

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO (RDF) A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UNA CIUDAD MEXICANA

Rodolfo TREJO-VÁZQUEZ y Ma. Guadalupe MORALES-CERVANTES

Departamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, Apdo. Postal 57, Celaya, Gto.
38000, México.

(Recibido septiembre 1987, aceptado septiembre 1989)

RESUMEN

Se presenta un estudio experimental a nivel de laboratorio del proceso de obtención y caracterización de combustible sólido almacenable (conocido internacionalmente como RDF), logrado a partir de los residuos sólidos urbanos de una ciudad mexicana. Se analizó el efecto de las variaciones en la composición del RDF sobre algunas de sus propiedades como densidad, consistencia, contenido de cenizas, poder calorífico y tiempo mínimo de residencia en el horno para combustión total. Los resultados y conclusiones alcanzados no son solamente válidos para esta investigación, sino que permiten visualizar la sensibilidad de cualquier RDF a su composición.

ABSTRACT

An experimental study of the obtention and characterization of refuse derived fuel on a laboratory scale was carried out. Samples of RDF were prepared from mexican municipal solid wastes of different compositions. The variations of density, consistency, ash content, gross calorific value and residence time for total combustion were studied. The results and conclusions reached permit us to make inferences about the sensitivity of a given RDF versus its composition.

INTRODUCCIÓN

En el contexto sanitario y ecológico, es necesaria tanto la recolección, como la eliminación de los residuos sólidos urbanos para la protección del ambiente y es de interés general, ya que de no realizarse eficientemente pueden sobrevenir diversos problemas de salud pública, tales como: contaminación de mantos proveedores de agua potable, proliferación de fauna nociva y las enfermedades que ésta transmite, además de la afectación de la atmósfera con olores, humos y polvos, la destrucción del paisaje, etc.

En el aspecto industrial de transformación, la producción de los satisfactores que la sociedad demanda, requiere un consumo cada vez mayor de energéticos, principalmente combustibles fósiles, cuya característica común es la de ser recursos no renovables. Puesto que las reservas mundiales totales de estos se van agotando inexorablemente, es de esperarse que sus precios se incrementen cada vez más, no obstante que por lapsos cortos las tendencias se revierten debido a estrategias económicas de algunos países en el mercado internacional.

Una alternativa para conciliar los enunciados antes mencionados, consiste en aprovechar la energía térmica contenida en los residuos sólidos urbanos. Este concepto, aunado a la conveniencia de la destrucción masiva de dichos residuos, ha dado paso a la incineración con recuperación de energía, como método de disposición final.

La idea de utilizar los residuos sólidos urbanos como un recurso energético renovable (que se crea sin cesar) no es nueva en el mundo. Sin embargo, los estudios al respecto en México son escasos (Morales-Cervantes 1987).

Operativamente, el método de incineración con recuperación de energía presenta algunas dificultades, como la de ser aplicable sólo para residuos con contenidos aceptables -desde el punto de vista de la combustión- de humedad, cenizas y poder calorífico.

En numerosas ciudades del mundo, los residuos sólidos urbanos incluyen un porcentaje significativo de componentes no combustibles, tales como metales, vidrios, restos de demolición y otros, así como constituyentes con alto contenido de humedad, como la materia orgánica (desperdicios de cocina y similares), por lo que su tratamiento por incineración masiva es sumamente difícil (Álvarez 1985). En estos casos ha resultado conveniente pasar los residuos inicialmente por una etapa de selección, donde se concentran los materiales combustibles con el objeto de homogeneizar y mejorar las propiedades de combustión como el contenido de humedad, las cenizas y el poder calorífico. Los residuos sólidos previamente seleccionados se secan, reducen de tamaño y mezclan (Colon y Boesmans 1980).

Todas estas operaciones se pueden hacer manualmente o con diferentes grados de automatización y la secuencia del procedimiento también puede cambiar según el caso. El producto logrado se conoce internacionalmente como "Refuse Derived Fuel" o RDF. Después de esta transformación el material puede ser sometido a otras operaciones para lograr su presentación final en forma de pelusa, pastilla o polvo. El proceso de obtención del RDF se encuentra aún a nivel piloto y, por tanto, lejos de su optimización en cuanto a energía consumida se refiere. Entre las ventajas del RDF están la de ser un material sólido con propiedades más o menos homogéneas a la combustión y, en algunos casos, comparables a las de los combustibles fósiles más pobres.

La formación ininterrumpida de residuos sólidos urbanos y su rápida descomposición exigen continuidad en los métodos de procesamiento. En el caso de la incineración con recuperación de calor, esta circunstancia impide una sincronización adecuada entre oferta y demanda de energía térmica, por lo que una parte considerable del calor obtenido de dichos residuos se desaprovecha por no ser posible su almacenamiento. El RDF es una alternativa de solución a este problema debido a que el producto se mantiene sin descomposición durante meses pudiéndose almacenar.

El RDF prácticamente no contiene azufre, a diferencia de los combustibles fósiles convencionales, por lo que no forma SO_2 al quemarse. Sin embargo, por su contenido de plásticos, en ocasiones puede liberar durante la combustión vapores ácidos, los que deberán ser neutralizados para evitar daños al ambiente y desgaste excesivo por corrosión del incinerador.

En ciudades donde los residuos sólidos no son almacenados y recolectados por separado, ocurre que el papel, cartón y otros, al mezclarse con el resto, adquieren un grado de contaminación tan elevado que pierden su valor como materiales reciclables. Esta situación no representa dificultad en el proceso de creación de RDF.

El costo de depuración de la fracción combustible, puede compensarse con la venta de los propios componentes separados, ya que en muchas ciudades del mundo, existe demanda por metales ferrosos, no ferrosos, vidrio, etc. De este modo, se puede considerar que el RDF es un producto obtenido en forma secundaria en una planta de recuperación de ingredientes reciclables y constituye una alternativa de aprovechamiento de materiales combustibles con poco valor intrínseco, así como una manera de amortiguar las fluctuaciones en la demanda de elementos plásticos, textiles y celulósicos de reciclo.

La amplia gama en la composición de los residuos sólidos urbanos, así como en la rentabilidad de la recuperación de algunos materiales combustibles contenidos en dichos residuos, hace que el RDF sea sumamente versátil tanto en el tipo como en la proporción de sus ingredientes y, por tanto, en sus propiedades.

La secuencia de operaciones para elaborar RDF, así como las especificaciones de ingreso y salida en cada una de ellas, están en función de las características de los residuos sólidos entrantes y del producto deseado. Por esta razón, para originar RDF de los residuos sólidos urbanos de una ciudad mexicana, es preciso estudiarlos primero, así como la demanda local de materiales plásticos, textiles y celulósicos recuperados de dichos residuos. Posteriormente, caracterizar el resultado que se puede conseguir de ellos como combustible sólido y en seguida determinar las condiciones de operación más adecuadas para lograr un RDF dentro de especificaciones para un uso predeterminado.

El presente trabajo es un estudio experimental a nivel de laboratorio sobre el proceso de obtención y caracterización del RDF en general y de cómo pueden ajustarse

las condiciones de operación para conseguir de los residuos sólidos urbanos de una ciudad en particular, un producto con características específicas.

Aunque actualmente la utilización de este combustible en México parece ser muy limitada, esto podría deberse, en parte, al desconocimiento de las posibilidades de esta tecnología, las cuales han empezado a explorarse ya en otros países, no obstante, que en ellos las aplicaciones carezcan también de viabilidad inmediata (Trejo-Vázquez 1987).

Las áreas del uso potencial más importante del RDF en México, así como en otros países, son las industrias con procesos intensos de consumo de energía, que no requieran de temperaturas muy elevadas y que puedan admitir un combustible sólido con alto contenido de cenizas, respecto de los combustibles fósiles convencionales. Tales son los casos de las fábricas cementera, ladrillera, azucarera y similares (Colin y Chatterton 1985, Colon y Boesmans 1980).

Es probable que el RDF, combinado con otros combustibles sólidos de mayor poder calorífico, como el residuo final de la destilación del petróleo, pueda ser aprovechado también en industrias como las de vidrio, cerámica y fundiciones metálicas.

En países con climas fríos, es posible aplicar el RDF para lograr clima artificial. En donde existen equipos aptos para la combustión de carbón, se puede aprovechar el RDF para sustituir total o parcialmente a éste en la generación de vapor y usos similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Residuos sólidos urbanos utilizados

En este estudio se trabajó con los residuos sólidos urbanos de Cortazar, Gto., obtenidos por colectas de la ciudad previamente sectorizada (Trejo-Vázquez 1988).

Los muestreos se realizaron durante 4 semanas consecutivas, lográndose un total de 80 muestras domiciliarias cuya composición promedio exhibió 28.22 % de materiales combustibles con base húmeda, sin incluir en éstos a la materia orgánica putrescible proveniente de desperdicios de comida y similares.

De la fracción combustible descrita, se descartaron los componentes de difícil combustión y alto contenido de cenizas, así como aquellos que se encontraron en muy pequeñas cantidades. Los materiales restantes, fueron considerados precursores o componentes del RDF (Tabla I), en tanto que en la Tabla II aparece la proporción de estos precursores, una vez que el material está libre del resto de los componentes de los residuos sólidos estudiados.

Secuencia del proceso

Se incluyeron las operaciones de separación, secado, trituración y compresión para

TABLA I. COMPOSICIÓN PROMEDIO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE CORTAZAR, GTO. DESTACANDO LOS MATERIALES PRECURSORES DEL RDF

<i>Componente</i>	<i>Promedio</i> %
Papel	9.78
Cartón	6.22
Plástico película (Incluye celofán, polietileno flexible y similares)	5.44
Plástico rígido (Incluye PVC)	2.98
Trapo (Incluye fibras sintéticas y cordeles)	1.61
Otros	73.97
TOTAL	100.00

TABLA II. COMPOSICIÓN PROMEDIO DE LOS PROCURSORES DEL RDF EN ESTE ESTUDIO, EN AUSENCIA DEL RESTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

<i>Componente</i>	<i>Promedio</i> %
Papel	38
Cartón	24
Plástico película	21
Plástico rígido	11
Trapo	6
TOTAL	100

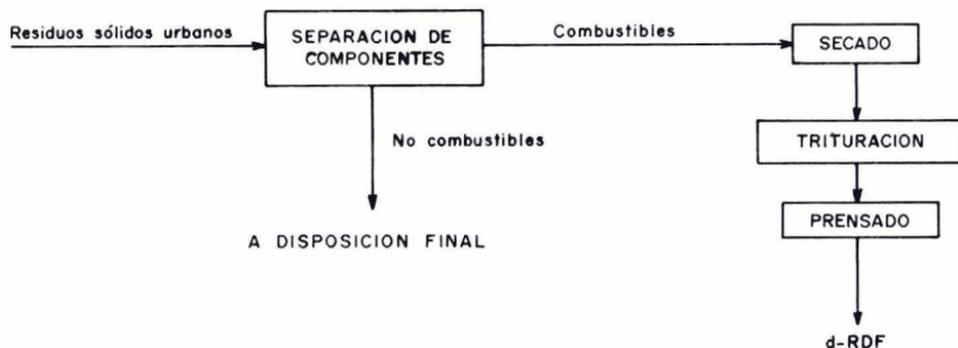


Fig. 1. Diagrama del proceso utilizado para obtener RDF

obtener un producto denso en forma de pastilla. El esquema del proceso se nota en la figura 1 y corresponde a la secuencia típica del mismo (General Electric Co. 1974, Domino 1979).

Dado que el método se desarrolló a escala de laboratorio, todas las operaciones se efectuaron manualmente. Fueron separados los precursores del RDF de los otros materiales; el secado se logró por exposición al ambiente y volteos durante una semana. La trituración se aplicó hasta alcanzar un tamaño uniforme de 2.54 cm en todo el componente. Para la compresión se utilizó una prensa para moldes de bakelita, marca Buehler Ltd.

Después de algunos ensayos preliminares, se establecieron las condiciones de compresión a 126.67 Kg/cm^2 (1800 psi) en seco, por dos minutos para todas las probetas (pastillas), las cuales eran de forma cilíndrica, con 2.54 cm de diámetro y alrededor de 8 g de peso.

Plan experimental

Puesto que se buscaba caracterizar el combustible sólido derivado de diferentes composiciones, se prepararon probetas constituidas por uno, tres o los cinco precursores del RDF listados en la Tabla II. En los casos de mezclas, se variaron las proporciones de los ingredientes para observar el efecto relativo de cada uno de ellos; también se dispuso una probeta con el contenido promedio indicado en la Tabla II (identificada como probeta No. 46 en la Tabla III), la cual correspondió a la elaboración del RDF con los residuos sólidos combustibles del caso de estudio sin alterar su proporción, es decir, sin recuperación parcial previa de ninguno de ellos.

Para considerar el caso de que la estructura promedio pudiera variar por recuperación parcial de los precursores del RDF o por fluctuaciones en la composición global de los residuos sólidos urbanos a lo largo del año, se estudiaron también otras probetas

TABLA III. COMPOSICIÓN EN PORCENTAJE DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

<i>Probeta No.</i>	<i>Plástico</i>				
	<i>Papel</i>	<i>Cartón</i>	<i>Rígido</i>	<i>Película</i>	<i>Trapo</i>
1	100	0	0	0	0
2	0	100	0	0	0
3	0	0	100	0	0
4	0	0	0	100	0
5	0	0	0	0	100
6	33	33	33	0	0
7	33	33	0	33	0
8	33	33	0	0	33
9	33	0	33	33	0
10	33	0	0	33	33
11	33	0	33	0	33
12	0	33	33	33	0
13	0	33	0	33	33
14	0	33	33	0	33
15	0	0	33	33	33
16	10	10	80	0	0
17	10	80	10	0	0
18	80	10	10	0	0
19	10	10	0	80	0
20	10	80	0	10	0
21	80	10	0	10	0
22	10	10	0	0	80
23	10	80	0	0	10
24	80	10	0	0	10
25	10	0	10	80	0
26	10	0	80	1	0
27	80	0	1	1	0
28	10	0	10	0	80
29	10	0	80	0	10
30	80	0	1	0	10
31	10	0	0	10	80
32	10	0	0	80	10
33	80	0	0	10	10
34	0	10	10	80	0
35	0	10	80	10	0
36	0	80	10	10	0
37	0	10	0	10	80
38	0	10	0	80	10
39	0	80	0	10	10
40	0	0	10	10	80
41	0	0	10	80	10
42	0	0	80	10	10
43	0	10	10	0	80
44	0	10	80	0	10
45	0	80	10	0	10
46	38	24	11	21	6
47	38	20	13	23	6
48	36	18	15	25	6
49	34	16	17	27	6
50	32	16	16	26	10
51	22	11	21	31	15
52	15	5	20	40	20

numeradas de la 47 a la 52, conteniendo variaciones alrededor de dicha composición. Todas las pruebas reportadas se ensayaron al menos por duplicado, en un total de 52 mezclas diferentes cuya descripción se muestra en la Tabla III.

Se definieron como propiedades relevantes a medir en las pruebas: densidad, consistencia, contenido de cenizas, poder calorífico superior y rapidez de combustión, las cuales se establecieron utilizando las técnicas previamente descritas (ASTM 1973, Savage 1977, Ansems y Boesmans 1984). En el caso de la consistencia, la prueba es cualitativa y la determinación se realizó con el criterio siguiente: se consideró consistencia buena, cuando una probeta al salir de la prensa conservó la estructura del molde; regular, si mantuvo parcialmente la forma del molde o sufrió una pequeña deformación y mala, si perdió total o considerablemente su apariencia.

Para medir la rapidez de combustión, se pesó la muestra a 3 diferentes tiempos de ésta y a partir de ellos se extrapoló el lapso en el cual su peso igualó al de las cenizas. Estas mediciones requirieron de un procedimiento para detener súbitamente la combustión que consiste en sacar la probeta del horno a 700 °C y colocarla sobre una superficie metálica cercana a éste, donde se cubrió de inmediato con una pequeña campana, a la cual, mediante el sistema de desplazamiento de agua mostrado en la figura 2, se le evacuó el aire del interior sustituyéndolo por nitrógeno. Se mantuvo la atmósfera de nitrógeno hasta que la probeta estuvo razonablemente fría, logrando así el cese súbito de la combustión debido a la falta de oxígeno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de los análisis experimentales (excepto los de la consistencia) se evidencian en la Tabla IV.

En virtud de que como señalan Baum y Parker (1973), el único atributo común de los residuos sólidos urbanos es su variabilidad, tanto con el tiempo, como con el sitio estudiado, el desarrollo de trabajos como el que aquí se presenta, tiene por objeto tratar de acotar dicha variabilidad y, de este modo, intentar establecer relaciones cualitativas o semicuantitativas entre la composición del material y sus propiedades. Sin embargo, no es posible esperar que estas relaciones resulten matemáticamente precisas, ya que lo que aquí se considera como un componente, por ejemplo el plástico rígido, en realidad es casi siempre una mezcla de diferentes polímeros sintéticos con diversas propiedades, cuya composición difícilmente se repetirá en otro lugar o en otro tiempo.

La observación de las Tablas III y IV, permite inferir ciertas relaciones de tipo causa-efecto, que a nivel semicuantitativo se describen en los siguientes párrafos.

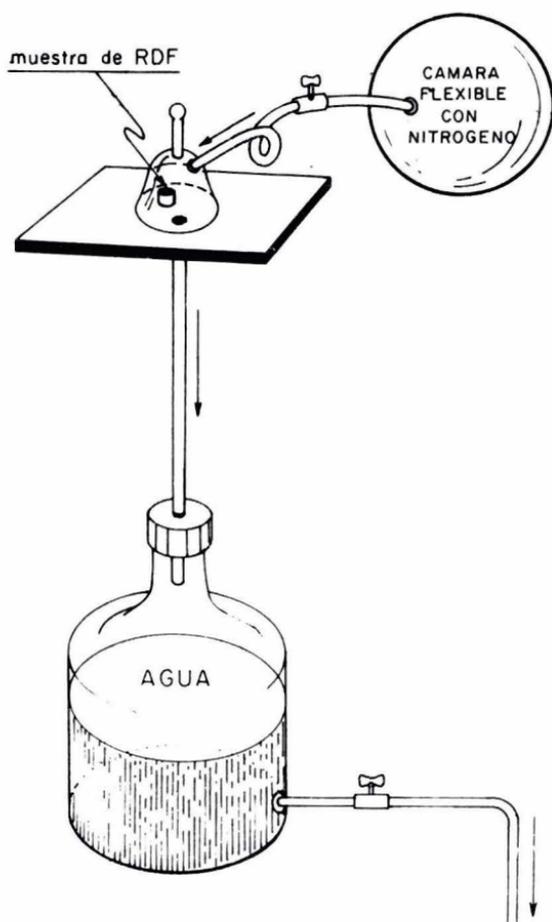


Fig. 2. Esquema del procedimiento para detener súbitamente la combustión del RDF

Densidad

Se nota que las densidades más altas ($1.0-0.9 \text{ g/cm}^3$) corresponden a composiciones con alto contenido de cartón, seguidas por probetas que tienen mucho papel ($0.9-0.8 \text{ g/cm}^3$). A continuación las que poseen gran cantidad de trapo ($0.8-0.6 \text{ g/cm}^3$), posteriormente las que tienen proporciones significativas de plástico rígido, plástico película o ambos ($0.6-0.4 \text{ g/cm}^3$). Las de menor densidad contienen en forma importante plástico película ($0.4-0.02 \text{ g/cm}^3$).

Se observa que la composición promedio encontrada en la fracción de presuradores

TABLA IV. RESULTADOS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES DE ESTE ESTUDIO

<i>Probeta No.</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Cenizas %</i>	<i>Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg)</i>	<i>Tiempo de Incineración (min)</i>
1	0.958	4.67	3308	3.01
2	0.997	6.95	3814	3.29
3	0.730	0.16	12050	3.06
4	0.018	0.19	10678	2.84
5	0.703	4.66	4182	2.84
6	0.770	2.90	6287	2.90
7	0.400	6.14	5566	3.11
8	0.724	7.22	3208	3.20
9	0.604	4.08	8638	3.27
10	0.339	4.89	5915	3.27
11	0.877	4.30	6506	3.32
12	0.559	2.71	8642	3.38
13	0.316	3.81	5944	3.38
14	0.710	2.51	6227	3.38
15	0.395	4.24	9052	3.30
16	0.567	2.34	11189	3.35
17	0.960	4.86	4189	3.31
18	0.770	7.56	4371	3.31
19	0.200	4.20	8954	3.40
20	0.877	8.52	4302	3.34
21	0.943	8.03	3680	3.36
22	0.622	5.57	3525	3.41
23	1.053	5.57	2747	3.45
24	0.987	6.11	3559	3.47
25	0.019	4.20	10774	3.54
26	0.730	1.37	11844	3.63
27	0.789	3.62	4816	3.60
28	0.770	3.64	4523	3.55
29	0.789	1.98	10837	3.61
30	0.906	4.40	4081	3.53
31	0.395	5.47	4211	3.50
32	0.300	4.51	9295	3.53
33	0.622	6.92	3365	3.50
34	0.192	3.29	10023	3.59
35	0.606	1.52	11553	3.65
36	1.053	5.23	5477	3.53
37	0.451	4.66	4062	3.54
38	0.158	3.79	9394	3.58
39	0.877	7.13	4057	3.49
40	0.730	3.85	5502	3.56
41	0.023	2.76	9710	3.59
42	0.637	0.73	11563	3.65
43	0.533	2.67	4341	3.59
44	0.910	1.45	11843	3.61
45	0.908	7.61	4274	3.44
46	0.783	3.17	6002	3.56
47	0.843	2.69	6415	3.59
48	0.615	3.57	6002	3.60
49	0.610	4.12	7992	3.64
50	0.778	6.05	6295	3.64
51	0.472	4.23	6959	3.67
52	0.728	2.93	7191	3.73

del RDF del caso estudiado (probeta No. 46), corresponde a densidades de alrededor de 0.8 g/cm^3 , es decir, hacia la parte alta de la escala, debido a su contenido de papel y cartón. Cambios cercanos a esta composición (probetas 47 a 52), muestran variaciones de dicho valor en $+0.06$ a -0.31 g/cm^3 .

Se buscó una expresión empírica para ajustar los datos experimentales obtenidos para densidad, en función de la composición de las probetas. Dicha expresión resultó:

$$\text{DEN} = 0.97283 X_1 + 1.01243 X_2 + 0.7413 X_3 + 0.01828 X_4 + 0.71388 X_5 - 0.04589$$

donde X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 son las fracciones de peso de papel, cartón, plástico rígido, plástico película y trapo, respectivamente.

Para los coeficientes descritos, la densidad se obtiene en g/cm^3 .

La discrepancia entre los datos experimentales y los calculados con la expresión empírica propuesta se muestran en la figura 3. Una medida cuantitativa de dicha discrepancia es el coeficiente de correlación lineal (Kreyszig 1973), cuyo valor absoluto para el caso ideal es 1.000 y para el caso mostrado es 0.897.

Consistencia

Es una propiedad en la que influyen variables que no se cambian en este estudio, tales como humedad y tamaño de los trozos. Los resultados mostrados en la Tabla V son cualitativos y corresponden sólo a las condiciones ensayadas experimentalmente.

Al comparar las Tablas III y V se observa que muchas de las probetas con mejor consistencia están formadas principalmente por papel, cartón o ambos; las de regular contienen trapo o mezclas de trapo con papel, cartón o plástico. Algunas de composición predominante en papel o cartón están también en este nivel. En tanto que las probetas de consistencia mala, son mezclas de plástico rígido o película en cualquier proporción.

La composición promedio encontrada en la fracción de precursores del RDF del caso en estudio corresponde a una consistencia regular, aunque variaciones de ella en donde el cartón o el papel disminuyen, la pueden llevar hacia una pobre.

De lo anteriormente expuesto se desprende que, en caso de presentarse deficiencias en la consistencia del RDF obtenido, se pueden corregir aumentando en contenido de materiales celulósicos en la mezcla o reduciendo los plásticos; tomando para ello como guía los datos descritos en la Tabla V.

Cenizas

Su porcentaje en las probetas está entre 8.52 y 0.16 %, según su composición. Este contenido es decreciente en orden para cartón, papel, tela, plástico rígido y plástico

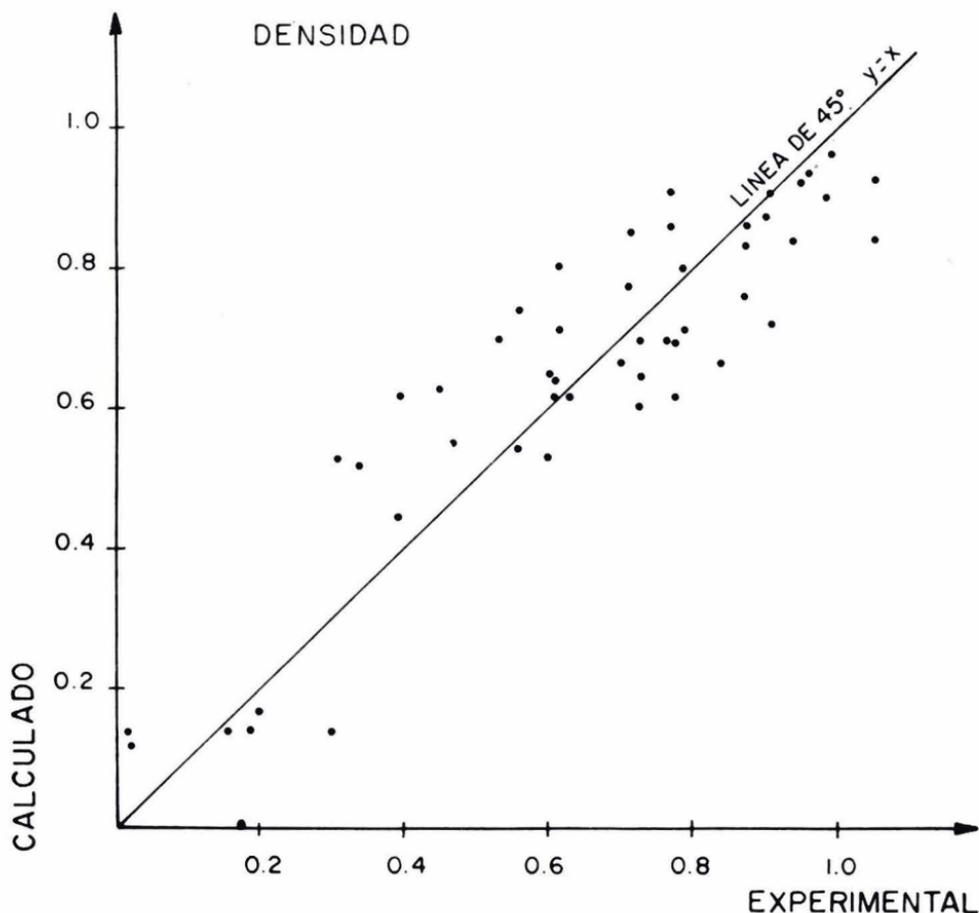


Fig. 3. Comparación entre valores experimentales y calculados de la densidad, en g/cm^3

película. Se encuentra un promedio de 3.17 % de cenizas en los precursores del RDF de los residuos sólidos estudiados (probeta 46), el cual corresponde a niveles bajos en la escala y refleja la bondad del proceso de depuración efectuado. Cambios cercanos a esta composición (probetas 47 a 52), muestran variaciones de las cenizas entre +2.88 y -0.48 %.

La presencia de cenizas parece ser particularmente alta para muestras ricas en papel o cartón y baja para las abundantes en plásticos.

De manera similar al caso de la densidad, se buscó una expresión empírica capaz

TABLA V. RESULTADOS DE CONSISTENCIA

<i>Consistencia</i>	<i>Probeta No.</i>
BUENA	1, 2, 8, 18, 22, 23, 24, 28, 30, 39
REGULAR	5, 11, 14, 20, 21, 27, 33, 36, 43, 44, 45, 46, 50
MALA	3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 25, 26, 29, 31, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 41, 42, 47, 48, 49, 51, 52

de ajustar los datos obtenidos experimentalmente para el porcentaje de las cenizas, la cual fue:

$$\% \text{ CNZ} = 3.706 X_1 + 5.515 X_2 + 0.127 X_3 + 0.151 X_4 + 3.698 X_5 + 1.615.$$

En la figura 4, se comparan los datos experimentales y los teóricos. El coeficiente de correlación lineal, cuyo significado se explicó anteriormente fue de 0.741.

Poder calorífico superior

Esta propiedad está entre 2747 y 12050 Kcal/Kg, dependiendo de la composición. Se observa que el poder calorífico correspondiente a la probeta No. 46 (valor promedio en este estudio), se ubica en la parte media de la escala (6002 Kcal/Kg), probablemente debido al alto contenido de papel y cartón, lo cual sugiere que modificando los ingredientes puede lograrse aumentar el poder calorífico superior dentro del intervalo mencionado arriba.

Variaciones alrededor de la constitución promedio (probetas 47 a 52), produjeron cambios en el valor del poder calorífico superior, entre +1990 y -0 Kcal/Kg.

Para ajustar estos datos experimentales, se propuso la expresión empírica:

$$\text{PCS} = 3622 X_1 + 4176 X_2 + 13194 X_3 + 11692 X_4 + 4579 X_5 - 757$$

donde el poder calorífico superior se calcula en Kcal/Kg.

La representación gráfica de los datos calculados, según esta expresión, contra los experimentales, se muestra en la figura 5. La buena concordancia lograda en este caso se mide cuantitativamente por el coeficiente de correlación, cuyo valor es de 0.989.

Los resultados anteriores sugieren que el predominio en la composición de materiales celulósicos (papel y cartón), produce efectos opuestos al exceso de materiales plásticos (rígido y película), en tanto que la proporción de trapo no exhibe una tendencia definida, probablemente debida a la presencia de algodón (cuya estructura es cercana a los celulósicos) y polímeros sintéticos (con organización similar a los plásticos).

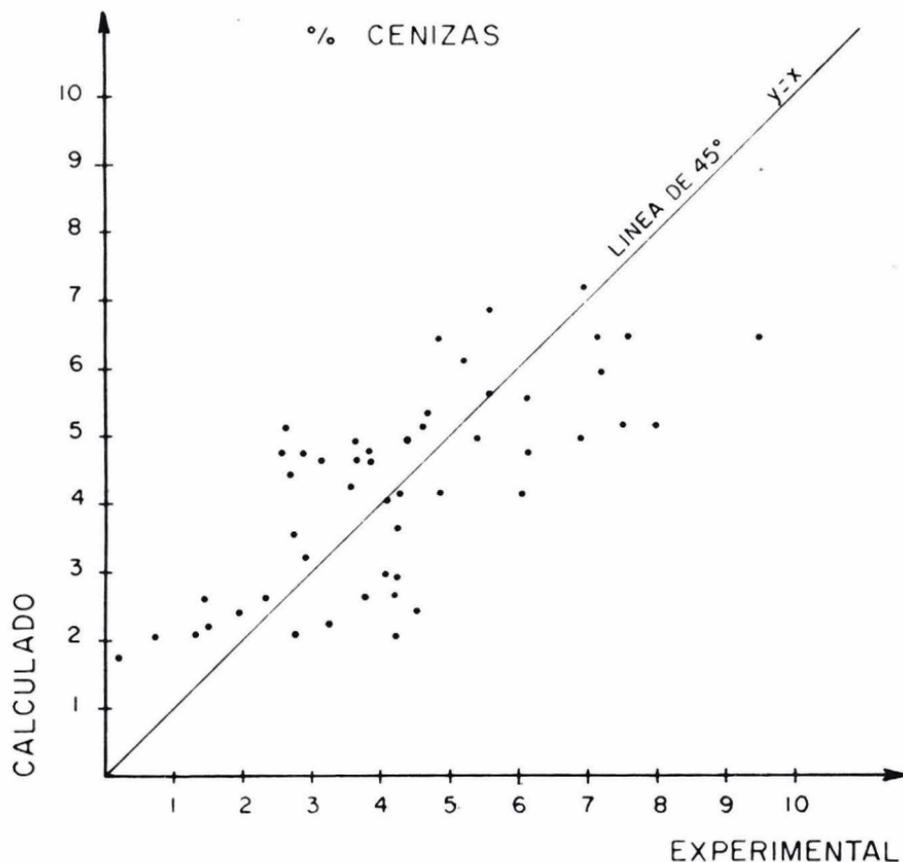


Fig. 4. Comparación entre valores porcentuales experimentales y calculados del contenido de ceniza

Para un combustible sólido, es deseable tener alto poder calorífico y densidad de mediana a alta con el fin de que se logre una buena carga térmica dentro del incinerador con un volumen más o menos reducido de combustible. También es recomendable contar con un contenido de cenizas tan bajo como sea posible, para que su remoción del horno sea sencilla.

Rapidez de combustión

Otra variable de interés para la incineración de RDF es la rapidez de combustión, ya que incide en el diseño del incinerador por estar relacionada con el tiempo de residencia requerido para la oxidación completa. La velocidad depende de su composición, tamaño de los trozos, grado de compactación y forma en que ésta se realiza,

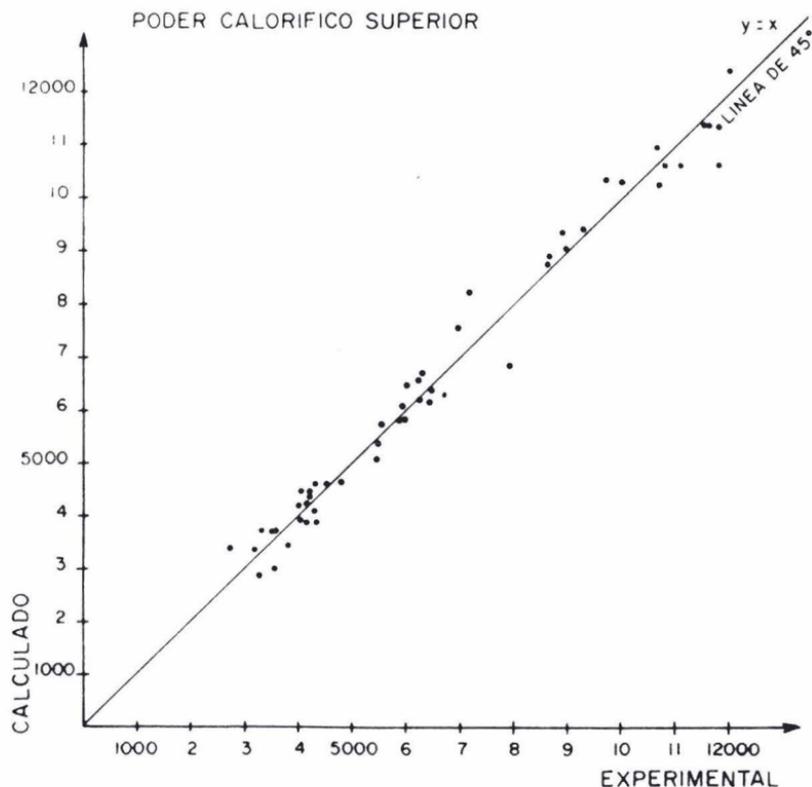


Fig. 5. Comparación entre valores experimentales y calculados del poder calorífico superior, en Kcal/Kg

contenido de humedad del material, temperatura del horno, etc. De todas estas características en este estudio sólo se modificó la composición.

En el presente trabajo se tomó un criterio arbitrario para medir la rapidez de combustión del material, consistente en introducir tres probetas idénticas a un horno a 700 °C (temperatura típica para la incineración de RDF), que abruptamente se apagó después de 0.5, 1 y 2 minutos respectivamente, siguiendo el procedimiento indicado anteriormente.

Una vez suspendida la combustión, se determinó la pérdida de peso en cada probeta y luego se buscó el mejor ajuste empírico para estos datos, que resultó:

$$p = a + b \times t^{1.3}$$

donde p = peso de probeta en g, t = tiempo en minutos dentro del horno a 700 °C, a y b = constantes empíricas, descritas en la Tabla VI.

TABLA VI. MODELACIÓN DE LOS DATOS DE RAPIDEZ DE COMBUSTIÓN

<i>Probeta No.</i>	<i>Ecuación Ajustada</i> $P = a + bx^{1.3}$ <i>a</i>	<i>b</i>	<i>Coefficiente de Correlación lineal</i>
1	7.545637	- 1.719106	- 0.9897602
2	7.702787	- 1.519316	- 0.9473274
3	7.730232	- 1.800634	- 0.9197920
4	7.722193	- 1.983043	- 0.9191156
5	7.671617	- 1.879515	- 0.9325199
6	7.718599	- 1.880705	- 0.9378981
7	7.598285	- 1.628713	- 0.9103538
8	7.546391	- 1.540253	- 0.9095265
9	7.406707	- 1.519381	- 0.8926964
10	7.502035	- 1.523587	- 0.8907143
11	7.508256	- 1.506660	- 0.8895530
12	7.544915	- 1.506652	- 0.8926944
13	7.563463	- 1.491113	- 0.8914230
14	7.581074	- 1.519583	- 0.8934492
15	7.616733	- 1.538661	- 0.8967292
16	7.634336	- 1.547492	- 0.9005242
17	7.693421	- 1.536987	- 0.8918684
18	7.685763	- 1.497311	- 0.8949076
19	7.691676	- 1.498391	- 0.8979450
20	7.712693	- 1.468188	- 0.8916074
21	7.756486	- 1.465936	- 0.8884804
22	7.777778	- 1.484434	- 0.8915235
23	7.785129	- 1.468384	- 0.8960784
24	7.780061	- 1.449133	- 0.9000928
25	7.784023	- 1.439503	- 0.8991461
26	7.781647	- 1.437848	- 0.9006344
27	7.780152	- 1.417068	- 0.9023927
28	7.732472	- 1.434049	- 0.8742031
29	7.739166	- 1.428702	- 0.8744131
30	7.754818	- 1.434448	- 0.8765896
31	7.757456	- 1.437010	- 0.8786725
32	7.761984	- 1.435999	- 0.8804019
33	7.749430	- 1.412937	- 0.8815953
34	7.747547	- 1.420972	- 0.8830434
35	7.736117	- 1.415785	- 0.8823060
36	7.746442	- 1.422194	- 0.8844921
37	7.751821	- 1.426425	- 0.8865821
38	7.753141	- 1.421453	- 0.8864171
39	7.756638	- 1.417695	- 0.8869792
40	7.757329	- 1.432036	- 0.8895590
41	7.763210	- 1.430634	- 0.8902911
42	7.773942	- 1.433068	- 0.8917208
43	7.777903	- 1.437507	- 0.8933742
44	7.786327	- 1.445900	- 0.8947448
45	7.777017	- 1.439577	- 0.8943468
46	7.794824	- 1.443905	- 0.8951761
47	7.814022	- 1.438985	- 0.8944839
48	7.811259	- 1.414283	- 0.8886520
49	7.820842	- 1.383694	- 0.8754706
50	7.810022	- 1.369615	- 0.8765491
51	7.826630	- 1.375322	- 0.8797928
52	7.843931	- 1.369076	- 0.8784537

Con el citado ajuste, el coeficiente de correlación lineal se mantuvo en todos los casos arriba de 0.874, siendo su valor más frecuente 0.89, lo cual significó que las predicciones fueron consistentemente aproximadas a la realidad.

Mediante la ecuación empírica ajustada, fue posible calcular el tiempo de residencia para cada composición de RDF, estableciéndolo como el tiempo en el cual el peso de la probeta es igual al de sus cenizas. Los datos resultantes están en la última columna de la Tabla IV.

Como puede verse, el tiempo de combustión total para las probetas estudiadas, se encontró entre 2.84 y 3.73 min según la composición, correspondiendo 3.56 min a la probeta No. 46.

Debido a que los tiempos máximo y mínimo de incineración son bastante cercanos entre sí, no se considera necesaria la obtención de una ecuación empírica para predecir el tiempo de residencia en función de la composición.

La caracterización del RDF mexicano que se ha analizado, referida a la probeta 46, puede resumirse y compararse con los combustibles fósiles sólidos que aparecen en la Tabla VII.

En esta comparación, no debe perderse de vista que las propiedades del RDF mexicano corresponden a condiciones ideales de proceso, logradas en el laboratorio y además no incluyen ninguna recuperación simultánea de constituyentes reciclables.

A escala industrial, la selección y la trituración de materiales tendrá, necesariamente, una eficiencia menor al 100 % obtenido en el laboratorio y por otra parte, la

TABLA VII. COMPARACIÓN DEL RDF OBTENIDO EN ESTE ESTUDIO CON OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS

<i>Propiedad</i>	<i>RDF Cortazar Gto. México</i>	<i>Carbón No. 9*</i>	<i>Carbón No. 17**</i>
Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg)	6002	8036	4027
Cenizas (%)	3.17	3.3	4.2
Humedad de Equilibrio (%) (Considine 1977)	no se midió	2.5	37.0

* Carbón Bituminoso, con alto contenido de materia volátil-A. Uno de los tipos de carbón de más alto contenido energético específico en Estados Unidos de América (Considine 1977).

** Carbón lignítico, lignito grupo A. Uno de los tipos de carbón de más bajo contenido energético específico en Estados Unidos de América (Considine 1977).

producción de RDF se enmarcará en un contexto más amplio, que incluye (a veces con mayor prioridad que el mismo RDF), la separación de ingredientes reciclables entre los que se pueden encontrar algunos de los precursores del RDF.

En virtud de lo anterior, si se busca optimizar de manera global la operación y lograr un reciclaje máximo de los residuos, se debe considerar a la composición del RDF como una variable, dependiente tanto de la mezcla local de los residuos sólidos de Cortazar como de la demanda en los mercados locales de materiales reciclables, así como de los costos de separación y de la pureza con que puedan ser conseguidos estos (Drobny *et al.* 1971, APWA 1976, Leinster 1985).

Si se considera en este marco la elaboración de RDF en México, su existencia será benéfica no sólo como una manera de obtener energía de los residuos sólidos urbanos, sino como un amortiguador a las fluctuaciones de las demandas y costos de separación de materiales reciclables. Desafortunadamente existen muy pocos estudios sobre reciclado de materiales en México (Trejo-Vázquez y Cespedes-Soto 1989).

Puesto que las condiciones locales para el reciclado son diferentes en cada país, no se espera que el RDF que pudiera alcanzarse a escala industrial en México fuese igual al que se obtiene en otros países. El grado de similitud podrá establecerse únicamente mediante estudios más detallados sobre la recuperación de materiales en México. A falta de mejores medios y una vez que se ha establecido que la comparación rigurosa no es válida, se presentan en la Tabla VIII las características de algunos RDF formulados a escala industrial en el extranjero.

Las cantidades elevadas de ceniza que aparecen en la Tabla VIII se deben generalmente a deficiencias en la segregación de ingredientes, toleradas para no incrementar demasiado los costos del producto en países donde la mano de obra es muy cara, pero que no sobrepasan las especificaciones de los consumidores. En algunos procesos, la separación se limita al uso de magnetos antes de la trituración.

Para mejorar la consistencia de las pastillas, algunos procesos admiten un alto contenido de humedad del material durante el prensado. Con el tiempo, la humedad va deca- yendo por transpiración.

Debido en parte a la insuficiente depuración y a la separación previa de materiales reciclables con buenas propiedades combustibles, el poder calorífico obtenido del RDF industrial, es normalmente inferior al del carbón en cualquiera de sus tipos, como puede inferirse de las Tablas VII y VIII. Otras posibles causas de los bajos valores de poder calorífico, son quizá la legislación ambiental de los países donde se produce RDF, que limita la cantidad de gases ácidos liberados a la atmósfera a causa de la combustión de plásticos y los efectos corrosivos de estos gases en las instalaciones de incineración de RDF, o tal vez la existencia de algún mercado interesante para reciclado de plásticos en estos países.

TABLA VIII. PROPIEDADES DE ALGUNOS RDF PRODUCIDOS A ESCALA INDUSTRIAL EN EL MUNDO*

<i>Proceso o Planta</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Cenizas (%)</i>	<i>Poder Calorífico Superior (base húmeda) (Kcal/Kg)</i>
Planta Chichester (Reino Unido)	10 – 15	12 – 17	3944 – 4063
Proceso National Ecology (EUA)	22.75	8.89	3435
Planta St. Louis Mo. (EUA)	27.8	21.6	2573
Proceso Chicago Nw. (EUA)			2422
Proceso A.M. Kinney (EUA)			1861
Proceso Monsanto (EUA)			2556
Proceso Ecology Inc. (EUA)			3678 – 4722
Proceso CPU – 400 (EUA)			3259
Planta Doncaster (Reino Unido)	25 – 35	7 – 10	3107 – 3585
Proceso MVU (Alemania)	20 – 30	15 – 20	2987 – 4063
Proceso OTV (Francia)			3500 – 4500

* National Ecology Inc. 1985, General Electric Co. 1974, Trejo Vázquez 1987.

De todo lo anterior, se concluye que las diferencias entre los valores de las propiedades del RDF logrado en este estudio a nivel de laboratorio y del RDF a escala industrial en otros países, se interpretan como el margen de posibilidades económicas y técnicas para incorporar al caso mexicano las eficiencias de separación a escala

industrial y los procesos paralelos de recuperación de materiales reciclables. A juzgar por las cifras reportadas, este margen es razonablemente atractivo.

A partir de un compromiso entre todos los criterios antes descritos, será posible establecer las características necesarias del equipo de incineración a emplear, tales como carga térmica del horno, capacidad de remoción de cenizas, modalidades de manejo del RDF en pastillas, pelusa o polvo, etc.

Para casos diferentes al presentado en este estudio, y si los componentes del RDF y las condiciones generales del proceso son las mismas, se sugiere repetir las determinaciones para las probetas 1 a 5, con el fin de verificar que los valores sean semejantes a los aquí reportados; si esto es así, se podrán utilizar las correlaciones presentadas en este trabajo para estimar las propiedades de cualquier composición de interés.

Debido a la ambivalencia del proceso de producción del RDF (ya que es un método para obtener un combustible, al mismo tiempo que un medio de procesamiento de residuos sólidos urbanos), no es de extrañar que el resultado de un cálculo riguroso que involucre costos de elaboración, transporte, almacenamiento y quema del RDF sea negativo. Esto sólo refleja la existencia de costos de disposición que deben ser pagados en alguna forma por quienes generaron los desechos. Dichos costos deben ser comparados más bien con los de otras técnicas de disposición alternas o con las molestias y los daños producidos por falta de tratamiento apropiado de los residuos sólidos urbanos.

CONCLUSIONES

1. El RDF es un material combustible, sólido, capaz de ser almacenado; obtenido de la depuración de los desechos sólidos urbanos de cualquier ciudad.
2. La fabricación de RDF facilita la recuperación de la energía contenida en los residuos sólidos urbanos y también sirve como un amortiguador de las fluctuaciones en la demanda local de materiales reciclables como papel, cartón y otros.
3. La manera de obtención del RDF puede ser tan automatizada o manual como la economía del caso específico lo aconseje y sus propiedades pueden modificarse a voluntad dentro de ciertos límites, durante el procesamiento.
4. El RDF es un material prácticamente desconocido en México, con aplicaciones potenciales en industrias como la cementera, tabiquera, azucarera y de generación de energía eléctrica, entre otras; así como en cualquier procedimiento cuyos equipos admitan carbón u otro combustible sólido.
5. En este trabajo se analizó la relación entre la composición del RDF y ciertas propiedades de interés en los combustibles, como la densidad, consistencia, cenizas,

poder calorífico y tiempo mínimo para incineración total. Se determinaron ecuaciones empíricas ajustadas a los datos experimentales, para predecir las propiedades de interés, excepto en la consistencia, la cual fue considerada en función de la composición en forma cualitativa.

6. Por comparación entre las propiedades encontradas para el RDF del caso de estudio y algunas obtenidas industrialmente en el mundo, se detectó un margen interesante de posibilidades de existencia para una planta productora de RDF a nivel industrial en el país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo del Sistema Nacional de Educación Tecnológica (COSNET), el haber patrocinado parcialmente esta investigación, así como al Dr. Rafael Villalobos-Pietrini, a la Dra. Sandra Gómez-Arroyo y a los revisores del manuscrito, sus valiosos comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- Álvarez R. J. (1985). A look at US plants that are burning MSW. *Waste Age*, enero, pp. 58-61.
- Ansems A. y Boesmans B. (1984). Possibilities of preparation of refused derived fuel (RDF) in the EEC. Presentado en el EEC-Symposium on sorting of household waste and thermal treatment of waste. Luxemburgo, septiembre 1984.
- APWA (Institute for Solid Wastes of American Public Works Association) (1976). Tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Instituto de Estudios de Administración Local. Madrid, España, p. 383.
- ASTM (American Society for Testing Materials) (1973). Standard method of test for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter (D2015-66). En: *Annual book of ASTM standards*, Filadelfia, pp. 292-299.
- Baum B. y Parker C. H. (1973). Solid waste disposal. *Ann Arbor Sci. Pub.* 1, 40-42.
- Colin A. C. H. y Chatterton M. H. (1985). Solid waste as a fuel in the cement industry in the UK. *Energy Prog.* 5, 84-88.
- Colon F. J. y Boesmans B. (1980). Applied industrial research work on the use of raw materials from municipal refuse. *Resour. Recov. Conserv.* 5, 85-98.
- Considine D. M. (Editor) (1977). *Energy technology handbook*. Mc Graw Hill, Nueva York, pp. 1.15-1.20.
- Domino F. A. (Editor) (1979). *Energy from solid wastes. Recent developments*. Noyes Data Corp. Park Ridge, N. J., p. 39.

- Drobny N. L., Hull H. E. y Testing R. F. (1971). Recovery and utilization of municipal solid wastes. Report sw-10c, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 95-96.
- General Electric Co. (1974). *Solid waste management. Technology assessment*. Van Nostrand Reinhold-General Electric Series, Nueva York, pp. 21-73.
- Kreiszing E. (1973). *Introducción a la estadística matemática. Principios y métodos*. Limusa, México, pp. 315-324.
- Leinster C. (1985). The sweet smell of profits from trash. *Fortune*, abril 1, 150-154.
- Morales-Cervantes G. (1987). Obtención experimental de combustible sólido (RDF) a partir de basura urbana. Tesis profesional, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto., México.
- National Ecology Inc. (1985). Technical data sheet. Utility grade RDF. Timonium, Maryland, EUA.
- Savage K. I. (1977). Coal testing. En: *Energy technology handbook* (D. M. Considine, Ed.), Mc Graw Hill, Nueva York, pp. 1.48-1.51.
- Trejo-Vázquez R. (1987). Revisión del estado del arte en el procesamiento de basura urbana. Reporte final del proyecto COSNET 74.84, SEP-SEIT México, pp. 188-269.
- Trejo-Vázquez R. (1988). Estudio de los desechos sólidos urbanos de una ciudad pequeña de México. Presentado en la XXVIII Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Octubre 19-23, 1988, Acapulco, México.
- Trejo-Vázquez R. y Céspedes-Soto R. (1989). The recycle from municipal solid wastes in Mexico. *J. Resour. Manag. Technol.* 17, 15-17.