

HDT 97 junio 2005

**PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS PARA LOS ESTUDIOS
DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**

Ing. Alvaro Cantanhede
Ex Asesor Regional en Residuos Sólidos del CEPIS/OPS
16, Rua Piratininga, Apt. 204, Gávea
RJ CEP-22451-130, Rio de Janeiro, Brasil
Tel. (5521) 2274-4386; 2511-1379
Correo electrónico: alvarocantanhede@hotmail.com

Ing. Gladys Monge
Ex Ingeniera Ambiental del CEPIS/OPS
Gerente de Investigación y Desarrollo de Ciudad Saludable (www.ciudadsaludable.org)
Av. Jorge Basadre 255 – San Isidro, Lima 27, Perú
Tel. (511) 421-5163 – Correo electrónico: gladys@ciudadsaludable.org

Ing. Leandro Sandoval Alvarado
Ex Asesor en Residuos Sólidos Urbanos del CEPIS/OPS
Lord Nelson 249, Miraflores, Lima, Perú
Tel. (511) 222-5960 – Correo electrónico: lsandova@speedy.com.pe

Lic. Carlos Caycho Chumpitaz
Magíster en Población y Licenciado en Estadística, Docente Investigador
de la Escuela de Negocios de la Universidad de Lima.

RESUMEN

Implementar mejoras o diseñar sistemas de manejo de residuos sólidos en una localidad implica conocer las características de esos residuos, tales como la generación per cápita, la densidad y la composición, en función al tipo de tratamiento que se pretenda dar a esos residuos. Ello requiere un estudio de caracterización de residuos sólidos en determinado número de viviendas, las que deberán ser representativas del universo de la población. La metodología estadística que se aplica en los estudios de caracterización en los países de la Región de América Latina y el Caribe es la diseñada por el doctor Kunitoshi Sakurai en 1982. En los procedimientos que señalamos a continuación, se ha creído conveniente reforzar dicha metodología e incorporar análisis estadísticos que tienen que ver con la validación tanto del número de las muestras, como de los datos obtenidos en el muestreo de las viviendas.

SUMMARY

The improvement or design of a solid waste management system in any locality should be based on the knowledge of the solid waste characteristics, such as generation per capita, density and

composition; depending on the type of treatment that is going to be projected to those wastes. Therefore, a solid waste characterization study in a selected number of households is required. The selected households should represent the population universe. The statistical methodology applied in the solid waste characterization studies in Latin America and the Caribbean countries was designed by Dr. Kunitoshi Sakurai in 1982. The procedures we present below are intended to reinforce that methodology, incorporating statistical analyses to validate both the number of the samples and the data collected during the households sampling.

Palabras clave: Caracterización, Composición, Densidad, Generación per cápita, Muestra, Estadística.

OBJETIVO

El objetivo de esta Hoja de Divulgación Técnica es describir el procedimiento estadístico a fin de determinar una muestra representativa de la población para la caracterización de residuos sólidos y el proceso de validación de los datos y del número de la muestra seleccionada.

DETERMINACIÓN DE LA MUESTRA

Procedimiento para la Obtención de la Muestra

- a) Definición de la población: Todas las viviendas y establecimientos comerciales del distrito bajo estudio.
- b) División de la población en estratos en las siguientes cuatro zonas o estratos:
 - Zona comercial (estrato comercial).
 - Zona residencial (estrato 1): viviendas de ingreso alto.
 - i. Zona residencial (estrato 2): viviendas de ingreso medios.
 - ii. Zona residencial (estrato 3): viviendas de ingreso bajos.

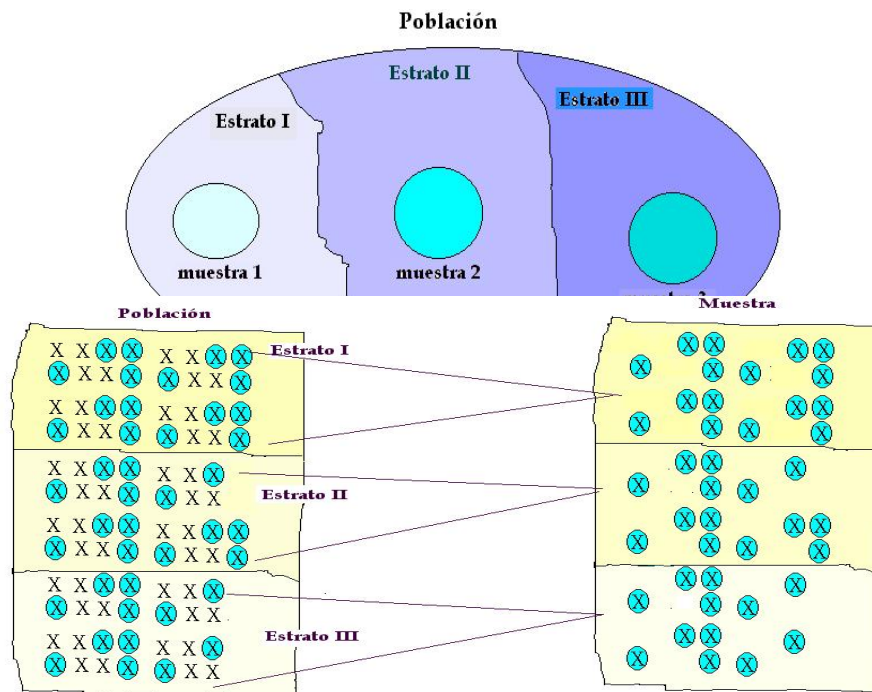


Figura 1. Determinación de la Muestra según Estrato Económico

- c) Ubicación de los estratos socioeconómicos en el plano de la ciudad.
- d) Utilización de la generación per cápita. Se considera que la población está conformada por N viviendas, que tienen R_i habitantes y producen W_i kg de basura en un día. Así se tiene que cada una produce $X_i = W_i / R_i$ kg/hab./d.

Aplicación de la Teoría del Muestreo

El muestreo estratificado proporcional es el método más común para la selección de muestras, pues asegura que cada vivienda de un estrato tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. Se siguen los siguientes pasos:

a) Determinación de la notación:

- i. N = Tamaño de la población
- ii. N_h = Tamaño de la población del estrato h (donde $h = 1, 2, 3$)
- iii. n = Tamaño de la muestra
- iv. n_h = Tamaño de la muestra del estrato h
- v. $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ Media de la población
- vi. μ_h = Media de la población del estrato h
- vii. $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ Media de la muestra
- viii. \bar{x}_h = Media de la muestra del estrato h
- ix. $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2$ Varianza de la población
- x. $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ Varianza muestral
- xi. $1 - \alpha$ = Nivel de confianza
- xii. $Z_{1-\alpha/2}$ = Coeficiente de confianza
- xiii. E = Error permisible

b) En el cálculo para determinar el tamaño de la muestra se debe considerar un nivel confianza, un nivel de error de estimación y un valor de variación:

i) Si se conoce el tamaño de la población N y su varianza σ^2 (o esta se asume):

$$n = \frac{Z_{1-\alpha/2}^2 N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}$$

ii) Cuando no se conoce el tamaño de la población N , pero sí el valor de la varianza σ^2 (o esta se asume):

$$n = \frac{Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}{E^2}$$

c) Asignación del tamaño de la muestra de viviendas particulares por estratos; en este caso se debe proceder de la siguiente manera.

i) Calcule el porcentaje o proporción del tamaño de la población en cada estrato. Esto es:

$$q_h = N_h/N, \quad \forall h=1,2,3$$

ii) Luego se procede a la asignación proporcional del tamaño de la muestra para cada estrato. Es decir:

$$n_h = n * q_h$$

d) El tamaño de la muestra estará en función de:

- i) El error permisible (E) en la estimación de μ , que por general debe ser entre 1 y 15% del valor de la media poblacional que se va a estimar.
- ii) La desviación estándar (σ) es el resultado de la raíz cuadrada de la varianza de la población. Si la desviación estándar es pequeña (población homogénea), bastará una muestra muy pequeña; mientras que si la desviación estándar es grande (población heterogénea), la muestra deberá ser grande.

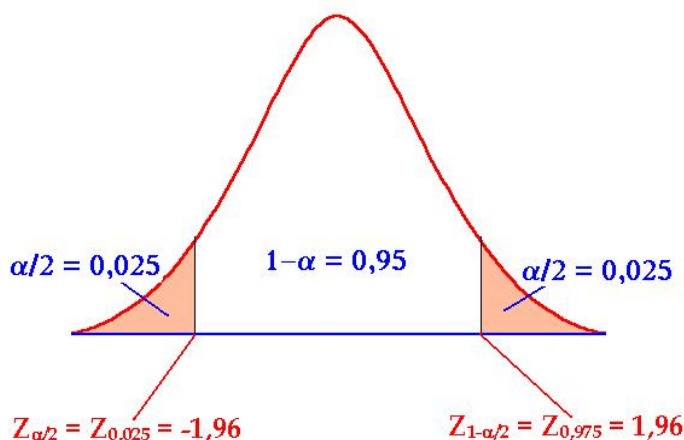
e) Para la obtención del valor de la varianza de la población:

- i) Se puede hacer un muestreo preliminar y estimar su valor con los datos muestrales.
- ii) Se pueden usar estimaciones de estudios anteriores.
- iii) Si no

ciudad,
la
200

hay datos
iniciales de la
se debe asumir
desviación
estándar en
gr/hab./día.

f) El nivel de



confianza más

utilizado es $1-\alpha = 0,95$; esto es, un coeficiente de confianza $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$.

Figura 2. Nivel de Confianza de la Muestra

Ejemplo: Localidad con tres estratos socioeconómicos:

| Estratos | Viviendas | % |
|-----------|-----------|-----|
| Total | 5000 | 100 |
| Estrato 1 | 1000 | 20 |
| Estrato 2 | 1500 | 30 |
| Estrato 3 | 2500 | 50 |

En este ejemplo se asume que $\sigma^2 = 0,04 \text{ kg}^2/\text{hab.}/\text{día}$, que el promedio podría ser $0,655 \text{ kg}/\text{hab.}/\text{día}$ y que el tamaño de población es $N = 5000$.

Si se quiere trabajar con un nivel de confianza de 95%, entonces $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$. Además, si se considera un error de estimación equivalente a 10% del promedio estimado, luego $E = 0,0655$. Con estos datos, el tamaño de la muestra total estaría dado por:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{Z_{1-\alpha/2}^2 N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2} = \\
 &= \frac{1,96^2 (5000)(0,04)}{(5000-1)0,0655^2 + 1,96^2 (0,04)} \cong \\
 &\cong 35,57 = 36
 \end{aligned}$$

El tamaño de la muestra de vivienda $n = 36$ se tiene que asignar o distribuir proporcionalmente entre los estratos, es decir:

| Estratos | Muestras | % |
|-----------|----------|-----|
| Total | 36 | 100 |
| Estrato 1 | 7 | 20 |
| Estrato 2 | 11 | 30 |
| Estrato 3 | 18 | 50 |

SELECCIÓN DE LA MUESTRA

- La muestra se selecciona por el método de muestreo simple aleatorio, que consiste en escoger de las unidades muestrales un total de N viviendas, de tal modo que cada una tenga la misma posibilidad de ser escogida.
- Esto se realiza con una tabla de números aleatorios, una calculadora o balotas numeradas desde el 1 hasta N en una urna, mezclándolos y tomando al azar n de ellos.
- El valor de “ n ” es el tamaño de la muestra y debe haber sido definido anteriormente.

VALIDEZ DE LA MUESTRA PRELIMINAR

La Varianza

- En la validación se debe tener en cuenta que el valor asumido de la varianza debe ser mayor o igual que la varianza estimada con los datos de la muestra.
- Para la estimación de la varianza de la población se tendrá un intervalo de confianza de 95%.

$$P\left(\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{(n-1, \alpha/2)}} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{(n-1, 1-\alpha/2)}}\right) = 1 - \alpha$$

La Muestra

Una vez obtenido el tamaño de la muestra, se debe realizar la validación para asegurar que ésta permita inferir los parámetros de la población.

- Para fines de validación, a esta muestra la denominaremos como m.
- Luego, se debe obtener el tamaño de la muestra con la varianza obtenida de la muestra m. A ese tamaño de la muestra la denominaremos n.
- En la relación de esas dos muestras se presenta tres casos:
 - Si $n > m$, se debe obtener del campo el número de unidades muestrales faltantes (determinadas por la diferencia de $n - m$).
 - Si $n = m$, no será necesario analizar más elementos para considerar como válido el muestreo aplicado en este caso.
 - Si $n < m$, se debe asumir como válido el valor de la muestra m y no se deben eliminar las supuestas unidades muestrales sobrantes.

Prueba de Significación para la Media de Población

- Cuando la varianza de la población σ^2 es conocida

| Hipótesis | Estadística de Prueba | Valores Críticos | Reglas para rechazar H_0 |
|------------------------|---|------------------------|----------------------------|
| $H_0 : \mu = \mu_0$ | $Z_c = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$ | Z_α | $Z_c < Z_\alpha$ |
| $H_1 : \mu < \mu_0$ | | | |
| $H_0 : \mu = \mu_0$ | | $Z_{1-\alpha}$ | $Z_c > Z_{1-\alpha}$ |
| $H_1 : \mu > \mu_0$ | | | |
| $H_0 : \mu = \mu_0$ | | $Z_{\alpha/2}$ | $Z_c < Z_{\alpha/2}$ |
| $H_1 : \mu \neq \mu_0$ | $Z_{1-\alpha/2}$ | $Z_c > Z_{1-\alpha/2}$ | |

b) Caso de varianza de la población σ^2 desconocida y $n \leq 30$

| Hipótesis | Estadística de Prueba | Valores Críticos | Reglas para rechazar H_0 |
|---|--|------------------------|------------------------------|
| $H_0: \mu = \mu_0$ $H_1: \mu < \mu_0$ | $t_c = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$ | $-t_{(n-1; \alpha)}$ | $t_c < -t_{(n-1; \alpha)}$ |
| $H_0: \mu = \mu_0$ $H_1: \mu > \mu_0$ | | $t_{(n-1; \alpha)}$ | $t_c > t_{(n-1; \alpha)}$ |
| $H_0: \mu = \mu_0$ $H_1: \mu \neq \mu_0$ | | $-t_{(n-1; \alpha/2)}$ | $t_c < -t_{(n-1; \alpha/2)}$ |
| | | $t_{(n-1; \alpha/2)}$ | $t_c > t_{(n-1; \alpha/2)}$ |

Prueba de la Comparación de Medias Poblacionales de los Estratos Socioeconómicos.

a) Cuadro de análisis de varianza o ANAVA:

| Fuente de Variación | Suma de Cuadrados | Grados de Libertad | Cuadrados Medios |
|------------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| Entre los Estratos | SCC | $c - 1$ | CMC |
| Dentro de los Estratos | SCE | $n - c$ | CME |
| Total | SCT | $n - 1$ | --- |

b) Procedimiento para la prueba de la hipótesis.

| Hipótesis | Estadística de Prueba | Valor Crítico | Regla para rechazar H_0 |
|--|-----------------------|----------------------------|------------------------------|
| $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ $H_1: \mu_h \neq \mu_k \forall h \neq j$ | $F = \frac{CMC}{CME}$ | $F_{(c-1; n-c, 1-\alpha)}$ | $F > F_{(c-1; n-c, \alpha)}$ |

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA BASURA

Procedimiento para la Toma de Información

Una vez definido el tamaño de la muestra (número de viviendas) se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

- Seleccione de manera aleatoria las viviendas a muestrear con el plano catastral de la localidad o el padrón de usuarios del servicio.
- Defina con los funcionarios municipales el lugar del trabajo de caracterización.
- Determine los objetivos y la metodología del trabajo e indique a los participantes que el muestreo se llevará a cabo durante ocho días.
- Seleccione el personal que hará la caracterización y gestione ante la autoridad municipal las credenciales correspondientes.

- Envíe comunicaciones oficiales a los propietarios de las viviendas seleccionadas para dar a conocer el trabajo, su importancia y el personal involucrado.
- Capacite al personal encargado de la caracterización y considere aspectos como su presentación ante los propietarios de las viviendas seleccionadas; el tipo de información a recabar; el trabajo con los residuos recolectados, entre otros que se detallan a continuación:
 - Registre el nombre del responsable, la dirección y el número de habitantes por vivienda seleccionada.
 - Entregue las bolsas vacías a los propietarios de cada una de las viviendas seleccionadas y pida que depositen en ellas los residuos generados en la vivienda y que procuren no cambiar sus costumbres o rutina diaria.
 - Recoja las bolsas con residuos al día siguiente y entregue otras bolsas vacías. Se debe procurar que esta actividad se efectúe siempre en el mismo horario.
 - Identifique las bolsas con una etiqueta en donde se especifique el número de la vivienda, el número de habitantes por vivienda, dirección y fecha.
 - Lleve las bolsas con residuos al lugar donde se hará la caracterización de dichos residuos y continúe con el procedimiento detallado en el siguiente punto.

Determinación de la Generación Per Cápita (gpc) y el Total Diario de Residuos Sólidos

- Utilice el total de residuos recolectados por día de muestreo.
- Pese diariamente (w_i) el total de bolsas recogidas durante los días que dure el muestreo (no considere los datos de los residuos recolectados el primer día de muestreo para el análisis). Este peso representa (W_t) la cantidad total de basura diaria generada en todas las viviendas.



Figura 3. Pesaje de Bolsas para la Muestra

- En función de los datos recopilados sobre el número de personas por vivienda (n_i) determine el número total de personas que han intervenido (N_t) en el muestreo.

- Divida el peso total de las bolsas (W_t) entre el número total de personas (N_t) para obtener la generación per cápita diaria promedio de las viviendas muestreadas (kg/hab./día).

$$\text{Generación per cápita diaria de residuos (gpc)} = \frac{\text{Peso total de residuos (} W_t \text{)}}{\text{Número total de personas (} N_t \text{)}}$$

- Multiplique la generación per cápita por el número de habitantes de la localidad para determinar la generación total diaria.

$$\text{Generación total diaria de residuos} = \text{gpc} \times N_t \text{ (kg/día)}$$

Determinación de la Densidad de los Residuos Sólidos

- Prepare un recipiente de alrededor de 100 litros para que le sirva como depósito estándar a fin de definir el volumen que ocupará el residuo; así mismo, prepare una balanza de pie.

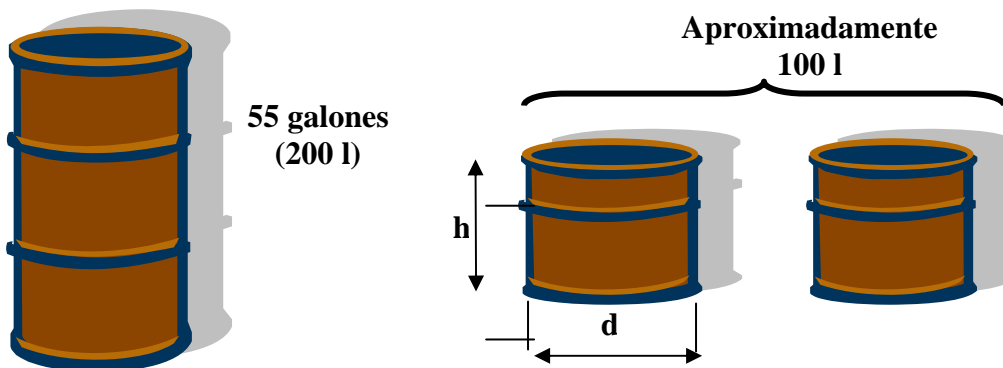


Figura 4. Recipiente para la Determinación de la Densidad

- Pese el recipiente vacío (W_1) y determine su volumen (V). De acuerdo con la figura, los datos del depósito que debe tomar en cuenta son la altura (h) y su diámetro (d). El volumen de ese recipiente es:

$$\text{Volumen (} V \text{)} = 0,7854 \times d^2 \times h$$

- Deposite sin hacer presión el residuo que fue utilizado en el cuarteo en el recipiente y muévelo de tal manera que se llenen los espacios vacíos en dicho recipiente. Para no hacer cálculos adicionales, es conveniente que el recipiente se encuentre lleno de residuos.
- Pese el recipiente lleno (W_2) y por diferencia obtendrá el peso de la basura (W).
- Divida el peso de la basura (W) entre el volumen del recipiente (V) para obtener la densidad de la basura.

$$\text{Densidad } D \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso del residuo } W \text{ (kg)}}{\text{volumen de la basura } V \text{ (m}^3\text{)}}$$

Determinación de la Composición Física de los Residuos Sólidos

- Utilice la muestra de un día; los residuos se colocan en una zona pavimentada o sobre un plástico grande a fin de no agregar tierra a los residuos.
- Rompa las bolsas y vierta el desecho formando un montón. Con la finalidad de homogenizar la muestra, troce los residuos más voluminosos hasta conseguir un tamaño que resulte manipulable; puede ser 15 cm o menos.
- Divida el montón en cuatro partes (método de cuarteo) y escoja las dos partes opuestas (los lados sombreados de la figura adjunta) para formar un nuevo montón más pequeño. Vuelva a mezclar la muestra menor y divida en cuatro partes nuevamente, luego escoja dos opuestas y forme otra muestra más pequeña. Esta operación se repite hasta obtener una muestra de 50 kg de basura o menos.

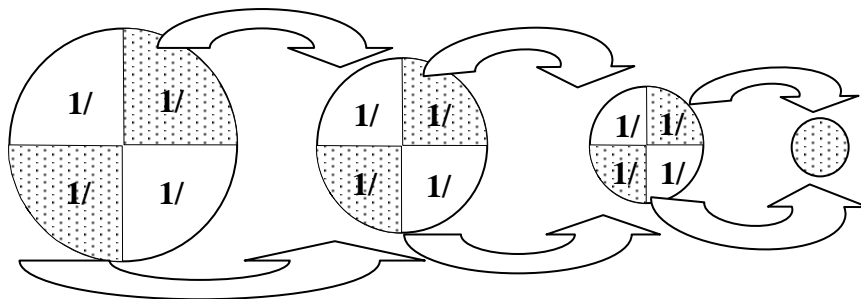
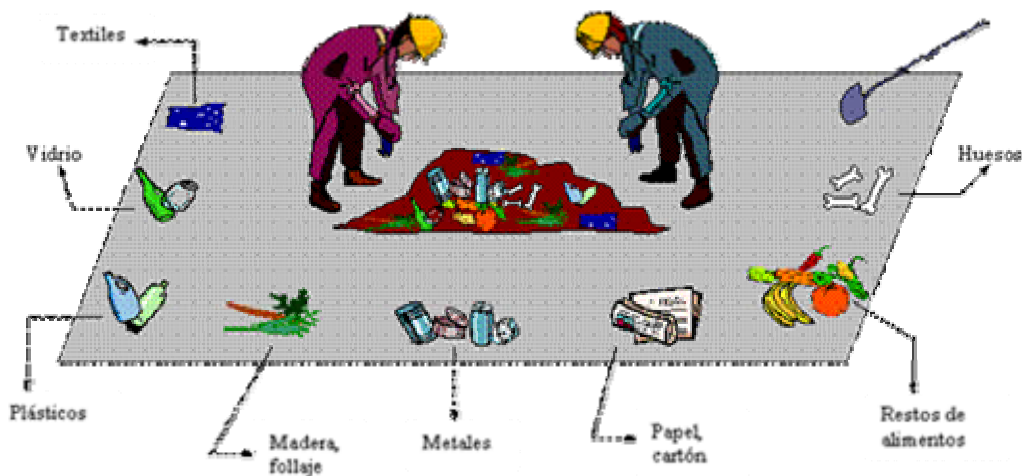


Figura 5. Método de cuarteo

- Separe los componentes del último montón y haga la clasificación por:
 - papel y cartón
 - madera y residuos de plantas
 - restos de alimentos
 - plásticos
 - metales
 - vidrio
 - otros (caucho, cuero, tierra, etc.).

Figura 6. Determinación de la Composición de los Residuos

- Clasifique los componentes en recipientes pequeños de 50 litros.
- Pese los recipientes pequeños vacíos en una balanza de menos de 10 kg antes de empezar la clasificación.
- Pese los recipientes con los diferentes componentes una vez concluida la clasificación y por diferencia determine el peso de cada uno de los componentes.
- Calcule el porcentaje de cada componente teniendo en cuenta los datos del peso total de los residuos recolectados en un día (W_t) y el peso de cada componente (P_i):



$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{P_i}{W_t} \times 100$$

- Repita el procedimiento durante los siete días que dure el muestreo de los residuos. Hay que recordar que de los ocho días que dure el muestreo, se elimina la muestra del primer día porque la experiencia ha demostrado que la basura del primer día no resulta representativa, ya sea porque se entrega demasiada cantidad de residuos o muy poca. Ello distorsiona los promedios.

Calcule un promedio simple para determinar el porcentaje promedio de cada componente, es decir, sume los porcentajes de todos los días de cada componente y divídalos entre los siete días de la semana.

CONCLUSIÓN

La validación estadística de los datos de la muestra para la caracterización es fundamental, ya que asegura una mayor confiabilidad de los parámetros obtenidos. Por ejemplo, si nos referimos al parámetro de generación per cápita, este es un decimal que multiplicado por la población total de la ciudad que se estudie, amplifica en miles de veces el valor de la generación. Ese resultado determinará la cantidad total de residuos que se genera en una ciudad y nos permitirá dimensionar o evaluar la parte operativa del sistema de limpieza pública. De allí la importancia de calcular adecuadamente los parámetros, ya que su uso errado podría llevarnos a grandes confusiones.

REFERENCIAS

- Sakurai, K. (1983) *Manual de instrucción de análisis de residuos sólidos municipales*. CEPIS, Lima. Segunda Versión.
- Collazos, H. & Duque, R. (1981) *Características de los residuos sólidos*. Bogotá Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Curso Intensivo sobre Manejo Integral de los Residuos Sólidos, Manual del Curso I.
- Sandoval, Leandro. *Caracterización de Residuos Sólidos en la Ciudad de San Andrés – Pisco* (Perú).
- SEDUE (1985). *Especificaciones técnicas para la elaboración de proyectos ejecutivos de manejo y disposición final de residuos sólidos municipales*.
- ECO (1997). *Manual de muestreo poblacional, aplicaciones en salud ambiental* .
- Sakurai, Kunitoshi (1983). *Método sencillo del análisis de residuos sólidos*. Hoja de Divulgación Técnica; 17. CEPIS, Lima.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- a) Población (N): Es la variable aleatoria o magnitud numérica de naturaleza aleatoria, asociada a objetos o individuos sobre los que se desarrolla una experiencia. Para nuestro caso se asume como viviendas o establecimientos comerciales de la zona de estudio.
- b) Muestra (n): Selección aleatoria de una pequeña parte de la población (N).
- c) Estrato: Parte de una división socioeconómica de la población (N).
- d) Zona: Lugar en donde se toma la muestra (n).
- e) Muestreo estratificado proporcional: Método común para la selección de una muestra, la cual asegura que cada vivienda de un estrato tenga la misma probabilidad de ser seleccionada.
- f) Varianza: Medida de "variabilidad" de la variable aleatoria (N o n). Es una constante que representa una medida de dispersión media de esa variable aleatoria, respecto a su valor medio o esperado
- g) Desviación estándar (σ): Resultado de la raíz cuadrada de la varianza de la población.