede aumentar su utilidad, ya que con este sistema, se está evitando la emisión de casi 29 mil toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, y con esto se podría entrar al mercado de bonos de carbono. Hoy en día no es tan factible, ya que en México todavía no se tiene mucha consciencia sobre la compra/venta de bonos de carbono, pero hay una tendencia marcada hacia la comercialización de dichos bonos.
- Hay que remarcar que el ahorro por desviación de residuos al relleno sanitario no se está tomando en consideración para la evaluación económica, ya que si se toma en cuenta, entonces la tasa interna de retorno del proyecto es 11.88%, haciendo que el valor presente del proyecto sea muy cercano a cero. Esto significa que la inversión no generaría aumento o disminución en el valor, y sería indiferente la inversión, económicamente hablando.
- Si se compara esta alternativa con un relleno sanitario, el área requerida para tratar 500 tpd con digestión anaerobia seca de una etapa es el 11% de la que se requeriría en el caso de un relleno sanitario.

---

## 5. Conclusiones

---

El manejo actual de los residuos orgánicos en el Distrito Federal es inadecuado. A continuación se mencionan algunos de los problemas:

- La población no está consciente de la necesidad de separar los residuos, por lo que el porcentaje de separación es bajo (9.5% de FORSU).
- Los sistemas de recolección no siempre cuentan con compartimentos de separación de residuos, por lo que se mezclan los residuos separados con el resto de los RSU.
- Las plantas de compostaje no cuentan con la capacidad necesaria para tratar la FORSU separada en sitio, por lo que el 77% de estos son mezclados nuevamente con los RSU. El 98.33% de la FORSU se dispone en un relleno sanitario, implicando un costo de \$38,320 /d.
- Las plantas de compostaje no operan de manera eficiente, por falta de recursos para mantenimiento y actualización de equipos. Esto trae como consecuencia la producción de composta de baja calidad (no apta para su comercialización), y la emisión de gases con alto potencial de calentamiento global, como el metano.
- Se emiten al día 8,369 t CO<sub>2</sub> eq, por la disposición de la FORSU en Bordo Poniente, esto equivale al 6.7% de emisión de GEI de la Zona Metropolitana del Valle de México (Murphy y McKeogh, Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste 2004) (Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal 2008).

Las tecnologías bioquímicas son las más idóneas para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos que se encuentran separados, pues esta fracción se constituye de residuos biodegradables, que pueden convertirse a productos de alto valor agregado sin necesidad de alcanzar temperaturas y presiones

extremas. Las tecnologías termoquímicas requieren mucha energía para secar esta fracción por su alto contenido de humedad, y las tecnologías fisicoquímicas no aplican para toda la fracción orgánica, por lo que no resultan tan eficientes para tratar esta fracción de los RSU.

Dentro de las tecnologías bioquímicas, el compostaje y la digestión anaerobia fueron las tecnologías más apropiadas para el tratamiento de la FORSU. La fermentación alcohólica aún no se considera como buena opción, ya que el alto contenido de celulosa en la FORSU conlleva a altos costos o baja conversión a azúcar; y esto tiene como consecuencia baja producción de etanol.

Dentro de las opciones tecnológicas de compostaje y de digestión anaerobia, el sistema seco de una etapa de digestión anaerobia presenta el mejor desempeño global, seguidos cercanamente por los sistemas multietapa. Los sistemas de compostaje resultaron inferiores en el desempeño en comparación con los sistemas de digestión anaerobia.

El algoritmo *PROMETHEE I* no puede marcar una diferencia entre las opciones tecnológicas de digestión anaerobia, por lo que, en caso de seguir con el proyecto, sería recomendable hacer un análisis más profundo tomando en consideración variantes comerciales de los sistemas.

Considerando los resultados arrojados por el algoritmo *PROMETHEE II*, se eligió a los sistemas de digestión anaerobia secos de una etapa como la mejor alternativa. Esto resulta en una planta de 5.3 hectáreas, que procesa 500 t/d de FORSU separada en sitio produciendo  $5.4 \times 10^4$  t de composta y  $4.9 \times 10^7$  kWh al año.

La propuesta representa una mejora sustancial al manejo actual de la FORSU separada en sitio, ya que, como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el 82.4% de la FORSU separada en sitio, se vuelve a mezclar con los RSU, y son

depositados en Bordo Poniente. Si se considerara a este proyecto, se ahorrarían \$1,523,516 USD al año en disposición de residuos, y se ganarían \$13,217,799 USD por venta de energía eléctrica.

Es evidente que el sistema de manejo actual de residuos sólidos en el Distrito Federal es inadecuado. Un sistema de manejo de residuos sólidos debe ser integral, contando con recuperación de materiales reciclables, y dando un tratamiento adecuado a las diferentes fracciones de los residuos. El sistema de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal debe tender hacia la generación cero, teniendo un centro integral de reciclado y energía donde ingresen residuos sólidos, y se genere energía y materiales útiles. Como parte de esta estrategia, es importante tener una parte para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, y la manera más fácil de comenzar es con los residuos que ya están separados.



---

## 6. Bibliografía consultada

---

1. Advanced Technology Applications Corp. «Swine Mortality Disposal Using an In-Vessel Composting System.» *Texas A&M University Commerce*. 2011. <http://www.tamu-commerce.edu/agscience/res-dlc/atacorp/ata-hog.html> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
2. Agrivert. «Case Study: In-Vessel composting.» *Agrivert*. 2005. <http://www.agrivert.co.uk/assets/casestudies/invessel.pdf> (último acceso: 8 de Abril de 2010).
3. Asamblea Legislativa del Distrito Federal II Legislatura. «Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.» *Movimiento Pro-Vecino*. 22 de Abril de 2003. [http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley\\_Residuos\\_Solidos\\_DF.pdf](http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley_Residuos_Solidos_DF.pdf) (último acceso: 6 de Noviembre de 2009).
4. Asha, Aalok, A.K. Tripathi, y P. Soni. «Vermicomposting: A Better Option for Organic Solid.» *J. Hum. Ecol.*, 2008: 59-64.
5. Aslam, Danielle. «The science behind In-Vessel composting.» *California Integrated Waste Management Board*. 2010. <http://www.calrecycle.ca.gov/LEA/Conference/07conf/Presentations/Day1/Compost101/Aslam.ppt> (último acceso: 8 de Abril de 2010).
6. Ayala Hernández, Cristal Berenice. «Análisis de la evolución de la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal: 1980-2008.» *División Técnica de Residuos Sólidos*. 2009. <http://www.dirsa.org/pgirsu/articulos/8.pdf> (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
7. Balat, M. «Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1.» *Energy Sources*, 2009: 620-635.
8. Bertolino, Ricardo, Elizabeth Fogwill, Martina Chidiak, Santiago Cinquangelis, y María Noelia Fergione. «Participación ciudadana y gestión integral de residuos.» *Experiencias urbanas de gestión integral de residuos en 10 municipios de argentina*. 20 de Marzo de 2009. [www.unicef.org/argentina/spanish/EcoclubesbajaWEB.pdf](http://www.unicef.org/argentina/spanish/EcoclubesbajaWEB.pdf) (último acceso: 9 de Abril de 2011).
9. Block, Dave, y Molly Farrell. «Variety is spice of on-sight composting.» *BioCycle* 39, n° 4 (1998).
10. Brans, Jean-Pierre, y Bertrand Mareschal. «PROMETHEE Methods.» En *Multiple Criteria Decision Analysis*, de Jose Figueira, Salvatore Greco y Matthias Ehrgott, 163-195. USA: Springer Science + Business Media Inc. , 2005.
11. Brentwood Recycling Systems. «Gicom in Vessel Composting.» *Brentwood Recycling Systems*. Junio de 1996. [http://www.brentwood.com.au/com\\_gicom.htm](http://www.brentwood.com.au/com_gicom.htm) (último acceso: 8 de Abril de 2010).
12. Brown, Sally, Chad Kruger, y Scott Subler. «Greenhouse Gas Balance for Composting Operations.» (*Journal of Environmental Quality*), n° 37 (2008).

13. Cabrera, Nayeli. *Opciones de tecnologías de conversión térmica para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. D.F.: Facultad de Química, UNAM, 2010.
14. Center for a Competitive Waste Industry. *Beyond Recycling, Composting food scraps and soiled paper*. U.S. Environmental Protection Agency, 2010.
15. Comisión Federal de Electricidad. «Conoce tu tarifa.» *Comisión Federal de Electricidad*. 2010. <http://www.cfe.gob.mx/casa/ConocerTarifa/Paginas/Conocetutarifa.aspx> (último acceso: 4 de Marzo de 2010).
16. Compost Canarias. «Historia del Compost.» *Compost Canarias*. 2011. <http://compostcanarias.com/HISTORIA.html> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
17. Cortinas de Nava, Dra. Cristina. «Regulación de la incineración de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos en México.» *Instituto Nacional de Ecología*. 2009. [http://siscop.ine.gob.mx/novedades/regulacion\\_incineracion\\_residuos\\_en\\_mexico.pdf](http://siscop.ine.gob.mx/novedades/regulacion_incineracion_residuos_en_mexico.pdf) (último acceso: 13 de Noviembre de 2009).
18. Corzo, Miguel Angel. *Introduccion a la ingeniería de proyectos*. Limusa, 1972.
19. Crop Energies. «Bioethanol production process.» *Crop Energies*. 2010. <http://www.cropenergies.com/en/Bioethanol/Produktionsverfahren/> (último acceso: 9 de Febrero de 2010).
20. Dogan, E., T. Dunaev, T.H. Erguder, y G.N. Demirer. «Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and alcohols.» *Chemosphere*, 2008: 797–803.
21. Ecopoda, S.L. «Estudio de maquinaria idónea para las labores de compostaje de alperujos.» *Junta de Andalucía*. Noviembre de 2005. [http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/www/portal/com/bin/portal/DGAEcológica/estudiototales/documento\\_completo.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/www/portal/com/bin/portal/DGAEcológica/estudiototales/documento_completo.pdf) (último acceso: 11 de Febrero de 2010).
22. Engineering News Record. «Construction Economics.» *Engineering News Record*, Junio 2004: p25-26.
23. Engineering News-Record. «Construction Economics.» (ENR: Engineering News-Record) 216, n° 5 (2008).
24. Environmental Protection Agency. «Organic Materials Management Strategies.» *Environmental Protection Agency*. Julio de 1999. <http://www.epa.gov/wastes/conservation/rrr/composting/pubs/omms.pdf> (último acceso: 22 de Marzo de 2010).
25. Envirotherm GmbH. «LFC Lecho Fluidizado Circulante.» *Envirotherm GmbH*. [http://envirotherm.de/content/e39/e137/e43/index\\_es.html](http://envirotherm.de/content/e39/e137/e43/index_es.html) (último acceso: 13 de Octubre de 2009).
26. Farrell, M., y D.L. Jones. «Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets.» *Bioresource Technology*, 2009: 4301–4310.
27. Flukong Enterprise Inc. «From Solid Waste to Compost.» *Flukong Enterprise Inc.* 2009. <http://www.flukong.ca/pdf/compost.pdf> (último acceso: 18 de Agosto de 2009).

28. Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. «Obtención de energía eléctrica mediante la gasificación de residuos sólidos urbanos para su implementación en el Distrito Federal.» *Proyecto No. DF-2008-C01-94261*. México, Distrito Federal, 2009.
29. García, A.J., M.B. Esteban, M.C. Márquez, y P. Ramo. «Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs.» *Waste Management*, 2005: 780-787.
30. Gasca Álvarez, Sergio. «¿Cuáles han sido las experiencias y retos del gobierno respecto al manejo de pilas?» *Foro Internacional de Pilas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 17 de Julio de 2007.  
<http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/fomento/Documents/Programa%20de%20Manejo%20Responsable%20de%20Pilas%20en%20el%20DF%20-%20Versi%C3%B3n%20Estenogr%C3%A1fica.pdf> (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
31. Gasification Technologies Council. «World Gasification Database.» *Gasification Technologies Council*. 2010. <http://www.gasification.org/database1/search.aspx?a=66&b=3> (último acceso: 05 de Marzo de 2010).
32. Geesing, Dieter, y John Paul. «Aerated Windrow Composting, (Un-) covered.» *Transform Compost Systems Ltd.*  
<http://www.transformcompost.com/tf%20web%20NEWSLETTER/Aerated%20Windrow%20Composting%20Un%20covered.pdf> (último acceso: 05 de Abril de 2010).
33. Grogan, Tim. «Construction Cost Index History (1918-2006).» *Engineering News-Record* 256, n° 11 (2006).
34. Hackett, Colin, y Robert B. Williams. *Evaluation of Conversion Technology*. Center for Environmental Research and Technology, Dept. of Biological and Agricultural Engineering; University of California, Integrated Waste Management Board, Sacramento, CA: Publications Clearinghouse, 2004.
35. Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal. «Recurso de Revisión Recurrente.» *Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal*. 15 de Mayo de 2007.  
[http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/RECUR07/RR219\\_07.pdf](http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/RECUR07/RR219_07.pdf) (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
36. International Energy Agency . «Operating Anaerobic Digestion Plants of Commercial Scale.» *IEA Bioenergy*. 2008. [http://www.iea-biogaz.net/anlagelisten/Plantlist\\_08.pdf](http://www.iea-biogaz.net/anlagelisten/Plantlist_08.pdf) (último acceso: 18 de Enero de 2010).
37. Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers. «Basic Incinerator.» *Japanese Advanced Environmental Equipment*. 2001.  
[http://www.gec.jp/JSIM\\_DATA/WASTE/WASTE\\_3/html/Doc\\_450.html](http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_450.html) (último acceso: 18 de Agosto de 2009).
38. Joshua Rapport, Ruihong Zhang, Bryan M. Jenkins, Robert B. Williams. *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. Reporte del contratado al California Integrated Waste Management Board, Department of Biological and Agricultural

- Engineering, University of California, California Integrated Waste Management Board, Sacramento, CA: Publications Clearinghouse, 2008.
39. Karagiannidis, A., y G. Perkoulidis. «A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion.» *Bioresource Technology*, 2009: 2355–2360.
  40. Kreith, Frank, y George Tchobanoglous. *Handbook of solid waste management*. McGraw-Hill Professional, 2002.
  41. López Jardinez, Judith, entrevista de Norma Angélica Delgadillo Hernández. *Fucionamiento actual y planes a futuro para la planta de composta de Bordo Poniente*. D.F., (05 de Octubre de 2010).
  42. Martin, Hugh. «Agricultural Composting Basics.» *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Ontario*. Marzo de 2005. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/05-023.htm> (último acceso: 11 de Febrero de 2010).
  43. Muñoz Meza, Ing. Juan Manuel. «La disposición de RSU en la Ciudad de México.» *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 15 de Octubre de 2008. [http://www.giresol.org/joom1/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=306&Itemid=105](http://www.giresol.org/joom1/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=306&Itemid=105) (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
  44. Murphy, J.D., E. McKeogh, y G. Kiely. «Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation.» *Applied Energy*, 2004: 407–427.
  45. Murphy, J.D., y E. McKeogh. «Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste.» *Renewable Energy*, 2004: 1043-1057.
  46. Pichtel, John. *Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial*. CRC Press, 2005.
  47. Princeton University Blog Service. «Conversion of Biomass to Bio-Oil.» *Biomass Blog*. [http://blogs.princeton.edu/chm333/f2006/biomass/bio\\_oil/02\\_chemistryprocessing\\_the\\_basics/02\\_processing/](http://blogs.princeton.edu/chm333/f2006/biomass/bio_oil/02_chemistryprocessing_the_basics/02_processing/) (último acceso: 18 de Agosto de 2009).
  48. ProMéxico. «Costos Industriales en México 2008.» *ProMéxico*. 2008. [http://www.promexico.gob.mx/work/sites/Promexico/resources/LocalContent/207/2/Costos\\_completo\\_2008.pdf](http://www.promexico.gob.mx/work/sites/Promexico/resources/LocalContent/207/2/Costos_completo_2008.pdf) (último acceso: 21 de Abril de 2010).
  49. Renewable Energy Association. «Benefits of AD.» *Renewable Energy Association*. 2007. <http://www.r-e-a.net/biofuels/biogas/anaerobic-digestion/benefits-of-ad> (último acceso: 25 de Agosto de 2009).
  50. RIS International. *Feasibility of generating green power through anaerobic digestion of garden refuse form the Sacramento area*. Sacramento: Advanced Renewable and Distributed Generation Program, 2005.
  51. Rodríguez Salinas, Marcos Arturo. «Manual de Compostaje Municipal.» *Instituto Nacional de Ecología*. 2006. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/499/experiencias.html> (último acceso: 19 de Abril de 2010).
  52. RWBeck. *Anaerobic Digestion Feasibility Study*. Iowa: Bluestem Solid Waste Agency, 2004.

53. Sabino, Irma, Porfirio Caballero, Martín Bremer, y Alberto Mendoza. «Evaluación técnica de la factibilidad de aprovechamiento energético de RSM en México.» *Instituto de Investigaciones Eléctricas*. 2004. <http://genc.ii.org.mx/genc/biomasa/segundo%20coloquio/Incineraci%C3%B3n%20y%20gasificaci%C3%B3n%20de%20basura/Irma%20Sabino.pdf> (último acceso: 10 de Julio de 2010).
54. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal. «Cómo y por qué separar la basura.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/02/03clave.pdf> (último acceso: 17 de Octubre de 2009).
55. —. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2008. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario-08/5-resultados.pdf> (último acceso: 14 de Enero de 2010).
56. —. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2006.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2006. [http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario\\_residuos\\_solidos.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario_residuos_solidos.pdf) (último acceso: 6 de Noviembre de 2009).
57. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. «[http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL\\_1994\\_DOF.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL_1994_DOF.pdf).» *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 22 de Junio de 1994. [http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL\\_1994\\_DOF.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL_1994_DOF.pdf) (último acceso: 18 de Enero de 2010).
58. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2007.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2007. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario/resultados.pdf> (último acceso: 26 de Julio de 2009).
59. —. «Programa de Capacitación para promotores de la separación de residuos sólidos en el Distrito Federal.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/02/04clave.pdf> (último acceso: 2 de Septiembre de 2009).
60. —. «Programa de gestión integral de los residuos sólidos para el Distrito Federal.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. 1 de octubre de 2004. [http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/programa\\_gestion\\_residuos\\_solidos\\_df\\_2004\\_2008.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/programa_gestion_residuos_solidos_df_2004_2008.pdf) (último acceso: 3 de Abril de 2011).
61. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. «Inventario de Emisiones, Gases de Efecto Invernadero.» *Secretaría del Medio Ambiente*. 2008. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=528> (último acceso: 31 de Julio de 2010).
62. Sherman, Rhonda. «Large-Scale organic materials composting.» *North Carolina Department of Environment and Natural Resources*. 30 de Agosto de 2006. <http://www.p2pays.org/ref/02/01372.pdf> (último acceso: 14 de Abril de 2010).
63. Spencer, Robert L. «What's new - in-vessel composting.» (BioCycle) 48, n° 5 (2007).

64. Sustainability in Industry, Energy and Transport European IPPC Bureau. «Additional Information submitted during the information exchange on Waste Treatments Industries.» *Joint Research Center*. Octubre de 2005. [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wt\\_AddInfo\\_1005.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wt_AddInfo_1005.pdf) (último acceso: 23 de Abril de 2010).
65. The National Biodiesel Board . «NBB Member Plants.» *The National Biodiesel Board* . 1 de Enero de 2011. <http://www.biodiesel.org/buyingbiodiesel/plants/showall.aspx> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
66. The Walt Disney Company . «Disneyland Resort Wins California's Top Environmental Leadership Award.» *The Walt Disney Company*. 2009. [http://corporate.disney.go.com/corporate/moreinfo/dlr\\_environmental\\_award.html](http://corporate.disney.go.com/corporate/moreinfo/dlr_environmental_award.html) (último acceso: 9 de Enero de 2010).
67. Verma, ShefaliI. «Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes.» Tesis para obtener un Master of Science Degree in Earth Resources Engineering, Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University, 2002.
68. Vidales Olivo, Amelia, Virginia Chávez Santillán, Erika Anahy García Rodríguez, y María Teresa Gómez García. «Alimentos balanceados para animales a partir de residuos orgánicos.» *Conciencia Tecnológica* 26 (2004).
69. Williams, Robert B. «Biofuels from Municipal Wastes.» *The California Biomass Collaborative*. 28 de Marzo de 2007. [http://biomass.ucdavis.edu/materials/reports%20and%20publications/2007/2007\\_Annual\\_Forum\\_Background\\_Paper.pdf](http://biomass.ucdavis.edu/materials/reports%20and%20publications/2007/2007_Annual_Forum_Background_Paper.pdf) (último acceso: 21 de Enero de 2010).
70. X-rates. «2008 - American Dollars to 1 Euro.» *X-rates*. 2010. <http://www.x-rates.com/d/USD/EUR/hist2008.html> (último acceso: 13 de Abril de 2010).
71. Yong, Xiao, y Zeng Guang-Ming. «Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation.» *Bioresource Technology*, 2009: 4807–4813.

---

## Anexo I. Generación de Energía con Biogás

---

Para calcular la energía que se genera por tonelada de FORSU, se utilizaron los mismos parámetros que RWBeck y Bluestem Solid Waste Agency, en su estudio de viabilidad de digestión anaerobia (RWBeck 2004).

- El biogás tiene un contenido energético de 6.2 kWh/m<sup>3</sup>
- La eficiencia de generación de energía eléctrica es de 35%

En seguida se presenta la tabla 22 con la generación de energía eléctrica por medio de Biogás.

**Tabla 22.** Generación de energía eléctrica con Biogás

Característica	Sistemas húmedos de una etapa	Sistemas secos de una etapa	Sistemas multietapa
Biogás (m <sup>3</sup> /t)	125	123	135
Energía (kWh/t)	776	765	838
Energía Eléctrica (kWh/t)	271	268	293

---

## Anexo II. Emisiones de gases de efecto invernadero

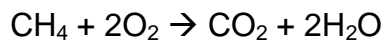
---

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de digestión anaerobia, se consideró lo siguiente:

- Se emite el 6.3% del biogás generado en los sistemas de digestión anaerobia (Murphy y McKeogh, Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste 2004) a
- La composición del biogás es 55.5% CH<sub>4</sub>, 44.5% CO<sub>2</sub>
- El biogás que no se emite a la atmósfera es quemado para producir energía (93.7%)
- El potencial de calentamiento global (PCG) del metano es 21 veces el del dióxido de carbono
- Por cada kWh de energía eléctrica que se produce, se ahorran 1.01 kg eq CO<sub>2</sub>(Brown, Kruger y Subler 2008).

Con estas consideraciones, se puede encontrar lo siguiente:

### Combustión de biogás



1 mol de metano  
carbono

Peso molecular: 16

1 kg CH<sub>4</sub>

1 mol de dióxido de

Peso molecular: 44

2.75 kg CO<sub>2</sub>

*Densidad del metano 0.714 kg/m<sup>3</sup>, el biogás contiene 55.5% de metano*

1m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>

0.714 kg CH<sub>4</sub>

0.555 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>

0.714 kg CH<sub>4</sub>

1.96 kg CO<sub>2</sub>

1.09 kg CO<sub>2</sub>



Densidad del dióxido de carbono 1.96 kg/m<sup>3</sup>, el biogás contiene 44.5% de dióxido de carbono

1m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub>	1.96 kg CO <sub>2</sub>
0.445 m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub>	0.87 kg CO <sub>2</sub>

Emisiones de biogás

55.5% CH <sub>4</sub>	0.396 kgCH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup>
PCG de CH <sub>4</sub> =21 PCG de CO <sub>2</sub>	8.32 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
44.5% CO <sub>2</sub>	0.87 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

Combustión de 0.937 m<sup>3</sup> de biogás: 1.84 kg CO<sub>2</sub>

Disipación de 0.063 m<sup>3</sup> de biogás: 0.58 kg CO<sub>2</sub>

**Emisiones por m<sup>3</sup> de biogás producido: 2.42 kg CO<sub>2</sub>**

A continuación se muestra en la tabla 23, los equivalentes de CO<sub>2</sub> para los sistemas de digestión anaerobia.

**Tabla 23.** Equivalencias de CO<sub>2</sub> para sistemas de Digestión Anaerobia

Característica	Sistemas húmedos de una etapa	Sistemas secos de una etapa	Sistemas multietapa
Biogás (m <sup>3</sup> /t)	125	123	135
Energía producida (kWh/t)	271	268	293
Gases de efecto invernadero (kg CO <sub>2</sub> /t)	28	28	30

Para el caso del compostaje, se consideró lo siguiente en la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero:

- 1.5% del nitrógeno inicial en la FORSU se convierte en N<sub>2</sub>O(Brown, Kruger y Subler 2008)

- 2.5% del carbono inicial en la FORSU se convierte en CH<sub>4</sub>(Brown, Kruger y Subler 2008)
- Los residuos sólidos del D.F contienen 23.6% de carbono y 0.82% de nitrógeno(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)
- El PCG del N<sub>2</sub>O es 320 veces el del CO<sub>2</sub>
- Por cada kWh de energía que se utiliza, se emiten 1.01 kg CO<sub>2</sub> equivalentes(Brown, Kruger y Subler 2008).
- La diferencia entre el compostaje abierto, y el cerrado, consiste en la energía que se utiliza. Para el compostaje abierto, se utilizan 3.75 kWh/t y para el cerrado 29.79 kWh/t.

La tabla 24 tiene los equivalentes de CO<sub>2</sub> para los sistemas de compostaje.

**Tabla 24.** Equivalencias de CO<sub>2</sub> para sistemas de Compostaje

Característica	Compostaje Abierto	Compostaje Cerrado
Energía Consumida (kWh/t)	24.38	29.79
CH <sub>4</sub> (kg/t)	7.88	7.88
NO <sub>2</sub> (kg/t)	0.40	0.40
Total GEI (kg CO <sub>2</sub> /t)	319	325

## **Anexo III. Consideraciones para calcular el costo de operación de plantas de digestión anaerobia**

Para calcular el costo de operación de plantas de digestión anaerobia, se utilizaron las consideraciones de RWBeck en su estudio de factibilidad de digestión anaerobia (RWBeck 2004). Estas son las siguientes:

- Se necesitan \$3/t para el procesamiento de biosólidos.
- Para la operación y mantenimiento de la planta de producción de energía eléctrica a partir de biogás, se necesitan ¢1.25/kWh.
- Para la operación y mantenimiento de la planta de digestión anaerobia, se necesitan 2.25% del costo de inversión.
- Se debe incluir \$3.56/t, para salarios del personal de la planta.

Cabe mencionar que todos los valores se actualizaron a dólares de enero de 2010 con el índice ENRCCI(Engineering News Record 2004). Se presenta en seguida el resumen de los cálculos realizados en la tabla 25.

**Tabla 25.** Resumen de los cálculos de costo de operación de plantas de digestión anaerobia

Característica	Sistemas húmedos de una etapa	Sistemas secos de una etapa	Sistemas multietapa
Energía (kWh/t)	546.25	538.97	589.95
Composta (kg/t)	300.00	276.67	280.00
Costo de Instalación (dólares 2010/tpd)	85102.63	213126.83	179181.82
Operación de planta de digestión anaerobia (\$/t)	5.25	13.14	11.05
Operación de planta de energía (\$/t)	6.83	6.74	7.37
Procesamiento de biosólidos (\$/t)	0.90	0.83	0.84
Pago a trabajadores (\$/t)	3.56	3.56	3.56
Total (\$ 2004/t)	17	24	23
Total (\$ 2010/t)	20	30	28

## Anexo IV. Cálculo del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno

Para calcular el valor presente neto y la tasa interna de retorno, se visualizaron los ingresos y egresos que presenta cada sistema comercial durante la vida de la planta. En seguida se ejemplifican en el diagrama 13 los ingresos y egresos considerados:

**Diagrama 16.** Ingresos y egresos de la planta de tratamiento

Ingresos	<input type="checkbox"/> Venta de productos	<input type="checkbox"/> Venta de productos	<input type="checkbox"/> Venta de productos	<input type="checkbox"/> Venta de productos	<input type="checkbox"/> Venta de productos
Año	1	2	3	...	20
Egresos	<input type="checkbox"/> Costo del terreno	<input type="checkbox"/> Costo de operación	<input type="checkbox"/> Costo de operación	<input type="checkbox"/> Costo de operación	<input type="checkbox"/> Costo de operación
	<input type="checkbox"/> Costo de instalación				
	<input type="checkbox"/> Costo de operación				

Los costos se calcularon para una planta que procesa 500 t/d de FORSU, y se consideraron los siguientes aspectos:

- Para la venta de productos, solamente se tomó en cuenta la energía eléctrica generada, ya que la composta no tiene un mercado asegurado en el Distrito Federal. Actualmente, la composta que se genera de residuos sólidos en el D.F. se regala. El precio de la energía eléctrica es de  $\phi 27/\text{kWh}$  (Comisión Federal de Electricidad 2010).
- El costo promedio del terreno en el Distrito Federal es de  $\$1.72 / \text{m}^2$  (ProMéxico 2008):

Con estos datos, se tienen los costos de operación presentados en la tabla 26.

**Tabla 26.** Cálculos de costo de operación para plantas de compostaje

	Sistemas húmedos de una etapa	Sistemas secos de una etapa	Sistemas multietapa	Compostaje Abierto	Compostaje Cerrado
Costo de operación (\$/t)	3,681,844	5,403,821	5,081,914	1,642,500	5,292,500
Costo de instalación (\$/tpd)	42,551,316	79,504,164	89,590,909	10,011,750	25,029,750
Costo de terreno (\$)	78,514	91,700	45,754	177,964	115,153
Ganancias (\$/t)	13,396,418	13,217,799	14,468,131	0	0

Posteriormente, se calculó el VPN y la TIR en Excel, con una tasa del 12%.