

Plan de muestreo para la cuantificación de residuos sólidos residenciales generados en las zonas urbanas de ciudades de tamaño intermedio

A sampling plan for residentially generated solid waste quantification at urban zones of middle sized cities

Rafael A Klinger¹, Javier Olaya^{1}, Luis Marmolejo², Carlos Madera²*

¹Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00, Cali, Colombia

²Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00, Cali, Colombia

(Recibido el 10 de julio de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

Resumen

Se propone un plan de muestreo para ciudades de tamaño mediano, que inicia con un muestreo bietápico piloto que conduce a una estimación del tamaño de muestra cuando se utiliza un estimador de razón. En el muestreo bietápico se utiliza el lado de manzana como unidad primaria de muestreo seguida de las viviendas como unidades secundarias. A partir de un marco muestral conformado por lados de manzana, se selecciona la muestra de lados de manzana para satisfacer un error de muestreo máximo del 5% con un nivel de confianza del 95%. Dentro del lado de manzana se seleccionan las viviendas luego de identificar aquellas que son aptas para el estudio (aquellas viviendas que se usan como lugar de habitación exclusivamente). La identificación se realiza mediante una visita de sensibilización en la cual se construye un plano a mano alzada del lado, en el cual se identifican las viviendas aptas. El propósito de este trabajo es presentar el diseño del plan de muestreo y su ejecución y proponerlo como un método utilizable para determinar cantidad de generación de residuos sólidos de origen residencial en ciudades de tamaño similar en países en vías de desarrollo.

----- *Palabras clave:* Muestreo bietápico, muestreo por conglomerados, estimadores de razón, muestreo piloto, sesgo de estimación, PPC, GPC

* Autor de correspondencia: teléfono: +57 +2 +333 49 03, ext. 109, fax: + 57 + 2 + 339 8462, correo electrónico: olaya@univalle.edu.co (J. Olaya).

Abstract

We propose a sampling plan intended for medium size cities. The proposed plan begins with a two-stage pilot plan, which helped us to obtain a better estimation of the final sample size when a ratio estimator is used. The sampling primary unit is the block side, followed by the houses as secondary units. From a sampling frame made of block sides, we pick a sample of block sides looking for a 5% sampling error with a 95% confidence level. We choose the houses to be included in the sample once we have identified within each block side those houses considered suitable for the study (those houses used exclusively as a place to live in). The identification is reached through a sensitization visit on which we make a rough draft of the block side in order to identify on it the suitable houses. The goal is to show the sampling plan design as well as its implementation. We suggest this plan as a working method for quantification of solid waste generation at similar size cities around the world, especially on developing countries.

----- *Keywords:* Two-stage sampling, conglomerates sampling, ratio estimators, pilot sampling, estimation bias, PPC, GPC

Introducción

La generación creciente de residuos sólidos y la pérdida del potencial de utilización de los mismos, fueron identificados como aspectos fundamentales asociados con la problemática ambiental, en la formulación de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en Colombia [1]. En la búsqueda de soluciones, el Gobierno Nacional promulgó normas como el Decreto 1713 de 2002 y la Resolución 1045 de 2003 a través de las cuales comprometió a los municipios colombianos en la formulación e implementación de Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos –PGIRS-. Elemento fundamental para el diseño de estos planes, es conocer las cantidades y características de los residuos generados [2- 4], dado que esta información es básica para la definición de las etapas clave para la gestión de residuos como son la recolección y transporte, el aprovechamiento, el tratamiento y la disposición final y de esta forma, lograr la selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas de gestión idóneos para lograr metas y objetivos de la Gestión Integral de Residuos Sólidos [5]. Muchas ciudades ubicadas en países en vías de desarrollo tienen poblaciones alrededor de los dos y medio millones de habitantes,

entre otras Guayaquil y Quito (Ecuador), Guatemala, San Salvador (El Salvador), Dakar (Senegal), Halab (Siria), Izmir (Turquía), Quingdao (China), Medellín (Colombia) y Puebla (México) [6]. La ciudad de Cali, Colombia, es una de estas ciudades, que comparten además del número de habitantes otras características demográficas que las hacen comparables, tales como el comportamiento de las migraciones, el desarrollo de zonas suburbanas y las desigualdades de ingresos de la población. Se propone un método eficiente para la cuantificación de los residuos sólidos residenciales en zonas urbanas de ciudades como las descritas, usando para efectos ilustrativos la ciudad de Cali. En el año 2006 el Municipio de Santiago de Cali (nombre oficial de la ciudad de Cali), decidió realizar el análisis de la generación de residuos sólidos residenciales en todo el territorio municipal, dado que la información más reciente databa de 1996 y se han presentado y observado cambios significativos en la dinámica y comportamiento de la población. Con tal fin, el Departamento Administrativo de Planeación Municipal –DAPM- se asoció con la Universidad del Valle para desarrollar un proyecto conjunto que permitiera cuantificar y caracterizar los residuos sólidos de origen residencial en las áreas rural y urbana de la ciudad, a partir de información reco-

lectada en las fuentes de generación. Cali es una ciudad que ocupa una extensión de 564 km², ubicada a 995 metros sobre el nivel del mar, en un valle ubicado entre dos cordilleras. Acorde con las proyecciones nacionales la ciudad cuenta con 2,4 millones de habitantes. Aproximadamente la cuarta parte del área de la ciudad es urbana y en ella se alberga más del 98% de la población total; en estudios realizados en dos comunas de la ciudad se encontró que la generación de residuos por estrato socioeconómico varió entre 0,4 y 1,1 kg/hab-día [7]. Este artículo se refiere a la cuantificación de los residuos sólidos generados en la parte residencial del área urbana del municipio, en el cual se tenían identificadas en el año 2005 unos 558 mil hogares que residían en cerca de 498 mil viviendas [8]. En atención a que la generación primaria de residuos sólidos residenciales ocurre en las viviendas, se requiere de un plan de muestreo que permita cuantificar la generación en la fuente. Se relacionan las diferentes fases en la elaboración del plan de muestreo tendiente a la cuantificación de los residuos sólidos residenciales generados en la zona urbana del municipio de Cali, así como sus conclusiones más relevantes. El propósito principal es la determinación del tamaño de muestra con la intención de estimar la generación per cápita (GPC) de los residuos sólidos residenciales generados en la zona urbana del municipio de Cali. Aunque es común en la literatura referirse a la generación per cápita (GPC) con el nombre producción per cápita (PPC), en este artículo se adopta la primera atendiendo al hecho que el término producción involucra operaciones o procesos que por lo general han sido planificados y responden a una voluntad. Esta voluntariedad no se presenta en el caso de los residuos por cuanto los residuos se generan independientemente de la voluntad del individuo. Aunque diversos autores proponen distintas metodologías y experiencias para la cuantificación y caracterización de los residuos, las condiciones específicas de Cali, que comparten las ciudades de su tamaño y características, hicieron necesaria la adaptación de las mismas. Por ejemplo, como alternativa a un listado exhaustivo de viviendas, se dispone de bases de datos que contienen conglomerados de

viviendas tales como sectores censales, manzanas o lados de manzana, clasificados por estrato socioeconómico (que es una alternativa para la clasificación de las viviendas por nivel de ingreso de la población). Cada lado de manzana está conformado por una o más viviendas y en cada vivienda habitan una o más personas, generando en la ciudad una gran heterogeneidad entre lados de manzana y dentro de ellos. Por otra parte la recolección de los residuos generados se hace en Cali con una frecuencia de dos veces por semana, lo que conduce a que el total generado en cada recolección varíe dependiendo del número de días que tardan en pasar los recolectores. Y finalmente existen fuertes diferencias en la predisposición de los habitantes a proveer la información y a entregar a los investigadores los residuos sólidos que se desea cuantificar. Un plan exitoso debería considerar entre otras estas características generales. Estas condiciones dinámicas de la ciudad y la información existente, crearon las condiciones para el diseño de una metodología de trabajo adaptada al contexto particular de Cali, tomando como referencia los trabajos reportados en la literatura científica.

Dada la importancia del problema de la cuantificación de residuos sólidos residenciales, muchos investigadores están trabajando en la búsqueda de soluciones. Por ejemplo, Alamgir y Ahsan [9] condujeron un extenso estudio en seis ciudades de Bangladesh, incluyendo la capital Dhaka (una ciudad de más de 10 millones de habitantes). En total se seleccionaron 320 muestras, incluyendo viviendas, instituciones, mercados y calles. En el caso de las viviendas, éstas se seleccionaron de cinco estratos socioeconómicos; las instituciones elegidas eran de dos tipos: escolares y hospitalarias; los mercados se eligieron de dos clases: abiertos y tipo supermercado; y las calles se barrieron algunas diariamente y otras cada dos días o dos veces a la semana. En este caso se escogió la muestra recolectada por la autoridad local encargada de esta tarea; en los otros casos los investigadores efectuaron la recolección. Se reporta una GPC promedio de 0,368 Kg. persona día en Dhaka, con una desviación estándar de 0,09, pero

el promedio encontrado para las seis ciudades es de 0,309, con desviación estándar 0,07. Sin excepción, las GPC son consistentemente crecientes según el estrato socioeconómico en todas las ciudades incluidas en el estudio. Aunque el propósito inicial del estudio es la caracterización, el estudio reporta las mediciones de cuantificación citadas. Infortunadamente el esquema de muestreo empleado no permite asociar niveles de error a los resultados, porque el muestreo no se condujo de manera tal que permitiera conclusiones a este nivel. Una década antes, Abu Qdais et al. [10] reportan otro esfuerzo por recolectar información en la fuente (viviendas) directamente, en lugar de hacerlo en los sitios de disposición final o en el transporte. En total visitaron 40 viviendas y recolectaron 840 muestras en Abú Dhabi, el más grande de los siete Emiratos Árabes Unidos, y reportan una GPC de 1,79 kg. persona día y un incremento lineal dependiente del nivel de ingresos, con un incremento del 35% para las clases altas, con respecto al promedio. El plan de muestreo no se presenta en el artículo y no se reportan inferencias, o al menos no con niveles de error ni de confianza asociados.

En general son relativamente pocos los estudios sobre generación de residuos sólidos reportados en la literatura científica internacional que se han basado en procedimientos de recolección en la fuente primaria de generación. En un estudio dirigido a la caracterización de los residuos sólidos domiciliarios del distrito de Santa Anita, un sector de la ciudad de Lima, Perú [11], se utilizó una muestra de 54 viviendas que se distribuyeron proporcionalmente en cuatro estratos socioeconómicos, para satisfacer un nivel de confianza del 95% y un error de muestreo del 5%; se asumió una estimación previa de la varianza obtenida en otro estudio preliminar en Lima. La recolección se hace en cada vivienda durante siete días consecutivos, de lunes a domingo y el promedio de GPC fue de 0,31 kg./hab-día. King y Murphy [12] reportan un estudio por muestreo en viviendas en el cual se utiliza un plan de muestreo probabilístico dirigido a la medición de la generación total en el Condado de Broward en

Florida, USA. Los resultados indican una generación anual de unos 1.500 kg por año por vivienda. En 2000, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), que es la Unidad de Saneamiento Básico del Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental (SDE) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) propuso [13] un método de muestreo de viviendas que escoge el número de viviendas a estudiar en cada estrato dependiendo de la desviación estándar de la generación per cápita en el estrato y del número de viviendas del estrato, para garantizar un nivel de confianza del 95% y un error de muestreo de 50 gramos por habitante por día. Otros estudios no acuden a la fuente sino a algún otro tipo de recolección, por ejemplo en el vehículo recolector, ruta de recolección o sector del municipio [14] o solo en los vehículos recolectores [15]. Otros autores, como Brokaw y Hornberger [16] reportan muestreo en rellenos sanitarios, en estaciones de reciclaje o en estaciones de transferencia. Y en otros casos el muestreo no se hace por unidades tales como viviendas o vehículos recolectores si no se refiere a la selección de muestras para caracterización, más que para cuantificación, y se toman en sitios de disposición final [17]. Pero este tipo de estudios no son comparables con el que se reporta en este documento, por cuanto su interés se centra en la recolección en las viviendas. A diferencia de los estudios citados, en este trabajo se considerará el hecho de que tanto la generación como el número de habitantes de cada vivienda son aleatorios, por lo que el cociente entre estas dos cantidades merece particular atención. La cantidad de residuos sólidos por persona por día por vivienda, se obtiene dividiendo la cantidad de residuos sólidos generada en la vivienda por el producto entre el número de personas que habitan la vivienda y el número de días asociado con la recolección de dicha cantidad en esa vivienda. Siendo la unidad de estudio la vivienda ubicada en el área urbana de Santiago de Cali, el proyecto estableció como objetivo central estimar la cantidad de residuos sólidos por persona por día para cualquier vivienda del área urbana, cantidad esta denominada GPC. Para cumplir con dicho objetivo se seleccionó

una muestra aleatoria de viviendas y para ellas sumar la cantidad de residuos sólidos de cada una y dividir esta cantidad entre el producto de la suma de personas que habitaron dichas viviendas y el número de días a que corresponde dicha recolección de residuos sólidos. A este cociente calculado de esta manera para varias unidades investigadas se le denomina un estimador de razón, el cual es una forma de promedio que converge al promedio poblacional más lentamente que el estimador media muestral.

Se presenta el plan de muestreo propuesto y se ilustra su uso en el proyecto de cuantificación y caracterización de los residuos sólidos residenciales en Cali, Colombia.

Diseño del plan de muestreo

Se definen como poblaciones objeto de estudio, en lo referente a la estimación de la generación per cápita de residuos sólidos (GPC) en el área urbana de Cali, las personas que habitaron las viviendas del área urbana de Cali durante el período enero a septiembre de 2006; y en lo referente a la caracterización de los residuos sólidos generados en el área urbana de Cali, los residuos sólidos generados por las personas que habitaron las viviendas del área urbana de Cali durante el período enero a septiembre de 2006. A diferencia de todos los estudios a los que se hace referencia, el marco muestral disponible en Cali está constituido por lados de manzana. Un lado de manzana se define como un conjunto de viviendas que ocupan uno de los dos lados opuestos de una calle, de una esquina a la siguiente. Así que el número de viviendas de un lado de manzana puede tomar cualquier valor entero no negativo. Se sigue que las poblaciones muestreadas y las unidades de muestreo fueron, de acuerdo con las poblaciones objeto de estudio, las siguientes:

- Población Muestreada N.º 1: Conjunto de lados de manzana del área urbana de Cali distribuidos por estrato socioeconómico. Cada lado de manzana está integrado por un número de viviendas diferente y recibe el nombre de unidad primaria de muestreo.

- Población Muestreada N.º 2: Conjunto de viviendas ubicadas en el área urbana de Cali con vocación exclusivamente habitacional. Cada vivienda de esta población recibe el nombre de unidad secundaria de muestreo.
- Población Muestreada N.º 3: Conjunto de bolsas que contienen los residuos sólidos de las viviendas del área urbana del municipio, generados por las personas que habitaron dichas viviendas en los períodos de recolección estipulados en el proyecto.

Con el propósito de seleccionar aleatoriamente las unidades de las poblaciones anteriormente establecidas se utilizaron los siguientes marcos muestrales, respectivamente, todos ellos disponibles en el DAPM:

- Listado de todos los lados de manzana del área urbana del municipio, clasificados por estrato socioeconómico (Estratos 1 al 6).
- Mapas del área urbana de Cali conteniendo: Perímetro urbano, Perímetro de barrios, Código Comuna, Nomenclatura vial, Zonas verdes y Ríos; suministrados por la oficina de Planeación Municipal de Cali.
- Planos de los lados de manzana que se seleccionan en forma aleatoria. Estos planos representan las viviendas de dicho lado aptas para el estudio y sobre ellos se seleccionaron mediante muestreo aleatorio sistemático las viviendas de dicho lado que fueron incluidas en la muestra final. Es necesario aclarar que el listado de lados del DAPM no contiene información sobre el número de viviendas aptas para el estudio ni sobre el número de predios que conforman cada lado. Por esta razón cada lado de manzana seleccionado fue visitado para el levantamiento del plano de viviendas aptas.

El método de muestreo utilizado para la estimación de la GPC y para la caracterización de los residuos sólidos del área urbana de Cali fue el muestreo aleatorio estratificado bietápico para estimaciones de razón con base en los tamaños de las unidades primarias de muestreo [18, 19].

La variable principal objeto de estudio fue la cantidad de residuos sólidos por persona por día generados en la vivienda j del lado i del estrato h , representada por Y_{hij} . Sobre esta variable se construye la GPC para el área urbana de la ciudad, representada por \bar{Y} , que indicará la cantidad de Residuos Sólidos (RS) por persona por día. La ecuación 1 describe el procedimiento de estimación de \bar{Y} . Se asume que k es el número de estratos. Para el caso de Cali se clasifica en seis estratos socioeconómicos.

$$\hat{\bar{Y}} = \sum_{h=1}^k W_h \cdot \hat{Y}_h \quad (1)$$

En la ecuación 1, $W_h = N_h \cdot \bar{M}_{oh} / \sum_{h=1}^k N_h \cdot \bar{M}_{oh}$ es la proporción de viviendas aptas por estrato; N_h es el total de lados de manzana que conforman el estrato h ; \bar{M}_{oh} es el promedio de viviendas aptas por lado de manzana en el estrato h . Además, \hat{Y}_h es un estimador de la cantidad de RS por persona por día por vivienda en el estrato h , el cual es un estimador de razón definido en la ecuación 2.

$$\hat{Y}_h = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} M_{hi} \cdot \hat{Y}_{hi}}{\sum_{i=1}^{n_h} M_{hi}} \quad (2)$$

En la ecuación 2, M_{hi} es el número de viviendas en el lado i del estrato h y \hat{Y}_{hi} es la cantidad de RS por persona por día por vivienda en el lado i del estrato h , el cual se calcula tal como se muestra en la ecuación 3; n_h es el total de lados de manzana en el estrato h .

$$\hat{Y}_{hi} = \frac{\sum_{j=1}^{m_{hi}} Y_{hij}}{m_{hi}} \quad (3)$$

En la ecuación 3 m_{hi} representa el número de viviendas en el lado i del estrato h . El lado de manzana (conglomerado) se consideró como unidad primaria de muestreo (UPM) y dentro de este se seleccionó aleatoriamente un número de viviendas proporcional al tamaño del lado en virtud de los costos de transporte, del pesaje de los RS y la supervisión de los mismos, así como de la nece-

sidad de caracterización rápida de las muestras. El efecto de estratificar los conglomerados (lados de manzana) para la consideración del estimador global permite reducir la variabilidad en las estimaciones presentadas al usar estimadores de razón. El estimador global $\hat{\bar{Y}}$ depende de conocer el total de viviendas aptas en cada estrato; lo cual no es posible saber a priori, de tal manera que este hecho también induce al uso de los estimadores de razón (observar por lado el total de RS y el total de viviendas aptas en él). Los estimadores de razón aunque son sesgados, son bastante eficientes cuando el total de la variable analizada en la UPM (en este caso el lado de manzana) depende en gran parte del tamaño de ésta. Considerando un estimador de razón al tamaño del conglomerado, se origina una distribución del estimador con varianza pequeña; por otra parte, el tamaño del sesgo es inversamente proporcional al número de conglomerados seleccionados [20].

Tamaño de muestra

El tamaño de muestra final se determinó con base en la varianza del estimador $\hat{\bar{Y}}$ la cual se presenta en la ecuación 4, de la cual se deriva la ecuación 5.

$$V(\hat{\bar{Y}}) \cong \sum_{h=1}^k W_h^2 \cdot V(\hat{Y}_h) \quad (4)$$

$$V(\hat{Y}_h) \cong \frac{1}{M_{oh}^2} \left[\frac{N_h \cdot (N_h - n_h)}{n_h} \cdot \sum_{i=1}^{n_h} \frac{(Y_{hi} - M_{hi} \cdot \bar{Y}_h)^2}{N_h - 1} + \frac{N_h}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} M_{hi} \cdot (M_{hi} - m_{hi}) \cdot \frac{S_{Y_{hi}}^2}{m_{hi}} \right] \quad (5)$$

En la ecuación 5, N_h es el total de lados de manzana del estrato h ; n_h es el número de lados de manzana muestreados en el estrato h ; M_{oh} es el total de viviendas aptas –en un lado de manzana pueden aparecer predios que se utilizan con fines diferentes a la vivienda (por ejemplo una tienda o un taller artesanal), que no se consideran aptas para el estudio– en el estrato h ; y $S_{Y_{hi}}^2$ es la variabilidad de Y_{hi} (GPC) en las viviendas del lado i en el estrato h . En un modelo bietápico se tienen

dos tipos de variabilidad: de una parte la variabilidad entre unidades grandes (lados de manzana) (Ecuación 6) y por otro lado, la variabilidad entre unidades elementales (viviendas) al interior de cada lado de manzana (Ecuación 7).

$$\hat{S}_{UPMh}^2 = \frac{1}{n_h - 1} \sum_{i=1}^{n_h} (\hat{Y}_{hi} - M_{hi} \cdot \hat{\bar{Y}}_h)^2;$$

con $\hat{Y}_{hi} = M_{hi} \cdot \hat{\bar{Y}}_{hi}$ (6)

$$\hat{S}_{Y_{hi}}^2 = \frac{1}{m_{hi} - 1} \sum_{j=1}^{m_{hi}} (Y_{hij} - \hat{\bar{Y}}_{hi})^2 \quad (7)$$

Para llegar al tamaño de muestra global y su repartición proporcional en los estratos considerados se tomó inicialmente una muestra aleatoria piloto de lados de manzana en forma sistemática dentro de cada estrato, una vez levantado el plano del lado. Con base en éste se seleccionó un número de viviendas en forma aleatoria sistemática. Esta muestra piloto estuvo integrada por 58 lados de manzana, los cuales estaban conformados por un total de 485 viviendas. La distribución por estratos de la muestra piloto se presenta en la tabla 1. A partir de la muestra piloto se calcularon estimaciones preliminares de las varianzas requeridas en las expresiones dadas anteriormente para la varianza del estimador global y se determinó además que el número de viviendas muestreadas

por lado de manzana se encontraría mediante la relación: $m_{hi} = M_{hi} \cdot \frac{\bar{m}_h}{\bar{M}_{oh}}$, (con \bar{m}_h el promedio de viviendas aptas por lado en el estrato h y \bar{M}_{oh} el promedio de viviendas aptas por lado de manzana en el estrato h) la cual permite establecer que la fracción de muestreo en las unidades secundarias (proporción de viviendas por lado) se mantenga aproximadamente constante. Este hecho ayuda a reducir la variabilidad entre unidades elementales (viviendas) que en este estudio no es cero ya que no se realizó censo en cada lado por razones de costo, tiempo y transporte de las

muestras de RS, significando con ello que la variabilidad del estimador global recae fuertemente en la variabilidad existente entre lados de manzana. Cuando la fracción de muestreo entre unidades secundarias (viviendas) se hace constante el diseño de muestreo se denomina autoponderado y facilita la obtención de la expresión final del número de lados (conglomerados) requeridos para una varianza determinada.

Tabla 1 Distribución por estratos del número de lados seleccionado en la muestra piloto

Estrato socio-económico	Número de lados de manzana	Número de viviendas muestreadas
1	12	109
2	16	131
3	17	133
4	4	34
5	4	35
6	5	43
Total	58	485

Por otra parte, los RS son recogidos por la empresa local dos veces a la semana, por lo que se realizó el cálculo de la muestra correspondiente a los dos períodos de recolección dentro de la semana y se tomó la muestra resultante mayor de las dos situaciones. Finalmente, se asume un error del 5% del $\hat{\bar{Y}}$ piloto y un nivel de confianza del 95%. El tamaño de muestra final resultante fue de 214 lados de manzana de un total de 36.712 lados. Esta muestra representa una fracción global de muestreo inferior a 0,88%. La expresión final considerada para el número de lados requeridos en el plan de muestreo se presenta en la ecuación 8.

$$n = \frac{\sum_{h=1}^k W_h \cdot (\hat{A}_h + \hat{B}_h)}{V(\hat{\bar{Y}}) + \sum_{h=1}^k W_h^2 \cdot \frac{\hat{A}_h}{N_h}} \quad (8)$$

En la ecuación 8, $\hat{A}_h = \left(\frac{N_h}{M_{0h}} \right)^2 \cdot \hat{S}_{UPM_h}^2$ y

$\hat{B}_h = \left(\frac{N_h}{M_{0h}^2} \right) \cdot \sum_{i=1}^{n_h} M_{hi}^2 \cdot \left(1 - \frac{m_{hi}}{M_{hi}} \right) \cdot \hat{S}_{V_{hi}}^2$. Además,

$V(\hat{\bar{Y}}) = \left(\frac{\delta}{Z_{\alpha/2}} \right)^2$; $n_h = W_h \cdot n$; $\forall h$ y δ es el

error absoluto asumido. $Z_{\alpha/2}$ representa el percentil de la distribución normal estándar asociado al nivel de confianza del 95%.

Resultados

En la figura 1 se presenta la metodología seguida para llegar hasta las unidades secundarias de muestreo (viviendas).

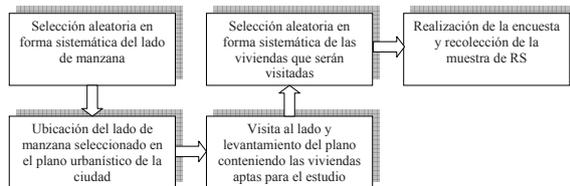


Figura 1 Protocolo para la fase de muestreo

Cuando el lado seleccionado correspondió a una unidad residencial o condominio, cada apar-

tamento se asimiló a una vivienda y el número de ellos seleccionado para la muestra se manejó como una proporción del promedio de viviendas por lado en el estrato al cual pertenece la unidad. En la figura 2 presenta la distribución final de la muestra, que, como se observa, se distribuye en toda la ciudad. La tabla 2 muestra la forma como quedó distribuida proporcionalmente la muestra final en los estratos socioeconómicos en que se divide la Ciudad de Cali.

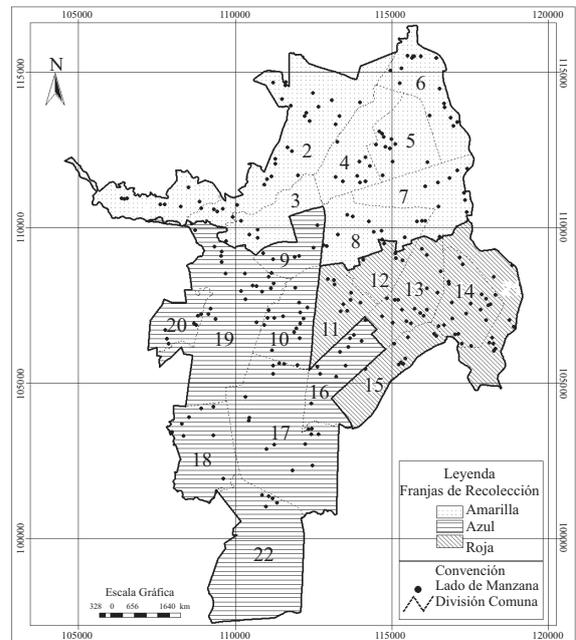


Figura 2 Mapa de Cali en el que cada punto representa un lado seleccionado en la muestra final

Tabla 2 Distribución por estratos del número de lados seleccionado en la muestra final

Estrato	Significado socioeconómico	Total de lados	Muestra estimada (lados)	Muestra real (lados)	Muestra de viviendas por estrato
1	Bajo-Bajo	7.366	43	50	429
2	Bajo	11.611	68	70	598
3	Medio-Bajo	11.850	69	74	607
4	Medio	2.416	14	31	222
5	Medio Alto	2.753	16	17	126
6	Alto	716	4	16	108
Total		36.712	214	258	2.090

Los análisis detallados de los resultados de cuantificación obtenidos no se presentan en este artículo por razones de espacio y porque el propósito es proponer un diseño de muestreo adaptable a varias situaciones posibles en las ciudades en las que es aplicable. Los resultados del estudio también se utilizaron para realizar análisis de caracterización, con ligeras adaptaciones del plan

de muestreo, pero de nuevo no es objeto de este artículo describir tales resultados. En este artículo se muestran resultados globales, con fines ilustrativos. Con la muestra estipulada se obtuvieron las estimaciones para la GPC global para la zona urbana del municipio de Cali que aparecen en la tabla 3. Los resultados por estratos socio-económicos se describen en la tabla 4.

Tabla 3 GPC global y estimación de la varianza de la GPC

$\hat{\bar{Y}}$	$\hat{V}(\hat{\bar{Y}})$	\hat{LINF}	\hat{LSUP}	$\hat{CV}(\hat{\bar{Y}})$
0,393709408	4,2926E-05	0,38086782	0,406550998	0,016641288

Tabla 4 Estimación por estratos de la GPC

Estrato	GPC (Kg./hab.día)	Intervalo del 95% de confianza
1	0,34	0,32---0,35
2	0,36	0,34---0,38
3	0,37	0,35---0,39
4	0,49	0,44---0,55
5	0,60	0,49---0,70
6	0,77	0,64---0,90

Por otra parte, es bien conocido que los estimadores definidos como \bar{Y}_h para el estrato h y $\hat{\bar{Y}}$ para toda la ciudad son sesgados ya que son estimadores de razón. Es importante entonces verificar si la magnitud del sesgo es apreciable o por el contrario lo suficientemente pequeña como para que pueda ser considerada despreciable. La ecuación 9 presenta la expresión aproximada para la estimación del sesgo de $\hat{\bar{Y}}$.

$$\hat{B}(\hat{\bar{Y}}) \cong \left(\frac{N_h - n_h}{N_h \cdot n_h \cdot \bar{M}_h} \right) \left(\hat{\bar{Y}}_h \cdot S_{M_h}^2 - S_{(M_h, \hat{Y}_h), M_h} \right) \quad (9)$$

En la ecuación 9, \bar{M}_h representa el número promedio de viviendas por lado en el estrato h ; $S_{M_h}^2$ es la cuasivarianza entre el número de viviendas

por lado en el estrato h y $S_{(M_h, \hat{Y}_h), M_h}$ es la cuasicovarianza entre el total de residuos sólidos por lado y el número de viviendas por lado en el estrato h . La cantidad $\hat{B}(\hat{\bar{Y}}_h)$ se considera despreciable [20] si se satisface la desigualdad de la ecuación 10.

$$\left| \frac{\hat{B}(\hat{\bar{Y}}_h)}{\sqrt{V(\hat{\bar{Y}}_h)}} \right| < 0,1 \quad (10)$$

La tabla 5 muestra los resultados respectivos para dicha verificación.

Nótese en la última columna de la tabla 5, que el sesgo estimado para la cantidad de RS por persona por día en todos los estratos es despreciable, de acuerdo con el criterio presentado en la ecuación 10. En cuanto al estimador del sesgo del estimador del GPC global se tiene que

$\hat{B}(\hat{\bar{Y}}) \cong \sum W_h \cdot B(\hat{C}_h)$ Al realizar los cálculos encontramos $\left| \hat{B}(\hat{\bar{Y}}) / \sqrt{V(\hat{\bar{Y}})} \right| = 0,0119 < 0,1$ con lo cual se verifica que el sesgo no es importante para el estimador de la cantidad de RS por persona por día para la ciudad de Cali y que por lo tanto los resultados globales obtenidos no están afectados por el sesgo del estimador.

Tabla 5 Evaluación del tamaño relativo del sesgo de estimación por estrato

<i>Estrato</i>	$\hat{V}(\hat{\bar{Y}}_h)$	$\hat{B}(\hat{\bar{Y}}_h)$	$\left \hat{B}(\hat{\bar{Y}}) / \sqrt{\hat{V}(\hat{\bar{Y}})} \right $
1	4,51887E-05	-0,00014106	0,020983934
2	0,000117895	-6,7781E-05	0,006242499
3	8,23459E-05	9,44E-05	0,010402795
4	0,000781594	0,00064448	0,023052518
5	0,002766981	0,00081607	0,015513952
6	0,004706499	-0,00034339	0,005005364

Conclusiones

- Se propone en este artículo un plan de muestreo adaptable a ciudades de tamaño mediano, el cual se aplicó exitosamente en la ciudad de Cali, Colombia. En este caso el plan requirió de una muestra piloto con el propósito de obtener estimaciones preliminares de la varianza de las mediciones que permitieron estimar el tamaño final de muestra.
- El muestreo bietápico, en el cual se selecciona primero un conglomerado de viviendas seguido por la selección de las viviendas en sí, se recomienda para este tipo de estudios ya que para su utilización bastaría con listados de manzanas, lados de manzana, sectores censales, barrios u otras formas de agrupaciones de viviendas. En tales casos el muestreo bietápico propuesto es aplicable y resultará en todo caso más económico que un muestreo directo de viviendas.
- La selección sistemática tanto de lados como de viviendas también resulta ser una solución conveniente, como se demuestra al observar su adecuada distribución en la zona urbana de la ciudad. La muestra final incluyó 2.090 viviendas de todos los estratos de la zona urbana de Cali.
- La estrategia de visitas previas y encuestas domiciliarias permitió la integración y colaboración de la comunidad con el estudio reduciendo el efecto de no-respuesta. Los autores recomiendan integrar este tipo de actividades en estudios similares.
- Los resultados de cuantificación indican valores del GPC residencial en la zona urbana de Cali acordes con lo esperado para una ciudad de tamaño mediano. En la obtención de las estimaciones se manejó un error del 5% y un nivel de confianza del 95%, valores estos recomendados en la literatura ambiental.
- El valor final global de la GPC residencial obtenido para la ciudad de Cali, es ligeramente inferior al recomendado por las guías y normas nacionales para ciudades como Cali y también está por debajo de los resultados reportados en la literatura científica para ciudades similares.
- La metodología empleada permitió obtener valores muy confiables, con nula afectación por sesgos atribuibles a la estrategia metodológica empleada.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Departamento Administrativo de Planeación Municipal del Municipio de Cali y a la Universidad del Valle, instituciones que financiaron la realización de proyecto de investigación a través del cual se obtuvieron estimaciones de la generación y composición de los residuos

Referencias

1. IDEAM, UNICEF, CINARA. *Marco político y Normativo para la gestión integral de residuos sólidos en Colombia*. 2005. <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/PoliticayNormatividad.pdf>. Consultada el 25 de junio de 2008.
2. O. Ayalon, Y. Avnimelech. "On the pattern of decision making of municipal solid waste management". *Appropriate Environmental and solid waste management and technologies for Developing Countries*. Vol. 1. ISWA. 2002. pp. 183-190.
3. L. F. Diaz, G. M. Eggerth, C. G. Golueke. "The role of composting in the management of solid wastes in Economically Developing Countries". *Appropriate Environmental and solid waste management and technologies for Developing Countries*. Vol. 2. 2002. ISWA. pp. 1353-1362.
4. H. J. Mosler, S. Drescher, C. Zurbrügg, T. Caballero, O. Guzmán Miranda. "Formulating waste management strategies based on waste management practices of households in Santiago de Cuba, Cuba". *Habitat International*. Vol. 30. 2006. pp. 849-862.
5. G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil. "Gestión Integral de residuos sólidos". Ed. McGraw-Hill. Bogotá. Colombia. 1994. pp. 16.
6. "Les 335 plus grandes agglomérations dans le monde". www.olscom.com/agglomerations/. Consultada el 25 de junio de 2008.
7. H. Collazos. *Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios*. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2ª ed. Cali. Colombia. 2005. pp. 31-32.
8. DAPM. *Cali en cifras*. Alcaldía de Santiago de Cali. Departamento Administrativo de Planeación Municipal. 2005. pp. 9-120.
9. M. Alamgir, A. Ahsan. "Municipal Solid Waste and Recovery Potential: Bangladesh Perspective". *Iranian Journal of Health Science Engineering*. Vol. 4. 2007. pp. 67-76
10. H. A. Abu Qdais, M. F. Hamoda, J. Newham. "Analysis of Residential Solid Waste at Generation Sites". *Waste Management & Research*. Vol. 15. 1997. pp. 395-405
11. M. Mejía. *Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios del distrito de Santa Anita*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú. 2004. <http://www.monografias.com/trabajos16/residuos-solidos/residuos-solidos.shtml>. Consultada el 28 junio de 2007.
12. B. F. King, R. C. Murphy. "Survey to Estimate Residential Solid Waste Generation". *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 122. 1996. pp. 897-901.
13. K. Sakurai, *HDT 17: Método sencillo del análisis de residuos sólidos*. 2000. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>. Consultada el 20 de septiembre de 2006.
14. CPTMA. *Estudio de composición y caracterización de las basuras urbanas en la Comunidad Autónoma de Canarias*. Consejería de Política Territorial y Medio Ambiente Gobierno de Canarias - AEPO Consultores. 2001. <http://www.gobiernodecanarias.org/cmoyot/medioambiente/calidadambiental/residuos/basuras/metodologia.pdf>. Consultada el 22 de septiembre de 2007.
15. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (IIS) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (UBA) - Dirección General de Higiene Urbana del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. 2001. *Calidad y gestión de los residuos sólidos Ciudad de Buenos Aires*. <http://escuelas.fi.uba.ar/iis/>. Estudio de Calidad RSU-CBA 2001.pdf. Consultada el 18 de junio de 2007.
16. W. S. Brokaw, G. S. Hornberger. "Municipal Solid Waste Sampling and Characterization". *Sampling Environmental Media*. ASTM STP 1282. James Howard Morgan (editor). American Society for Testing and Materials. 1996. pp. 137-142.
17. B. Lohani, S. M. Ko. "Optimal Sampling of Domestic Solid Waste". *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 114. 1988. pp. 1479-1483.
18. W. Cochran. *Técnicas de Muestreo*. Ed. CECSA. México. 1980. pp. 372-373.
19. I. Méndez, G. Eslava, P. Romero. *Conceptos básicos de muestreo*. UNAM. 2004. pp. 63-69.
20. D. Ospina. *Introducción al muestreo*. Universidad Nacional. Bogotá. 2001. pp. 163-212.