



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**COMPOSTAJE Y DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO
PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LA
FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Raúl Alberto Pérez Flores

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México



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 Celestino Montiel Maldonado
VOCAL	Profesora María Rafaela Gutiérrez Lara
SECRETARIO	Dra. María Neftalí Rojas Valencia
1° SUPLENTE	Dr. Martín Rivera Toledo
2° SUPLENTE	Profesora Guillermina Yazmin Arellano Salazar

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Instalaciones de la empresa Sustentabilidad en Energía y Medio Ambiente S.A. de C.V., Planta de Composta Bordo Poniente y Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

ASESOR DEL TEMA: Dra. María Neftalí Rojas Valencia _____

SUSTENTANTE: Raúl Alberto Pérez Flores _____

I.-RESUMEN

Actualmente en las megalópolis a nivel mundial la gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es un grave problema, debido principalmente a la inserción de desechos provenientes de materiales novedosos con gran volumen y difícil degradación, incremento de las poblaciones de manera exponencial, y falta de cultura ambiental.

En la Ciudad de México (CDMX) se generan 12,740 t/d de residuos; 44% son la Fracción Orgánica (FORSU) y 56% la Fracción Inorgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FIRSU). Con la actual gestión llevada a cabo y la cultura de separación implementada en la entidad solo es posible separar 10% de residuos inorgánicos con potencial de aprovechamiento directamente en las plantas de separación, sin tomar en cuenta los aprovechables separados antes de llegar a este tipo de instalaciones; en cuanto a los residuos orgánicos, actualmente opera la Planta de Composta Bordo Poniente, que procesa cerca de 2,500 t/d de biomasa mediante un proceso de estabilización aerobio conocido como composteo.

En el presente trabajo se realizó una comparación de los procesos de tratamiento biológico convencionales y existentes para residuos orgánicos, mediante el apoyo de datos oficiales publicados por las diferentes entidades gubernamentales y académicas de la CDMX. Como resultado de la comparación de los procesos biológicos, se generó una propuesta con la tecnología de digestión anaerobia, tomando en cuenta los beneficios sociales, ambientales y económicos.

I.-Abstract

The most important cities of the world are having a serious problem with Municipal Solid Waste (MSW) management, The actual system of MSW management, officially only can recover 10% of inorganic waste with high reuse potential in the waste selection plant, although the operative personnel of collecting trucks recover some products before arrive to the selection plant. the organic part was send to Bordo Poniente composting plant, this place processed 250 ton/day, the process used is aerobic composting for getting biomass stabilized; but the final product (compost) almost never get a good quality.

In this work were compared the principal biologic processes for treatment the part organic of MSW, supported with published data by the most important governmental and academics institutions, in Mexico City.

The result of comparison of biological processes, generated a proposal anaerobic digestion technology, regard to social, environmental and economic benefits.

II.-CONTENIDO

II.1.-Índice general

I.-RESUMEN	3
I.-Abstract.....	4
II.-CONTENIDO	5
II.1.-Índice general	5
II.2.-Índice de figuras	7
II.3.- Índice de tablas.....	9
III.-SIGLAS, ACRÓNIMOS Y UNIDADES.....	11
III.1.-Siglas y acrónimos.....	11
III.2.-Unidades.....	13
IV.- OBJETIVO GENERAL	14
IV.1- OBJETIVOS PARTICULARES	14
V.- JUSTIFICACIÓN.....	15
1.- MARCO TEÓRICO.....	16
1.1.- RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO	17
1.1.1.- Definiciones de: "Residuos Sólidos Urbanos".....	17
1.1.2.- Jerarquía de manejo de residuos.....	18
1.1.3.- Perspectiva: la situación actual en el territorio nacional	19
1.1.4.- Clasificación de los RSU	26
1.1.5.- Composición general de los residuos sólidos urbanos.....	27
1.1.6.- Propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos urbanos	31
1.2.-CARACTERÍSTICAS DEL DISTRITO FEDERAL (CDMX).....	37
1.2.1-Ubicación dentro de la República Mexicana y demografía.....	37
1.2.2.-Relieve del Distrito Federal (CDMX)	39
1.2.3.-Uso de suelo y vegetación.....	39
1.2.4.- Clima del Distrito Federal (CDMX)	41
1.3.- GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	43
1.3.1.-Proceso actual de recolección y traslado.....	44
1.3.2.-Tratamiento de los RSU en el Distrito Federal (CDMX)	50
1.3.3.-Tratamiento de inorgánicos reciclables y reutilizables.....	52
1.3.4.-Proceso actual para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal (CDMX)	58
1.3.5.-Inversiones y costos para el tratamiento de la fracción orgánica en el Distrito Federal (CDMX)	59
1.4.- MÉTODOS DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	60
1.4.1.-Proceso aerobio (Compostaje).....	61
1.4.1.1.- Proceso de compostaje	62
1.4.1.2.- Planta de Composta Bordo Poniente	68
1.4.1.2.1.- Emisiones biogénicas en la planta de composta Bordo Poniente.....	69

1.4.1.3.-Compostaje acelerado.....	70
1.4.2.- PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	71
1.4.2.1.-Procesos Anaerobios.....	73
1.4.2.2- Fases de la digestión anaerobia.....	75
1.4.2.3.-Consumo de Materiales y Energía en la operación de una planta de digestión Anaerobia	88
2.- METODOLOGÍA	89
2.1.-Estudio de efectividad biológica en composta proveniente de Bordo Poniente.....	89
2.1.1.-Metodología	90
2.1.2 - Selección de los cultivos para las pruebas:	94
2.2.-Diseño de propuesta para tratamiento a gran escala de FORSU provenientes del Distrito Federal	95
2.2.1.-Metodología de Cálculo. Dimensionamiento del digestor.....	96
3.-RESULTADOS.....	100
3.1.-Resultados composta	100
3.2.- Ingeniería básica de la propuesta para tratamiento a través de digestión Anaerobia de FORSU provenientes del Distrito Federal.....	118
3.2.1.-Alternativas y disponibilidad de componentes del sistema en el mercado/diseño propio.....	126
3.2.2.-Viabilidad técnica	127
3.2.3.-Presupuesto de inversiones del proyecto	128
3.2.4.- Beneficios económicos generados por la planta.....	129
3.2.5-Bonos de Carbono	135
3.2.6.-Impactos y beneficios	138
4.-DISCUSIÓN.....	140
5.-CONCLUSIONES	146
6.-PERSPECTIVAS y RECOMENDACIONES.....	148
7.- REFERENCIAS	150

II.2.-Índice de figuras

Figura 1.- Jerarquía de manejo de residuos.....	18
Figura 2.- Generación RSU por entidad federativa (t/d)	25
Figura 3.- Localización y porcentaje de superficie de la CDMX respecto al total de superficie de la República Mexicana	37
Figura 4.- Crecimiento poblacional en el Distrito Federal (CDMX) (1900 – 2010).....	37
Figura 5.- Mapa de la zona urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.	38
Figura 6.- Uso de suelo CDMX	40
Figura 7.- Clima de la CDMX	41
Figura 8.-Comparación entre Gestión y Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	43
Figura 9.- Composición Fracciones de RSU en la CDMX 2009	51
Figura 10.- Esquema del proceso de compostaje	61
Figura 11.- Tamaño de las pilas de la Planta Bordo Poniente.....	64
Figura 12.- Sistemas de compostaje industrial.....	71
Figura 13.-Esquema simplificado de proceso anaerobio.....	75
Figura 15.- Semillas de amaranto.....	100
Figura 16.- Semillas de girasol.....	101
Figura 17.- Semillas jitomate	101
Figura 18.- Semillas de sandía	102
Figura 19.- Semillas de amaranto.....	102
Figura 20.- Semillas de girasol.....	103
Figura 21.- Semillas de jitomate	103
Figura 22.- Semillas de sandía	104
Figura 23.-Plantas de amaranto tierra 100% - composta 0% después de 70 días.....	106
Figura 24.-Plantas de amaranto tierra 80% - composta 20% después de 70 días.....	106
Figura 25.-Plantas de amaranto tierra 70% - composta 30% después de 70 días.....	107
Figura 26.-Plantas de amaranto tierra 50% - composta 50% después de 70 días.....	107
Figura 27.-Plantas de girasol tierra 100% - composta 0% después de 70 días.....	109
Figura 28.-Plantas de girasol tierra 80% - composta 20% después de 70 días.....	109
Figura 29.-Plantas de girasol tierra 70% - composta 30% después de 70 días.....	110
Figura 30.-Plantas de girasol tierra 50% - composta 50% después de 70 días.....	110
Figura 31.-Plantas de jitomate tierra 100% - composta 0% después de 70 días.	112
Figura 32.-Plantas de jitomate tierra 80% - composta 20% después de 70 días.	112
Figura 33.-Plantas de jitomate tierra 70% - composta 30% después de 70 días.	113
Figura 34.-Plantas de jitomate tierra 50% - composta 50% después de 70 días.	113
Figura 35.-Plantas de sandía tierra 100% - composta 0% después de 70 días.	115
Figura 36.-Plantas de sandía tierra 80% - composta 20% después de 70 días.	116
Figura 37.-Plantas de sandía tierra 70% - composta 30% después de 70 días.	116

Figura 38.-Plantas de sandía tierra 50% - composta 50% después de 70 días.	117
Figura 39.-Diagrama de Bloques del proceso.....	124
Figura 40.-Diagrama de Flujo de Proceso.....	125
Figura 41.-Esquema simplificado de proceso anaerobio para FORSU	127
Figura 42.- Flujo de caja neto generado por el proyecto para el inversionista privado	132
Figura 43.- Periodo de recuperación simple de la inversión.....	133
Figura 44.- Comportamiento de semillas de amaranto.....	140
Figura 45.- Comportamiento de semillas de girasol.....	141
Figura 46.- Comportamiento de semillas de girasol.....	142
Figura 47.-Datos experimentales pruebas con jitomate.....	143
Figura 48.-Datos experimentales pruebas con sandía	144

II.3.- Índice de tablas

Tabla 1.- Generación de RSU por entidad federativa	23
Tabla 2.- Composición de RSU subproductos a nivel nacional	29
Tabla 3.- Densidad de los Residuos Sólidos Urbanos en distintas condiciones	31
Tabla 4.- Densidad y humedad de algunos residuos sólidos urbanos	32
Tabla 5.- Datos energéticos típicos para materiales encontrados en los residuos sólidos urbanos	35
Tabla 6.- Separación primaria avanzada de acuerdo a NOM-NADF-024-AMBT-2013	46
Tabla 7.- Residuos sólidos urbanos en plantas de selección.....	51
Tabla 8.- Composición física porcentual de los RSU en el Distrito Federal.....	53
Tabla 9.- Tipos de plástico, siglas y origen.	54
Tabla 10.- Productos recuperables y posibles usos.....	56
Tabla 11.- Comparación entre los tratamientos aerobios y anaerobios para FORSU.....	60
Tabla 12.- Relación C/N de los principales materiales utilizados para la composta	62
Tabla 13.- Factores de emisiones biogénicas a partir del tratamiento de FORSU mediante compostaje	70
Tabla 14.-Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo a diferentes criterios	75
Tabla 15.-Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo a diferentes criterios	79
Tabla 16.-Residuos orgánicos de diversos orígenes.	80
Tabla 17.-Clasificación de sustratos.....	81
Tabla 18.- Rangos de temperatura.....	82
Tabla 19.-Estudio a composta Bordo Poniente	89
Tabla 20.-Diseño Experimental Bordo Poniente.....	92
Tabla 21.-Matriz experimental.....	92
Tabla 22.- Germinación de Semillas	100
Tabla 23.- Composición de la mezcla tierra-composta.....	104
Tabla 24.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para amaranto.....	105
Tabla 25.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.	105
Tabla 26.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.	105
Tabla 27.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para girasol.....	108
Tabla 28.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.	108
Tabla 29.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.	108
Tabla 30.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para jitomate	111
Tabla 31.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.	111

Tabla 32.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.	111
Tabla 33.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para sandía	114
Tabla 34.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.	114
Tabla 35.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.	114
Tabla 36.- Contenido de sólidos y generación de biogás teórica.	119
Tabla 37.- Contenido de sólidos y generación de biogás teórica.	119
Tabla 38.- Memoria de cálculo generación de biogás.	120
<i>Tabla 38 (continuación).- Memoria de cálculo generación de biogás.</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 38 (continuación).- Memoria de cálculo generación de biogás.</i>	<i>122</i>
Tabla 39.- Alternativas y disponibilidad de componentes del sistema en el mercado/diseño propio	126
Tabla 40.- inversiones necesarias para el diseño y la construcción de la planta	128
Tabla 41.- Beneficios supuestos de la planta de tratamiento de digestión anaerobia de FORSU129	
Tabla. 42.- Estudio de mercado sobre los precios de venta de distintos mejoradores de suelos	131
Tabla 43.- Beneficios económicos	131
Tabla 44.- Bonos de Carbono	137

III.-SIGLAS, ACRÓNIMOS Y UNIDADES

III.1.-Siglas y acrónimos

BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
C/N	Relación de contenido carbono-nitrógeno
Ca	Calcio
CDMX	Ciudad de México
CDR	Combustible Derivado de Residuos
CER	Certificados de Reducción de Emisiones
CETES	Certificados de la Tesorería
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH ₄	Metano
CIEMAD	Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo
CO ₂	Dióxido de Carbono
CORENA	
Cr	Cromo
CSRT	Continuous stirred-tank reactor (Tanque agitado de proceso continuo)
Cu	Cobre
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FIRSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
FO	Fracción Orgánica
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GDF	Gobierno de la Ciudad de México o Gobierno del Distrito Federal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H ₂	Hidrógeno
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico
HDPE/PEAD	Polietileno de alta densidad
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
K	Potasio
LDPE/PEBD	Polietileno de baja densidad
LPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LRSDF	Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MORSU	Módulo de Residuos Sólidos Urbanos
MSW	Municipal Solid Waste
N	Nitrógeno
NH ₃	Amoniaco
Ni	Níquel
NO _x	Óxidos de nitrógeno

NTRS	Norma Técnica de Residuos Sólidos
P	Fósforo
Pb	Plomo
PEPGIR	
PET	Polietilen - tereftalato
pH	Potencial de hidrógeno (acidez)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de vinilo
RDF	Residue Derived Fuel (Combustible Derivado de Residuos)
REDOX	Reacciones de reducción-oxidación
RO	Residuos Orgánicos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAGARPA	
SEDESOL	
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMA	
SNIEG	Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica
SV	Sólidos Volátiles
TIIE	Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio
TIR	Tasa interna de retorno
TREMA	Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable
TRH	Tiempo de retención hidráulica
VCO	Velocidad de Carga Orgánica
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
VPN	Valor Presente Neto
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Zn	Zinc

III.2.-Unidades

%	Porcentaje
cm	Centímetros
d	Día
g	Gramos
Ha	Hectáreas
kcal	Kilocalorías
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
kWh	Kilowatts-hora
m ³	Metros cúbicos
mhos	mhos u ohms
mm	Milímetros
mV	Milivolts
MW	Megawatts
Nm ³	Metros cúbicos normalizados a condiciones de presión y temperatura estándar.
°C	Grados centígrados
t	Toneladas
t CO _{2e}	Toneladas de dióxido de carbono equivalente

IV.- OBJETIVO GENERAL

Comparar el proceso de tratamiento de la fracción orgánica usado actualmente en Bordo Poniente tomando como base cifras oficiales y la tecnología de digestión anaerobia con una proyección teórica, evaluando ambas para generar de manera escrita un antecedente que funcione como base de selección tecnológica en cuanto al tema de gestión de residuos orgánicos de manera local, regional o nacional.

IV.1- OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la calidad del sustrato obtenido en la Planta de Composta Bordo Poniente por medio de pruebas de efectividad biológica.
- Generar un diseño y la ingeniería básica necesaria para un tratamiento mediante digestión anaerobia.
- Evaluar la mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debidas a la tecnología de digestión anaerobia y sus beneficios comparada contra el proceso de composteo actual.
- Generación de la viabilidad económica del proceso de digestión anaerobia.
- Evaluación de las tecnologías de digestión anaerobia y composteo.
- Selección de la mejor tecnología debido a su rentabilidad.

V.- JUSTIFICACIÓN

Debido al cierre del relleno sanitario Bordo Poniente el pasado 19 de diciembre de 2011, el manejo actual de los RSU en la capital del país se volvió insostenible, debido principalmente a la falta de espacio en este territorio, y al aumento de la población debido a que la Ciudad de México es una de las principales fuentes de empleo del país. En los años 70's una parte del relleno de Bordo Poniente se destinó como proyecto de composta, y después del cierre de éste, el proceso de composta paso a primer término e incremento su actividad debido a la problemática de los residuos.

Bordo Poniente inicio un proceso de modernización tecnológica y de cultura a nivel población, logrando separar la FORSU proveniente principalmente de casas habitación, comercios y algunos otros, llegando a la planta de composta gran parte de esta biomasa para su transformación en composta.

La tecnología aerobia de compostaje y la tecnología de digestión anaerobia son las únicas tecnologías aceptadas a nivel mundial como sistemas sustentables de tratamiento de desechos orgánicos lo que implica que también funcionan como procesos de mitigación de gases de efecto invernadero, por ello su importancia.

Es importante tomar en cuenta que para la selección del tratamiento de los residuos se necesita de espacio, inversión y generación de nuevos mercados y empleos, cosas que mediante un crecimiento controlado e informado se toman en cuenta durante el desarrollo de las ciudades.

La tecnología de digestión anaerobia enfocada al tratamiento de residuos orgánicos provenientes de ciudades, poblaciones o estados ha tenido mucho éxito y auge en otros países de todo el mundo debido a los beneficios, aunque actualmente no se aplica en la República Mexicana debido a falta de información, interés o planeación y por la generación de soluciones locales que terminan como pasivos ambientales, como es el caso de rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto.

1.- MARCO TEÓRICO

El aumento en el consumo de bienes materiales, causado por el incremento de la población mundial u otras exigencias en la calidad de vida, ha hecho crecer exponencialmente la producción de diferentes tipos de residuos.

Para el caso de los residuos orgánicos, el compostaje utilizado actualmente para el tratamiento final de esta fracción, se encuadra como uno de los sistemas sustentables de tratamiento aplicados actualmente la CDMX, aunque esto no implica que actualmente sea sostenible ambiental y económicamente.

Los sistemas de tratamiento de residuos son esenciales en el control de la contaminación ambiental, y cada vez se hace más necesario que sean técnicas cuya optimización sea lo más similar posible a los procesos que ocurren cotidianamente en la naturaleza.

Los sistemas de tratamiento de FORSU tienen dos modalidades. Una, el proceso de compostaje aerobio, y la segunda, la digestión anaerobia, que se realiza en digestores; ambos procesos se basan en la digestión de la materia orgánica biodegradable.

1.1.- RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

1.1.1.- Definiciones de: “Residuos Sólidos Urbanos”

1. En la actualidad, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada en el año 2003, define en el artículo 5 fracción XXXIII a los RSU como: “Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole.”
2. La Norma Técnica de Residuos Sólidos-1 (NTRS-1), plantea en su apartado 2.40 el siguiente concepto: Residuo Sólido Municipal: “ aquellos que se generan en casa habitación, parques, jardines, vía pública, oficinas, sitios de reunión, mercados, comercios, bienes muebles, demoliciones, construcciones, instituciones, establecimientos de servicio en general y todos aquellos generados en actividades municipales que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación”.
3. Los desechos sólidos también se pueden definir como: “el conjunto de elementos heterogéneos resultante de desechos o desperdicios del hogar o de la comunidad en general”. Ya antiguamente el Gobierno de la Ciudad de México (GDF) definía a los desechos sólidos provenientes de la sociedad de la siguiente manera: “son los residuos no provenientes de la industria, resultante de las actividades de las personas o municipios”.

4. El Diccionario de la Real Academia Española define a las basuras como: "parte o proporción que queda de un todo; lo que resulta de la descomposición o destrucción de una cosa; materia que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación".

5. Por su parte la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), las define como "aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo, que no han alcanzado un valor económico en el contexto en el que son producidas".

1.1.2.- Jerarquía de manejo de residuos

La jerarquía de manejo de residuos establece un orden de preferencia en las etapas de gestión de residuos como se muestra en la Figura 1; inicia en la prevención de la generación de residuos, seguida por el reúso, reciclaje, recuperación y disposición en relleno sanitario como última opción.



Figura 1.- Jerarquía de manejo de residuos.
Fuente: reciclatumbes.blogspot.com

La prioridad establecida en el manejo de residuos está en función únicamente de criterios ambientales y se considera que las acciones ubicadas en la parte baja de la pirámide invertida, representan los mayores impactos ambientales.

La jerarquía de manejo de residuos no exige un orden riguroso, antes bien es flexible y debe tender a ajustarse a las circunstancias de cada región.

Con respecto a ésta jerarquía de manejo de residuos, aún falta mucho por mejorar en el país, ya que al comprar un producto, éste tiene un empaque impreso, un empaque plástico, varios sellos de seguridad-calidad y algún otro elemento innecesario que terminan en los contenedores de residuos.

1.1.3.- Perspectiva: la situación actual en el territorio nacional

México tiene una superficie de 1,958,000 km², ocupando el décimo cuarto lugar mundial respecto al tamaño de los países. Comparte la frontera norte con los Estados Unidos de América con 3,100 km de límites y al sudeste con Guatemala y Belice con una frontera de 940 km y 250 km respectivamente. El país tiene los siguientes litorales: al oeste una línea costera de 7,400 km hacia el Océano Pacífico y 2,800 km de costa al este hacia el Golfo de México y el Mar Caribe.

Con una población creciente dentro del país, cada una de las actividades humanas demandan la producción y consumo de bienes y servicios a diario, los cuales requieren el uso de recursos naturales que impactan el medio ambiente; la evolución y desarrollo del país ha tenido repercusiones que han modificado de manera significativa el volumen y características de los RSU generados, en la medida que ha favorecido el ingreso de productos de consumo sin una adecuada planeación, los cuales cuentan con envases y embalajes elaborados con materiales novedosos, no necesariamente biodegradables, y que ejercen presiones considerables sobre los servicios de limpia y que plantean problemas para una disposición final ambientalmente adecuada.

La gestión de los residuos cobra una gran relevancia ambiental, en virtud del impacto que ello tiene sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos, con afectaciones a la flora, la fauna y la vida urbana, además de ser una fuente

importante de generación de gas metano que influye en el calentamiento del planeta por ser un gas de efecto invernadero (GEI).

Gran parte de los desechos tienen un alto potencial de reúso o reciclaje que a la fecha no ha sido aprovechado. Actualmente los restos son enviados a sitios de disposición final autorizados, los cuales no cumplen con la normatividad mínima necesaria y se sobresaturan rápidamente por la mala planeación durante su construcción.

Entre las opciones para el manejo integral de los residuos se encuentran el reciclaje y el tratamiento. Por un lado, el reciclaje permite restituir el valor económico de los residuos mediante su transformación, siempre y cuando la restitución favorezca un ahorro de energía y de materias primas, evitando por ende su disposición final; en la actualidad existen mercados para determinados productos reciclados y se ha desarrollado infraestructura asociada a ellos, la cual requiere personal, inversión y un flujo comercial. Por otro lado, el tratamiento de residuos es fundamental para reducir el impacto y los riesgos ambientales que se generan o surgen al manejarlos o disponerlos finalmente; actualmente los inorgánicos no aprovechables se compactan disminuyendo su volumen empero no su toxicidad y en cuanto a los residuos orgánicos, no se cuenta con un tratamiento que explote su potencial energético.

En México, el sector informal está presente en las diversas etapas del manejo de los RSU, de hecho, es un actor principal en el sistema de reciclaje, e incluso en algunos municipios, asume tareas que son competencia de las autoridades municipales. En el pasado hubo tentativas de incorporar a los pepenadores a las estructuras formales, sin embargo, no ha tenido éxito debido a que generalmente se ofrecen trabajos por un sueldo mínimo, mientras que el ingreso por la separación informal es de dos a tres salarios mínimos.

El personal informal no se limita al reciclaje, también está involucrado en la recolección, siendo muchas veces usado por las autoridades municipales como sustituto parcial del sector formal. En la mayoría de los municipios mexicanos no se cobra por el servicio de recolección a través de la administración municipal, sin embargo, gran parte de la ciudadanía paga propinas o gratificaciones que, en algunos casos, sobrepasan la cantidad que costaría un servicio formal por parte

del municipio. Mientras la administración pública tiene que pagar el sistema (sueldos de los trabajadores y la infraestructura, como ejemplo los camiones y estaciones de transferencia) a través de los impuestos y su presupuesto, los ingresos directos los recibe el personal (formal e informal) que efectúa la recolección.

Los municipios pueden hacer contratos con personas del sector privado (formal o informal) que se encargan de la recolección, traslados, tratamiento y disposición final, cuyas ganancias son únicamente las propinas y la venta de material reciclable encontrado en los RSU. La actividad de la pepena, es importante para la sociedad, ya que evita que toneladas de RSU se depositen en los basureros, y suministra casi en su totalidad las materias primas que son recicladas en las industrias de papel, plástico, aluminio, fierro y vidrio; sin embargo, estos trabajadores laboran en condiciones que ponen en riesgo su salud. Cualquier intento factible de modificación y mejora del sistema actual de manejo de RSU implica la necesaria formalización sistemática de los aspectos "informales", "subterráneos", "alternos", o simplemente costumbristas que se han generado con el tiempo. Esto implica un cuidadoso análisis de las relaciones sociales, económicas y políticas que existen en cada uno de los grupos que participan en el proceso de manejo de los residuos.

Según datos reportados por la SEDESOL para el 2004, la generación nacional de RSU fue de 94,800 toneladas diarias, equivalentes a 34.6 millones de toneladas anuales. La generación y composición ha variado significativamente durante las últimas décadas, derivado del propio desarrollo, así como del incremento poblacional y los cambios en los patrones de urbanización, en este sentido se ha observado que la generación per cápita creció de 300 g/d en 1950 a 900 g/d en 2004.

En cuanto a la composición de los residuos en el año 2004, en el país el 53% de los RSU eran de tipo orgánico, en tanto que el 28% eran potencialmente reciclables como el papel y cartón (14%), vidrio (6%), plásticos (4%), hojalata (3%) y textiles (1%), mientras que el 19% restante correspondía a la madera, cuero, hule, trapo y fibras diversas (SEDESOL, 2005).

Cabe mencionar que debido a la escasa información que se tiene de la generación y la clasificación de los RSU, es necesario implementar metodologías, clasificación de residuos y subproductos, composición, generación y proyecciones que permitan homologar y comparar las diferentes entidades y/o municipios.

Con respecto a la recolección, tratamiento y disposición final, la SEDESOL, estimó que en el 2004, se recolectaron hasta un 87% de las 94,800 t/d generada en todo el país, logrando una cobertura de recolección del 95% en las grandes zonas metropolitanas y entre el 75% y el 85% en ciudades medianas, mientras que en pequeñas áreas urbanas se alcanzó una cobertura de recolección ubicada entre el 60% y el 80%. Del total de los residuos generados en México, solamente un 64% se depositó en 88 rellenos sanitarios y 21 sitios controlados. Por lo que se estima que 25,000 t/día, se depositaron en tiraderos a cielo abierto, barrancas, o bien en cualquier otro sitio sin control (SEDESOL, 2005).

De acuerdo con el estudio de la SEDESOL, 2005, se estima que en el país los materiales recuperados para su venta (principalmente: cartón, papel, aluminio, vidrio, PET), representan del 8% al 12% del total generado. No obstante, gran parte de éstos se obtienen mediante el empleo informal, es decir la pre-pepena (en la recolección) y pepena (en el sitio de disposición final).

De acuerdo al Diagnostico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012 (publicado en 2013 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC y la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT y con datos del año 2010) la generación nacional fue de 102,895.00 toneladas por día, equivalentes a 37.6 millones de toneladas anuales en el país como se muestra en la Tabla 1, aumentado un 8.7% la generación nacional en 6 años, teniendo una recolección de 86,356.92 toneladas diarias (83.93% de la generación), disminuyendo el porcentaje de recolección en un 3%, y con una disposición final de 60.54% dispuesta en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 15.93% en tiraderos a cielo abierto y el 2.07% restante se desconoce dónde se deposita.

Tabla 1.- Generación de RSU por entidad federativa

Entidad	Generación por población (t/d)
Estado de México	14,970.34
Distrito Federal	9,452.03
Jalisco	6,902.70
Veracruz	6,316.85
Guanajuato	5,406.63
Puebla	4,799.56
Nuevo León	4,687.85
Chiapas	3,930.22
Michoacán	3,622.17
Baja california	3,344.58
Tamaulipas	3,271.64
Chihuahua	3,264.10
Guerrero	2,850.11
Sinaloa	2,728.35
Coahuila	2,692.03
Sonora	2,565.46
Oaxaca	2,531.94
Tabasco	2,235.48
San Luis Potosí	2,201.64
Hidalgo	2,058.90
Querétaro	1,771.23
Morelos	1,551.59
Durango	1,477.96
Quintana Roo	1,321.53
Zacatecas	1,189.08
Aguascalientes	1,116.25
Nayarit	925.99
Tlaxcala	780.95
Campeche	758.05
Yucatán	887.14
Colima	645.68
Baja California Sur	636.94
<i>Nacional</i>	102,894.97

Fuente: Elaboración propia con datos de PEPGIR (2012)

Al analizar la generación a nivel de entidad federativa el Estado de México, el Distrito Federal y Jalisco generan el 33% de los RSU del país, mientras que los estados de Campeche, Colima y Nayarit presentan los valores más bajos y generan el 2% del total; mientras que en 26 entidades federativas de 32 (82%), presentan valores de generación de residuos por debajo de 4,000 toneladas al día, la Figura 2 muestra la generación por estado.

La cobertura de recolección ha avanzado, teniendo 100% en los estados de Colima, Aguascalientes, Chihuahua, Distrito Federal, Nayarit y Quintana Roo, aunado a la recolección selectiva (9.11% generación nacional) que se está impulsando actualmente en varios estados del país.

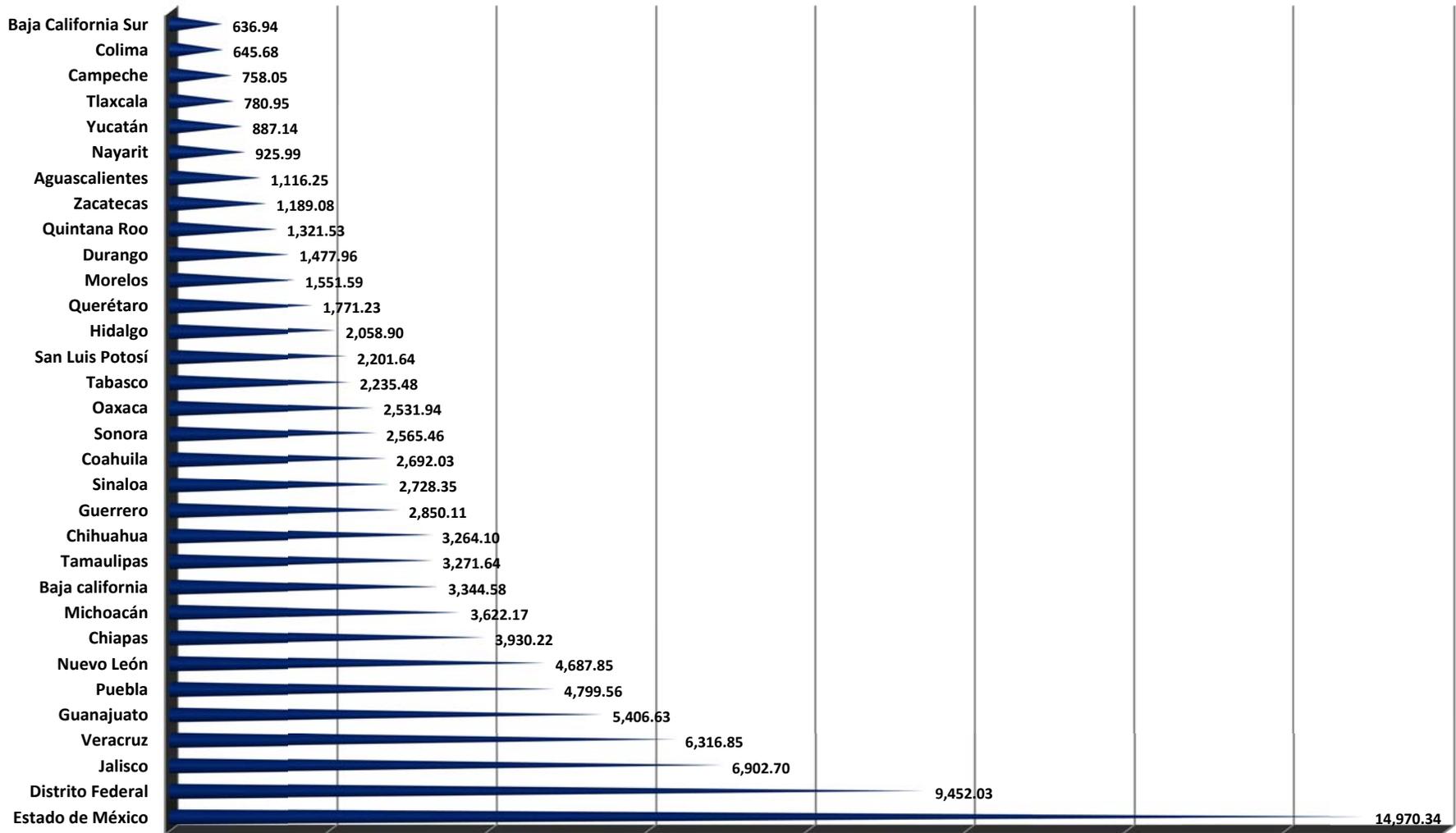


Figura 2.- Generación RSU por entidad federativa (t/d)

Fuente: Basada en datos de PEPGIR, 2012.

1.1.4.- Clasificación de los RSU

Entre los residuos sólidos urbanos se pueden desarrollar un número variable de clasificaciones, pero el más típico y representativo es el siguiente:

- a) **Materia orgánica.-** Es todo aquello que se puede descomponer o fermentar por bacterias u organismos vivos, como son: restos de comida, vegetales, frutas, hojas y ramas que resultan de limpiar las macetas o el jardín, cascaras de huevo, moluscos, restos de infusiones, por mencionar algunos. Es regularmente llamada fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)
- b) **Residuos recuperables o reciclables.-** Son todos aquellos que una vez seleccionados pueden venderse a diferentes industrias, las cuales mediante un tratamiento los utilizan como materia prima, reintegrándolos posteriormente al ciclo de consumo. Como ejemplos de estos tenemos: huesos, trapos, cartón, papel, metal, vidrio, plásticos, hule, etc.
- c) **No recuperables inertes.-** Son aquellos como tierra, piedras que solo pueden utilizarse como material de relleno.
- d) **Residuos provenientes de poda, mantenimiento a parques y de barrido en la calle.-** Está constituida por hojarasca, ramas, tierra, papeles, colillas de cigarros, arena, animales muertos, etc.
- e) **Cenizas.-** El término de "cenizas" se refiere a los residuos provenientes de la combustión del carbón; madera y otros materiales utilizados en el hogar o industrias.
- f) **Metales.-** Son todos los residuos provenientes de operaciones donde se emplearon metales o aquellos que dentro de su composición contengan algún tipo de metales, tales como: acero, hierro, bronce, cobre, estaño, entre otros; además de los metales peligrosos como el plomo, mercurio, litio, cadmio, etc., que requieren de un manejo especial así como una disposición en sitios controlados especiales.
- g) **Papel.-** El papel es una estructura obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible.

Es el elemento de mayor generación y también el más susceptible de ser reciclado. Dentro de este punto se consideran: hojas de papel de uso diario, papel de envoltura y embalaje, cartón, etc.

- h) **Plástico.**- Son sustancias que contienen como ingrediente esencial una sustancia orgánica de masa molecular llamada polímero. Entre los principales ejemplos de residuos plásticos se encuentran: botellas de agua y refresco, envolturas, bolsas, tuberías, artefactos domésticos, entre muchos más.
- i) **Vidrio.**- El vidrio es un material duro, frágil y transparente que ordinariamente se obtiene por fusión a unos 1,500° C de arena de sílice, carbonato sódico y caliza. Algunos residuos de vidrio son: botellas, envases, vasos, cristales de ventanas, etc.
- j) **Otros.**- Todos aquellos residuos que por su composición, no pueden ser clasificados en las otras categorías, y que generalmente se originan en sistemas productivos peligrosos, especiales o médicos.

1.1.5.- Composición general de los residuos sólidos urbanos

La composición de los RSU se modifica por diversos factores, a continuación de describen los principales:

I. Modo y nivel de vida de la población

El consumo de productos alimenticios ya preparados hace que aumente el contenido de envases y embalajes, pero se produce una disminución de restos vegetales, carnes y grasas.

II. Actividad de la población y características, ya sean zonas rurales o núcleos urbanos, áreas residenciales o zonas de servicios.

- En áreas rurales se observa un predominio de productos fermentables.
- En núcleos urbanos aumenta sensiblemente la cantidad de residuos de envases y embalajes (vidrio, plásticos, papel/cartón), aunque sigue predominando la materia orgánica (en menor proporción que en el caso de núcleos rurales).

- En zonas de servicios se observa un claro predominio de los envases y embalajes frente a cualquier otro tipo de residuo.
- En zonas industriales predominan los residuos industriales (a veces residuos peligrosos) y residuos de envases y embalajes.

III. Climatología general de la zona y estacionalidad

Los residuos recogidos en verano presentan un mayor contenido de restos de frutas y verduras, mientras que las escorias y cenizas procedentes de las calefacciones domésticas aumentan en invierno. El contenido en humedad es mayor en las estaciones con alta pluviosidad. Es importante señalar que se ha encontrado que en zonas urbanas se está observando una cierta estandarización de los productos de consumo, tendiendo a reducir la influencia estacional y las variaciones por localización geográfica.

IV. Vida útil del producto

Este factor cada vez es más importante en la generación de RSU ya que la rapidez con que los productos pasan a ser inútiles, pasados de moda, inservibles u obsoletos en muy poco tiempo (4-8 meses).

Por tal razón la composición de los RSU, es un parámetro de gran importancia para proponer su manejo enfocado a la valorización y con ello dimensionar las plantas de tratamiento. En la Tabla 2 se describe la composición promedio a nivel nacional.

Tabla 2.- Composición de RSU subproductos a nivel nacional

Categoría	Subproductos	Porcentaje
Susceptibles de aprovechamiento 39.57%	Cartón	6.54
	Papel	6.20
	Material Ferroso	2.09
	Material no Ferroso	0.60
	Plástico rígido y de película	7.22
	Envase de cartón encerado	1.50
	Fibras sintéticas	0.90
	Poliestireno expandido	1.65
	Hule	1.21
	Lata	2.28
	Vidrio de color	2.55
	Vidrio transparente	4.03
	Poliuretano	2.80
Orgánicos 37.97 %	Cuero	0.51
	Fibra dura vegetal	0.67
	Residuos alimenticios	25.57
	Hueso	0.59
	Residuos de jardinería	9.38
	Madera	1.25
Otros 22.46 %	Pañal desechable	6.52
	Algodón	0.70
	Trapo	3.57
	Loza y cerámica	0.55
	Material de Construcción	1.46
	Varios	5.90
	Residuo fino	3.76
Total		100.00

Fuente: INEGI, MORSU (2010)

A nivel nacional cerca del 40% son productos susceptibles de aprovechamiento, pero algunos de ellos necesitan un proceso de separación y/o limpieza mayor debido a la mala cultura de separación o recolección mixta que representa el 74.82% de la generación nacional, así mismo al 95% de los orgánicos se les podría tratar por medio de sistemas aerobios o anaerobios que pudieran producir productos integrables a las necesidades de consumo actuales (composta, biogás, agua, electricidad).

Con respecto a la aplicación e integración de sistemas de tratamiento de RSU, autoridades municipales, estatales y nacionales han recibido propuestas de nuevas tecnologías (incineración, plasma, pirólisis, etc.) que aún no han sido implantadas en el país por diversas razones políticas, sociales, legales, tecnológicas, así como la falta de garantía en cuestión de equipo, mantenimiento y uso de los procesos; existen sin embargo, experiencias en materia de

producción de composta y de aprovechamiento de subproductos, esta última utilizando bandas transportadoras y separación manual de materiales.

En el ámbito de la infraestructura para el tratamiento y disposición final, se requiere desarrollar un programa real de fomento al crecimiento y operación de infraestructura, así como involucrar realmente a los gobiernos locales y estatales para que coadyuven a lograr dicho objetivo, ya que aunque se han generado políticas de manejo y disposición final de residuos, aún no se aplican de manera integral.

1.1.6.- Propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos urbanos

Las propiedades intrínsecas de los RSU se deben de tomar en cuenta para implementar sistemas de gestión adecuados para el tratamiento de residuos, ya que todos los procesos antes de llegar a un lugar de separación o disposición final afectan a la forma y composición.

Propiedades físicas

- Densidad de los RSU

Se define como el peso de un material por unidad de volumen (de acuerdo al Sistema Internacional de unidades kg/m^3), esta propiedad dependerá de su grado de compactación, ya que en las diferentes etapas se obtienen diferentes medidas, desechos contenidos dentro de una bolsa, en un contenedor, en un camión de recolección, a la entrada o salida del proceso de selección, después del proceso de selección y en el lugar de disposición final. El conocimiento del peso específico es importante para poder conocer la masa y el volumen de los residuos para optar por la mejor opción para la gestión de los mismos. En la Tabla 3 se muestra la densidad de algunos residuos en diferentes etapas del proceso de gestión.

Tabla 3.- Densidad de los Residuos Sólidos Urbanos en distintas condiciones

LOCALIZACIÓN DE LOS RESIDUOS	DENSIDAD (kg/m^3)
En cubos o contenedores	150 – 250
En camión compactador	500 – 650
En fosa de almacenamiento tras su descarga del camión	350 – 600
En vertedero con tratamiento de media densidad	650 – 800
En vertedero con tratamiento de alta densidad	900 – 1,000

Fuente: Alonso, 2003

La densidad de los RSU varía notablemente por características de localización geográfica, composición, estación del año, clima, componentes y el tiempo de almacenamiento; para optimizar el proceso de recolección, traslado y disposición final se debe de realizar un estudio enfocado al área deseada, obteniendo un valor aplicable a la zona de estudio. La densidad de los RSU, entregada por los vehículos que tienen cámara de compactación, se ha comprobado que varían desde 178 kg/m^3 hasta 415 kg/m^3 , con un valor típico de 300 kg/m^3 .

- Humedad

Es el contenido de agua que tienen los RSU, esta propiedad depende de varios factores como la composición de los residuos, la estación del año, las condiciones ambientales de humedad y las condiciones climáticas. En la Tabla 4 se muestran valores típicos de densidad y humedad de diferentes tipos de RSU.

Tabla 4.- Densidad y humedad de algunos residuos sólidos urbanos

TIPO DE RESIDUO	Peso específico (kg/m ³)		Humedad (fracción masa)	
	Rango	Típico	Rango	Típico
DOMÉSTICOS (NO COMPACTADOS)				
Residuos de comida mezclados	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Cartón	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Textiles	42-101	65	6-15	10
Gomas	101-202	131	1-4	2
Cuero	101-261	160	8-12	10
Residuos de Jardín	59-225	101	30-80	60
Madera	131-320	237	15-40	20
Vidrio	160-481	196	1-4	2
Latas de hojalata	50-160	89	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	131-1.151	320	2-4	3
Suciedad cenizas, etc.	320-1.000	481	6-12	8
Cenizas	650-831	745	6-12	6
Basuras	89-181	131	5-20	15
RESIDUOS DE JARDÍN DOMÉSTICOS				
Hojas sueltas y secas	30-148	59	20-40	30
Hierba verde suelta y humedad	208-297	237	40-80	60
Hierba verde humedad y compactada	593-831	593	50-90	80
Residuos de jardín triturados	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín compostados	267-386	326	40-60	50
URBANOS				
En camión compactados	178-451	297	15-40	20
EN VERTEDERO				
Medianamente compactados	362-498	451	15-40	25
Bien compactados	590-742	600	15-40	25

Fuente: Tchobanoglous, 1994

- Tamaño de partícula

Es la dimensión y la distribución del tamaño de los componentes de los materiales en los RSU es de una consideración importante dentro de los procesos mecánicos y físicos de recuperación de materiales, como trommel, cribas y separadores magnéticos. En función de ésta característica se diseñaran y construirán los equipos de separación. El tamaño de partícula medio de los componentes de los RSU está entre 178 y 203 mm, dependiendo del material. Así, la fracción que suele tener mayor tamaño es el cartón y la de menores dimensiones suele ser la correspondiente a residuos de comida.

- Capacidad de campo

La capacidad de campo de los residuos es la cantidad de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad. Es de gran importancia para determinar la formación de la lixiviación en los sitios de disposición final. El exceso de agua sobre la capacidad de campo se emitirá en forma de lixiviación. La capacidad de campo varía con el grado depresión aplicada y el estado de descomposición del residuo

Propiedades Químicas

El análisis de las propiedades químicas de los RSU es importante por la capacidad de los RSU para ser procesados y/o recuperados, incluyendo técnicas de incineración, tratamiento biológico o disposición final en relleno sanitario. Para el proceso de incineración se describe a los RSU como una combinación de materiales con cierto grado de humedad que pueden ser combustibles o no combustibles; por tal razón se deberá conocer el análisis físico, el punto de fusión de las cenizas, el análisis elemental y el contenido energético de la mezcla.

Para utilizar los RSU en el proceso de compostaje u otros procesos de degradación biológica, se debe obtener información del contenido de agua, sólidos totales, orgánicos volátiles, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno; no olvidando la presencia de inertes y metales pesados que influirán de manera positiva o negativa en el proceso determinando su viabilidad.

Las características químicas más relevantes de los RSU se destacan:

- Potencial de hidrógeno (pH)

El valor del pH permite conocer la acidez o alcalinidad de los residuos, lo cual está estrechamente relacionada con la disponibilidad y movilidad de los iones y metales presentes en los mismos.

- Análisis elemental de los componentes de RSU

Se determina el porcentaje de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza. Debido a la preocupación acerca de la emisión de compuestos clorados durante la combustión, se incluye la determinación de halógenos en el análisis elemental. Con estos análisis se determina la composición química de la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos. También se usan para conseguir relaciones C/N aptas para los procesos de conversión biológica.

- Contenido energético

La capacidad calorífica de los componentes de los residuos es importante cuando se tiene una mezcla conocida de residuos, los cuales al realizar un análisis estadístico tienen variaciones mínimas en composición a través del tiempo o se realiza una mezcla preferida de aquellos materiales que cuentan con un potencial de recuperación energética. En la Tabla 5 se tiene el contenido energético de algunos residuos para la determinación teórica del potencial energético.

Tabla 5.- Datos energéticos típicos para materiales encontrados en los residuos sólidos urbanos

TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE EN PESO				CONTENIDO ENERGÉTICO (kcal/kg)	
	HUMEDAD	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	NO COMBUSTIBLE	RESIDUOS RECOGIDOS	RESIDUO SECO
Restos de comida						
Grasas	2,0	95,3	2,5	0,2	8964	9148
Mezcla de comidas	70,0	21,4	3,6	5,0	998	3989
Residuos de frutas	78,7	16,6	4,0	0,7	948	4452
Residuos de carne	38,8	56,4	1,8	3,1	4235	6919
Papel y derivados						
Cartón	5,2	77,5	12,3	5,0	3912	4127
Revistas	4,1	66,4	7,0	22,5	2919	3043
Periódicos	6,0	81,1	11,5	1,4	4431	4713
Papel mezclado	10,2	75,9	8,4	5,4	3777	4206
Cartones encerados	3,4	90,9	4,5	1,2	6292	6513
Plásticos						
Plásticos mezclados	0,2	95,8	2,0	2,0	7834	7995
Polietileno	0,2	98,5	<0,1	1,2	10382	10402
Poliestireno	0,2	98,7	0,7	0,5	9122	9140
Poliuretano	0,2	87,1	8,3	4,4	6224	6237
PVC	0,2	86,9	10,8	2,1	5419	5430
Textiles, goma, cuero						
Textiles	10,0	66,0	17,5	6,5	4422	4913
Goma	1,2	83,9	4,9	9,9	6050	6123
Cuero	10,0	68,5	12,5	9,0	4167	4467
Maderas						
Residuos de jardín	60,0	30,0	9,5	0,5	1445	3613
Madera verde	50,0	42,3	7,3	0,4	1167	2333
Maderas duras	12,0	75,1	12,4	0,5	4084	4641
Madera mezclada	20,0	68,1	11,3	0,6	3689	4620
Vidrio, metales, etc.						
Vidrio y mineral	2,0	-	-	96-99+	47	48
Metal, hojalata	5,0	-	-	94-99+	167	177
Metal férreo	2,0	-	-	96-99+	-	-
Metal no férreo	2,0	-	-	94-99+	-	-
RSU						
RSU domésticos	21,0 (15-40)	52,0 (40-60)	7,0 (4-15)	20,0 (10-30)	2778	3472
RSU Comerciales	15,0 (10-30)	-	-	-	3056	3594
RSU	20,0 (10-30)	-	-	-	2556	3194

Fuente: Tchobanoglous, 1994

- Punto de fusión de las cenizas:

Se define como la temperatura en la cual la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólidos (escoria) por la fusión y aglomeración. Las temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1100 °C y 1200 °C.

Propiedades biológicas

- Biodegradabilidad

La biodegradabilidad de las fracciones orgánicas de los RSU se basa en su transformación, en presencia de microorganismos, en otras sustancias, orgánicas o inorgánicas, asimilables por el medio, más sencillas. Las fracciones más biodegradables son los restos de comida y de jardinería, a los que siguen el papel y el cartón, con una degradación más lenta. Para determinar estas propiedades se utilizan métodos para medir el DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda bioquímica de oxígeno). En ocasiones se determina mediante el contenido de sólidos volátiles (SV, porción de materia orgánica que puede eliminarse o volatizarse cuando esta se quema en un horno mufla a una temperatura de 550 °C). Esta medida puede ser errónea ya que muchos componentes de los RSU pueden ser altamente volátiles y sin embargo no ser biodegradables, como el papel de periódico y restos de podas.

Existen dos clasificaciones de velocidad conforme a la biodegradabilidad de los residuos orgánicos, aquellos que se descomponen lento y los que se descomponen con rapidez; éstos últimos provienen principalmente de la manipulación y preparación de comida y su descomposición provoca olores molestos y reproducción de moscas.

- Población microbiana y agentes patógenos

Los roedores (ratas), insectos (cucarachas, moscas, mosquitos, escarabajos, etc.) y algunas aves (gaviotas, cigüeñas, gacetas, etc.), encuentran en los residuos el alimento y el medio agradable para su desarrollo, cabe señalar que

estos animales son excelentes transportadores y generadores de agentes patógenos.

Los RSU pueden contener diversos virus, bacterias, protozoos y helmintos de humanos y/o animales, los cuales encuentran un medio apropiado para su crecimiento y proliferación. Las especificaciones biológicas más comunes son: Coliformes totales, *Escherichia coli*, *Salmonella* y Huevos de Helminto viables.

1.2.-CARACTERÍSTICAS DEL DISTRITO FEDERAL (CDMX)

1.2.1-Ubicación dentro de la República Mexicana y demografía

El Distrito Federal tiene una extensión territorial de 1,486.85 km², abarcando el 0.08% de la superficie total de la República Mexicana, de manera ilustrativa se muestra el porcentaje ocupado por ésta entidad en la Figura 3 (INEGI, 2010).



Figura 3.- Localización y porcentaje de superficie de la CDMX respecto al total de superficie de la República Mexicana
Fuente: INEGI, 2010

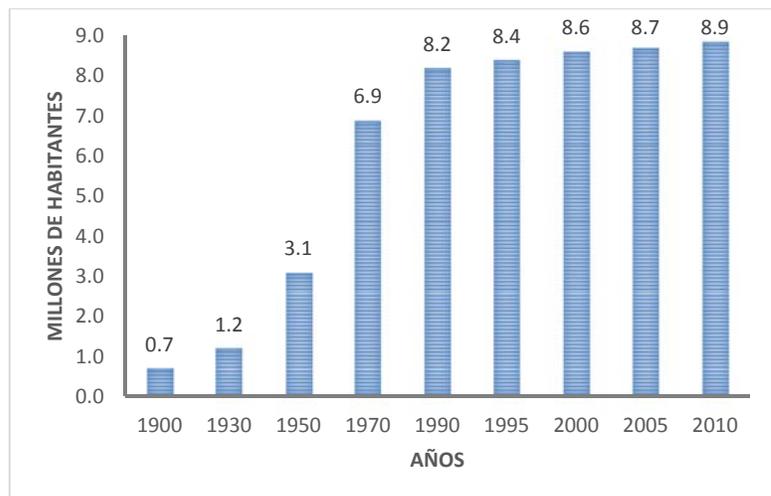


Figura 4.- Crecimiento poblacional en el Distrito Federal (CDMX) (1900 – 2010)

Fuente: Elaboración propia con datos de censos de población 1990 a 2000 y II conteo de población y vivienda 2005 y 2010 de INEGI.

Se localiza en la región central de la República Mexicana, dentro del llamado Valle de México, cuya zona metropolitana representa el mayor asentamiento urbano con más de 24 millones de residentes (21.4% de la población nacional); aunque la entidad federativa más poblada es el Estado de México con 15,175,862 habitantes, quedando en segundo lugar la CDMX (INEGI, 2010). En la figura 5 se muestra la mancha urbana creciente de la Zona Metropolitana del Valle de México.

El número de habitantes de la CDMX asciende a 8,851,080 personas 7.8% de la población nacional (INEGI, 2010) y alberga una densidad de población de 5,953 personas/km², de acuerdo con su territorio y población urbanos.



Figura 5.- Mapa de la zona urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
Fuente: Wikipedia

Con relación al continente americano, México se ubica en tercer lugar por la magnitud de su población, después de Estados Unidos y Brasil (Banco Mundial, 2014); a nivel mundial se encuentra en el décimo primer lugar, pero es el primero en contener a la ciudad con el más rápido crecimiento poblacional, si se considera que el Distrito Federal (CDMX) en 1950 contaba con 3.1 millones de

habitantes, en contraste con los casi 9 millones actuales; habiéndose triplicado en 55 años, con su consecuente expansión hacia una gran extensión del territorio del Valle de México y estados circunvecinos.

Nacionalmente, el 76% de la población se concentra en zonas urbanas y el 24% en rurales; con relación al Distrito Federal (CDMX), el 99.7% es urbana y tan solo el 0.3% es rural.

Las centralizaciones de actividades urbanas y de población en la CDMX tienen un alto impacto en la generación de residuos, en promedio se generan 12,740 toneladas por día (inventario de residuos sólidos del Distrito Federal, 2012), lo que se traduce en una generación per cápita diaria en 1.439 kg/hab/d que son transportadas sitios de disposición final fuera de la capital por el cierre del único sitio de disposición Bordo Poniente el pasado diciembre de 2011.

1.2.2.-Relieve del Distrito Federal (CDMX)

El territorio de la Ciudad de México se localiza en la parte meridional de la cuenca de México, dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico; lo que le atribuye condiciones geológicas y topográficas muy particulares, encontrándose rodeada por elevaciones montañosas.

1.2.3.-Uso de suelo y vegetación

El Distrito Federal tiene dos tipos de uso del suelo predominantes: el urbano que cubre cerca del 45% de su territorio, hacia el centro-norte y el rural que abarca el 55% restante, correspondiente a las Sierras de Guadalupe y Santa Catarina. El área rural conformada por zonas forestales, pecuarias y agrícolas se maneja como suelo de conservación. De manera ilustrativa se muestran los usos de suelo en la figura 6.

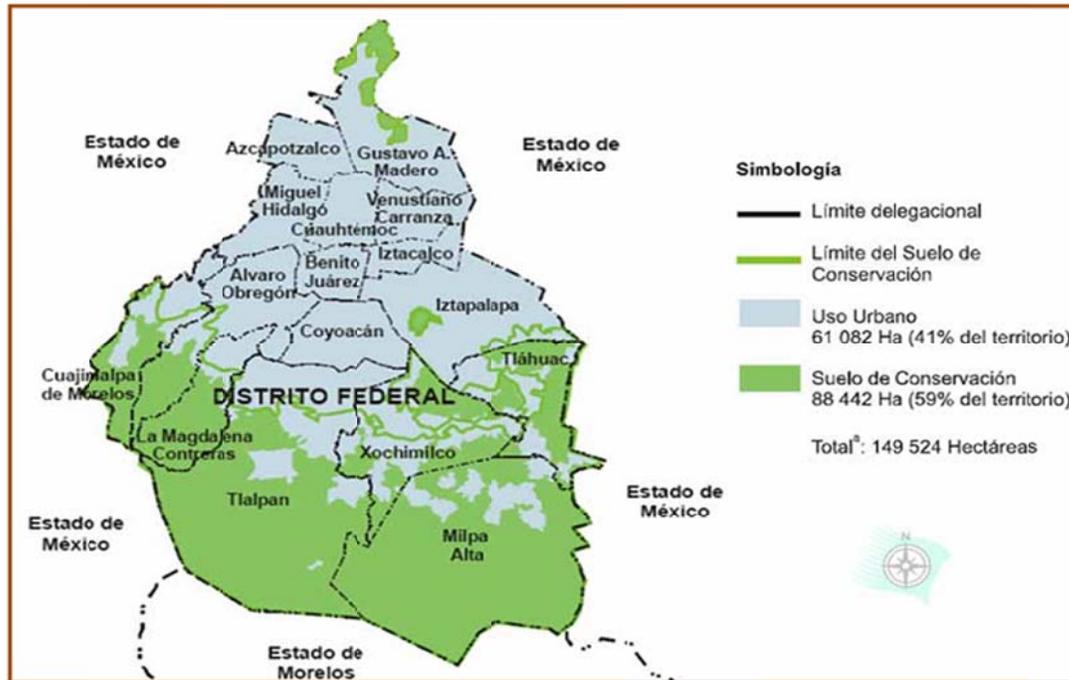


Figura 6.- Uso de suelo CDMX

Fuente: GDF-SMA-CORENA, 2002.

El suelo exclusivamente urbano se presenta en siete delegaciones: Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Iztacalco, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza.

El suelo de conservación abarca nueve delegaciones: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tiáhuac y Xochimilco. El suelo de preservación proporciona bienes y servicios ambientales que permiten la viabilidad de la ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua al manto acuífero, la regulación del clima, el mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas. El suelo de conservación ecológica de la CDMX está definido y caracterizado en el programa general de desarrollo urbano y los programas delegacionales, constituye poco más del 59% de la superficie total con 88,442 hectáreas de acuerdo al INEGI.

1.2.4.- Clima del Distrito Federal (CDMX)

El clima de la Ciudad de México corresponde al de una zona intertropical, aunque la temperatura se modifica debido a su relieve particular, haciendo que predominen cuatro tipos diferentes, como se puede apreciar en la figura 7.



Figura 7.- Clima de la CDMX

Fuente: Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG); INEGI

- a) **Templado subhúmedo con lluvias en verano:** cubre más de la mitad de la superficie abarcando la parte Noroeste, Centro y Este del Distrito Federal. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía de 12 °C a 18 °C; tiene un grado de humedad intermedio, con precipitación pluvial total anual dentro del rango de menos de 600 mm en el noroeste a menos de 1,500 mm en la porción occidental. Lo que es muy propicio para los asentamientos humanos.
- b) **Semifrío subhúmedo con lluvias en verano:** cubre la parte Sur y Suroeste. Presenta temperaturas medias anuales entre 5 °C y 12 °C; tiene un grado de humedad elevado, con precipitación total anual dentro del rango de 1,200 mm a menos de 1,500 mm.
- c) **Semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano:** cubre la porción suroeste y junto con el anterior clima semifrío subhúmedo abarcan el 33% del territorio del Distrito Federal. Presenta temperaturas medias anuales entre 5 °C y 12 °C; se considera la región más húmeda de la capital, con precipitación total anual mayor a 1,200 mm.

d) **Semiseco templado:** cubre apenas el 10% del territorio en su porción Noreste y tiene como límite el vaso de Texcoco. Presenta temperaturas medias anuales entre 12 °C y 18 °C, con precipitación total anual menor de 600 mm.

Es importante destacar que en los últimos veinte años, las condiciones meteorológicas y climáticas de la Ciudad de México han cambiado significativamente, provocando que se dificulte distinguir los cambios estacionales; sin embargo, aún se puede reconocer una temporada húmeda (lluvias) y una temporada seca.

Por otra parte, las variaciones de temperatura que se presentan en esta última estación, permite dividirla en dos microestaciones: la estación seca-caliente (marzo a mayo) y la estación seca-fría (noviembre a febrero).

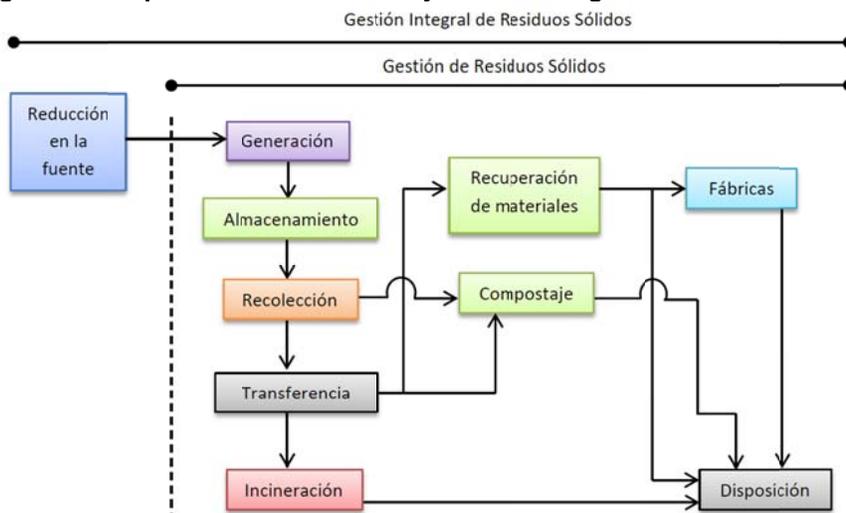
La temporada de lluvias y la humedad relativa alta, inicia a mediados de mayo y se vuelve más evidente entre junio y octubre, ocasionando que desciendan los niveles de algunos contaminantes por la inestabilidad atmosférica. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente (nororiental) (INEGI, 2007).

1.3.- GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Se considera como gestión de los RSU al conjunto de operaciones que se realizan con ellos desde que se generan en los hogares y servicios hasta la última fase en su tratamiento. Abarca pues tres etapas: depósito y recogida, transporte y tratamiento.

La gestión integral de los RSU, es la disciplina asociada con el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia, procesamiento y disposición de los residuos sólidos, de tal manera que resulte acorde con los principios de Desarrollo Sustentable (McDougall, 2001), se pueden notar las principales diferencias en la figura 8.

Figura 8.-Comparación entre Gestión y Gestión Integral de Residuos Sólidos



Fuente: UNEP, 2012

La CDMX debe desarrollar e implementar una Gestión Integral de Residuos iniciando con la reducción de la generación de residuos, la cual afectará el volumen y en cierta medida la naturaleza de los residuos (UNEP, 2012), acción que coincide con el primer peldaño de la jerarquía de manejo de residuos.

1.3.1.-Proceso actual de recolección y traslado

La CDMX es el núcleo urbano más grande del país, así como el principal centro político, académico, económico, de moda, financiero, empresarial y cultural. Debido a los constantes cambios de cultura, modificaciones a los factores de consumo, crecimiento poblacional, modernización constante de la ciudad; se obtiene un incremento en la producción de bienes y servicios, haciendo del manejo de los RSU un reto permanente, ya que cualquier cambio modifica de manera inevitable la composición de los residuos.

El incremento en la producción de elementos contaminantes ha superado al poder de recuperación natural del medio ambiente, actualmente se trata de minimizar el deterioro ecológico a través de acciones, acuerdos, tratados que apoyan actividades como el reciclaje, la separación de residuos y concientización de la población a través de educación ambiental; empero las acciones no han sido suficientes.

Actualmente el manejo de los residuos depende de manera particular de cada país, estado y/o sociedad, de acuerdo a las leyes, procesos, tecnología y reglamentos aplicables.

Enfocándonos en grandes ciudades y generadores nacionales, la CDMX ha tenido un crecimiento poblacional exponencial que tiene un impacto directo en la generación de RSU, lo cual trae consigo diferentes problemas tales como tiraderos de basura clandestinos incumplimiento de normatividad, aumento de enfermedades, contaminación del medio ambiente (agua, tierra y/o aire), incremento en el desarrollo de insectos insalubres como moscas o mosquitos y suciedad en áreas urbanas, así como conflictos entre la sociedad y el gobierno, por carecer de la capacidad del manejo de los residuos.

Las operaciones incluidas para el manejo de RSU en la Ciudad de México es la siguiente: generación, almacenamiento primario, separación y procesamiento de origen, recolección, transferencia, selección, reciclaje y tratamiento y/o disposición final de RSU.

Todo proceso tiene un inicio, y en esté, toma parte toda la población, este ciclo comienza con la **generación de residuos**; y abarca todas las actividades en las

que los materiales son identificados como aquellos sin ningún valor adicional (envolturas, contenedores, empaques, embalajes, cascaras, restos de madera, plástico, vidrio, metal, equipos descompuestos, materiales rotos, etc.) y son desechados.

La CDMX es el mayor productor de RSU a escala nacional y se han implementado normas como el control de bolsas de plástico, reciclado de basura y separación de residuos, pero a pesar de estas iniciativas, existen otros problemas con la generación de más de 12 mil toneladas de basura al día y el traslado de desechos al Estado de México debido al cierre del tiradero del Bordo Poniente, después de 30 años de operación.

Después de la primera operación siguen otras, las cuales son: **almacenamiento primario, separación y procesamiento de origen.**

En la Ciudad de México se tiene una gran diversidad de recipientes que son utilizados para el almacenamiento primario de los RSU pero la gran mayoría no han sido diseñados para ese fin, las bolsas de plástico son las de mayor uso por la población y esto se debe a que son proporcionadas por los diferentes comercios como embalaje y transporte de las mercancías adquiridas, además es frecuente encontrar otros recipientes tales como cajas de cartón, tinas de lámina o plástico, cubetas, costales, bolsas de papel y cajas de madera que son diseñados para otro uso y son utilizados de manera improvisada para el almacenamiento temporal de residuos.

Existen fuentes de generación como las unidades habitacionales, centros comerciales, unidades médicas, terminales terrestres y aéreas, en las que destinan un almacenamiento central para depositar los residuos, los cuales posteriormente son retirados por un vehículo recolector, de acuerdo al Programa de Recolección Separada en el cual los días lunes, miércoles, viernes y domingos se recolecta la fracción inorgánica, y los martes, jueves y sábados la fracción orgánica; este proceso abarca desde la manipulación, clasificación y entrega en el punto de recolección. Los colores que identifican los contenedores son: gris para inorgánicos y verde para orgánicos. Es importante señalar que se han implementado programas específicos en escuelas, hospitales y otras instituciones públicas y privadas, orientadas a la mejor separación de residuos, las cuales

hacen posible que la fracción orgánica no contenga bolsas, por lo que logran una mejor separación y disposición de estos desechos orgánicos para su posterior tratamiento, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.- Separación primaria avanzada de acuerdo a NOM-NADF-024-AMBT-2013

Orgánicos (Color: Verde, Pantone 360 C ó 364)	Residuos inorgánicos con potencial de reciclaje (Color: Gris Pantone 877 C)	Residuos Inorgánicos de aprovechamiento limitado (Color: Naranja Pantone 165 C)	Residuos de manejo especial y voluminosos (Color: Marrón Pantone 463 C)
<ul style="list-style-type: none"> • Residuos de jardinería: Flores, pasto, hojarasca, ramas • Residuos de alimentos: Restos de verdura, hortalizas y frutas. Cascarón de huevo. Restos de café o té. Pan. Tortillas. Productos lácteos (sin recipiente). Huesos. Aceite comestible usado. Bioplásticos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Papel y cartón. • Plástico. • Vidrio. • Metales. • Ropa y textiles. • Maderas. • Envase multicapas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos sanitarios • Pañuelos usados. • Papel de baño. • Preservativos. • Toallas sanitarias. • Cotonetes. • Curitas. • Pañales. • Plásticos de difícil aprovechamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes y pequeños electrodomésticos. • Equipos de informática y telecomunicaciones. • Aparatos electrónicos de consumo y paneles fotovoltaicos. • Aparatos de alumbrado. • Herramientas eléctricas y electrónicas (con excepción de las herramientas industriales fijas de gran tamaño). • Instrumentos de vigilancia y control. • Pilas y baterías que contengan litio, níquel, mercurio, manganeso, plomo, zinc o cualquier otro elemento que permita la generación de energía eléctrica en las mismas, en los niveles que no sean considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente. • Radiografías. • Voluminosos. • Colchones.

Fuente: NADF-024-AMBT-2013

En este punto el problema de los residuos no desaparece, tan solo transferimos el problema a otro lugar, este es el inicio de la operación de **recolección**.

En la Ciudad de México de acuerdo al INEGI se generan diariamente alrededor de 17,043 toneladas de residuos sólidos (INEGI, 2013), cifra que difiere de las reportadas en el Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal (12,740 t/d), las cuales son recolectadas por medio de un parque vehicular integrado por 2,346 unidades recolectoras, 2,090 rutas de recolección y una plantilla de personal de más de 17 mil trabajadores.

Las delegaciones tienen a su cargo la recolección de los residuos y su transporte fundamentalmente a las estaciones de transferencia y en menor medida a las plantas de selección o directamente a los sitios de disposición final (Secretaría de Obras del Gobierno del Distrito Federal, 2013).

En las seis delegaciones en las que se concentran tres quintas partes de la población de la entidad se recolecta el 71% de los residuos. Destaca Iztapalapa, que registra 3,533 toneladas diarias (21%), seguida de las siguientes demarcaciones: Gustavo A. Madero, con 2,965 toneladas (17%); Cuauhtémoc, con 2,192 toneladas (13%); Venustiano Carranza, con 1,200 toneladas (7.0%); Coyoacán, con 1,136 toneladas (7%), y Álvaro Obregón, con 1,095 toneladas por día (6%). Observado en relación con la recolección per cápita, los primeros dos sitios los ocupan las delegaciones Cuauhtémoc (4 kg) y Venustiano Carranza (3 kg) (INEGI, 2013).

Es práctica común llevar a cabo la selección de materiales susceptibles de ser reciclados en el transcurso de ruta de recolección. Los materiales recuperados más comunes son: cartón, papel, botellas de vidrio, latas de aluminio, otros metales e incluso colchones. En la mayoría de los casos la cuadrilla de recolección está compuesta por un chofer y dos ayudantes generales, adicionalmente se incluyen dos o más voluntarios, quienes se dedican a la pepena de materiales reciclables en su recorrido. Una vez que termina la ruta o se ha llenado el vehículo recolector en el camino a la estación de transferencia, se desvían para vender los subproductos recuperados (Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal, 2004).

El barrido es otra fase del sistema de recolección de residuos y surge por la necesidad de mantener limpia y en condiciones estéticas, sobre todo las vías de intensa circulación peatonal de las principales ciudades, las calles principales, parques y jardines, además se realiza la limpieza, mantenimiento y conservación de la red vial primaria, que abarca más de 1,500 kilómetros. Este servicio se cubre con una plantilla de 1,200 trabajadores y 96 vehículos de recolección en horarios nocturnos. Cada delegación proporciona el servicio en horario matutino con una plantilla de 9,661 trabajadores y 7,827 carritos para dicha actividad.

El siguiente proceso es la descarga de los RSU a una estación de **transferencia**, la Ciudad de México cuenta con 13 estaciones, y una capacidad para transferir 23,565 toneladas diarias, estas estaciones son instalaciones intermedias entre las diversas fuentes generadoras de RSU y las plantas de selección o el sitio de disposición final.

En la actualidad el sistema de transferencia para residuos sólidos se ha convertido en una instalación necesaria en las grandes urbes como la Ciudad de México, debido al continuo alejamiento de los sitios de tratamiento y de disposición final.

Los tráileres de transferencia generalmente transportan una carga útil aproximada de 20-25 toneladas de residuos, y reciben un promedio de cinco a seis vehículos recolectores. Las principales ventajas que presenta un sistema de transferencia se describen a continuación:

- Disminución de los costos globales de transporte permitiendo que los vehículos de recolección se incorporen nuevamente a sus rutas durante la jornada de trabajo.
- Aumento de la vida útil y disminución en los costos de mantenimiento de los vehículos recolectores.
- Incremento en la eficiencia del servicio de recolección, por medio de una cobertura más homogénea y balanceada en las rutas de recolección.
- Mayor regularidad en el servicio de recolección, debido a la disminución de desperfectos de ejes, muelles, suspensiones y llantas que sufrían al transitar hasta el sitio de disposición final.

- Reducción en la contaminación ambiental.
- Se reducen las afectaciones a la salud pública.

La desventajas de los medios de transporte actuales en los procesos de recolección y transferencia incluyen la falta de mantenimiento e implementación de nuevas tecnologías, debido a que muchas unidades son viejas o no cuentan con un sistema de compactación o contenedores para jugos/lixiviados producidos por la fermentación de los FORSU, provocando contaminación a vías públicas, enfermedades respiratorias y fauna nociva debido en parte a éstos líquidos derramados durante el traslado desde el lugar de recolección hasta los sitios de disposición final y/o tratamiento.

1.3.2.-Tratamiento de los RSU en el Distrito Federal (CDMX)

Tratamiento se puede definir “como cualquier procedimiento al que se someten los residuos, mediante el cual se modifican sus características físicas, químicas y/o biológicas para aprovecharlos, estabilizarlos, reducir su volumen o facilitar su manejo y disposición final”.

En este caso existen procesos que actualmente son aplicados y ayudan a la recuperación de materiales aprovechables, aquellos para los cuales existen mercados y están presentes en los residuos en cantidades que justifican su separación. Los materiales más comunes que pueden recuperarse son: el papel, cartón, plástico, vidrio, metales ferrosos, aluminio y otros metales residuales no ferrosos. Debido a que todos estos materiales pueden ser de suficiente valor económico para justificar su separación, y por ende se tienen plantas especializadas para esta operación, las **plantas de selección**.

La CDMX cuenta actualmente con tres plantas de selección de residuos urbanos 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.

En estas instalaciones se recuperan más de 20 materiales reciclables que son comercializados en la Ciudad de México y sus alrededores; el material no recuperado o rechazado, se transporta a sitios de **disposición final** en el **Estado de México** y la **FORSU** se lleva a la **Planta de Composta Bordo Poniente**.

Los principales materiales recuperados son: aluminio traste, macizo, chatarra, perfil, bote aluminio, bote ferroso, fierro, lámina metálica, cobre, alambre, botellas de refresco y cerveza, vidrio ámbar, transparente y verde, cartón, todo tipo de papel, periódico, PVC, PET, plástico rígido o nylon y vinil, entre otros.

En la Tabla 7 se presenta la cantidad de residuos que recibió en el año 2008 cada planta, así como la capacidad instalada con la que cuenta cada una de ellas.

Tabla 7.- Residuos sólidos urbanos en plantas de selección

Planta de selección	Ingreso (t/año)	Capacidad instalada (t/año)	Capacidad (t/d)
Santa Catarina	296,745	912,500	2500
Bordo Poniente	169,360	730,000	2000
San Juan de Aragón	135,780	730,000	2000
Total	61,885	2,372,500	6500

Fuente: Secretaria de Obras y Servicios del DF, 2008

La separación es un proceso usado para la recuperación de productos que son sujetos de comercialización como materias primas para diversas industrias. La separación manual se practica en las fuentes generadoras, en los camiones recolectores de residuos sólidos, en los sitios no controlados de residuos sólidos que operan "a cielo abierto" y en estas plantas de separación.

Se tienen tres fracciones principales en las cuales se pueden dividir los RSU como se aprecia en la figura 9, obteniendo así que 55.58 % corresponde a la fracción orgánica; 20.30% a subproductos que presentan un potencial de reciclaje tales como el polietilentereftalato (PET), papel, cartón, vidrio transparente, plástico rígido, lata, vidrio de color, materiales ferrosos, aluminio y, por último, 24.12 % de subproductos que tienen un escaso valor en el mercado (Secretaria de Medio Ambiente, 2009).

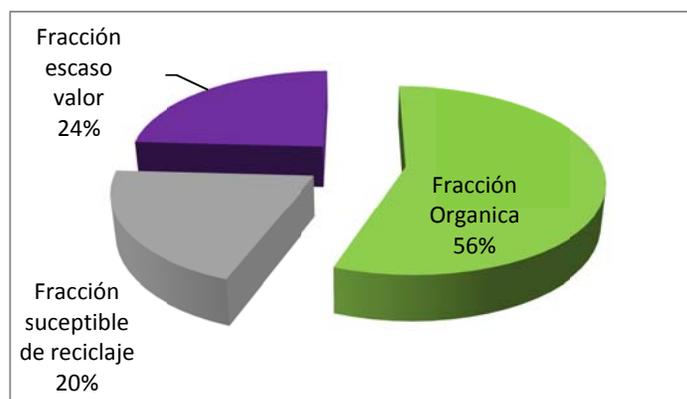


Figura 9.- Composición Fracciones de RSU en la CDMX 2009

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente, 2009.

1.3.3.-Tratamiento de inorgánicos reciclables y reutilizables

Mediante estos procesos se impulsa el reúso y reciclaje de materiales utilizados, para generar nuevos productos. En las plantas de selección, la recuperación de materiales separados, es menor que lo reportado por la Secretaria de Medio Ambiente según su estudio de 2009 como antes se mencionó, ya que aquel estudio se basó en la composición de los residuos generados por hogares, industrias y comercios, sin tomar en cuenta que los camiones recolectores y el personal voluntario absorben una parte de los productos con valor económico durante el recorrido hacia el tratamiento de los RSU.

En la realidad solo el 10% de los productos con valor económico es recuperado en las plantas de selección, aunque cabe señalar que se reciben los RSU de la CDMX y una parte del Estado de México (Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2011).

La Ciudad de México ha mejorado en cuanto a cultura de reciclaje, pues la separación de residuos sólidos alcanza en promedio 70%.

En el mundo, el reciclaje de los desechos sólidos genera 12 millones de empleos; la mayoría en 3 países: China, Brasil y Estados Unidos, de acuerdo a un estudio realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Las ganancias que se obtienen por la reutilización de estos desechos son millonarios, alrededor de 410 mil millones de dólares. No obstante a pesar de que el porcentaje de acopio de residuos es mayor de 90% en la Ciudad de México; la mayoría no se aprovecha.

Para lograr el uso de los materiales separados es importante conocer sus características, y proporcionarlos a un mercado que los pueda utilizar dentro de sus procesos. En la Tabla 8 se nota la composición física porcentual de los RSU en la CDMX y a continuación se describen los principales subproductos que actualmente cuentan con un mayor potencial de mercado.

Tabla 8.- Composición física porcentual de los RSU en el Distrito Federal

Algodón	0.30%	Cobre	0.02%
Cartón liso	3.09%	Pilas eléctricas	0.07%
Cartón corrugado	2.77%	Acero inoxidable	0.02%
Otros cartones	0.50%	Papel Bond	2.09%
Envase de cartón tetrapak	1.51%	Periódico	1.68%
Cuero	0.33%	Revista	0.63%
Residuo Fino	2.68%	Papel higiénico	6.72%
Residuo grueso	1.71%	Pañal desechable, toallas femeninas	2.83%
Fibra dura vegetal	0.50%	PET (Polietilen-tereftalato)	2.80%
Fibra sintética	0.49%	HDPE-PEAD (Polietileno de alta densidad)	2.92%
Hueso	0.70%	PVC (Policloruro de vinilo)	0.15%
Llantas de automóvil	0.48%	LDPE-PEBD (Polietileno de baja densidad)	5.44%
Llantas de camioneta	0.06%	PP (Polipropileno)	0.92%
Llantas de camión	0.37%	PS Poliestireno	0.98%
Otros hules	0.17%	Alimenticios	34.86%
Lata aluminio	0.27%	Residuos de jardinería	9.18%
Lata metálica	1.46%	Trapo	2.94%
Losa y cerámica	0.53%	Vidrio Transparente	1.74%
Madera	1.95%	Vidrio de color	0.74%
Material construcción	1.75%	Tenis	0.20%
Material ferroso	0.37%	Zapatos	0.44%
Aluminio	0.07%	Fibra de vidrio	0.43%
Bronce	0.03%	Electrónicos	0.11%
		Total	100.00%

Fuente: Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal, 2011

Papel y cartón

Sólo una parte del papel y del cartón desechado es reutilizable debido a consideraciones económicas y logísticas, ya que la fibra virgen es abundante y barata, la capacidad para destinar y reutilizar papel y el cartón usados es limitada, además de que las características principales pedidas para su compra son: que se encuentre limpio, seco, sin grapas, sin gomas, sin lazos y separados por tipo.

Los principales tipos de papel para reciclaje son: a) periódico; b) cartón corrugado; c) papel de oficina, y d) papel mezclado y se pueden obtener productos como: papel periódico, papel higiénico, pañuelos de papel, hueveras, cartón y productos para construcción (fibra prensada).

Plástico

El proceso de reciclaje de plástico depende de su composición, por esta razón se identifica mediante un código estandarizado. La clasificación -del 1 al 7- representa las resinas comúnmente usadas y facilita la separación y el reciclaje. En la Tabla 9 se nota la clasificación. Las características comunes que debe de tener el plástico para su reúso y reciclaje son que se encuentre limpio y sin mezcla de otros residuos.

Tabla 9.- Tipos de plástico, siglas y origen.

Plástico	No.	Siglas	Origen
Poliétilen Tereftalato	1	PET	Botellas de refrescos, recipientes de alimentos.
Poliétileno de Alta Densidad	2	PEAD	Botellas de leche, detergente, bolsas
Policloruro de Vinilo	3	PVC	Recipientes de alimentos, tubería
Poliétileno de Baja Densidad	4	PEBD	Bolsas y envolturas
Polipropileno	5	PP	Cajas, maletas, tapas y etiquetas
Poliestireno	6	PS	Vasos, platos, protectores de electrónicos
Otros	7		Todas las resinas y materiales multilaminados.

Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/>

Vidrio

La mayor parte del vidrio contenido en los residuos es de botellas (90%) u otros recipientes. Después de triturado y separado por colores (blanco, verde y ámbar), casi todo el vidrio se utiliza para producir nuevos recipientes y envases. Los fabricantes de botellas están dispuestos a pagar precios un poco más altos por el vidrio triturado que por las materias primas, debido a ahorros en energía y a mayor durabilidad del horno de fundición. La desventaja de usar vidrio usado reside en que casi siempre contiene contaminantes que pueden alterar el color o la calidad del producto final. Las características principales para su reutilización son: que se encuentre limpio, sin etiquetas y separado por color.

Metales

Los metales se pueden clasificar en dos categorías:

1. **Metales férricos** (hierro y acero). Los bienes que más contienen metales son: electrodomésticos, gran cantidad de aparatos y equipos industriales, automóviles, tuberías, material de construcción, chatarra industrial, muebles y puertas. Las latas de acero y la hojalata se separan magnéticamente (por el recubrimiento de estaño).
2. **Metales no férricos**. Casi todos estos metales se pueden reciclar si están seleccionados y libres de material extraño: plástico, tela, goma, etc. Además del aluminio, los metales no férricos son: cobre, latón, bronce, plomo, níquel, estaño y zinc. Una ventaja del reciclaje de aluminio es que las impurezas son fácilmente separables.

Otros

Además de los materiales señalados, existen otros subproductos que pueden recuperarse; sin embargo, las cantidades, sobre todo los ingresos obtenidos por la venta de los mismos son relativamente bajos.

De todos los productos recuperables se tiene una lista de posibles usos que se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.- Productos recuperables y posibles usos.

Residuos	Productos finales
Bagazo de caña de azúcar	Papel
Papel y cartón	Cartón
Polietileno de alta densidad	Tarimas de plástico
Hule de llanta	Loderas para camión
Hule, cuerda NYLON, alambre de acero	Llantas
Polietileno, PVC	Poliducto para agua e instalaciones eléctricas
Madera de pino	Aglomerados
Pedacería de vidrio	Toda clase de productos de vidrio
Fibra de vidrio de tercera	Fibra de vidrio para aislamientos termostáticos
Chatarra de acero	Perfiles para fabricación, maquinaria y estructuras
Chatarra de aluminio, hierro y bronce	Piezas de maquinaria en general
Chatarra de cobre	Conectores eléctricos, tuercas y válvulas
Chatarra de aluminio	Lingote de aluminio para la industria envasadora
Desperdicio de zinc, aluminio y plomo	Óxido de zinc
Desperdicios de conductores eléctricos	Barras de cobre
Pedacería de ladrillo refractario	Material refractario
Frutas, legumbres pan, tortillas y carne en descomposición	Alimento para animales; mejoradores de suelo
Huesos y cartílagos	Alimentos, gelatinas, cosméticos, pegamentos, farmacéuticos, abonos y fertilizantes.
Llantas	Suelas para zapatos, juguetes, tenis , etc.
Plástico en película	Hidroxi-etil-celulosa
Otros plásticos	Juguetes, suelas para zapatos, tenis, etc.
Colchones viejos	Colchones y bases para colchón.
Envases de vidrio	Envases para mermeladas, café, etc.
Botellas	Se vuelven a utilizar
Trapo	Estopa

Fuente: Esquer, 2009

Las plantas de selección tienen como objetivo final el separar lo valorizable, la fracción orgánica de los RSU y lo no valorizable.

Durante el proceso se utilizan varias bandas transportadoras de por lo menos 50 metros de longitud para una selección manual de los residuos aprovechables, existen diferentes etapas para la selección de los recuperables, y en cada sección los seleccionados son depositados en ductos que los llevan a contenedores de tipo silo, los depósitos cuentan con bandas auxiliares que alimentan los reciclables a prensas compactadoras, disminuyendo de esta forma el volumen de los reutilizables.

Al final del proceso hay residuos que no se pueden aprovechar directamente, como residuos higiénicos, orgánicos, electrónicos, residuos de construcción, u otros combinados; de ésta mezcla el único residuo aprovechable es la fracción orgánica, y su separación se hace a través de trommels, que dejan pasar los residuos orgánicos. Los residuos inorgánicos son llevados a otros contenedores de tipo silo, para su posterior compactación. Dependiendo del contenido energético de éstos últimos, y la logística, se puede llegar a ocupar como Combustible Derivado de Residuos (CDR o RDF por sus siglas en inglés) o llevados a disposición final.

Una forma de recuperar los residuos no reciclables es utilizarlos como combustible y esto se logra recuperando su energía. El Combustible Derivado de Residuos (CDR/RDF) es el término que se aplica a los materiales con un alto poder calorífico (es decir, materiales capaces de liberar un alto porcentaje de energía cuando se queman). Este energético puede beneficiar a las fábricas de cemento y a las centrales eléctricas.

El proceso de los inorgánicos termina de esta forma, una parte se regresa como materia prima para integrándose a los sistemas de producción de nuevos productos, y una gran parte puede ser ocupada como CDR o llevarse a un relleno sanitario.

El relleno sanitario es una técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, teóricamente no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública, tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado el mismo. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más pequeña posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos en el relleno, por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

El método constructivo y la secuencia de la operación de un relleno sanitario están determinados principalmente por las características del terreno escogido, aunque también dependen de la fuente del material de cobertura y de la profundidad del nivel freático.

Hasta la fecha el relleno sanitario es la técnica que mejor se adapta a México para disponer de manera sanitaria la basura, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

1.3.4.-Proceso actual para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal (CDMX)

En Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF) establece en su artículo 3º a los sólidos orgánicos como: "todo residuo sólido biodegradable". Como se ha escrito anteriormente los residuos orgánicos están compuestos principalmente de restos de plantas, vegetales y animales.

El sitio de disposición final que daba servicio a la ZMVM era el Bordo Poniente, pero cerró oficialmente el 19 de diciembre de 2011, y para solventar la crisis metropolitana de "basura", el gobierno del Estado de México autorizó que los sitios de disposición final de residuos de Izcalli, Ixtapaluca, Tecámac y Xonacatlán reciban los restos procedentes de la CDMX.

El tratamiento de los residuos en la ZMVM ha sido desalentado, pues los procesos de incineración y aprovechamiento de subproductos no han tenido el resultado esperado. No obstante, existen plantas utilizadas para el tratamiento de la fracción orgánica, donde el producto final es composta, que se puede utilizar como fertilizante o mejorador de suelo. La ZMVM cuenta con seis plantas de composta en la CDMX: Bordo Poniente, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta y Xochimilco, con una capacidad instalada para tratar 80,151 toneladas al año. Sin embargo, se reciben 37,869, es decir, 47.24% de la capacidad instalada.

El método de composteo es utilizado para procesar la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos que, generalmente, representa el 40-60% del volumen total, el proceso consiste en la fermentación controlada y acelerada de los residuos utilizando el contenido microbiano presente; el resultado es un producto estabilizado que se emplea como abono orgánico o mejorador de suelos, sin llegar a nivel de fertilizante.

1.3.5.-Inversiones y costos para el tratamiento de la fracción orgánica en el Distrito Federal (CDMX)

La Secretaria de Obras y Servicios del Distrito Federal, realizó durante el año 2011, una inversión de casi 100 millones de pesos del Fondo Metropolitano en la adquisición de 22 máquinas y vehículos de carga en operación en la planta de composta. La planta de composta del Distrito Federal tiene una superficie de 20 hectáreas ubicadas dentro del Bordo Poniente y en ella laboran 105 trabajadores.

El manejo por cada tonelada de residuos municipales cuesta aproximadamente \$250.00 pesos. Y para seguir sumando cifras: en el Distrito Federal se generan 12,740 ton/día, de las cuales 44% son FORSU y 56% son FIRSU. Tan solo la disposición de los inorgánicos en disposición final implica una erogación de \$1,783,600 pesos cada día, cifra que en un mes representa 53.51 millones de pesos.

Para el caso de los residuos orgánicos no se encontró un costo por el tratamiento para el Distrito Federal, pero de acuerdo al Diagnóstico Básico de Residuos de la Construcción del Estado de México del año 2007, para el tratamiento de los residuos orgánicos se estima un costo diario por tonelada tratada de \$459.16 pesos, tomando en cuenta que el tratamiento de residuos orgánicos brindado en el Estado de México es de tipo mecánico biológico (1 municipio) y composteo (11 municipios).

Relacionando las cifras en la Planta de Composta Bordo Poniente se procesan a diario aproximadamente 2,500 t/d de biomasa para su tratamiento, lo que implica un costo aproximado de \$1,147,900.00 pesos diarios, \$34,437,000.00 pesos mensuales y \$413,244,000.00 pesos anuales, sumado a la inversión en maquinaria que se realiza cada año.

1.4.- MÉTODOS DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El compostaje y el tratamiento de FORSU a través de biodigestión anaerobia constituyen operaciones de recuperación de materiales y energía, en tanto se aprovechen los productos generados a partir de estos procesos; tomando en cuenta que estas tecnologías satisfacen los principios de jerarquía de residuos en el marco de desarrollo sustentable, son ampliamente reconocidas por organismos como la FAO y la UNEP para la gestión integral de los RO.

En general los procesos anaerobios son más complejos que los aerobios, sin embargo, los primeros presentan ventaja de la recuperación de energía en forma de biogás, que puede ser utilizado en la generación de electricidad o como sustituto de gas natural (Tchobanoglous & Kreth, 2002). La comparativa de ambos procesos se puede ver en la Tabla 11.

Tabla 11.- Comparación entre los tratamientos aerobios y anaerobios para FORSU

Característica	Proceso Aerobio	Proceso anaerobio
Consumo de energía	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos	Composta, CO ₂ , H ₂ O	Digestato y biogás
Reducción de volumen	Mayor al 25%	Mayor al 10%
Tiempo de procesamiento	20-30 días	20-40 días
Principal objetivo	Reducción de Volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de Composta	Reducción de volumen, estabilización de residuos y obtención de energía

Fuente: Tchobanoglous & Kreth, 2002

Los procesos aerobios son consumidores netos de energía, pero ofrecen la ventaja de que su operación es más sencilla, y si ésta se realiza adecuadamente, reducen significativamente el volumen de residuos.

1.4.1.-Proceso aerobio (Compostaje)

El proceso de compostaje o composteo de los residuos sólidos consiste en la descomposición o fermentación natural de la FORSU, por la acción biológica de los microorganismos presentes, dando origen a un producto denominado composta o compost, el cual al término del proceso debería ser un producto orgánico estabilizado, cuyas propiedades la hacen particularmente útil como mejorador de la estructura y textura de los suelos y en menor grado como fertilizante vegetal.

El proceso por el cual se elabora composta se ha denominado "compostaje". Las tecnologías para el compostaje son variadas y los productos finales también varían en su composición, color, textura, y propiedades más específicas que dependen del tipo de residuos y procesos que les dio origen.

El compostaje se asemeja a una sucesión ecológica, en donde primero hay ciertos organismos que son paulatinamente remplazados por otros y éstos, a su vez, sucesivamente por otros hasta el agotamiento de todos los nutrientes básicos. Al finalizar el proceso, la composta es estable, esto es, no se descompone, no crecen en ella animales, hongos o bacterias y puede almacenarse largo tiempo sin perder sus propiedades.

Al ser la composta la versión artificial del humus, el compostaje requiere un control que permita elaborar un producto que no dañe al ambiente, por tal razón los procesos que se describen a continuación tienen gran importancia para su producción. (Ver Figura 10)

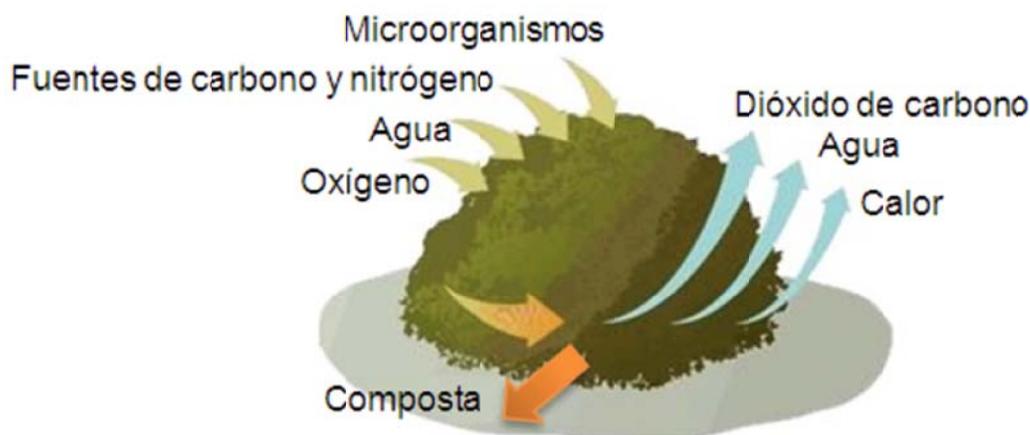


Figura 10.- Esquema del proceso de compostaje
Fuente: Komilis & Ham, 2004

1.4.1.1.- Proceso de compostaje

1. Separación de residuos

La separación consiste en apartar la fracción orgánica de los elementos que no se degradan biológicamente y aquellos que pueden causar la contaminación de las operaciones biológicas. Es posible realizar éste proceso en la planta a través de la selección manual y separación a partir de operaciones mecánicas como cribas.

Debe evitarse el uso de materiales no biodegradables, como vidrios, metales, alambre, plásticos, caucho, cenizas frescas, fibras sintéticas o frutos con espinas, ya que pueden causar problemas a las personas encargadas de su manejo. En la Tabla 12 se presentan algunos materiales usados para compostas con sus respectivas relaciones C/N. Se debe de tomar en cuenta que la mejor relación es 30/1. Por lo anterior, es conveniente mezclar materiales con altas y bajas relaciones C/N así los materiales se complementaran y se obtendrá una relación C/N cercana a la ideal.

Tabla 12.- Relación C/N de los principales materiales utilizados para la composta

Material	Relación C/N	Material	Relación C/N
<i>Desechos del ganado</i>		Desechos vegetales	
<i>Orina</i>	0.8	Follaje de pino	5
<i>Estiércol almacenado (3 meses)</i>	15-20	Residuos frescos de jardín	12
<i>Estiércol de bovino</i>	20-25	Abonos verdes	10-15
<i>Estiércol de caballo</i>	25	Algas	19
		Residuos frescos del huerto	30
<i>Desechos de cosecha</i>		Hojas secas	50-80
<i>Semillas de oleaginosas</i>	3-15		
<i>Residuos de leguminosas</i>	15	Desechos Agroindustriales	
<i>Alfalfa verde</i>	15	Pulpa de café seca	3
<i>Desechos de caña de azúcar</i>	15-20	Harina de pescado	4-5
<i>Rastrojo de maíz</i>	40-80	Harina de hueso	8
<i>Paja de avena</i>	50-150	Desechos de cervecería	15
<i>Paja de trigo</i>	130-150	Bagazo de caña	200
		Aserrín	200-500

Fuente: Martín, 1992

2. Reducción del tamaño (molienda)

También se le conoce como trituración. Es una operación que puede no ser incluida para FORSU, pero es indispensable para residuos de poda. Consiste en reducir el tamaño de los materiales para facilitar la degradación. Una versión particular de este proceso es la "ruptura de bolsas" que reduce el tamaño de RSU de una bolsa en sus componentes.

El tamaño de las partículas debe ser de 1.3 a 5 cm, si se trata de papel y residuos vegetales o de cocina; menor de 1.3 cm si es madera; se busca con esto que el intercambio de sustancias sea eficiente. Un tamaño pequeño de partícula supone mayor superficie de contacto, y por lo tanto, fermentaciones rápidas y homogéneas; sin embargo, si el tamaño es excesivamente pequeño pueden originarse problemas de compactación que impiden una aireación adecuada.

3. Generación de pilas

La manera óptima de hacer las pilas es a través de la adición de diferentes tipos de residuos y agentes químicos que facilitan el compostaje. Pero en plantas a nivel industrial es difícil llevar un control al inicio del proceso.

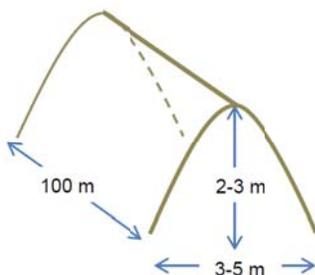
La forma óptima de generación de pilas se lograría a través de la adición de capas alternadas de materiales con alta y baja relación de C/N, pero por la cantidad, tiempo y llegada de los residuos es difícil aplicar este método. Conforme avanza el proceso es posible adicionar material diferentes materiales de acuerdo a los problemas que se presenten en las pilas.

La materia orgánica de la composta debe estar constituida por una buena relación de sólidos, agua y gases que permitan el constante intercambio de sustancias.

Es importante señalar que los microorganismos asimilan 30 partes en peso de carbono por una parte de nitrógeno para formar proteínas y generar energía; por lo tanto, se recomienda que los materiales para compostas tengan una relación C/N de 30/1, con rango de variación de 26 a 35.

De manera ilustrativa en la figura 11 se muestra tamaño típico de las pilas generadas en la Planta de Composta Bordo Poniente

Figura 11.- Tamaño de las pilas de la Planta Bordo Poniente



Fuente: Santos, 2013

4. Degradación y Maduración

En esta etapa del proceso un conjunto diverso de organismos ataca los residuos, transformándolos bioquímicamente durante varios días. Durante el proceso se debe proporcionar suficiente oxígeno a la degradación y evitar de esta forma la proliferación de malos olores y reducción de velocidad en el proceso de compostaje. Ésta puede llevarse a cabo por convección natural o forzada (con uso de motores). También se debe proporcionar la humedad necesaria para la degradación, evitando la inundación o la resequedad de la mezcla. Las fases por las que pasa el proceso se describen a continuación:

I. Fase I o Mesófila. (10-40 °C)

Al comienzo del proceso de compostaje, los residuos se encuentran a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos presentes en los materiales orgánicos empiezan a desarrollarse utilizando hidratos de carbono y proteínas fácilmente asimilables, de esta forma los microorganismos crecen y se multiplican descomponiendo los materiales. Como consecuencia de la actividad de estos microorganismos la temperatura se eleva alcanzando 40 °C en pocos días. La duración de esta etapa es variable y depende de diversos factores como oxígeno, humedad, relación carbono/nitrógeno y tipo de residuos utilizados.

II. Fase II o Termófila. (40-75 °C)

La temperatura sigue subiendo hasta alcanzar valores cercanos de 60 a 70 °C y los microorganismos mesófilos son reemplazados por aquellos resistentes a estas temperaturas (termófilos). En un comienzo bacterias y hongos termófilos empiezan a degradar la celulosa y parcialmente la lignina, con lo cual la temperatura aumenta. A partir de los 60 °C, los hongos termófilos cesan su actividad y aumentan los actinomicetos.

Durante varios días se mantiene la temperatura alta y disminuye la actividad biológica, se produce la pasteurización del medio, es decir, se destruyen las bacterias patógenas, parásitos presentes en los residuos y la inhibición de la germinación de semillas de malezas.

En esta etapa se deben realizar frecuentes volteos con el objeto de aportar oxígeno, el que es rápidamente consumido por los microorganismos.

III. Fase III o de enfriamiento

Cuando prácticamente la totalidad de la materia orgánica se ha transformado, la temperatura empieza a disminuir, ya que el calor que se genera al interior de la pila es menor que el que se pierde. Como consecuencia de este descenso de temperatura bacterias y hongos mesófilos de reproducen nuevamente en el compost, degradando la celulosa y la lignina restantes.

Esta fase se reconoce cuando luego de dar vuelta la pila no existe un aumento de temperatura posterior. Los materiales residuales de la degradación se convierten lentamente en composta.

Cuando no se cuenta con una mezcla adecuada de desechos orgánicos, el proceso de composteo es lento y el producto final es un material de baja calidad. Para evitar esto, se pueden adicionar otros materiales que mejoran la composición química y la estructura de las pilas. Estos materiales son:

- a) **Activadores:** Son sustancias que estimulan la descomposición; contienen gran cantidad de proteínas y aminoácidos, como son los estiércoles y los desechos orgánicos en general; en este grupo figuran el sulfato de amonio, la urea y otros fertilizantes nitrogenados comerciales.

- b) **Inoculantes:** Estos son cultivos especiales de bacterias o medios donde se encuentran los organismos encargados de la descomposición de la materia orgánica; entre estos se pueden señalar a las bacterias del género *Azetobacter*, a la composta madura, la fosforita molida, el fosfato de calcio y la tierra, entre otros.
- c) **Enriquecedores:** Son fertilizantes comerciales incorporados al proceso; la cantidad de nutrientes contenidos en la composta se mejora obteniéndose un mejor producto para las plantas.

Además, para el control del proceso se deben manipular de manera eficiente las siguientes variables:

- a. **Temperatura:** Durante el proceso de compostaje la actividad microbiana produce un incremento en la temperatura atribuido a las oxidaciones biológicas exotérmicas; esta fase se llama termofílica y es donde ocurre la descomposición más rápida de la materia orgánica. La temperatura óptima de la descomposición termofílica es de 50 a 60 °C considerando la producción de CO₂; en algunas ocasiones la temperatura por la actividad microbiana puede alcanzar hasta 76 °C, situación no deseable, debido a que a temperaturas de 64 °C la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco es muy alta. Durante los primeros días, la temperatura se eleva entre 60 y 70 °C, posteriormente se estabiliza entre 40 y 50 °C; si la temperatura no aumenta, indica que hay un defecto en la aireación, baja relación C/N o un bajo nivel de humedad. Temperaturas elevadas, mayores de 65 °C, prolongadas, pueden ocasionar la muerte de bacterias benéficas, lo que frena la fermentación y provoca pérdidas de nitrógeno. Para sanear el material de la composta se requiere una temperatura de 60 a 65 °C; durante 2 ó 3 semanas; sin embargo si el material presenta este rango de temperatura durante 5 ó 6 semanas; es señal de una anomalía en el proceso y pudiera ocurrir un retraso en la estabilización de la composta. Cuando existen deficiencias en el proceso de aireación y mezclas no equilibradas; generalmente hay una baja temperatura.

- b. **Humedad:** La actividad biológica disminuye cuando el contenido de humedad es menor de 12%; si existe un exceso de humedad, hay descenso en la temperatura y producción de olores desagradables; cuando la circulación de oxígeno es limitada y los contenidos de humedad son del orden del 60%. la actividad microbiana disminuye; la humedad óptima se encuentra en el rango de 50 a 70%. Una deficiencia de humedad en las pilas, provoca una sensible disminución de la actividad microbiana, lo que produce que la fermentación se detenga y descienda la temperatura; un exceso de humedad, dificulta la circulación de oxígeno y provoca fermentaciones anaerobias. El mayor nivel de humedad se requiere durante la fase inicial del proceso de descomposición.
- c. **Aireación:** En el proceso de composteo, el oxígeno se requiere para el metabolismo aeróbico, ligado a la oxidación de moléculas orgánicas presentes en el material por descomponer. Por ello, generalmente se requiere incrementar la aireación por medio de volteos periódicos de las pilas; con estas acciones, además de suministrarse oxígeno, se disipa el calor producido dentro de la pila. Para determinar algunos intervalos en días, óptimos para realizar los volteos se consideran factores como la temperatura y la humedad; así han surgido algunas recomendaciones como la de realizar el primer volteo a los 22 días y posteriormente cada 7 ó cada 15 días; sin embargo, en la práctica esta actividad se realiza cuando la temperatura es cercana a los 70 °C o la humedad es mayor de 60%. Existen procesos más sofisticados que tienen aireación pasiva, la cual consta de insertar en las tubos en las pilas de composta generando aireación natural, o aireación forzada teniendo equipos de compresión que envían aire a través de tuberías colocadas en la base de las pilas a compostar.
- d. **Oxígeno:** El consumo de oxígeno es directamente proporcional a la actividad microbiana; por ello existe una relación directamente proporcional entre el oxígeno consumido y la temperatura. La mayor cantidad de

oxígeno se requiere durante la fase inicial de la descomposición, debido al crecimiento de la población microbiana, el incremento en la temperatura y la gran actividad bioquímica; durante la fase de estabilización, la demanda de oxígeno decrece.

5. Cribado (tamizado, cernido)

Esta operación separa la composta en dos partes: una primera fracción más fina que está lista para su comercialización, y otra fracción de impurezas y residuos de lenta degradación (por ejemplo, huesos). También se puede separar en tres partes: la más fina de composta lista, la mediana de biofiltro para las pilas y la gruesa como parte de la mezcla. El tamaño de la malla depende del uso final. Una medida común es de 15 mm para los finos y 50 mm para los medios.

6. Secado

Esta operación reduce la cantidad de agua en el producto final. Su principal propósito es disminuir los costos de transporte y aumentar la estabilidad biológica del producto. El secado se realiza incrementando la temperatura de la composta, ya sea con calor solar o calentando artificialmente con empleo de combustible.

7. Empacado

Acondicionamiento final para su comercialización. Protección del producto del sol y la humedad excesivos durante el transporte y el almacenamiento. Facilita el transporte y comercialización. Incluye el pesaje del producto.

1.4.1.2.- Planta de Composta Bordo Poniente

La planta de composta está ubicada en el sitio Bordo Poniente etapa IV, en el kilómetro 2.1 de la Autopista Peñón Texcoco, en la zona Federal ex lago Texcoco, Estado de México. Cuenta con más de 3.5 km² que pertenecen al Gobierno del Distrito Federal.

La planta de composta Bordo Poniente tienen una capacidad instalada de 2,000 t/d e inicio sus actividades en el año de 1988.

El principal objetivo de esta planta durante su adecuación fue reducir el volumen de residuos orgánicos que se depositan en el relleno sanitario y así alargar su vida útil. La composta que se produce se utiliza en los parques y jardines públicos de la CDMX, en las áreas verdes de escuelas públicas, y para sanear las celdas del relleno sanitario.

Actualmente el objetivo de esta planta es procesar el total de la fracción orgánica proveniente de la CDMX, prueba de esto es el incremento exponencial de toneladas procesadas: del uno de agosto de 2001 al 2003, la planta procesaba en promedio 20 toneladas por día de residuos de poda y orgánicos provenientes de mercados; para el primer cuatrimestre del 2012, el promedio de ingreso diario fue de 2 mil 427 toneladas, que comparados con el primer cuatrimestre de 2011, el aumento fue de 400%.

El Distrito Federal produce 12,740 t/d de RSU de los cuales el 44% son orgánicos (Inventario de RSU, 2012). La planta de Bordo Poniente recibe 2,900 t RO/d; la planta trata tan solo el 23% de los residuos orgánicos del DF de acuerdo a los datos obtenidos en el año 2012.

Pese a la gran inversión y proceso controlado, así como la experiencia en nuestro país, la composta solo se utiliza para las áreas verdes de las diferentes delegaciones, y no se ha logrado una comercialización formal debido a los fracasos tenidos en el producto durante las fases de prueba con diferentes productos agrícolas. A pesar de todo la Universidad Autónoma de Chapingo, validó que se logra una composta de alta calidad y esto lo demuestra la ausencia de metales pesados y patógenos así como la estabilidad y madurez del producto terminado (Secretaría de Obras y Servicios, 2013).

1.4.1.2.1.- Emisiones biogénicas en la planta de composta Bordo Poniente

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006) el proceso de compostaje puede resultar en:

- Emisiones de CH₄ a partir de la descomposición anaerobia de una fracción de la pila de composta (si no se realiza un adecuado mezclado)
- Emisiones de CO₂ y de NO_x, generados a partir de la descomposición aerobia de FORSU.
- Emisiones no biogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a partir de la colecta, selección y transporte de los residuos al sitio de compostaje.

El proceso de compostaje involucra la formación de CO₂ debido a la degradación de la FORSU, se estima que esta generación corresponde a 156 kg de CO₂ biogénico por cada tonelada de RO. (ICF consulting, 2005). La generación de CH₄ depende del mezclado de pilas, este valor presenta la mayor variación con respecto a otros gases.

En la Tabla 13 se pueden ver los factores de emisiones biogénicas debidas a un proceso aerobio de compostaje típico.

Tabla 13.- Factores de emisiones biogénicas a partir del tratamiento de FORSU mediante compostaje

Gas	kg/t RO
NO _x	0.29
CH ₄	0.00023
CO ₂	156

Fuente: Komilis & Ham, 2004

1.4.1.3.-Compostaje acelerado

El compostaje acelerado consiste en introducir materiales orgánicos en un tambor o silo donde se controla perfectamente la temperatura, la humedad y el mezclado mecánico de los materiales con el fin de acelerar el proceso de producción de composta. De esta forma la degradación aerobia realizada por microorganismos se ve beneficiada, y al tener los parámetros de control estabilizados se acelera el proceso hasta un 300%.

El compostaje en estos sistemas requiere mucho menos espacio que los montones o pilas convencionales, no lo afectan las condiciones meteorológicas y logra acelerar el proceso de descomposición sin tener que preocuparse de olores ni lixiviados.

El proceso es simple: un tambor rotatorio de acero cuyas dimensiones pueden variar en cuanto diámetro y longitud dependiendo de la carga de diseño, mezcla los materiales y mantiene controladas todas las variables que afectan a la descomposición. La entrada de desperdicios se produce a través de una tolva que tritura y transporta los residuos al interior del compostador. Durante el proceso de transformación aeróbica la temperatura puede alcanzar los 54 °C. Un motor y unos engranajes se encargan de mantener mezclados los materiales durante el proceso de compostaje. La forma de extracción puede variar, pero se obtiene composta de buena calidad a la salida.

Este proceso es muy completo, pero tiene altos costos de construcción y operación, además no existir un proveedor confiable en México, lo que incrementa los costos por el traslado y puede influir en la garantía. Además de que están limitados a la capacidad de diseño, y la mayor capacidad encontrada en compostadores comerciales oscila de 1 a 25 toneladas. Este proceso puede llegar a minimizar el tiempo de proceso obteniendo composta terminada hasta en 7 días.



Figura 12.- Sistemas de compostaje industrial
Fuente: B W Organics, Inc, 2013.

1.4.2.- PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia o metanización como la llaman algunos investigadores genera como subproducto biogás, se ha desarrollado en diferentes civilizaciones e incluye los nombres de investigadores reconocidos a nivel mundial.

En la segunda mitad del siglo XIX, se comenzó en Francia una investigación más sistemática y científica para comprender mejor el proceso de la fermentación anaerobia. El objetivo era simplemente suprimir el mal olor emitido por los conjuntos de aguas residuales. Durante sus experimentos, los investigadores descubrieron algunos de los microorganismos que hoy se conocen como esenciales para el proceso de fermentación.

A finales del siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de fermentación metánica. En estos finales del siglo XIX se construyen en el sur de China las primeras plantas de biogás, tal y como se conocen actualmente. En Europa, los primeros digestores se construyeron para obtener biogás en Gran Bretaña en 1911.

Durante las décadas de los años 20 y 30 del siglo XX, se realizan numerosas experiencias tanto a nivel de laboratorio como de plantas piloto. En muchos casos ya se utilizaban los lodos de aguas residuales como influente de los digestores.

Con motivo de la II Guerra Mundial se desarrollaron en Alemania un gran número de instalaciones de digestión anaerobia con el fin de potenciar nuevas fuentes de energía, y aunque la tecnología se extendió al resto de Europa Occidental, cuando cesaron las condiciones de escasez de combustibles sólo quedaron funcionando algunos pocos digestores en Alemania y Francia.

Alrededor de los años cuarenta del siglo pasado, en los Estados Unidos, se emplea el término de "digestión anaeróbica" como una parte del tratamiento de las aguas residuales, generando metano que es utilizado para generar electricidad para las propias plantas de depuración.

Durante los años de la década de los 60's se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir del estiércol de bovino en la India, con el doble objetivo del aprovechamiento energético, el uso y aprovechamiento del digestato.

En los países industrializados, el desarrollo de la metanización ha estado más influenciado por criterios medioambientales que los puramente energéticos, siendo un método clásico de estabilización de aguas residuales urbanas.

De hecho, hasta que se produjo la "Crisis del Petróleo" el proceso anaerobio, había sido considerado por los países industrializados como un tratamiento para reducir las altas cargas orgánicas de algunos residuos, pero sin aprovechar los lodos como fertilizantes o el metano como combustible.

La segunda oleada de construcciones de digestores tuvo lugar en los años 70 del pasado siglo, a raíz de la "Crisis del Petróleo". Pero su desarrollo se frenó por la escasa producción de metano y el elevado coste de las instalaciones a finales de los 80, agravando el problema la caída de los precios del petróleo.

Al final de los años noventa del pasado siglo, se construyeron y se implementaron numerosas plantas para el tratamiento mecánico-biológico de los residuos sólidos urbanos. La tecnología estaba basada en procesos anaerobios, incluyendo un compostaje aerobio. El proceso anaerobio se demostró ser ventajoso ya que permitió proporcionar energía considerable para reincorporar en la planta.

El uso y adaptación de esta tecnología a problemas reales, ha resultado en la generación de una amplia investigación, experimentos y trabajo en biodigestores con la tecnología mexicana. Las aplicaciones a las cuales se está enfocando es al tratamiento de los lodos primarios y secundarios resultantes de las plantas de tratamiento de agua residual con tecnología de lodos activados, lactosueros, la fracción orgánica de RSU, estiércol de diferentes animales, pulpa proveniente de la generación de jugos o concentrados, principalmente.

1.4.2.1.-Procesos Anaerobios

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o "biogás" (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca) y compuestos de difícil degradación.

El biogás contiene un alto porcentaje en metano, CH₄ (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible.

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

La digestión anaerobia puede aplicarse a diferentes tipos de biomasa como residuos ganaderos, agrícolas, aguas residuales de alta carga orgánica, entre otros.

Los beneficios asociados a la digestión anaerobia son:

- Reducción significativa de malos olores.
- Producción de energía renovable a través del aprovechamiento energético del biogás.
- Reducción de emisiones de CH₄ y CO₂, gases de efecto invernadero derivados del sistema de tratamiento actual que es liberado al ambiente, así como reducción del CO₂ derivada de la sustitución de combustibles fósiles para generación de energía.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que su contenido de agua sea alto, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La co-digestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

En la Tabla 14 se pueden ver la clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo los criterios expuestos.

Tabla 14.-Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo a diferentes criterios

Criterio	Tipo
Contenido de solidos totales en el sustrato	Digestión húmeda
	Digestión seca
Tipo de alimentación	Intermitente
	Semicontinua
	Continua
Número de fases del proceso	Una fase
	Dos fases
Temperatura del proceso (°C)	Psicrofílica (7-25)
	Mesofílica (27-37)
	Termofílica (55-60)
Configuración de los digestores	Verticales
	Horizontales

Fuente: FAO, 2011

1.4.2.2- Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea, un diagrama simplificado del proceso se puede ver en la figura 13.

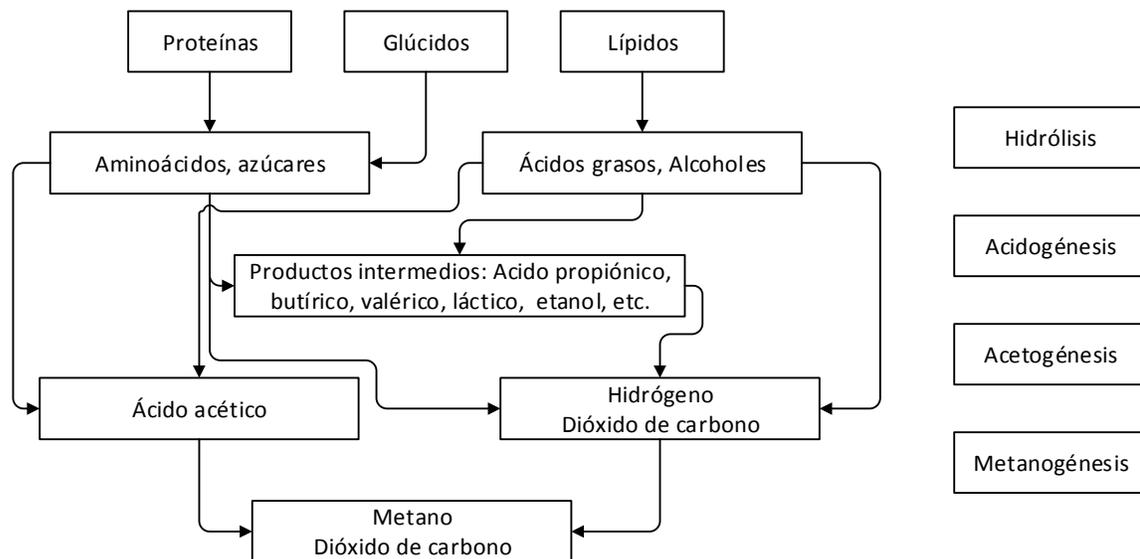


Figura 13.-Esquema simplificado de proceso anaerobio

Fuente: Varmero, 2011

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaerobia de la biomasa en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

En estas etapas intervienen cinco grandes poblaciones de microorganismos:

- i. Bacterias hidrolíticas-acidogénicas;
- ii. Bacterias acetogénicas;
- iii. Bacterias homoacetogénicas;
- iv. Bacterias metanogénicas hidrogenófilas;
- v. Bacterias metanogénicas acetoclásicas.

A continuación se describen las diferentes etapas de la digestión anaerobia:

Hidrólisis: Las cadenas largas de materia orgánica se descomponen en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios. La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada por los microorganismos a menos que se hidrolice en compuestos solubles, los cuales deben de atravesar la pared celular. La materia orgánica descompuesta por la acción de bacterias hidrolíticas anaeróbicas, transforman moléculas de gran peso molecular como grasas, proteínas y carbohidratos en compuestos simples, algunos otros compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por éstas bacterias que actúan en el exterior celular. Esta etapa puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se trata de residuos con altos contenidos de sólidos. Esta etapa depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulica (TRH), composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), tamaño de partícula, contenido de agua y pH del sustrato.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material

celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis; esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos.

Existen en esta etapa muchos microorganismos responsables de la hidrólisis, pero entre estos destacan: ***Bacteroides, Lactobacillus, Propioni-bacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megaspheera, Bifidobacterium.***

Acidogénesis: En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases las llevan a cabo un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acético mayormente). Las bacterias de este proceso son principalmente de dos clases, las bacterias anaeróbicas facultativas (pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta tóxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido y no hay una reducción significativa de DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente.

La importancia de esta etapa es la producción de alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, y que se elimina cualquier traza del oxígeno disuelto en el sistema anaerobio.

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrólisis. El género ***Clostridium***, ***Paenibacillus*** y ***Ruminococcus*** están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica. El grupo ***Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides*** representa el segundo grupo más grande de microorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición.

Acetogénesis: Algunos productos de las etapas anteriores pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y ácido acético), pero otros como etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonatados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato.

Esta reacción es endergónica pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

Metanogénesis: En esta fase un segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforman los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásicas. El otro grupo de

bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase de acetogénesis, por ello, son las que limitaran el proceso de degradación anaerobia, las que condicionaran el tiempo de retención de la biomasa en el digestor, así como la temperatura del proceso.

Ésta fase se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las Arqueas metanogénicas; las principales son: ***Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina***

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, son el biogás y un digestato que consiste en un efluente líquido estabilizado.

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. El biogás tiene propiedades específicas, a continuación en la Tabla 15 se muestran algunas.

Tabla 15.-Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo a diferentes criterios

Composición	55 - 70% metano (CH ₄) 30 - 45% dióxido de carbono (CO ₂)
Contenido energético	6.0-6.5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750 °C
Presión crítica	74-88 atm
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg/kmol

Fuente: Deublein y Steinhäuser, 2008

Para el control del proceso se deben manipular de manera eficiente las variables descritas en los siguientes incisos.

a) Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.

Diferentes tipos de biomasa se pueden utilizar en el proceso de digestión anaerobia como: residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico, otros o combinaciones de estos.

La producción de biogás es influenciada por el tipo de materia prima con la que se alimenta al digestor, la Tabla 16 muestra diferentes tipos de biomasa usada típicamente para el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 16.-Residuos orgánicos de diversos orígenes.

Residuos de origen animal	Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescado
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado, cascaras, desechos de frutas y verduras.
Residuos de origen humano	Heces, residuos de cocina, orina
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, melazas, residuos de semillas
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

En términos generales, se pueden clasificar los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO), como puede apreciarse en la Tabla 17.

Tabla 17.-Clasificación de sustratos.

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características cuantitativas
Sólido	1	Residuos orgánicos provenientes de desechos urbanos	≥20% ST 40-70 % Fracción Orgánica
		Estiércol sólido	
		Restos de cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces animales	100-150 g/l _{DQO} 5-10% ST 4-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l _{DQO} 1-2 g/l _{SS}
		Aguas residuales de mataderos	
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l _{DQO}
		Aguas negras	4-500 g/l _{DQO}

Fuente: Varnero y Arellano, 1991

b) Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

Toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida al proceso de digestión anaerobia. El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células.

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

La relación C/N óptima que debe tener el material, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1.

c) Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles.

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias

metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

d) Temperatura

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica.

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar e iniciar la desestabilización del proceso, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25 °C), mesófilos (entre 25 y 45 °C) y termófilos (entre 45 y 65 °C), como se puede apreciar en la Tabla 18, siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación, en la Tabla 18 se colocan los rangos de temperatura y tiempos de fermentación.

Tabla 18.- Rangos de temperatura

Tipo de Digestión Anaerobia	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18 °C	20-25 °C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20 °C	25-35 °C	35-45 °C	30-60 días
Thermofílica	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C	10-15 días

Fuente: Lagrange, 1979.

Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación.

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, un aumento en la eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas.

e) Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica

El TRH es parámetro se refiere al tiempo de permanencia de la biomasa en el dentro de digester hasta su descarga. No existe un criterio unificado para determinar el tiempo de retención. Esta variable depende de la temperatura del proceso, de la carga orgánica, la degradabilidad de la materia orgánica, estas propiedades de la biomasa determinan el volumen del digester.

La Velocidad de Carga Orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor.

Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digester. Por lo tanto, mientras menor sea el tiempo de retención, el tamaño del digester se reduce y también los costos.

f) Rangos de pH y alcalinidad

El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad; las bacterias acidogénicas son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH, en cuanto que los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético e H₂.

g) Nutrientes (niveles de sales)

Debido a que el proceso integra a microorganismos, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) para favorecer el proceso anaeróbico y por ende la síntesis de nueva masa celular, una de las ventajas de los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes ya que para obtener 100 g de biomasa anaeróbica producida se necesitan aproximadamente un 12% de nitrógeno.

La demanda de fósforo corresponde a 1/7 – 1/5 de la demanda de nitrógeno, se asume que un 10 % de la materia orgánica removida (DQO) durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa. Además de estos macronutrientes se han identificado nutrientes traza que son esenciales para los microorganismos anaeróbicos y que mejoran la producción de metano, los

principales son: hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de mg/L y la vitamina B12 en niveles de µg/L. Esto puede utilizarse para calcular los requerimientos de nutrimentales o si se tienen deficiencias elementales en la biomasa a ingresar dentro de los digestores.

h) Potencial REDOX

Para adecuado crecimiento de los microorganismos anaerobios el valor del potencial REDOX se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0, se debe de asegurar un ambiente fuertemente reductor para que las bacterias metanogénicas mantengan una actividad celular óptima. Cuando se cultivan bacterias metanogénicas, se incorporan agentes reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial REDOX adecuado.

i) Inhibidores de la metanogénesis

El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos.

Sustancias tales como amoníaco, ácidos grasos volátiles, hidrógeno, nitrógeno amoniacal, sulfatos y sulfuros (mayores a 50 mg/l), cationes y metales pesados metales pesados (Ni>Cu >Cr (IV) ~ Cr (III)>Pb>Zn), compuestos halogenados, cianuro y fenoles, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga.

En algunos casos, la magnitud del efecto tóxico de una de sustancia logra reducir significativamente mediante la aclimatación de la población de microorganismos. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso.

j) Agitación – Mezclado

Los objetivos buscados con la agitación son:

- I. Remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana
- II. Evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor.
- III. Distribuir de manera uniforme la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor.
- IV. Prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás. La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el TRH, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata” o “espuma” que dificulta la salida del biogás.

Dentro de los tipos de agitación que se pueden proporcionar a un digestor se distinguen 3 tipos, las cuales son:

- Mecánica: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- Hidráulica: a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de biogás: se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa

1.4.2.3.-Consumo de Materiales y Energía en la operación de una planta de digestión Anaerobia

I. Combustible

El consumo de combustibles en una planta de digestión anaerobia está relacionado básicamente con las siguientes operaciones:

- a. Transporte de residuos desde la recepción al área de acondicionamiento.*
- b. Secado del digestato. Cabe señalar que por cada tonelada de FORSU alimentada al biodigestor se generan en promedio 0.3 toneladas de composta.*
- c. Pre-tratamiento y post-tratamiento.- como combustible se pueden utilizar diésel, gasolina o generar energía eléctrica con el biogás y mover motores eléctricos, para el acondicionamiento de la biomasa y al final del proceso del biosólido estabilizado.*

II. Consumo de electricidad y calor

De acuerdo a las tecnologías actuales, "Valorga, Kompogas, Dranco, Strabag y Bekon", tienen como objetivo producir energía, lo cual las hace atractivas para ser implementadas en un sistema de gestión integral de residuos.

Al analizar los procesos, se ha estimado que una planta de digestión anaerobia a escala industrial y optimizada puede consumir del 30-50% de energía térmica y del 10-30% de energía eléctrica.

III. Generación de Biogás

La cantidad de biogás producido depende principalmente del sustrato alimentado y de las condiciones de operación; la generación oscila entre 100 a 130 Nm³ por tonelada de FORSU alimentada al proceso (García, 2006).

2.- METODOLOGÍA

2.1.-Estudio de efectividad biológica en composta proveniente de Bordo Poniente

La definición de efectividad biológica es: "Resultado conveniente que se obtiene al aplicar un insumo de nutrición vegetal" (NOM-077-FITO-2000).

La calidad de un abono orgánico se mide en términos de la cantidad de nutrientes que puede aportar, en particular nitrógeno, y el abono debe carecer de semillas de malezas, de insectos o patógenos viables y de fitotoxicidad. Las características señaladas se utilizan como parámetros de evaluación en estudios de efectividad previos a su registro y comercialización. Por tal razón se tomó como referencia a los estudios realizados por el CIIEMAD desde al año 2011 y de acuerdo a los análisis el contenido nutrimental promedio de la composta de Bordo Poniente se muestra en la Tabla 19:

Tabla 19.-Estudio a composta Bordo Poniente

Evaluación Sensorial		
Aspecto	Sólido café oscuro de granulometría fina	
Olor	Tierra húmeda	
Composición de nutrimental		
Elemento	Concentración	
Nitrógeno total	1.50-1.82	%
Fósforo extraíble	2.00-2.50	%
Potasio intercambiable	1.00-1.50	%
Calcio intercambiable	2.00-3.00	%
Magnesio intercambiable	6.30-7.58	cmol/kg
Hierro	35.73-43.63	mg/kg
Cadmio	0.27-0.33	mg/kg
Otros componentes y valores		
Potencial de hidrógeno (pH)	6.8-8.2	
Conductividad eléctrica	7.51-9.18	mhos
Materia orgánica	25.24-30.73	%
Relación Carbono-Nitrógeno	10—11	
Humedad	40-45	%
Ácidos húmicos	2.5-3.0	%
Microbiológicos		
Coliformes fecales	Menor a 1,000 unidades formadoras de colonias por gramo	
Clostridium tetani	0 unidades formadoras	
Salmonella sp	Menor a 3 unidades formadoras de colonias por gramo	

Fuente: CIIEMAD, 2011

De acuerdo al contenido nutrimental en la composta la recomendación para el uso de la composta específica en siembras agrícolas va desde un 5% hasta un 50% dependiendo de las necesidades de cada siembra cultivo y especie.

2.1.1.-Metodología

Se investigaron pruebas de diferentes fuentes, y por beneficio de costos y análisis a la composta se proponen pruebas simples que nos indiquen de manera completa la maduración de la composta. Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

A. Toma de muestra de composta

Para este caso se realizó la toma de muestra de acuerdo a la norma NADF-020 AMBT-2011, para una pila de 10-100 m³.

B. Prueba de germinación

La semilla es la portadora del potencial genético que determina la productividad del cultivo, constituye el insumo más importante para alcanzar altos rendimientos en cualquier cultivo. La calidad fisiológica de la semilla se puede conocer a través del vigor y germinación. El vigor es la fuerza con que una planta germina o emerge en condiciones de estrés, su medición es complicada. La germinación es el potencial o poder que tiene la semilla para producir plantas.

Este elemento es más fácil de medir. La prueba de germinación ayuda a determinar la capacidad que tiene la semilla para producir plantas normales y vigorosas, bajo condiciones favorables de producción.

Los resultados de esta prueba son de mucha utilidad para determinar la cantidad de semilla que utilizará en la siembra. Si de cada 20 semillas que se siembran, germinan al menos 16 y son plantas sanas y vigorosas, y se puede decir que la germinación de la semilla es buena.

Por germinación se entiende el proceso fisiológico donde la semilla produce una plántula con sus partes esenciales normales (radícula y plúmula). La capacidad de germinar una semilla está influenciada por varios factores (momento de la cosecha, ataque de plagas y enfermedades, secado y condiciones de almacenamiento).

Es una prueba que se realiza sobre una muestra de semilla que sirve para estimar el porcentaje de semillas con capacidad para germinar.

El procedimiento para la realización de este bioensayo fue la siguiente:

1. Se obtuvieron las semillas a las cuales se les realizará la prueba, en este caso se realizaron los estudios con semillas a granel compradas en la Central de Abastos del Distrito Federal
2. De las semillas adquiridas se seleccionaron 20-30 semillas al azar.
3. Se dividieron en dos diferentes grupos de acuerdo a la experimentación.
4. Se sembraron varios grupos de 5-10 semillas de acuerdo al tamaño de la semilla y cultivo. Cada grupo debe quedar por separado.
5. Se regaron a diario
6. Las plántulas comenzarán a emerger de 5 a 7 días después de sembradas.
7. Contar las plántulas que emergieron en cada uno de los grupos de cultivo.
8. El porcentaje de germinación de la semilla se verá reflejado en el número de plántulas que germinen entre el total y el resultado se multiplicará por 100%.

Con este método se comprobó la fortaleza de germinación de la semilla.

Las plántulas germinadas y sanas se utilizaran para la prueba de efectividad biológica.

C. Diseño experimental prueba de efectividad biológica

Tomando en cuenta que en la NORMA Oficial Mexicana NOM-077-FITO-2000, en la que se establecen los requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal. Esta prueba se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se realizó la mezcla específica para cada caso en % peso para cada estudio de efectividad biológica como se muestran en la Tablas 20 y 21. De acuerdo a los factores y niveles, el diseño experimental es la cantidad de composta evaluada en la presente experimentación fue de 0, 20, 30 y 50 % en base peso.

Se utilizó un diseño experimental 4^2 , 2 factores a 4 niveles, este diseño implica la realización de 16 experimentos, con su triplicado correspondiente dando un total de 64 unidades experimentales en las Tablas 20 y 21 se indican cómo se definieron las unidades experimentales.

Tabla 20.-Diseño Experimental Bordo Poniente

Factor	Nivel
Composta (A)	0% (D1)
	20% (D2)
	30% (D3)
	50% (D4)
Planta (B)	Amaranto (Am)
	Girasol (Gi)
	Jitomate (Ji)
	Sandía (Sa)

Tabla 21.-Matriz experimental

Unidad experimental	A	B
1	D1	Am
2	D2	Am
3	D3	Am
4	D4	Am
5	D1	Gi
6	D2	Gi
7	D3	Gi
8	D4	Gi
9	D1	Ji
10	D2	Ji
11	D3	Ji
12	D4	Ji
13	D1	Sa
14	D2	Sa
15	D3	Sa
16	D4	Sa

2. Las macetas utilizadas son de polietileno de alta densidad de plástico del no. 6 (2 L de capacidad), se marcó cada una de ellas y de le ingreso la respectiva cantidad de sustrato y la semilla a evaluar.
3. Durante el desarrollo de la experimentación se mantuvo el sustrato a capacidad de campo (se regó con agua cada tercer día hasta rebose y el exceso salió a través de los orificios de la maceta)
4. Se realizaron 4 repeticiones, las macetas se rotularon según la proporción de abono utilizado. Y las semillas se colocan en a una profundidad de 2-3 cm, las semillas más grandes se pueden plantar a mayor profundidad, pero que no se excedan los 5 cm.
5. Se comparó cada tercer día la altura, número de hojas, tiempo de floración (si aplica).

D. Prueba de fermentación anaeróbica

1. Para este método se debe colocar una muestra de compost con una humedad aproximada del 15-20 % en una bolsa plástica.
2. El compost maduro emitirá un suave olor a tierra al abrir la bolsa después de una semana de almacenamiento a temperatura de 20 a 30 °C. Si el compost está inmaduro se producirá fermentación anaeróbica, lo que provocará un fuerte olor.

Se le llama composta madura cuando nuestra materia orgánica tiene un color oscuro, olor a tierra de bosque, una textura granular, y no se distinguen los elementos que originales que dieron forma al compost.

E. Método de cualitativo

Color: el compost se oscurece con la madurez, llegando a un color café oscuro o negro.

2.1.2 - Selección de los cultivos para las pruebas:

De acuerdo a investigaciones realizadas, se seleccionaron cuatro cultivos que abarcan el total de analizables de acuerdo con la SAGARPA de manera general en un estudio de esta índole, tomando en cuenta diferentes características sociales, económicas y culturales de México. Las semillas fueron compradas en la Central de Abastos y de origen nacional.

Los cultivos elegidos fueron:

Amaranto: Por su importancia, conocimiento y producción en el Distrito Federal, para la generación de diferentes productos como las alegrías, palanquetas, licuados u otros. Este cultivo representará a los cereales dentro las pruebas.

Girasol enano: Una flor muy conocida, la cual se seleccionó por la facilidad de notar el crecimiento y los colores durante su desarrollo. Estas plantas representarán a los cultivos ornamentales.

Jitomate saladet: Este cultivo se seleccionó por la importancia gastronómica a nivel mundial. Representará a las hortalizas en las pruebas realizadas.

Sandía peacock: Se seleccionó como representación de los frutales, debido a que la mayoría de los frutales crecen en árboles y el objetivo de las pruebas es mostrar resultados de manera rápida y eficaz.

2.2.-Diseño de propuesta para tratamiento a gran escala de FORSU provenientes del Distrito Federal

Para este diseño se realizó una evaluación a través de los datos teóricos obtenidos de la bibliografía y a través del uso de una hoja de cálculo para el desarrollo de la ingeniería básica para la propuesta de tratamiento de FORSU a través de una planta de digestión.

Los datos obtenidos y bases de diseño ocupadas para el cálculo se provienen "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y planta de biogás, Manual práctico de diseño", publicado por la empresa AQUALIMPIA, y del libro "Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries", publicado por Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland.

Dentro de los materiales ocupados fueron computadora, software Microsoft Office 2010 y Microsoft Office 2013.

Para el cálculo de emisiones y proyecciones de precios se realizó de manera teórica de acuerdo a los datos citados.

En los siguientes temas se abordarán de manera puntual los cálculos realizados.

2.2.1.-Metodología de Cálculo. Dimensionamiento del digester

Los parámetros requeridos para calcular las dimensiones del digester son los siguientes:

Masa inicial (m_t).- Este parámetro se refiere al total de la Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos promedio que actualmente se procesa en la Planta de composta Bordo Poniente. Para el caso específico se procesan en promedio $FORSU_{DF}=2,500,000$ kg/día de orgánicos.

Masa de inertes (m_i).- Este dato fue tomado de la restando la pureza media de FORSU que ingresan actualmente a la planta de composta Bordo poniente. El valor de la pureza es del 90% (Barrón, 2013), por lo cual el valor de inertes corresponde a 10% del total de la masa inicial. Es importante tomar en cuenta este dato, ya que dentro de la instalación, selección de equipo y proceso, esta separación física de inertes impacta en cuanto a consumo energético y tiempo de operación en cada etapa. Los procesos principales son para retirar las bolsas de plástico, metales pequeños, y otros de menor proporción que algunas veces vienen revueltos con la materia orgánica.

Masa a tratar (m_b).- Esta biomasa corresponde a la cantidad de materia que se dispondrá a través del tratamiento de digestión anaerobia.

Sólidos Totales de FORSU (ST_{FORSU}).- Se refiere al contenido de masa seca, sin agua que tienen en promedio los residuos. Para el caso de FORSU el contenido promedio es de 20-75%. Para el caso del dimensionamiento se tomó en valor de $ST_{FORSU}=20\%$ (Vögeli, 2014)

Sólidos Volátiles (SV_{FORSU} contenidos en ST).- es el porcentaje de ST FORSU que los microorganismos son susceptibles de degradar y convertir en biogás. Para este caso se tomó en cuenta el valor de contenido de $SV_{FORSU}= 80\%*ST_{FORSU}$ (Vögeli, 2014).

Densidad promedio FORSU triturado (ρ_{FORSU}).- es importante conocer el volumen que ocupará la materia susceptible de aprovechamiento energético para el cálculo final del equipo principal. Para este caso la densidad de FORSU triturado se tomó de 0.96 t/m³.

Volumen a tratar (V_{FORSU}).- El espacio ocupado por la masa a tratar, es importante. para la determinación del volumen del reactor ocupado para la digestión anaerobia.

Volumen del digestor (V_{RXN}).- El volumen de trabajo depende de la carga orgánica, el tiempo de retención y el volumen diario que ingresa al reactor. Para este caso se toma en cuenta que el reactor está lleno al 75% de líquido, con un espacio para biogás del 25%.

Velocidad de Carga Orgánica (VCO).- Generalmente se trabaja con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Para el caso particular se trabajará con una $VCO_{\text{teórica}}$ de 3 kg SV_{FORSU}/m^3 . La real se recalculará de acuerdo al volumen del reactor.

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH).- Este parámetro se refiere al tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor hasta su descarga. No existe un criterio unificado para determinar el tiempo de retención: generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días. Por lo tanto, mientras menor sea el tiempo de retención el tamaño del digestor se reduce y también los costos. Para este cálculo se tomó en cuenta un TRH inicial de 30 días, pero este difirió hasta un TRH=50 días debido a que la VCO no debe sobrepasar los 4 kg SV_{FORSU}/m^3 , ya que mientras mayor sea la carga puede fallar el proceso. De manera general se puede mejorar el rendimiento del reactor una vez puesto en marcha y cuando las bacterias ya están adaptadas al sustrato.

Temperatura de operación (T_f).- para este caso se considera un proceso termofílico a 55 °C. Debido a que se propone un sistema termofílico, el TRH puede disminuir.

Temperatura de FORSU (T_i).- Se tomará la temperatura media anual del Distrito Federal (INEGI, 2015) la cual es a 16 °C.

Tasa de Producción de Gas (GPR, Gas Production Rate).- Este dato fue tomado de la bibliografía. Se utilizó para calcular la producción teórica obtenida con FORSU, para esta evaluación de acuerdo al tipo de biomasa se ocupó un factor de generación de $\gamma_{\text{FORSU}}=0.67 \text{ m}^3/\text{kg } SV_{\text{FORSU}}$ (Vögeli, 2014), este dato nos da una generación promedio de biogás por contenido de sólidos volátiles.

Concentración de Metano en biogás (V_{CH_4}).- De manera experimental se ha determinado que este tipo de sustrato genera un 53% de metano del volumen total generado. Después de la purificación el contenido de metano se incrementará para lograr obtener una concentración cercana a 60%.

De acuerdo a lo anterior se realizará de manera general el proceso para la obtención del volumen de biodigestor.

$$m_t = FORSU_{DF} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

$$m_i = m_t * 10\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

$$m_b = m_t - m_i \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

$$V_{FORSU} = m_b * \rho_{FORSU} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

$$ST_{FORSU} = m_b * 40\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

$$SV_{FORSU} = ST_{FORSU} * 50\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

$$COV_T = 3 \frac{kgST}{m^3} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

$$TRH = 30 \text{ días} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

$$V_{RXN} = \frac{V_{FORSU} * TRH}{90\%} \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

$$V_f = \frac{V_{RXN}}{75\%} \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

$$GPR = \gamma_{FORSU} * SV_{FORSU} \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$

$$V_{CH_4} = GPR * 65\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 13}$$

Los parámetros para la obtención del contenido otros componentes en el biogás son los siguientes:

$$V_{H_2S} = 5,000 \text{ ppm} = 0.5\% * GPR \dots \dots \dots \text{Ecuación 14}$$

$$m_{H_2O} = 85 \frac{g}{m^3_{\text{biogás @ } 55^\circ C, 1atm}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 15}$$

$$\rho_{\text{vaporH}_2O} = 0.596 \frac{kg}{m^3} \dots \dots \dots \text{Ecuación 16}$$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{\text{vaporH}_2O}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 17}$$

$$V_{CO_2} = GPR - V_{CH_4} - V_{H_2S} - V_{H_2O} \dots \dots \dots \text{Ecuación 18}$$

Para la generación de energía eléctrica se realizaron los siguientes cálculos:

$$\text{Producción de electricidad} = 6 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^3_{\text{biogás}}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 19}$$

$$\text{Eficiencia a transformación de energía eléctrica} = 42\% \dots\dots\dots \text{Ecuación 20}$$

$$\text{Producción de energía térmica} = 5,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3_{\text{biogás}}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 21}$$

$$\text{Eficiencia a transformación de energía térmica} = 47\% \dots\dots\dots \text{Ecuación 22}$$

$$cp_{\text{FORSU}} = 2 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 23}$$

$$Q_{\text{RXN}} = m_b * cp_{\text{FORSU}} * (T_f - T_i) \dots\dots\dots \text{Ecuación 24}$$

Para el caso de la eficacia de transformación de energía eléctrica y energía térmica se tomaron valores teórico referenciados de proveedores y fabricantes de equipos de cogeneración a biogás. Para la transformación eléctrica el valor de eficiencia es de 42% y para transformación a energía térmica el valor es de 47 % de eficiencia.

3.-RESULTADOS

3.1.-Resultados composta

El objetivo principal de las pruebas fue comprobar la calidad de la composta a través de procedimientos simples de análisis, Se inició con las la prueba de germinación, los resultados de las pruebas se pueden apreciar en la Tabla 22, con sus correspondientes fotografías en las figuras 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22.

A. Prueba de germinación

Días de duración de prueba: 6 días

Tabla 22.- Germinación de Semillas

Semilla seleccionada	Número de semillas iniciales	Número de plántulas sanas obtenidas	Número de plántulas enfermas	Número de semillas no germinadas	% de germinación sano
Amaranto	30	30	0	0	100
Girasol	20	17	0	3	85
Jitomate	30	30	0	0	100
Sandía	20	18	0	2	90



Figura 15.- Semillas de amaranto



Figura 16.- Semillas de girasol



Figura 17.- Semillas jitomate



Figura 18.- Semillas de sandía



Figura 19.- Semillas de amaranto



Figura 20.- Semillas de girasol



Figura 21.- Semillas de jitomate



Figura 22.- Semillas de sandía

B. Prueba de efectividad biológica

Para las pruebas de efectividad biológica se usó como sustrato inerte 100% de tierra negra de hoja de la marca Nutrigarden, sin lote, dos costales de 15 kg.

El sustrato fue un lote fresco de composta, tomado de acuerdo al método de muestreo. Se mezclaron la tierra inerte y la composta, todas de manera ordenada y en cantidad suficiente.

En la Tabla 23 se describen las combinaciones realizadas para sembrar los diferentes cultivos seleccionados.

Tabla 23.- Composición de la mezcla tierra-composta

Composición de la mezcla en peso				
Tierra	0%	20%	30%	50%
Composta	100%	80%	70%	50%
Total	100%	100%	100%	100%

Resultados obtenidos para amaranto

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos al final del experimento del cultivo de amaranto, de acuerdo a los parámetros medidos.

Tabla 24.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para amaranto

Amaranto	Altura final promedio (cm)	Número de hojas Final
0% composta	2.7	4
20% composta	17.25	9.5
30% composta	19.25	12
50% composta	21.75	11.75

En la Tabla 25 se muestra el análisis estadístico de altura y en la Tabla 26 el de número de hojas, de los datos obtenidos para el amaranto.

Tabla 25.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
50 vs 0	21.750	12.536	2.969	< 0.0001	Si
50 vs 10	4.500	2.594	2.969	0.095	No
50 vs 20	2.500	1.441	2.969	0.500	No
20 vs 0	19.250	11.095	2.969	< 0.0001	Si
20 vs 10	2.000	1.153	2.969	0.666	No
10 vs 0	17.250	9.942	2.969	< 0.0001	Si

Tabla 26.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
20 vs 0	12.000	8.888	2.179	< 0.0001	Si
20 vs 10	2.500	1.852	2.179	0.089	No
20 vs 50	0.250	0.185	2.179	0.856	No
50 vs 0	11.750	8.703	2.179	< 0.0001	Si
50 vs 10	2.250	1.666	2.179	0.121	No
10 vs 0	9.500	7.036	2.179	< 0.0001	Si

Los resultados del análisis estadístico no muestran diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, pero a continuación se muestran las imágenes tomadas al final del experimento. Las figuras 23, 24, 25 y 26 muestran de manera ilustrativa las diferencias entre tratamientos.



Figura 23.-Plantas de amaranto tierra 100% - composta 0% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 24.-Plantas de amaranto tierra 80% - composta 20% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 25.-Plantas de amaranto tierra 70% - composta 30% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 26.-Plantas de amaranto tierra 50% - composta 50% después de 70 días.
Fuente: Propia

Resultados obtenidos para girasol

En la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos al final del experimento del cultivo de girasol, de acuerdo a los parámetros medidos.

Tabla 27.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para girasol

Girasol	Altura final promedio (cm)	Número de hojas Final	Día de floración
0% composta	11	9	
20% composta	24	8	54
30% composta	31	11	54
50% composta	20	12	54

A continuación en la Tabla 28 se muestra el análisis estadístico de altura y en la Tabla 29 el de número de hojas, de los datos obtenidos para girasol.

Tabla 28.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
10 vs 0	20.675	2.673	2.179	0.020	Si
10 vs 50	3.500	0.452	2.179	0.659	No
10 vs 20	0.375	0.048	2.179	0.962	No
20 vs 0	20.300	2.624	2.179	0.022	Si
20 vs 50	3.125	0.404	2.179	0.693	No
50 vs 0	17.175	2.220	2.179	0.046	Si

Tabla 29.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
50 vs 0	42.000	3.834	2.179	0.002	Si
50 vs 10	13.750	1.255	2.179	0.233	No
50 vs 20	1.750	0.160	2.179	0.876	No
20 vs 0	40.250	3.675	2.179	0.003	Si
20 vs 10	12.000	1.096	2.179	0.295	No
10 vs 0	28.250	2.579	2.179	0.024	Si

Los resultados del análisis estadístico no muestran diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, pero a continuación se muestran las imágenes tomadas al final del experimento. Las figuras 27, 28, 29 y 30 muestran de manera ilustrativa las diferencias entre tratamientos.



Figura 27.-Plantas de girasol tierra 100% - composta 0% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 28.-Plantas de girasol tierra 80% - composta 20% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 29.-Plantas de girasol tierra 70% - composta 30% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 30.-Plantas de girasol tierra 50% - composta 50% después de 70 días.
Fuente: Propia

Resultados obtenidos para jitomate

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos al final del experimento del cultivo de jitomate, de acuerdo a los parámetros medidos.

Tabla 30.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para jitomate

Jitomate	Altura final promedio (cm)	Número de hojas Final	Día de floración
0% composta	10	12	
20% composta	40	45	66
30% composta	36	46	75
50% composta	33	48	75

A continuación en la Tabla 31 se muestra el análisis estadístico de altura y en la Tabla 32 el de número de hojas, de los datos obtenidos para jitomate.

Tabla 31.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
10 vs 0	20.675	2.673	2.179	0.020	Si
10 vs 50	3.500	0.452	2.179	0.659	No
10 vs 20	0.375	0.048	2.179	0.962	No
20 vs 0	20.300	2.624	2.179	0.022	Si
20 vs 50	3.125	0.404	2.179	0.693	No
50 vs 0	17.175	2.220	2.179	0.046	Si

Tabla 32.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
50 vs 0	42.000	3.834	2.179	0.002	Si
50 vs 10	13.750	1.255	2.179	0.233	No
50 vs 20	1.750	0.160	2.179	0.876	No
20 vs 0	40.250	3.675	2.179	0.003	Si
20 vs 10	12.000	1.096	2.179	0.295	No
10 vs 0	28.250	2.579	2.179	0.024	Si

Los resultados del análisis estadístico no muestran diferencia significativa entre los tratamiento aplicados, pero a continuación se muestran las imágenes tomadas al final del experimento. Las figuras 31, 32, 33 y 34 muestran de manera ilustrativa las diferencias entre tratamientos.



Figura 31.-Plantas de jitomate tierra 100% - composta 0% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 32.-Plantas de jitomate tierra 80% - composta 20% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 33.-Plantas de jitomate tierra 70% - composta 30% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 34.-Plantas de jitomate tierra 50% - composta 50% después de 70 días.
Fuente: Propia

Resultados obtenidos para Sandía

En la tabla 33 se muestran los resultados obtenidos al final del experimento del cultivo de sandía, de acuerdo a los parámetros medidos.

Tabla 33.- Comparativa de parámetros analizados al final del experimento para sandía

Sandía	Altura final promedio (cm)	Número de hojas Final
0% composta	6	5
20% composta	8	2
30% composta	3	4
50% composta	3	24

A continuación en la Tabla 34 se muestra el análisis estadístico de altura y en la Tabla 35 el de número de hojas, de los datos obtenidos para sandía.

Tabla 34.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de altura con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
0 vs 20	3.733	1.605	2.306	0.147	No
0 vs 30	1.933	0.831	2.306	0.430	No
0 vs 50	1.933	0.831	2.306	0.430	No
50 vs 20	1.800	0.774	2.306	0.461	No
50 vs 30	0.000	0.000	2.306	1.000	No
30 vs 20	1.800	0.774	2.306	0.461	No

Tabla 35.-TX / Fisher (LSD) / Análisis de diferencia entre categorías para los datos de número de hojas con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Diff	Diferencia Significativa
50 vs 20	4.000	2.910	2.306	0.020	Si
50 vs 0	0.000	0.000	2.306	1.000	No
50 vs 30	0.000	0.000	2.306	1.000	No
30 vs 20	4.000	2.910	2.306	0.020	Si
30 vs 0	0.000	0.000	2.306	1.000	No
0 vs 20	4.000	2.910	2.306	0.020	Si

Los resultados del análisis estadísticos para altura no muestran una diferencia significativa entre los tratamientos y el blanco, pero en el caso de número de hojas, si hay una diferencia significativa entre las dosis de 50% y 20%, 20% y 30%, así como 0% y 20%, aunque estos tratamientos tuvieron demasiados problemas por plagas y puede ser que la diferencia principal sea por esta razón. A continuación se muestran las imágenes tomadas al final del experimento. Las figuras 35, 36, 37 y 38 muestran de manera ilustrativa las diferencias entre tratamientos y el blanco.



Figura 35.-Plantas de sandía tierra 100% - composta 0% después de 70 días.

Fuente: Propia



Figura 36.-Plantas de sandía tierra 80% - composta 20% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 37.-Plantas de sandía tierra 70% - composta 30% después de 70 días.
Fuente: Propia



Figura 38.-Plantas de sandía tierra 50% - composta 50% después de 70 días.
Fuente: Propia

3.2.- Ingeniería básica de la propuesta para tratamiento a través de digestión Anaerobia de FORSU provenientes del Distrito Federal

La planta de tratamiento de FORSU que se podría implementar en algún espacio disponible dentro del territorio federal ocupado por la Planta de Composta Bordo Poniente, aprovecharía la capacidad energética de la biomasa contenida en estos residuos.

La propuesta para la planta de tratamiento sería implementar la tecnología de digestión anaerobia seca, a través de un proceso continuo en tanques agitados (CSRT). La fracción orgánica a tratar diariamente será calculada para la misma capacidad actual de la planta de composta Bordo Poniente, la cual es de 2,500 t/d. El proceso inicia con un pretratamiento, luego ingresa a trituración y de aquí pasará a la separación física de natas y de los más pesados a través de una sedimentación. Del proceso se retirarán inertes y natas, correspondientes al 10% del total teórico, o sea 250 t/d, los inertes se mandarán a disposición final. Las 2,250 t/d de FORSU se integraran al proceso de digestión anaerobia.

De acuerdo a la Tabla 36 se exponen algunos valores típicos de ST, SV, producción de biogás y % de metano para diferentes sustratos:

Tabla 36.- Contenido de sólidos y generación de biogás teórica.

Sustrato	%ST	SV (%ST)	Biogás (m ³ /kg _{SV})	%CH ₄
Estiércol de ganado con residuos de pienso	9	64	370	55
Estiércol de ganado sin restos de pienso	6	60	250	55
Purín de cerdo	6	60	400	60
Majada de ganado	25	60	450	55
Gallinaza seca	35	75	500	65
Estiércol de caballo sin paja o pienso	26	75	300	55
Vaca lechera estiércol	6	83	0.25-0.4	57
Vaca lechera majada	25	83	0.4	57
Vaca purín	7.5	83	0.3-0.4	57
Ternera hasta 4 meses	25	83	0.4	63
Pollinaza de pollos y gallinas	20-34	70-75	0.45-0.55	62
Pollos tiernos en jaula, gallinaza	22	75	0.35	63
Gallinas ponedoras en jaula, gallinaza	22	75	0.45	63
Pollos engorda en suelo, gallinaza seca	60	75	0.55	62
Pavos engorda en suelo gallinaza seca	60	75	0.55	62
Pollos tiernos en suelo, gallinaza seca	60	75	0.55	62
Gallinas ponedoras en suelo, gallinaza seca	60	75	0.55	62
Agua de cervecería	0-25	70-50	0.55-0.75	60
Agua de cereales	5	63-66	0.43-0.7	50-65
Pulpas frescas	13	90	0.65-0.75	62-65

Fuente: AQUALIMPIA, 2013

Los valores teóricos que se presentan en la Tabla 37 son aquellos se eligieron para el desarrollo conceptual del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 37.- Contenido de sólidos y generación de biogás teórica.

Sustrato	%ST	SV (%ST)	Biogás (m ³ /kg _{SV})	%CH ₄
Desechos orgánicos	20	80	0.67	60

Fuente: Vögeli, 2014

En la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos de la memoria de cálculo realizada con los datos teóricos explicados en la presente tesis y de acuerdo a las ecuaciones 2 a 24.

Tabla 38.- Memoria de cálculo generación de biogás.

<i>Descripción general y unidades</i>	Valor
m_t (FORSU totales por día) [kg]	2,500,000
m_i (Inertes) [kg]	250,000
m_b (FORSU total por día a tratar) [kg]	2,250,000
m_b (FORSU total por semana a tratar) [kg]	142,350,000,000
m_b (FORSU total por 30 días a tratar) [kg]	67,500,000
m_b (FORSU total por año a tratar) [kg]	810,000,000
Contenido ST_{FORSU}	20.0%
Contenido ST_{FORSU} día [kg]	450,000.00
Contenido ST_{FORSU} semana [kg]	28,470,000,000.00
Contenido ST_{FORSU} 30 días [kg]	13,500,000.00
Contenido ST_{FORSU} año [kg]	162,000,000.00
SV contenidos en ST_{FORSU}	80%
SV_{FORSU} por día	360,000.00
SV_{FORSU} por semana	22,776,000,000.00
SV_{FORSU} por mes	10,800,000.00
SV_{FORSU} por año	129,600,000.00
Densidad promedio de FORSU triturado [t/m^3]	0.96
Volumen de FORSU al día [m^3]	2,343.75
Volumen de FORSU por semana [m^3]	16,406.25
Volumen de FORSU por 30 días [m^3]	70,312.50
Volumen de FORSU por año [m^3]	855,468.75
COV teórica [kg ST/ m^3]	3.00
COV Real [kg ST/ m^3]	2.76
Temperatura manejada [°C]	55.00
TRH [días]	50.00
Volumen del digestor [m^3]	117,188
Volumen del digestor con factor de seguridad [m^3]	130,208
Volumen del digestor con depósito de biogás [m^3]	173,611
Número de biodigestores	30
Volumen de digestores propuestos [m^3]	3,906
Altura de biodigestor	25
Diametro de biodigestor	14
Biogás producido [m^3/kg SV]	0.670
Porcentaje de degradación de biomasa	65%
GPR por día [m^3]	241,200
GPR por semana [m^3]	1,097,460
GPR producido por ciclo [m^3]	3,855,220
GPR producido por mes [m^3]	4,703,400
GPR producido por año [m^3]	57,224,700

Tabla 38 (continuación).- Memoria de cálculo generación de biogás.

Contenido en porcentaje de metano	53%
Volumen metano por día [m ³]	127,836
Volumen metano por semana [m ³]	581,654
Volumen metano por ciclo [m ³]	2,043,267
Volumen metano por mes [m ³]	2,492,802
Volumen metano por año [m ³]	30,329,091
Contenido de agua en biogás a 55 °C [g/m3 de biogás]	85
Volumen vapor de agua [m ³]	34,399
Eficiencia de remoción de agua (Trampas de vapor)	90%
Volumen de vapor de agua extraído de biogás diariamente [m ³]	30,959
Agua condensada extraída de biogás diariamente [m ³]	18,452
Contenido de H ₂ S diario [m ³]	1,206
Eficiencia de remoción de H ₂ S (Filtros de desulfuración)	97%
Remoción de H ₂ S	1,170
Gas diarios real [m ³]	209,071
Volumen de tanque de alimentación [m ³]	4,688
Digestato al día [kg]	2,052,000
Volumen de digestato por semana [kg]	142,349,802,000
Digestato por mes [kg]	67,302,000
Digestato por año [kg]	809,802,000
Producción de electricidad [KWh/m ³]	6.00
Eficiencia a transformación de energía eléctrica	42%
Producción de electricidad al día [KWh]	607,824
Producción de electricidad al día [KW]	25,326
Producción de electricidad por semana[KWh]	4,254,768
Producción de electricidad por semana[KW]	177,282
Producción de electricidad por ciclo [KWh]	14,946,392
Producción de electricidad por mes [KWh]	18,234,720
Producción de electricidad por mes [KW]	759,780
Producción de electricidad por año [KWh]	221,855,760
Producción de electricidad por año [KW]	9,243,990
Tanque de almacenamiento de gas [m ³]	80,000
Producción de energía térmica [kcal/m ³]	5,100
Eficiencia para transformación de energía térmica	47%
Producción de energía térmica al día [kcal]	501,142,669
Producción de energía térmica por semana[kcal]	3,507,998,685
Producción de energía térmica por ciclo [kcal]	12,323,098,238
Producción de energía térmica por mes [kcal]	15,034,280,079
Producción de energía térmica por año [kcal]	182,917,074,299

Tabla 38 (continuación).- Memoria de cálculo generación de biogás.

<i>cp FORSU [kcal/kg °C]</i>	2
<i>Calor necesario para elevar la Temp. De FORSU [kcal]</i>	175,500,000
Composición de Bioabono	100.00%
<i>Agua</i>	90.40%
<i>Masa seca</i>	9.60%
<i>Superficie aproximada de construcción típica [m²/MW]</i>	8,000
<i>Superficie aproximada de construcción Bordo Poniente [m²]</i>	202,608
Superficie aproximada de construcción Bordo Poniente [ha]	20.3
Composición de Biogás % volumen (antes de purificación)	100.00%
<i>Metano</i>	53.00%
<i>CO₂</i>	31.24%
<i>Hidrógeno</i>	1.00%
<i>Vapor de agua</i>	14.26%
<i>H₂S</i>	0.50%
Composición de Biogás % volumen (después de purificación)	100.00%
<i>Metano</i>	61.14%
<i>CO₂</i>	37.19%
<i>Vapor de agua</i>	1.65%
<i>H₂S</i>	0.02%

El tren de tratamiento propuesto deberá estar integrada de al menos las siguientes operaciones.

1. Zona de acceso
2. Área de pesado para determinar la masa de materia orgánica que ingresa.
3. Sistemas de separación física y rompimiento de bolsas para el cribado.
4. Equipo de trituración.
5. Sedimentador para separación de inertes (natas y fondos) y de la fracción orgánica.
6. Pre-tratamiento físico de separación de natas y pesados.
7. Pre-tratamiento químico a FORSU.
8. Cárcamo de alimentación.
9. Batería de digestores anaerobios.
10. Sistema de calentamiento de los digestores.
11. Filtro para remoción de ácido sulfhídrico.
12. Unidad de cogeneración.
13. Secado de digestato por medio de centrifuga.
14. Tratamiento de agua de recuperación.
15. Tratamiento y acondicionamiento final a digestato seco.
16. Tratamiento y acondicionamiento a inertes.
17. Distribución de biosólido estabilizado para su uso en cultivos.
18. Laboratorio e invernadero para pruebas de calidad de biosólido

Es importante señalar que procesos son necesarios para la implementación de este tipo de tecnologías, ya que sin la respectiva planeación podría generar problemas durante el desarrollo de la ingeniería a detalle o una implementación incompleta debida a la mala planeación.

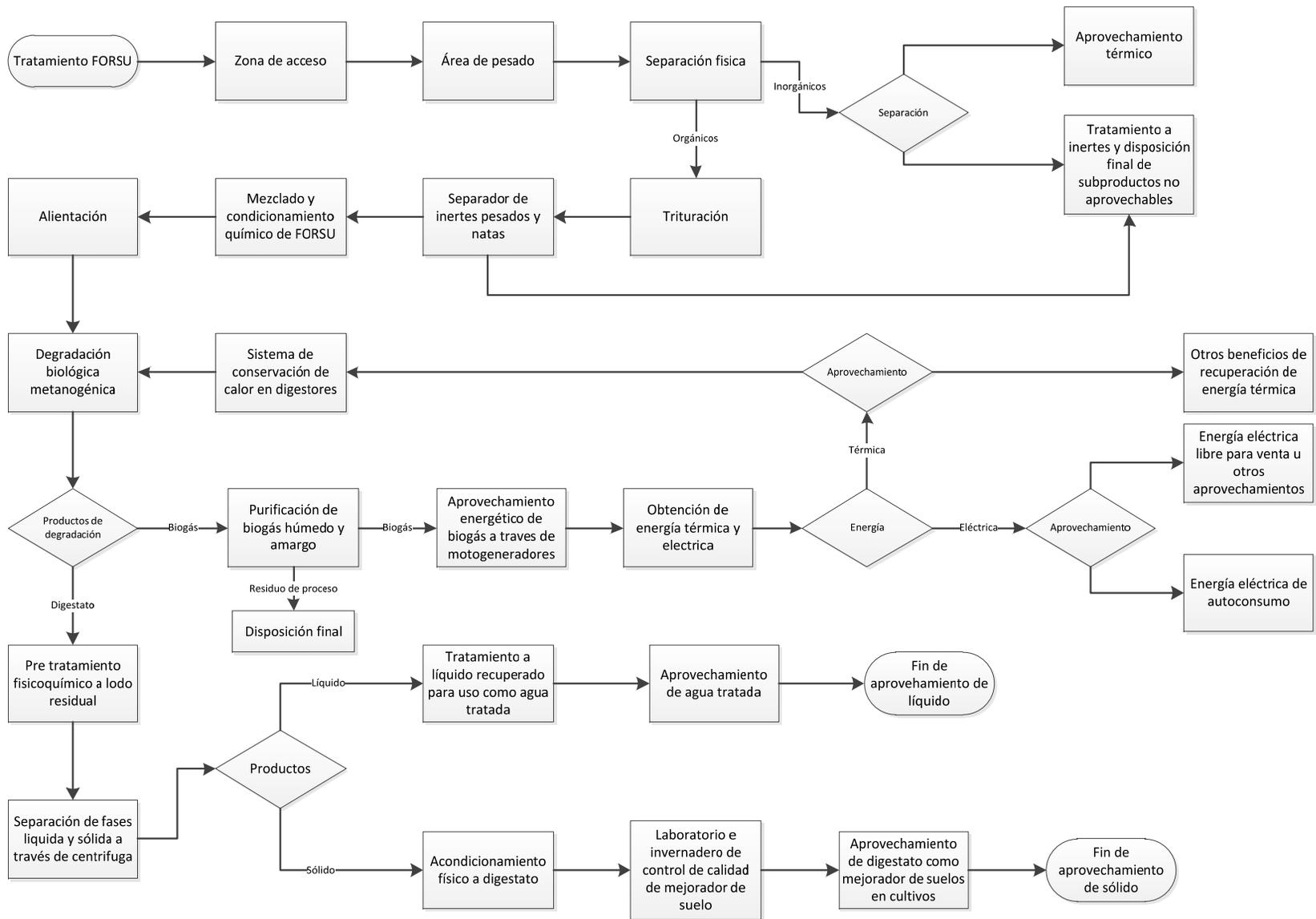


Figura 39.-Diagrama de Bloques del proceso.
Fuente: Propia.

3.2.1.-Alternativas y disponibilidad de componentes del sistema en el mercado/diseño propio

De acuerdo al diseño conceptual del tren de tratamiento y dimensionamiento de los elementos y equipos que lo integrarían, se revisó la tecnología, materiales, procedimientos constructivos, disponibles dentro y fuera del país para tener una base de referencia para el desarrollo posterior de un proyecto ejecutivo, en la Tabla 39 se muestra la evaluación.

Tabla 39.- Alternativas y disponibilidad de componentes del sistema en el mercado/diseño propio

Concepto.	Procedencia.
Obra civil	
Trabajos Preliminares.	Nacional.
Pre-tratamientos físicos	Nacional.
Pre-tratamientos químicos	Nacional.
Biodigestores.	Nacional.
Purificación.	Nacional.
Sistema de calentamiento.	Nacional.
Cogeneración eléctrica.	Nacional.
Subestación.	Nacional.
Edificación Centrifugas	Nacional.
Sistema de tratamiento agua.	Nacional.
Obras civiles complementarias.	Nacional.
Equipamiento	
Recepción de Residuos.	Nacional.
Alimentación de residuos.	Nacional.
Biodigestores (medidores agitadores).	Importado.
Purificación (Biológicos).	Importado.
Sistema de calentamiento.	Nacional.
Cogeneración eléctrica.	Importado.
Subestación.	Importado.
Sistema de amortiguación.	Nacional.
Centrifugas.	Importado.
Otros	
Control y automatización de la Planta.	Nacional. Importado.

3.2.2.-Viabilidad técnica

Las estrategias de sostenibilidad en materia de residuos abogan por la búsqueda de sistemas de tratamiento que impliquen su reintroducción en las escalas productivas para minimizar el consumo de materias primas y evitar su impacto medioambiental. Estos sistemas de tratamiento deben estar orientados a favorecer la reutilización, el reciclaje y la valorización de todo o una parte del residuo.

La presente propuesta propone el diseño y construcción de un sistema para el tratamiento de FORSU mediante tecnología anaerobia. Las principales unidades que integrarán el sistema de tratamiento de FORSU están plasmadas en la Figura 39.



Figura 41.-Esquema simplificado de proceso anaerobio para FORSU

El diseño del producto final se podría realizar con un modelo a escala mayor a 10 toneladas, logrando que sea auto-sostenible energéticamente y escalar el diseño final con la información generada en prototipos escalables, cuyos resultados servirán para la concepción del modelo comercial.

El suministro de biomasa está asegurado además, la tecnología y equipos pueden ser implementados dentro de instalaciones existentes de Bordo Poniente, y se obtienen los siguientes beneficios:

1. Se obtiene un biocombustible con grandes perspectivas para el futuro.
2. La generación de digestato, producto que puede ser estabilizado y dar uso como mejorador de suelo.

El desarrollo del presente proyecto es una inversión rentable, considerando la crisis energética y económica actual con el alza de precios de los combustibles derivados de petróleo y además del costo que tiene el tratamiento y la correcta disposición de FORSU Ciudad de México.

3.2.3.-Presupuesto de inversiones del proyecto

Como se puede observar en la Tabla 40 el monto total de las inversiones en obra civil, equipamiento, estudios preliminares, obras complementarias y proyecto de ingeniería asciende a \$2,000,000,000.00 MXN (Pesos mexicanos).

Los datos obtenidos en la tabla 43 fueron calculados con la base de datos de Noyola, 2013, específicamente para la tecnología de digestión anaerobia.

Tabla 40.- inversiones necesarias para el diseño y la construcción de la planta

<i>Tecnología</i>	Capacidad de Planta (t/d)	Costo de Inversión (pesos)	Planificación y puesta en marcha (meses)
<i>Digestión Anaerobia</i>	100	80,000,000.00	24
<i>Bordo Poniente</i>	2,500	2,000,000,000.00	60
<i>Operación planta típica (precios anuales)</i>	100	13,183,500.00	N/A
<i>Operación planta (Bordo Poniente)</i>	2,500	329,587,500.00	N/A

Fuente: Noyola, 2013

De acuerdo a los mismos datos se pueden obtener cifras netas teóricas para realizar un balance económico, y determinar el periodo de recuperación de una inversión para este tipo de proyectos.

3.2.4.- Beneficios económicos generados por la planta

La planta de biogás que se propone como alternativa para el aprovechamiento de FORSU, generará los siguientes subproductos:

1. Biogás, el cual se transformará en energía eléctrica para autoabastecimiento de las instalaciones y exportación de energía a la red de CFE, además de energía térmica para la misma planta de tratamiento anaerobio.
2. Agua tratada, que cumplirá con los requerimientos que dicta la NOM-003-SEMARNAT-1997. Esta servirá para el proceso aerobio complementario
3. Digestato, el cual se acondicionará a través de medios aerobios ya deshidratado para utilizarlo como mejorador de suelos, obteniendo un biosólido clase A y estabilizado para el reverdecimiento del entorno urbano y la mitigación de Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes Climáticos de Vida Corta, eliminando los malos olores actuales.

En la Tabla 44 se encuentran los volúmenes estimados que se tendrán de cada subproducto mencionado anteriormente. Al final de la Tabla 41 se encuentran estimaciones de los costos de los beneficios calculados en el presente estudio.

Tabla 41.- Beneficios supuestos de la planta de tratamiento de digestión anaerobia de FORSU

Conceptos	Magnitudes	Unidades
<i>Energía eléctrica generada por la planta de cogeneración</i>	607,824.00	kWh/d
	18,234,720.00	kWh/mes
	221,855,760.00	kWh/año
<i>Generación de agua tratada</i>	250	m ³ /d
	7,500.00	l/mes
	91,250.00	l/año
<i>Producción de mejorador de suelos</i>	1750	t/d
	52,500.00	t/mes
	638,750.00	t/año
<i>Costo actual de la energía eléctrica</i>	\$ 2.801	\$/kWh
<i>Costo actual del agua tratada en la zona de impacto</i>	\$ 20.36	\$/m ³
<i>Beneficio promedio del mejorador de suelos</i>	\$ 300.00	\$/t

Fuente: Propia

Costos de venta de planteados para la Planta de Digestión Bordo Poniente

1. Tarifa de energía eléctrica utilizada. La cuota que se tomará como referencia para el cálculo de los beneficios obtenidos por el operador de la planta será la Tarifa para servicios públicos 2014 – 2015, clase 5, con tensión media, (CFE, 2015) correspondiente a servicio general en media tensión, es decir, \$2.801 por kWh de energía intermedia. Tomando esta tarifa y el volumen de generación eléctrica especificado en la tabla 44, se estima que si la energía eléctrica se vende al precio pactado se obtendrá un beneficio económico de más de **\$621 Millones de pesos anualmente.**
2. Costo actual del agua tratada en la zona de impacto. Ya se ha mencionado que el Distrito Federal sufre un gran desabasto de agua potable, por lo que uno de los beneficios sociales y económicos importantes a considerar es la obtención de agua que puede ser distribuida a la población más vulnerable. De lo estipulado por el Artículo 173 fracción III. Agua residual tratada a nivel secundario del Código Fiscal del Distrito Federal 2015, se tiene que el costo actual es de \$20.36 por m³, que corresponde al 40% de lo estipulado en el inciso a) de la Fracción I del citado artículo por lo que el beneficio para el operador por este concepto es de más de **\$ 1.5 Millones de pesos anuales.**
3. Precio de venta de mejorador de suelos. En la Tabla 42 se presentan distintos precios de venta de mejoradores de suelos en la región central del país. Es importante mencionar que al acondicionar el digestato se obtendrá un biosólido Tipo A, con condiciones “excelentes” el cual, como lo indica la NOM-004-SEMARNAT-2002, se puede utilizar como mejorador de suelos. Este mejorador tendría una calidad similar al abono natural pues cumpliría con las condiciones de salubridad especificadas incluso por la NADF-020-AMBT-2011. Otra de las condiciones que se deberán exigir a la entidad operadora de la planta es que instale un sistema de gestión de la calidad que asegure que se cumplirán estas especificaciones y que en su momento certifique el producto ante las instancias correspondientes. Al realizar estas acciones, los precios de venta que se pueden alcanzar en ciertos mercados son de hasta \$ 26 mil pesos por tonelada, lo que le daría un importante

margen de utilidad al operador y los incentivos necesarios para que el mismo mantenga en correcto funcionamiento el sistema. De manera conservadora se estima que podrá obtener al menos **\$300.00 por cada tonelada vendida**, lo que se traduce en ingresos netos de **\$191 Millones de pesos** anuales por este concepto.

Tabla. 42.- Estudio de mercado sobre los precios de venta de distintos mejoradores de suelos

Precios de mejoradores de suelos		
Región - D.F.	\$/Ton compost	Referencia
Humus lombriz 2 kg- \$28	\$ 14,000.00	http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/humus-de-lombriz-2-kg
Abono natural 1 kg- \$26	\$ 26,000.00	http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/super-abono-natural-1kg
Fertilizante orgánico 5 kg -\$39	\$ 7,800.00	http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/fertilizante-organico-5-kg-838141p--5
Abono de borrego 5 kg -\$55	\$ 11,000.00	http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/abono-de-borrego-5-kg

Fuente: Propia

De acuerdo a los datos anteriores se estima que los beneficios económicos obtenidos por el inversor se desglosan en la Tabla 43.

Tabla 43.- Beneficios económicos

<u>Conceptos</u>	<u>Magnitudes</u>	<u>Unidades</u>	<u>Beneficio económico (pesos mexicanos)</u>
<i>Energía eléctrica generada por la planta de cogeneración</i>	221,855,760.00	kWh/año	621,417,983.76
<i>Generación de agua tratada</i>	91,250.00	l/año	1,857,850.00
<i>Producción de mejorador de suelos</i>	638,750.00	t/año	191,625,000.00
<i>Beneficios Anuales</i>			814,900,833.76
<i>Gastos de operación</i>			329,587,500.00
<i>Beneficios Reales</i>			485,313,333.76
<i>Inversión planta</i>			2,000,000,000.00
<i>Inversión total</i>			2,000,000,000.00
<i>Tiempo de recuperación de la inversión tomando en cuenta la operación de la planta al 100%</i>			7 años
<i>Costo actual de la energía eléctrica</i>	\$ 2.801	\$/kWh	
<i>Costo actual del agua tratada en la zona de impacto</i>	\$ 20.36	\$/m ³	
<i>Beneficio promedio del mejorador de suelos</i>	\$ 300.00	\$/t	

Fuente: Propia

Se realizó un estudio de pre-factibilidad, referente a la viabilidad económica del desarrollo de una planta de digestión anaerobia para el tratamiento de FORSU en Bordo Poniente, de acuerdo al presupuesto de inversión, y las proyecciones de los costos operativos, la proyección de los beneficios económicos que traería el proyecto y los análisis económicos de la TIR, VPN.

Después de restar de los beneficios económicos directos anuales los costos operativos de la operación de la planta, se obtienen flujos de caja positivos de más de \$ 485 millones de pesos anuales, los cuales servirían para amortizar la inversión inicial.

A continuación se presenta la figura 40 se muestran los flujos de caja positivos de más de \$ 485 millones de pesos anuales que generaría el proyecto para el inversionista.

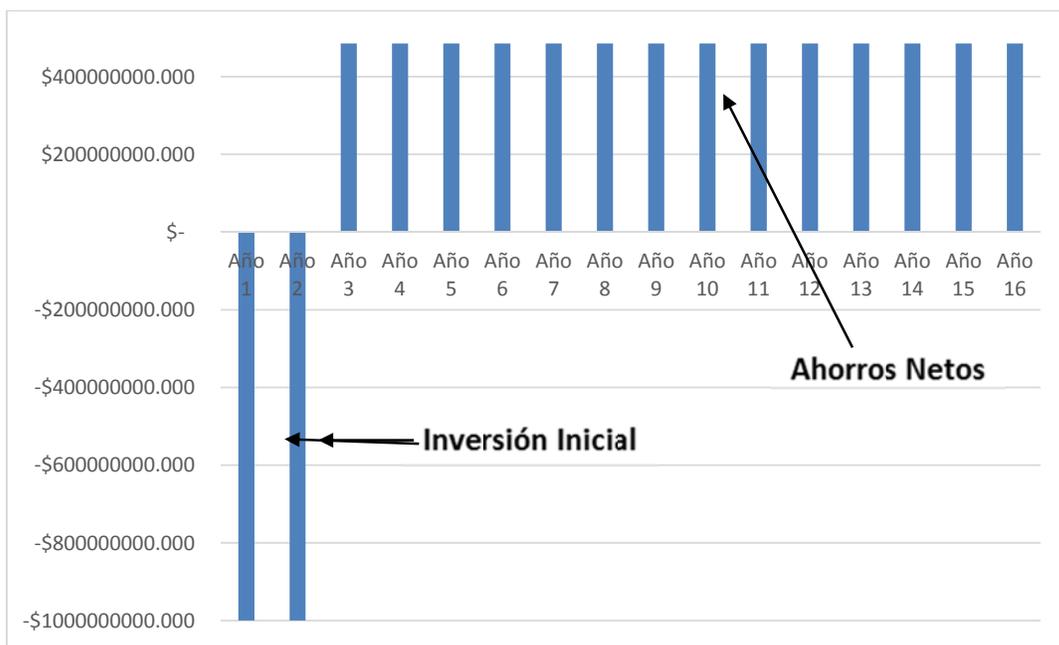


Figura 42.- Flujo de caja neto generado por el proyecto para el inversionista privado
Fuente: Propia

En la figura 41 se muestra el periodo de recuperación de la inversión para el operador privado, privado/público o público. Como se observa la recuperación de la inversión se da en el séptimo año después de realizado el proyecto ejecutivo.

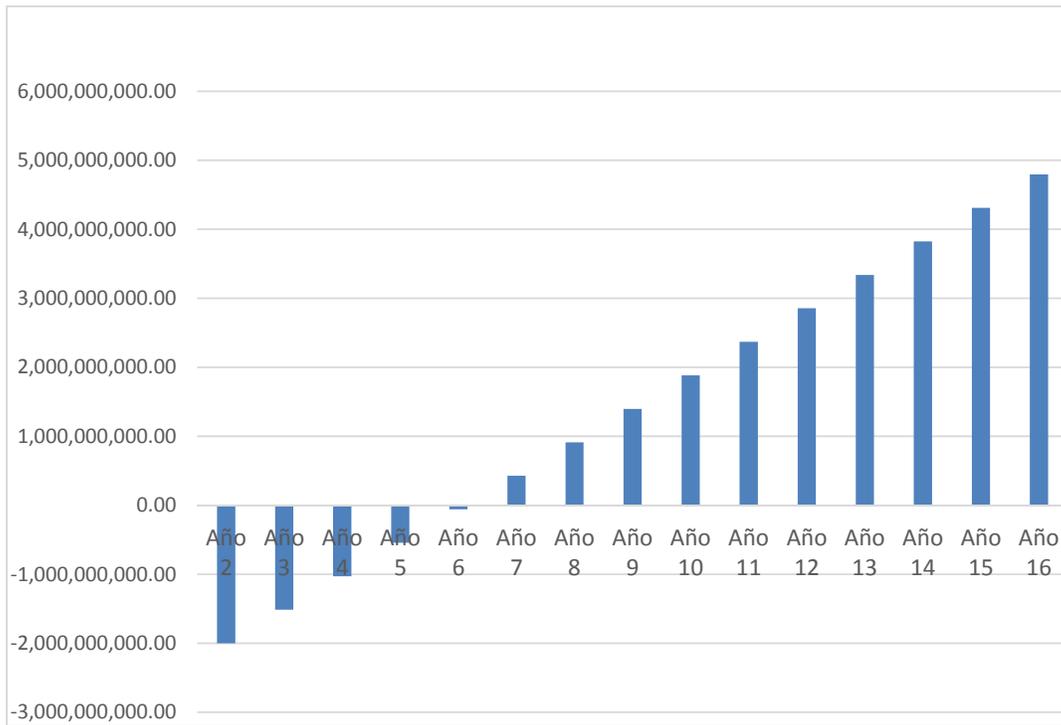


Figura 43.- Periodo de recuperación simple de la inversión
Fuente: Propia

Con base en los flujos de caja señalados en las secciones anteriores y apegándose a los “Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión” publicados por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público se calculará el VPN de la siguiente manera:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+TIR)^t} = 0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

- B_t: son los beneficios totales en el año t
- C_t: son los costos totales en el año t
- B_t-C_t: flujo neto en el año t
- n: número de años del horizonte de evaluación
- r: es la tasa social de descuento
- t: año calendario, en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones

Análisis para la inversión: Con base, en el modelo matemático presentado anteriormente, la TIR del proyecto de inversión de la construcción y operación de la planta de biogás es de 19%. Esta tasa indica el rendimiento neto del proyecto como un proyecto de inversión, que comparada con la Tasa máxima CETES a 175 días de 4.08% (Valor tomado al 27 de enero 2015) es muy superior, por lo que sería conveniente invertir en el proyecto.

Si el proyecto fuere fondeado por la Banca de Desarrollo (Ejemplo BANOBRAS, en cualquiera de sus productos financieros) para la obtención del Valor Presente Neto se tomaría como tasa social para la implementación del proyecto la TIIE de 3.37% consultada el 6 junio de 2015 + 2.9%, es decir 6.27% y se ofrecería un bono de rentabilidad adicional de 5 puntos, por lo que la tasa social final (TREMA) que se considerará para el cálculo es de 12%.

Con estas consideraciones, el Valor Presente Neto a 15 años que genera la planta de biogás es de \$2,840,182,495.03, es decir, **el proyecto debe ser implementado.**

3.2.5-Bonos de Carbono

Los efectos de la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera son hoy en día una realidad. La tierra se está calentando por el efecto de la acumulación de estos gases producidos por el hombre en la atmósfera.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) calculó que las temperaturas medias para este siglo variarán de 1.4 a 5.8 °C, lo que conlleva a grandes y catastróficos efectos en el clima y fenómenos naturales en el planeta, por tanto la modificación no controlada de los ecosistemas y con ello escases de agua y alimento.

En el 2007 el gobierno mexicano creó la estrategia Nacional de Cambio Climático por parte de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático de la SEMARNAT y dentro de las acciones que se impulsan están mejorar la eficiencia energética, reducir la contaminación ambiental e impulsar el uso de fuentes alternativas de energía.

Una alternativa de fuente de energía alternativa técnica, ambiental y económicamente viable es el tratamiento, aprovechamiento y estabilización de FORSU. El tratamiento por digestión anaerobia produce biogás que es capturado y aprovechado energéticamente para producir energía eléctrica y térmica; el biogás está constituido en su mayor parte por metano CH₄ que de no ser capturado se liberaría libremente a la atmósfera representando una contribución importante a los Gases de Efecto Invernadero (GEI), ya que el mismo tiene un potencial 34 veces más dañino que el CO₂ (IPCC, 2014).

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones liberadas al medio ambiente y fue propuesto por el protocolo de Kioto (2005) para la reducción de emisiones de GEI causantes del calentamiento global. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un instrumento de mercado que puede ser financiado por países de economías sólidas quienes fungen como compradores de bonos de carbono. A cambio de la reducción de GEI los países en vías de desarrollo reciben Certificados de Reducción de Emisiones (CER).

La reducción de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente (tCO_{2e}) y se traducen en CER's, con lo que un CER es una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera y puede ser comercializado. Los pasos a seguir para lograr el registro y venta de CER's es el que sigue:

1. Selección y diseño del proyecto para reducir GEI.
2. Validación y registro del proyecto por parte de la autoridad nacional Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
3. Operación, monitoreo y cuantificación.
4. Verificación y certificación de la metodología por parte de autoridades de la ONU.
5. Cumplimiento y cálculo de verificación para extensión de los certificados y su posible venta en el mercado,

De acuerdo a los datos de emisiones por el tipo de tratamiento actual del tipo aerobio comparado con el tratamiento anaerobio se muestran los resultados de emisiones mitigadas con la propuesta de digestión anaerobia en la Tabla 44.

Tabla 44.- Bonos de Carbono

Emisiones CH ₄ generadas por el tratamiento actual de FORSU en Bordo Poniente		
FORSU por día	2,250.00	t/d
Lodos por año	821,250.00	t/año
Factor de emisión metano, proceso composteo	0.00023	kg/t RO
Metano generado por tratamiento tipo composta	188.89	kg CH ₄ /año
Factor de emisión dióxido de carbono, proceso composteo	156.00	kg/t RO
Dióxido de carbono generado por tratamiento tipo composta	128,115,000.00	kg CO ₂ /año
Factor equivalencia CH ₄ a CO ₂	34.00	Veces
Toneladas de CO ₂ emitidas por tratamiento actual de FORSU	128,121.42	t CO _{2e} /año
Proceso de Digestión Anaerobia		
Producción diaria de biogás	209,070.78	m ³ /d
Producción diaria de Metano	127,836.00	m ³ /d
Producción diaria de Metano (CH ₄)	112,751.35	t/d
Densidad Metano (CH ₄)	0.88	kg/m ³
Peso molecular Metano (CH ₄)	16.00	g/mol
Moles producidas Metano	7,046,959.50	mol/d
Producción diaria de CO ₂ digestión	77,758.67	m ³ /d
Producción diaria de CO ₂ por proceso de digestión	121.30	t CO _{2e} /d
Producción anual de CO ₂ por proceso de digestión	44,275.79	t CO _{2e} /año
Densidad CO ₂	1.56	kg/m ³
Peso molecular CO ₂	44.00	g/mol
Moles producidas de CO ₂	2,756.90	mol
Consumo Metano (aprovechamiento)	127,836.00	Nm ³ /d
Consumo Metano (aprovechamiento)	112,751.35	t/d
Moles CH ₄ que se queman	7,046,959.50	mol
Toneladas generadas de CO ₂ debidas al aprovechamiento	310.07	t CO _{2e} /d
Toneladas generadas de CO ₂ debidas al aprovechamiento	113,174.17	t CO _{2e} /año
Aprovechamiento del biogás		
Potencia eléctrica ocupada	25,326.00	kW/d
Energía eléctrica ocupada	607,824.00	kWh/d
Factor de emisión de electricidad producida con combustibles fósiles	0.50	t/MWh
CO ₂ equivalente	303.85	t/d
Ahorro total anual equivalente de emisiones energía producida	110,905.69	t CO _{2e} /año
Mitigación de emisiones anuales		
Emisiones actuales por disposición de FORSU	128,121.42	t CO _{2e} /año
Emisiones con tratamiento a FORSU	157,449.96	t CO _{2e} /año
Emisiones mitigadas con tratamiento	81,577.16	t CO _{2e} /año

Fuente: Propia

Para calcular las misiones mitigadas se realiza la operación aceptada:

Emisiones mitigadas con tratamiento= Emisiones actuales por disposición de FORSU- Emisiones con tratamiento a FORSU+ Ahorro total anual equivalente de emisiones energía producida

De acuerdo a los resultados calculados el proyecto tiene el potencial para ser acreedor a estos beneficios, y disminuiría el tiempo de recuperación de la inversión.

Cabe señalar que las emisiones mitigadas con el tratamiento son aquellas que abarca el proyecto, por lo cual se toman en cuenta las emisiones mitigadas por el concepto de generación de energía eléctrica, ya que esta energía elimina el uso de hidrocarburos para abastecer esta cantidad de energía a través de biomasa.

3.2.6.-Impactos y beneficios

Dentro de los procesos para el tratamiento de FORSU, se propone a la digestión anaerobia, tecnología que a pesar de requerir una elevada inversión resulta muy atractiva, ya que uno de los beneficios más importantes es la producción de gas metano, que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica, otra ventaja es la reducción de la masa de la materia biodegradable, así como la producción de mejoradores de suelo y la reutilización de agua residual tratada.

Este sistema de tratamiento producirá en forma simultánea energía eléctrica y térmica. Parte de la energía eléctrica se utilizará para autoabastecimiento de la planta de tratamiento y de esta forma desplazar energía eléctrica de la red tradicional, además de la generación extra se puede ocupar para el suministro energético de industrias, iluminación u otros usos a través de la red eléctrica. La energía térmica servirá para mantener el proceso a temperatura mesofílica a 35 °C o a temperatura termofílica de 55 °C dependiendo del diseño, tecnología y recursos.

Dentro de los principales beneficios que tiene una planta de digestión para el adecuado tratamiento de FORSU en el DF se encuentran los siguientes

- Mejora tecnológica de la gestión actual de los residuos.
- Generación de empleos y mano de obra mexicana.
- Disminución de GEI debido al tratamiento y uso del potencial energético de la biomasa obtenido con el proceso de digestión anaerobia comparado contra el proceso aerobio actual de composteo en pilas.

- Obtención de energía renovable a través de la generación de biogás.
- Generación de un biosólido estabilizado que podría cumplir con las características Clase A de la NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- Mejora a la calidad del mejorador de suelos o biosólido estabilizado comparada con la calidad de la composta actual.

4.-DISCUSIÓN

En cuanto a las pruebas de efectividad biológica realizadas as tendencias y crecimiento de las plantas durante el tiempo de duración de la experimentación se muestran a continuación a través de las figuras 42 para amaranto, 43 y 44 para girasol, 45 para jitomate y 46 para sandía. Para los diferentes cultivos, se nota que la diferencia entre los tratamientos y la ausencia de tratamiento es significativa. Las mediciones realizadas durante el transcurso del experimento siguen la tendencia mostrada en los gráficos, por lo cual se ilustra el comportamiento con el más representativo.

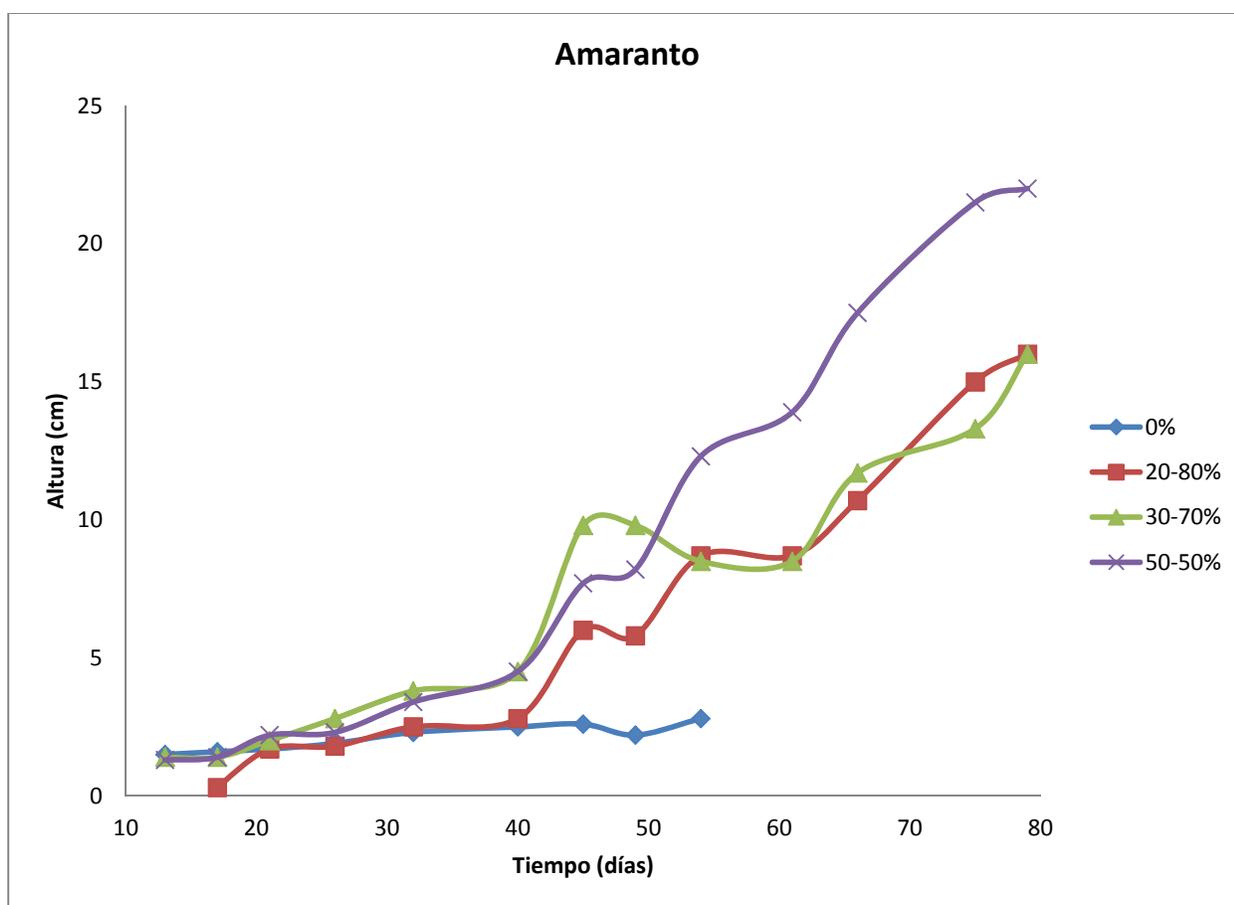


Figura 44.- Comportamiento de semillas de amaranto

En cuanto al amaranto se nota gráficamente la diferencia que hubo entre tratamientos, aunque no haya diferencia estadística significativa entre los datos, al comparar las fotos de los tratamientos en éste caso se nota que el mejor tratamiento es el de 50% composta-50% tierra, notándose que no hubo

realmente una diferencia entre los tratamientos donde se agregó composta en una relación de 20% y 30%.

Este cultivo fue bastante sencillo y a pesar de las plagas es muy resistente. Cabe señalar que en este caso se plantaron el mismo número de semillas en cada maceta.

Para el caso del girasol se nota que el mejor tratamiento es el equiparado a 30% composta y 70% tierra. El girasol es una planta fácil de cuidar y que se nota la vitalidad y entereza desde que es una plántula.

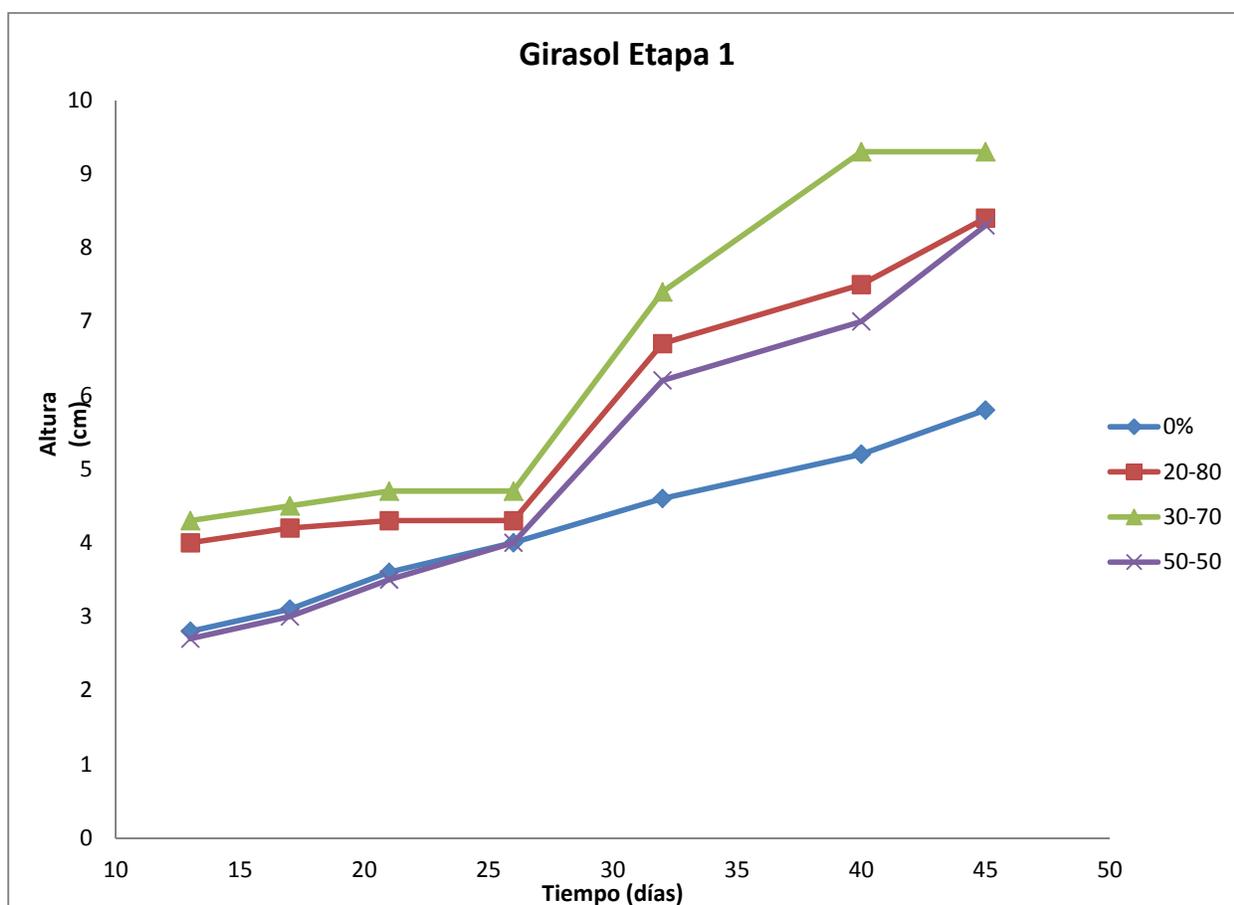


Figura 45.- Comportamiento de semillas de girasol

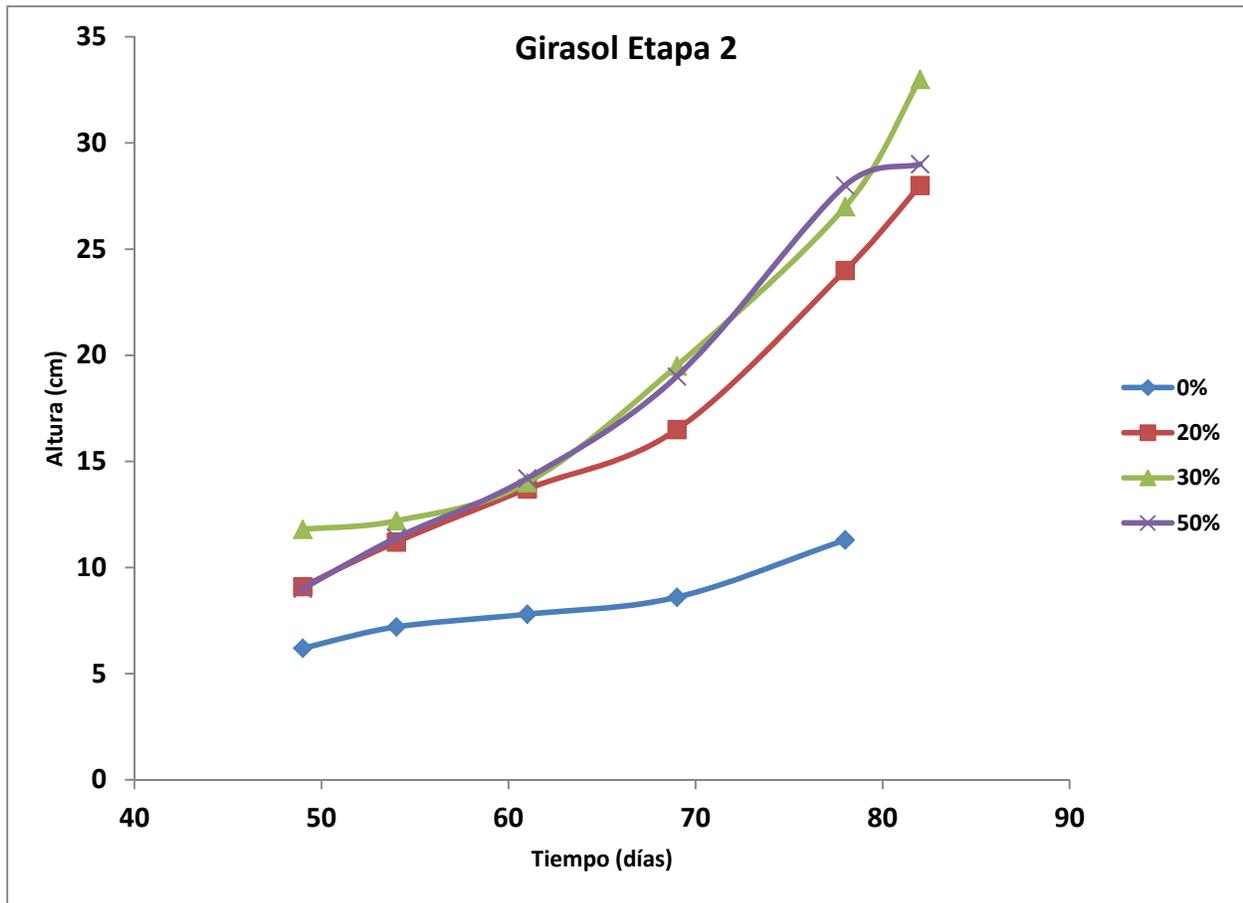


Figura 46.- Comportamiento de semillas de girasol

En este caso un exceso de nutrientes o falta de los mismos, tienen efectos negativos sobre la planta. Durante la etapa de floración tuvo una sobre población de insectos, aunque el color amarillo de las flores con tratamiento era muy brillante. Este cultivo se dividió en dos partes debido al crecimiento y altura de las plantas.

En cuanto al jitomate las semillas y la planta se adaptan a variados climas, aunque la atacan todo tipo de plagas. Durante la floración y la generación de frutos fue atacada por innumerables plagas. El crecimiento es rápido y se notan los resultados en corto tiempo.

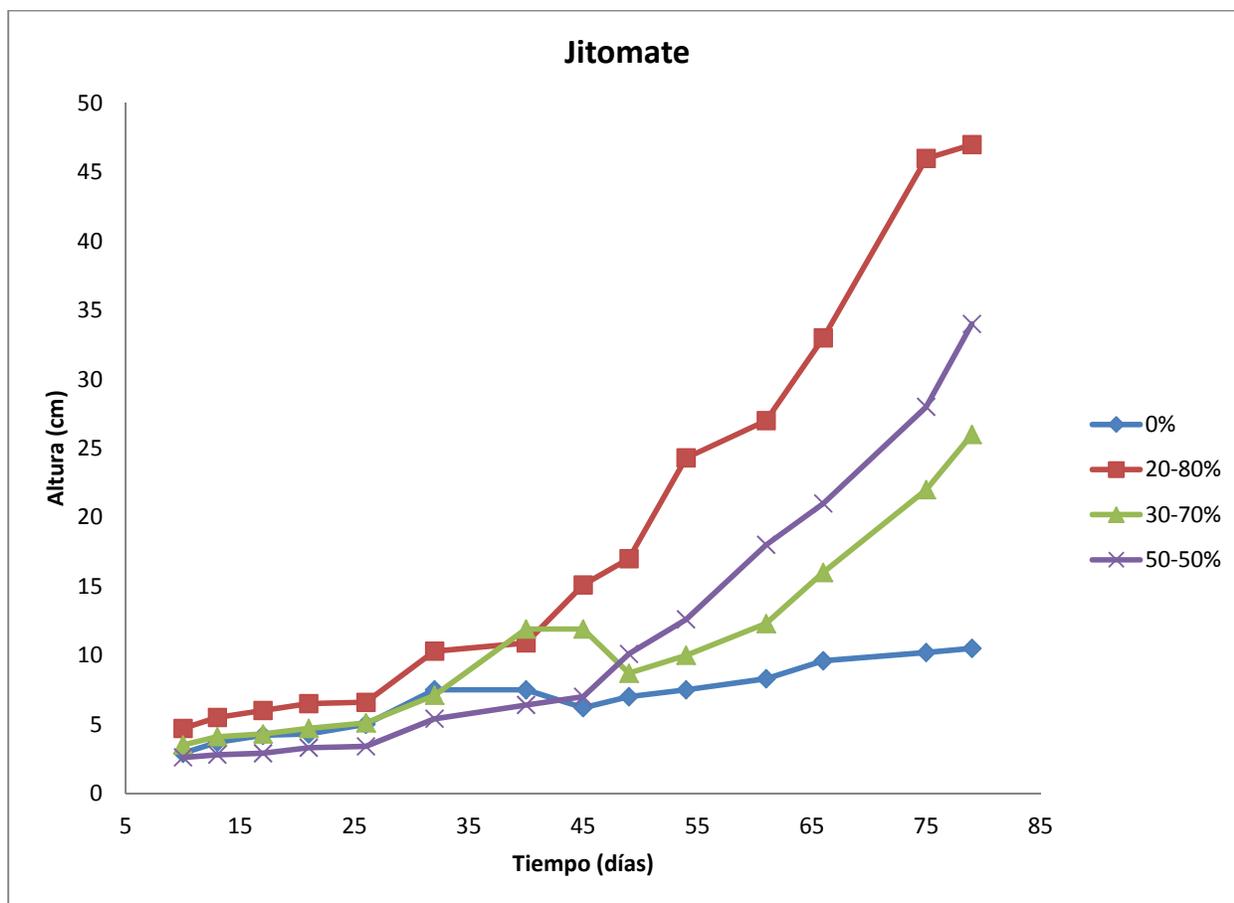


Figura 47.-Datos experimentales pruebas con jitomate

Para el jitomate el mejor tratamiento fue el de 20% composta y 80% tierra, las plantas como se muestra en la figura 45 fueron las de mayor crecimiento y a pesar de las plagas son muy resistentes.

En el caso de la sandía es un cultivo muy difícil, la germinación es sencilla, pero es atacada por toda clase de plagas y no es adaptable a las condiciones ambientales.

Este cultivo tuvo un crecimiento continuo hasta que fue atacada e impacto de manera negativa en su crecimiento y la salud. En este caso se tuvieron errores por los insectos y la falta de experiencia, aunque a pesar de todo la que tuvo mejor resistencia fue el tratamiento 50% composta-50% tierra como se muestra en la figura 46.

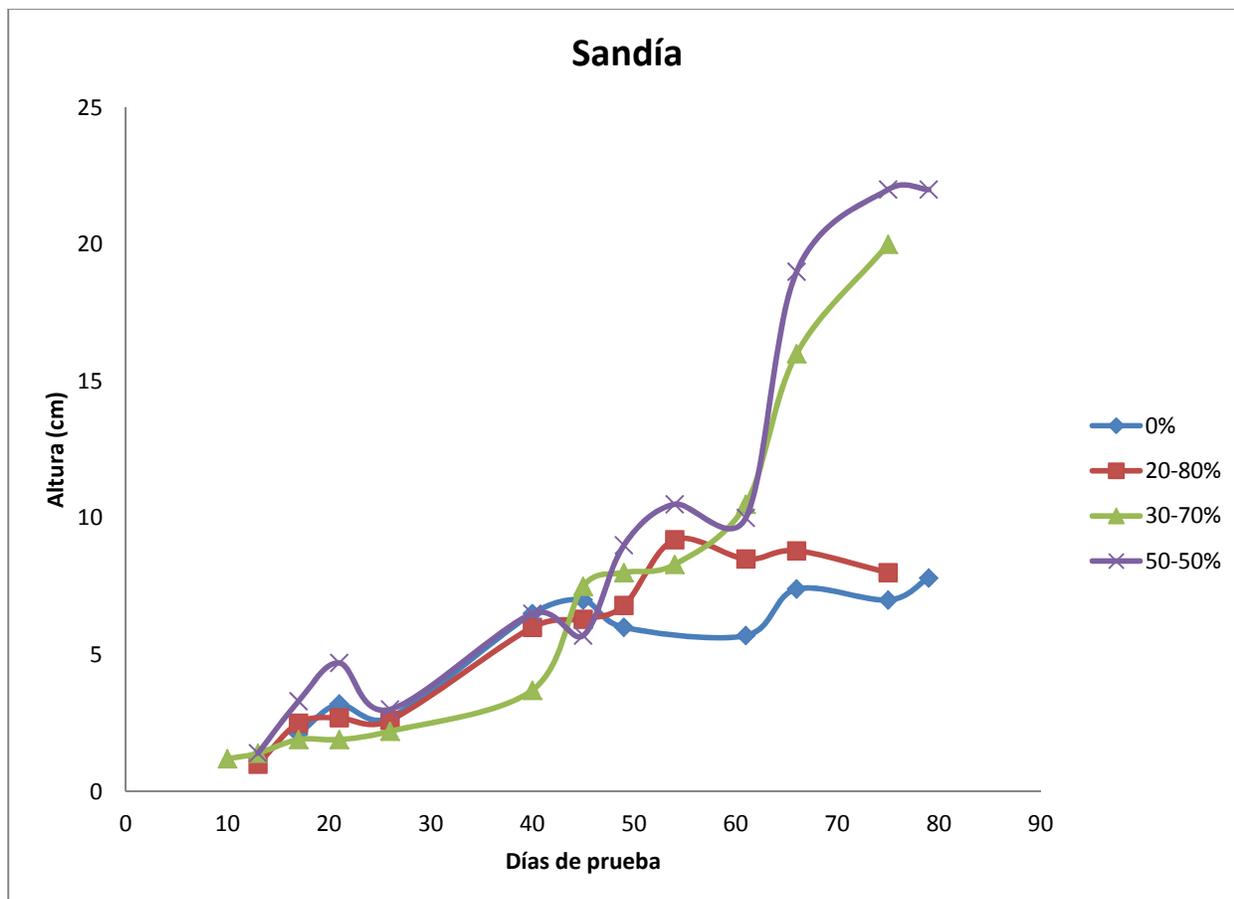


Figura 48.-Datos experimentales pruebas con sandía

De acuerdo a los las características cualitativas y variables determinadas se demuestra que la composta es un nutriente vegetal de buena calidad que mejora la salud y su aplicación resulta benéfica para el crecimiento de los diferentes cultivos. Las dosis se deberán determinar de acuerdo a las necesidades particulares de cada planta, hortaliza, árbol o vegetal en el cual se aplique; tomando en consideración un control integral de plagas. Para dosis específicas en

cultivos seleccionados se deberán de realizar pruebas de efectividad biológica complementarias, pero se manifiesta que la composta es de buena calidad y que funcionará como insumo para la producción de múltiples productos agrícolas en México.

La composta obtenida de Bordo Poniente puede llegar a ser un excelente insumo de procedencia natural y orgánica si se realizarán las pruebas de calidad correspondientes y se cumple con los requisitos técnicos de acuerdo a la norma *NADF-020-AMBT-2011*.

5.-CONCLUSIONES

De acuerdo al objetivo general al comparar la tecnología aerobia y anaerobia de tratamiento de FORSU, se concluye:

1. Beneficios ambientales.- Ambos procesos se encuentran dentro de las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero, aunque la digestión anaerobia otorga mayores beneficios debido al desplazamiento de combustibles fósiles.
2. Beneficios económicos.- La planta de composta actualmente no genera beneficios económicos debido principalmente a que no se ha realizado un plan de comercialización para el producto obtenido, lo cual implica que tiene costos operativos sin beneficios económicos. En contraste la digestión anaerobia tiene como producto final principal el biogás, que es un producto con alto valor económico alto debido a su potencial de aprovechamiento como combustible para generar energía térmica y/o eléctrica.
3. Beneficios energéticos.- La planta de composta es un consumidor neto de energía debido al equipo utilizado para el proceso, utilizando grandes cantidades de combustibles fósiles para la generación de composta; en cuanto a la digestión anaerobia a gran escala, la planta se puede autoabastecer y además generar un producto final (biogás para aprovechamiento energético) de alto valor agregado.
4. Costos de inversión.- Los costos de inversión de ambas tecnologías a gran escala son elevados debido a las medidas ambientales requeridas y al equipo especializado.
5. Costos operativos.- Actualmente para la planta de composta Bordo Poniente se calcula un costo operativo de \$413,244,000.00 pesos/año y para el caso de la planta de digestión anaerobia se proyectó un gasto corriente de \$329,587,500.00 pesos/año de acuerdo a reportes de plantas en Europa y Estados Unidos, lo que implica una reducción del 20% al gasto público.
6. Disponibilidad de la tecnología.- El proceso aerobio es el más utilizado en el país y se tienen buenas experiencias en el manejo de las plantas privadas y

gubernamentales. En cuanto a la digestión anaerobia, actualmente en el país se encuentran empresas que pueden desarrollar un proyecto ejecutivo, pero la experiencia y garantías a nivel nacional son mínimas. El proceso aerobio presenta disponibilidad en el mercado mexicano.

En cuanto a los objetivos particulares:

La composta de Bordo Poniente tiene una buena calidad y es apta para su uso en cultivos agrícolas destinados a consumo humano de acuerdo a las pruebas de efectividad biológica realizadas.

En el centro del país se puede otorgar un valor económico a la composta que se produce actualmente en Bordo Poniente, debido a sus características nutrimentales, pues existe actualmente producción agrícola extensiva en ésta área, y el producto lograría reducir gastos por fertilización química

El diseño e ingeniería básica mostrada en éste documento demuestra que es posible aplicar la tecnología de digestión anaerobia en México y que existen los conocimientos y mano de obra capacitada para la ejecución e implementación de esta obra.

Con la implementación de la tecnología de digestión anaerobia se evitaría la emisión de 81,577.16 t CO_{2e}/año considerando como línea base el proceso tratamiento actual (composteo), que impactaría de manera benéfica por la reducción de contaminación atmosférica del centro del país. Este es un proyecto que puede tener acceso a incentivos económico de acuerdo a la reducción de GEI.

La inversión en tecnología de digestión anaerobia asciende a \$2,000,000,000.00 pesos, y los beneficios ambientales, sociales y económicos son superiores a \$800,000,000.00 pesos/año; la recuperación de la inversión se da en el séptimo año después de realizado el proyecto ejecutivo lo cual lo hace una inversión atractiva debido a que el tiempo de vida del proyecto es de por lo menos 25 años.

6.-PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES

Actualmente la planta de Composta Bordo Poniente ubicada en la zona oriente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México opera por debajo de su capacidad teórica, y debido a la falta de controles de calidad durante la producción de composta, algunos de los lotes no cuentan con las características mínimas que se deberían de cumplir, cabe señalar que la composta utilizada y contaba con la calidad requerida y fue apta para la prueba de efectividad biológica en los cultivos seleccionados.

La digestión anaerobia en sus distintas facetas es sin lugar a dudas la mejor tecnología disponible. La evolución de la digestión anaerobia, ha tenido cambios desde el tipo de aprovechamiento del biocombustible hasta mejoras en la eficiencia de transformación del biogás a bioenergía, así como en los métodos de purificación logrando obtener biometano para uso automotriz como producto final.

Se debe de realizar una planeación para lograr una transición a procesos sustentables para el tratamiento de FORSU en la Ciudad de México, el costo de inversión de la tecnológica de digestión anaerobia es alta, pero los beneficios ambientales, energéticos y de mantenimiento obtenidos con éste proceso son bastante atractivos.

Como principal resultado de este documento la recomendación generalizada es implementar la digestión anaerobia como tratamiento final de la FORSU. La generación de una propuesta debe de tomar en cuenta por lo menos la siguiente información:

- Experiencia del constructor y operador
- Garantías
- Montos de inversión
- Programas de mantenimiento predictivos, preventivos y correctivos para equipos
- Capacitación técnica del personal operativo de la planta
- Elaboración de un estudio integral para el proyecto ejecutivo

Es muy probable que la construcción de la planta se lleve a cabo en fases, por lo cual la transición tecnológica será paulatina y se verán los resultados de manera secuencial.

Durante la transición de tecnología es importante considerar el uso final de los productos y subproductos obtenidos, tomando en cuenta la calidad del biogás, energía eléctrica y el biosólido estabilizado.

La construcción de una tecnología de esta índole podría ser transferida para su implementación a otros estados con problemas relacionados a la gestión de residuos orgánicos.

7.- REFERENCIAS

1. Catálogo Nacional de Costos 2014 [en línea]. Instituto Mexicano de Ingeniería de Costos. Disponible en: <https://www.imic.com.mx/catalogo_nacional_costos.php>
2. Aguilar, José Armando. "Basura". PROFECO [en línea]. Julio 2008. [fecha de consulta: 10 de junio de 2014]. Disponible en: <http://www.profeco.gob.mx/revista/publicaciones/adelantos_08/42-53%20basura%20OKMM.pdf>
3. Alonso Alonso, C., Martínez Nieto, E. y Morena Olías, J. de la (2003). *Manual para la Gestión de los Residuos Urbanos*. Ed. El Consultor. Madrid
4. Alonso, R.M.; Companioni N. y Peña E. (1997). *La materia orgánica y la producción de abonos orgánicos*. Curso de Agricultura Urbana. INIFAT-AECI.
5. Álvarez, M.; M. García y E. Treto (1995). *Los abonos verdes una alternativa natural y económica para la agricultura*. Revisión bibliográfica. Cultivos Tropicales. INCA.
6. Álvarez-Sánchez, Vázquez-Alarcón, Castellanos J. Z. y Cueto-Wong J. (2006); *Efectividad biológica de abonos orgánicos en el crecimiento de trigo*, Terra Latinoamericana 24: 261-268[en línea]. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/pdf/573/57311108013.pdf>>
7. Atencio Anaya, Pedro José (2009). *Efecto de la aplicación de diferentes dosis de Humus de Lombriz y Bayfolan* [en línea]. Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos84/efecto-aplicacion-diferentes-dosis/efecto-aplicacion-diferentes-dosis2.shtml#ixzz3bXQFx8vb>>
8. Bacht, Monedero, Ubaya y Valdé (1997). *Utilización de lodos anaeróbicos de la producción de biogás como enmienda orgánica del suelo*. IV Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo y Reunión Internacional de Rhizosfera.

9. Barranco Cruz, C.; López Serna, F.; Núñez Espinosa, F.; Gemma Cervantes, T.M. y Robles Martínez, F. (2011). *Análisis de la eficiencia de las plantas de selección de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal [en línea]*. Red iberoamericana en gestión y aprovechamiento de residuos. Revista digital: Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima pp. 117-120. Disponible en: <<http://www.redisa.uji.es/artSim2011/GestionYPoliticaAmbiental/An%C3%A1lisis%20de%20la%20eficiencia%20de%20las%20plantas%20de%20selecci%C3%B3n%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20urbanos%20del%20Distrito%20Federal.pdf>>
10. Caballero, R.; J.E. Gandarilla; D. Pérez y M. Ruiz (1997-1998). *Uso del residual de biogás como abono en una secuencia de cultivos hortícolas*. Resúmenes. IV Seminario Científico.
11. Barrón Santos, Francisco Javier (2013); *Optimización del proceso de composta generada a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos que se generan en la Ciudad de México [en línea]*. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en <<http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/13659/1/Francisco%20Javier%20Barron%20Santos.pdf>>
12. *Boletín de prensa núm. 151/13*, INEGI, 10 abril de 2013.
13. Bueno, J. L., Sastre, H. y Lavin, A. G. (1997). *Degradación del suelo y tratamiento de residuos*. Contaminación e Ingeniería Ambiental. Oviedo-España.
14. Cardona B., D.J. 1988. *Fertilización edáfica y foliar en Amaranto (Amaranthus hypochondriacus L.) tipo mercado*. Tesis de M. en C. CEDAF-CP. Montecillo, Méx.
15. Carrión, M.; E. Peña y R. González (1998). Preparación de los sustratos. Diferentes materiales para mezclar. *Compendio sobre Agricultura Urbana*. Modalidad: Organopónicos y huertos intensivos. INIFAT- UNICA.

16. Celis García, A. A., 2006. *Planta Generadora de Biogás en la Central de Abasto de la Ciudad de México, D.F.* Tesis para obtener el título de Arquitecto, Facultad de Arquitectura, UNAM.
17. Cleaner production and eco-efficiency, WBCSD - UNEP, 1998
18. Colomar Mendoza, F. J. y Gallardo Izquierdo, A.(2007). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Universidad Politécnica de Valencia. Limusa.
19. *Datos meteorológicos en el Distrito Federal* [en línea]. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIIEG), <http://www.snieg.mx/>
20. Deublein, Dieter; Steinhauser, Angelika (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources* [en línea]. Federal Republic of Germany, Wiley-VCH. Disponible en: < http://projects.pixel-online.org/chemistry/files/ed_pack/04/further03/Deublein%20D.%20Steinhauser%20A.-Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources.pdf>
21. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (2003), *Sector Project Mechanical-biological Waste Treatment*, Germany.
22. *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2006*, INE, SEMARNAT. Disponible en: < <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/495.pdf>>
23. *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012*, INECC, SEMARNAT. Disponible en: < http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf>

- 24.** *Diagnóstico Básico de Residuos de la Construcción del Estado de México, Programa de cooperación técnica México-Alemania "Gestión ambiental y manejo sustentable de recursos naturales". Componente Residuos Sólidos y Sitios Contaminados (PN2003.2462.4-003.00), GTZ & Ministerio de Cooperación y Desarrollo, México, 2007. Disponible en: <http://transparencia.edomex.gob.mx/sma/informacion/publicaciones/ARCHIVO%20A17.pdf>*
- 25.** Diccionario de la Real academia Española. Disponible en: <http://www.rae.es/>
- 26.** Eibner, R. (1986). *Foliar fertilization, importance and prospects in crop production*. Proceedings of the First International Symposium of Foliar Fertilization by Schering Agrochemical Division. Berlín. 1985.
- 27.** Environmental Protection Agency. 1996a. *A guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule*. USA.
- 28.** Epp, Christian; Rutz, Dominik; Köttner, Michael; Finsterwalder Tobias [2008]. *FITEC Guidelines for Selecting Suitable Sites for Biogas Plants*. WIP Renewable Energies. Munich. [Fecha de consulta 9 de junio de 2014]. Disponible en: http://www.big-east.eu/big-east_reports/WP6_Site_Selection_Strategy_final_20080404.pdf
- 29.** Esquer Verdugo, Rosario Alejandro (2009). *Reciclaje de los Residuos Sólidos Urbanos* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3484/RECICLAJEYTRATAMIENTO.pdf?sequence=1>
- 30.** *Factor de Emisión Eléctrico 2013* [en línea]. Programa GEI México. Disponible en: <http://www.geimexico.org/factor.html>
- 31.** Facultad de Ingeniería – UBA. Presentación: *Aplicaciones del Biogás* [en línea]. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6756/Aplicaciones%20del%20Biogas%201C%2007.pdf>

- 32.** Ferreiro Chao, A., Martínez Martínez, J., Martínez Merino, M y M. del Campo, G. *Inventario de residuos industriales*. En II jornada COTEC sobre Medio Ambiente. Madrid (1991)
- 33.** Flores Becerril, Martha Elizabeth (2011). *Análisis energético, ambiental y económico de los procesos de transformación de residuos sólidos urbanos a energía eléctrica*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería. UNAM.
- 34.** Gómez, Luis Enrique. "DF sólo recicla 11% de las miles de toneladas de basura que genera". Más por más [en línea]. 16 mayo 2012. [Fecha de consulta: 9 de junio de 2013]. Disponible en: <<http://www.maspormas.com/noticias/df/df-solo-recicla-11-de-las-miles-de-toneladas-de-basura-que-genera#sthash.PT9appAZ.rI64JU1q.dpuf>>
- 35.** Gutiérrez Castro, Lucía Mónica. *Diseño de un Sistema Solar para Suministrar Energía a un Digestor*. Tesis de maestría. Escuela Superior De Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional.
- 36.** Hernández, M. A. *Gestión administrativa y empresarial de residuos. Economía en: Residuos Urbanos e Industriales*. II jornada COTEC sobre Medio Ambiente. Madrid (1991).
- 37.** Huerta Gallegos, Nadia (2010). *Degradación Anaerobia de Residuos de Restaurantes de Ciudad Universitaria*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería. UNAM.
- 38.** Instituto Nacional de Ecología (1996), *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas*. México.
- 39.** *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2010*, Secretaria de Medio Ambiente. México.
- 40.** *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2012* [en línea], Secretaria de Medio Ambiente. México. Disponible en:<<http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/temas->

ambientales/programas-generales/residuos-solidos/inventario-residuos-solidos-2012/inventario-residuos-solidos-2012introduccion.pdf>

41. IPCC [en línea]. *Working group I – twelfth session Stockholm 23-26 September 2013*, Contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: the physical science basis; [fecha de consulta: 17 Mayo 2014]. Disponible en: <http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf>

42. JICA (1999). *Estudio sobre el manejo de Residuos Sólidos para la ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos (informe final)*. Kokusai Kogyo Co. LTD.

43. Jiménez, Rebeca y Barrera, Juan Manuel. “7 datos de la crisis de la basura del DF en Edomex”. El Universal [en línea]. 8 de enero de 2012. [fecha de consulta: 25 septiembre de 2013]. Disponible en:<http://www.eluniversaledomex.mx/cuautitlan_izcalli/7-datos-de-la-crisis-de-la-basura-del-df-en-edomex.html>

44. Komilis, D.P., Ham, R.K. (2004). *Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste*. Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, Xanthi 67100, Greece. Waste Management. Disponible en: <http://www.researchgate.net/publication/7480096_Carbon_dioxide_and_ammonia_emissions_during_composting_of_mixed_paper_yard_waste_and_food_waste>

45. Lagrange, B. (1979). *Biomethane: Principles, Techniques, Utilizations*. Edisud/Energies alternatives. Aix-ex-Provence, France.

46. *Ley de residuos sólidos del Distrito Federal*, Asamblea Legislativa del Distrito Federal, VI Legislatura. Gaceta Oficial del Distrito Federal .Martes 22 de abril de 2003. Disponible en: http://www.metro.df.gob.mx/transparencia/imagenes/fr1/normaplicable/2014/4/lrsdf_15102014.pdf

- 47.** *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*, Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 2004, Disponible en: <<http://info4.juridicas.unam.mx/ijure/fed/211/default.htm?s>>
- 48.** *Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*. Diario Oficial. Lunes 30 de diciembre de 2013. Disponible en: <http://www.shcp.gob.mx/LASHCP/MarcoJuridico/ProgramasYProyectosDeInversion/Lineamientos/costo_beneficio.pdf>
- 49.** *LINEAMIENTOS para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión* [en línea]. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Disponible en: <http://www.shcp.gob.mx/LASHCP/MarcoJuridico/ProgramasYProyectosDeInversion/Lineamientos/costo_beneficio.pdf>
- 50.** López Garrido, J., Vidal, F.M. and Pereira, J. 1975. "*Basura Urbana: recogida, eliminación y reciclaje*". Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, España.
- 51.** *Manual de formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. ISWA, UNEP, Secretaría del Convenio de Basilea, 2002.
- 52.** Martín A. (1992). Aportaciones al proceso de descomposición insitu de hojas *Quercus pirenaica* y *Pinus pinaster*. Trabajo de licenciatura. Universidad de Salamanca.
- 53.** Martínez López, Wilmer Adolfo, Gatica Campo, Maricela del Socorro (2007). *Construcción de un biodigestor para la obtención de biogás a través del estiércol de res en la hacienda San Pedro, municipio de Muhan, departamento de Chontales* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Disponible en <https://www.unan.edu.ni/dir_invest/web_judc/cur_chontales/Educ_y_Humanidades/Construccion_biodigestor_edu_huma5.pdf>

- 54.** Metcalf & Eddy Inc. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 4 rd Ed. Mc. Graw- Hill. USA.
- 55.** Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, George, Burton, Franklin L, Stensel, H. David (2002). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse Paperback*. New York: McGraw Hill
- 56.** Modificación de la *Norma Oficial Mexicana NOM-077-FITO-2000*. DIARIO OFICIAL, México, 19 de diciembre de 2011. Disponible en: <<http://www.senasica.gob.mx/?doc=713>>
- 57.** Moncayo-Romero, Gabriel (2005). *Manejo Ecológicamente compatible de las Cuencas del Tungurahua, Ecuador*. [Fecha de consulta 9 de junio de 2014]. Disponible en: < http://www.aql-biogas.com/PDF/Manual%20Biogas_AQL.pdf>
- 58.** Muñoz Gasca, Andrea Adriana (2006). *Diseño de un separador por tamaño de residuos sólidos municipales*. Tesis de Maestría. Facultad de ingeniería. UNAM.
- 59.** Muñoz Valero J. A., Ortiz Cañavate, J. Y Vazquez Minguela, J. (1987), *Procesos y sistemas de biometanización. Parámetros de operaciones*, En: *Técnicas y aplicaciones agrícolas de la biometanización*. Ed: Secretaría General Técnica–Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- 60.** NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL *NADF-020-AMBT-2011*. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, Distrito Federal, 30 de noviembre de 2012. Disponible en:<<http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/sedema/leyes-reglamentos/normas/locales/NADF-020-AMBT-2011.pdf>>
- 61.** NORMA Oficial Mexicana *NOM-004-SEMARNAT-2002*, Diario Oficial de la Federación, México, 15 de agosto de 2003. Disponible en:<http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003>

- 62.** NORMA Oficial Mexicana *NOM-077-FITO-2000*. Diario Oficial de la Federación, México, Martes 11 de abril de 2000. Disponible en: <<http://www.senasica.gob.mx/?doc=713>>
- 63.** *Norma Técnica de Residuos Sólidos-1 (NTRS-1)*, México, consultada diciembre de 2010.
- 64.** Noyola A. (1998). *Digestión anaerobia de lodos. Memorias de curso. "Digestión anaerobia de lodos y aguas residuales"*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, A.C. México.
- 65.** Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L. P. and Hernández-Padilla, F. (2012). *Typology of wastewater treatment technologies in Latin America*. CLEAN – Soil, Air, Water 40(9), pp. 926-932
- 66.** Noyola, A.,; Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L. P. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Primera Edición, Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, 2013.
- 67.** Organización Panamericana de Salud (2002). *Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales*. Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. <http://www.bvsde.ops-oms.org>
- 68.** Pérez I., C. (1988). *Fertilización foliar de macro y micronutrientes en un Andosol de la Sierra Tarasca, Michoacán*. Tesis de M. en C. CEDAF-CP. Montecillo, Méx.
- 69.** Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Consultado 14 de agosto de 2014. Gobierno de la república. México. Disponible en: <<http://pnd.gob.mx/>>
- 70.** *Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal 2011*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México. 13 de septiembre de 2010. Disponible en: <http://residuossolidos.df.gob.mx/work/sites/tdf_rs/resources/LocalContent/54/2/PGIRS.pdf>

- 71.** *Programa de separación de Residuos en el Distrito Federal.* Consultada el 10 diciembre de 2012, Gobierno del Distrito Federal, <http://www.transparenciamedioambiente.df.gob.mx/>
- 72.** *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018.* Consultado 12 de marzo de 2015. Secretaria de turismo. México- Disponible en: <http://www.sectur.gob.mx/programas/planeacion-y-politica-turistica/ordenamiento-turistico-sustentable/cambio-climatico/programa-especial-de-cambio-climatico-2014-2018/>>
- 73.** Residuos Sólidos Urbanos - Instituto Nacional de Ecología. Datos de SEDESOL, 2005.
- 74.** Robles, Johana. "GDF impulsará producción de luz en Bordo Poniente". El Universal [en línea]. 14 julio 2014. [Fecha de consulta: 7 de septiembre de 2014]. Disponible en: <http://www.agu.df.gob.mx/sintesis/index.php/gdf-impulsara-produccion-de-luz-en-bordo-poniente/>>
- 75.** Rodríguez M., Ma. de las N. 1997. *Fertilización foliar en el cultivo de tomate en condiciones de invernadero.* Tesis Doctoral. EDAF-IRENAT-CP. Montecillo, México
- 76.** Rodríguez, Yadira, "Dejará el GDF de enviar basura al Bordo Poniente a finales de 2011", W Radio [en línea], 22 de noviembre de 2011. [Fecha de consulta: 24 de enero de 2012] Disponible en: www.wradio.com.mx.
- 77.** Rojas López, María Magdalena (2013). Aspectos regulatorios de los insumos biológicos en México, [en línea]. Disponible en: <http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/2013/Noticias/Bioinsumos/Presentaciones/RojasLopez1.pdf>>
- 78.** Romm, Joe. "More Bad News For Fracking: IPCC Warns Methane Traps Much More Heat Than We Thought". Climate Progress [en línea]. 2 octubre 2013. [Fecha de consulta: 3 septiembre de 2013]. Disponible en:

<<http://thinkprogress.org/climate/2013/10/02/2708911/fracking-ipcc-methane/>>

- 79.** Salgado Caamaño, Raúl (2009). *Gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos*. Tesis de licenciatura. Escuela Superior De Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional.
- 80.** Sandoval Ruiz, Elsa Indira (2011). *Metodología para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en Asentamientos Irregulares de la Ciudad de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería. UNAM.
- 81.** SEMARNAT, 2001. *Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 82.** SEMARNAT, 2006a. *El medio ambiente en México 2005 en resumen*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 83.** SEMARNAT, 2006b. *Una propuesta para la gestión ambiental municipal de los residuos sólidos*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 84.** SEMARNAT, 2006c. *Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2006*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 85.** SEMARNAT, 2008a. *Informe de la situación del medioambiente en México*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México, D.F., México.
- 86.** SEMARNAT, 2008b. *Inventario de residuos sólidos 2008*. Publicación de la Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 87.** SEMARNAT, 2009a. *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

- 88.** SEMARNAT, 2009b. *El medio ambiente en México en resumen*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- 89.** Tabulador General de Precios Unitarios 2014 [en línea]. Gobierno del Distrito Federal, Secretaria de Obras y Servicios.
- 90.** Tafoya Rangel Felipe (1995). *Evaluación de parámetros físico-químicos para el control de proceso en el tratamiento de aguas residuales*. Tesis para obtener grado de Ingeniero Bioquímico Industrial. Universidad Autónoma Metropolitana.
- 91.** Tarifas de venta de CFE, consultada para actualización de precios el 1 de mayo de 2015, página: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp
- 92.** Tarifas por agua tratada, Código Fiscal del Distrito Federal. Asamblea Legislativa del Distrito Federal, VI Legislatura. Gaceta Oficial del Distrito Federal .Martes 29 de diciembre de 2009. Disponible en: <<http://www.aldf.gob.mx/archivo-08b937618d14b244746bc0aa61e45404.pdf>>
- 93.** Tasa de interés interbancaria de equilibrio, TIIE a 26 semanas. Banco de México. Consultada el 25 de mayo de 2015. Disponible en: <<http://www.banxico.org.mx/stdview.html?url=/portal-mercado-valores/informacion-oportuna/tasas-y-precios-de-referencia/tiie/26s/res/TasaInteres26sem.html>>
- 94.** Tchobanoglous, G., Theisen, H y Vagil, S. A. (1996). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.
- 95.** Tchobanoglous, George, Kreith, Frank (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. New York: McGraw Hill
- 96.** Tchobanoglous, George, Theisen, Hilary, Eliassen, Rolf, Clark, B. J. (1977). *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw Hill

- 97.** Tchobanoglous, George, Theisen, Hilary, Vigil Samuel (1993), *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw Hill
- 98.** Varnero Moreno, María Teresa (2011). *Manual de Biogás* [en línea], FAO, Santiago de Chile, [fecha de consulta: 9 mayo 2013]. Disponible en < <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>>
- 99.** Viveros Santos, Iván (2013). *Análisis de Ciclo de Vida de la gestión de Residuos Sólidos Orgánicos de la Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA)*. Tesis de Licenciatura. Facultad de química. UNAM.
- 100.** Vögeli Y., Lohri C. R., Gallardo A., Diener S., Zurbrügg C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland [en línea], Suiza, [fecha de consulta: 12 de diciembre de 2014]. Disponible en:< <http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/swm/dl/biowaste.pdf>>
- 101.** Weiland, P. (1997). *Co-digestion of agricultural, industrial and municipal waste*. REUR Technological Serie, Rome: FAO. (1997).
- 102.** Xavier Elías, C. *Tecnologías aplicables para el tratamiento de residuos, su valoración y la fabricación de materiales a partir de residuos*. En: Reciclaje de residuos industriales. Ed. Díaz de Santos, S.A. Madrid. (2000).