

**Análisis económico sobre el tamaño
óptimo del mercado y ubicación
de estaciones de transferencia para el
manejo de residuos sólidos en Colombia**

Jorge Perdomo y Juan Ramírez

Jorge Perdomo y Juan Ramírez

Análisis económico sobre el tamaño óptimo del mercado y ubicación de estaciones de transferencia para el manejo de residuos sólidos en Colombia

Resumen: El objetivo principal de este estudio es realizar un análisis económico para estimar el tamaño de mercado óptimo, con el fin de tomar de decisiones sobre la viabilidad de contar con una estación de transferencia (ET) y su adecuada distancia para ubicarla, de acuerdo con la longitud del trayecto a recorrer entre un sitio origen y el relleno sanitario más cercano. Lo anterior, haciendo uso del método de evaluación de impacto diferencia en diferencias, mediante un modelo de datos panel con efectos aleatorios y análisis estático comparativo de optimización matemática. Técnicas, que permitieron comparar el comportamiento de los costos totales de producción, entre firmas recolectoras de residuos sólidos con y sin estación de transferencia, en un período de tres años (2006-2008). Así, se evidenció cómo estas empresas disminuyen los gastos de operación y mantenimiento cuando implementan por lo menos una estación de transferencia.

Palabras clave: evaluación de impacto, residuos sólidos, estaciones de transferencia, datos panel, diferencia en diferencias, optimización matemática. Clasificación JEL: Q53, R42, R48, R53.

Economic Analysis about the Solid Waste Quantities and Optimal Hauling Distance to Install Transfer Stations in Colombia

Abstract: The main objective of this study is to develop an economic analysis estimating the solid waste quantities and optimal hauling distance to install transfer stations in Colombia, according to landfill location. This goal is met by using a difference in differences approach (impact evaluation technique), means panel data (random effects), comparative static analysis and mathematical optimization. These methods allowed comparing total production costs between firms with and without transfer stations during three years (2006 to 2008). This study suggests that the use of a transfer station reduces maintenance and operation costs.

Keywords: Impact evaluation, solid waste, transfer stations, panel data, difference in differences, mathematical optimization. JEL Classification: Q53, R42, R48, R53.

L'analyse économique sur la taille optimale du marché et l'emplacement de stations de transfert pour la gestion des déchets solides en Colombie

Résumé : Cette étude propose une analyse économique pour estimer la taille optimale du marché, afin de prendre des décisions concernant la viabilité d'une station de transfert (TS) pour la gestion des déchets solides. Nous considérons son emplacement en tant que variable fondamentale et, tout particulièrement, nous considérons la distance parcourue entre un lieu d'origine des déchets et le centre d'enfouissement. Pour ce faire, nous utilisons la méthode d'évaluation d'impact en « double différence », à travers un modèle de données de panel avec des effets aléatoires et une analyse comparative statique d'optimisation mathématique. Il s'agit d'une technique qui permet de comparer les coûts de production totaux des sociétés colombiennes qui gèrent des déchets solides à travers une station de transfert, avec les entreprises qui n'ont pas une telle station, pour la période 2006-2008. Nous constatons que les sociétés réduisent, en effet, leurs coûts d'opération et d'entretien lorsqu'elles disposent d'au moins une station de transfert.

Mots-clés : évaluation de l'impact, stations de transfert des déchets solides, données de panel, double différence, optimisation mathématique. Classification JEL: Q53, R42, R48, R53.

Análisis económico sobre el tamaño óptimo del mercado y ubicación de estaciones de transferencia para el manejo de residuos sólidos en Colombia

Jorge Perdomo y Juan Ramírez*

–Introducción. –I. Literatura relacionada. –II. Marco teórico y metodológico. –III. Datos y análisis empírico. –Conclusiones y sugerencias. –Referencias.

Primera versión recibida en septiembre de 2011; versión final aceptada en diciembre de 2011

Introducción

En Colombia la transferencia de residuos sólidos, previo a su disposición final, es definida en el Artículo 1° del Decreto 1713 de 2002 (Alcaldía de Bogotá, 2002). Entre tanto, a partir de septiembre de 2005 y abril de 2009 comienzan a operar las estaciones de transferencia (ET)¹ del Valle de Aburra (Antioquia) y Palmaseca (Valle del Cauca) respectivamente. Convirtiéndose en las dos únicas alternativas del país para realizar este tipo de práctica, de acuerdo con lo establecido en la regulación. Adicionalmente, en Bogotá fue clausurada una de ellas y actualmente se debate la viabilidad de este proyecto en diferentes zonas del país.

* *Jorge Andrés Perdomo Calvo*: Teknidata Consultores, Subdirector de Análisis Cuantitativo, Bogotá-Colombia. Dirección electrónica: jperdomo@teknidataconsultores.com. Dirección postal: Carrera 18 No.86A-14. *Juan Andrés Ramírez Orozco*: Total Waste Management, Director de Procesos, Bogotá-Colombia-. Dirección electrónica: juan.ramirez@twm-sa.com. Dirección postal: Carrera 7 No.74-56, Oficina 708.

Corresponde a los autores: la opinión y resultados de los autores no compromete el pensamiento y estudios técnicos realizados en el tema por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y todo lo plasmado en el presente documento es de exclusiva responsabilidad de ellos y no de la CRA.

1. Se refiere *“al conjunto de equipos e instalaciones, donde se realiza el transbordo de residuos sólidos desde camiones recolectores a otros con mayor capacidad de carga para llevarlos al sitio destino o relleno sanitario. Estos sitios, pretenden incrementar la eficiencia del servicio como resultado de reducir el tiempo de viaje y costos de transportarte”* (Sánchez y Estrada, 1996, p. 7).

Ante esto, y con el fin de evaluar las actividades de transferencia para residuos sólidos en Colombia, mediante la construcción y operación de estaciones de transferencia, el presente estudio tiene como objetivo principal realizar un análisis económico para estimar el tamaño de mercado óptimo, con el fin de tomar decisiones sobre la viabilidad de contar con una estación de transferencia y su adecuada distancia para ubicarla, de acuerdo con la longitud del trayecto a recorrer entre un sitio origen y el relleno sanitario más cercano. Lo anterior, haciendo uso del método de evaluación de impacto diferencia en diferencias, mediante un modelo de datos panel con efectos aleatorios y análisis estático comparativo de optimización matemática.

De esta forma, el presente trabajo busca que las entidades estatales colombianas y privadas encargadas del manejo y tratamiento de residuos sólidos, realicen este tipo de análisis bajo las metodologías descritas, para poder medir ecuánimemente los beneficios económicos generados por implementar estaciones de transferencia y así incentivar su construcción, con el fin de mejorar la eficiencia del transporte de residuos sólidos a los rellenos sanitarios. Adicionalmente, ayudar al diseño de instrumentos, políticas y fortalecimiento regulatorio sobre la planificación y construcción de estos proyectos en Colombia.

Para alcanzar el objetivo principal del estudio, el documento se divide en cuatro partes, de la siguiente manera: la sección I, comprende el estado del arte mediante una revisión literaria nacional e internacional en el tema. La sección II, presenta una síntesis teórica y metodológica con los aspectos más destacados sobre evolución de los costos de transporte de residuos sólidos, datos panel y diferencia en diferencias. La sección III, contiene la fuente, descripción de la información y los resultados empíricos. Por último, se presentan las conclusiones y sugerencias derivadas del trabajo.

I. Literatura relacionada

Considerando que internacionalmente la mayor parte de los trabajos realizados en el tema son teóricos, hay una cantidad reducida con aplicaciones empíricas y no existe, hasta el momento, estudios que empleen métodos de evaluación de impacto, datos panel y análisis estático comparativo de optimización matemática. Por esto, a continuación se hace énfasis en los más relevantes, publicados en revistas indexadas y borradores de trabajos. Entre algunos de ellos, se destacan los siguientes:

Para Colombia, Perdomo y Ramírez (2010) emplearon la metodología de evaluación de impacto diferencia en diferencias, un modelo de datos panel con efectos aleatorios y optimización matemática. Tras sus estudios, concluyen que

cuando los rellenos sanitarios están ubicados a más de 35 kilómetros (km), del centro de partida servido, es necesario implementar, al menos, una estación de transferencia para efectuar el transbordo de residuos sólidos a vehículos con mayor capacidad.

En el ámbito internacional, Malarin y Vaughan (1997) señalan que rellenos sanitarios ubicados por encima de los 20 a 40 km necesitan apoyarse en una estación de transferencia para disminuir los costos de recolección y transporte de residuos sólidos. La misma conclusión fue pronunciada por Victorian Government Department of Sustainability and Environmental (2009) en Melbourne-Australia, pero refiriéndose a un tiempo de viaje superior a 30 minutos de recorrido entre el sitio origen y el relleno sanitario. Al respecto, también puede consultarse Ouano (1983), Bovea *et al.* (2007) y Komilis (2008).

Por otra parte, y de acuerdo con las estimaciones realizadas por United States Environmental Protection Agency –EPA– (2001), 100 toneladas diarias de residuos sólidos es el monto mínimo requerido para operar una estación de transferencia tipo descarga directa con aumento en capacidad, esto teniendo en cuenta el crecimiento poblacional, agrícola e industrial de una zona, debido a que este tipo de estación es la más económica de implementar.

Asimilando los anteriores criterios, la Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste (Ministry of Environment, 2005) describe el comportamiento desagregado de costos para estaciones de transferencia que tienen capacidad de recibir hasta 10.000 toneladas/año, 192 toneladas/semana (10.000/52 semanas) o 27,4 toneladas/día (192/7 días). No obstante, este valor puede variar de acuerdo con las condiciones del mercado atendido, siempre que garantice la ocupación de los vehículos de transferencia disponibles.

En el mismo sentido, según United Nations Environment Programme –UNEP– (2005), antes de tomar la decisión de realizar una estación de transferencia, es importante y esencial realizar cuidadosamente un análisis beneficio-costos, económico y financiero, y con los resultados del mismo determinar la viabilidad del proyecto. Así, los lugares de transferencia deben implementarse únicamente cuando los costos de transporte directo hasta el relleno sanitario en los vehículos de recolección supera representativamente a los incurridos con el transporte a granel, apoyado en una estación y que sus ahorros de implementación resulten significativos.

De esta forma, y como conclusión de la literatura relacionada, la mayor parte de los estudios expuestos emplearon metodologías con estadísticas descriptivas y técnicas econométricas convencionales para determinar los resultados. Por consiguiente, y a diferencia de los trabajos analizados, en la siguiente sección se

presenta el marco teórico y metodológico que pretende mejorar la precisión del tamaño de mercado óptimo y distancia adecuada de los rellenos sanitarios, con el fin de tomar la decisión de implementar o no una estación de transferencia.

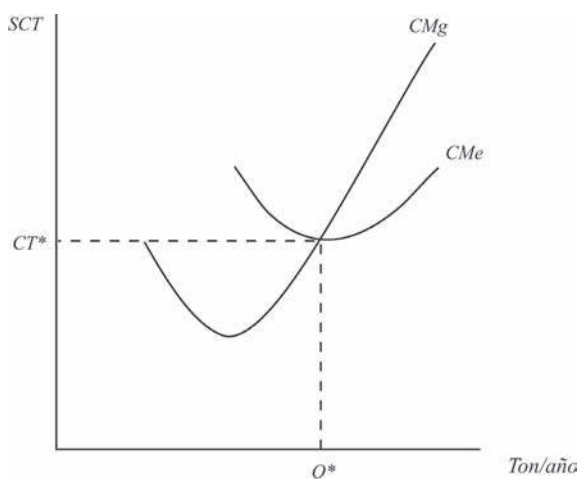
II. Marco teórico y metodológico

Esta sección comprende el marco teórico microeconómico y metodológico de los aspectos más relevantes desarrollados en economía del transporte sobre análisis de costos (McCarthy, 2001; De Rus *et al.*, 2003; Mendieta y Perdomo, 2008) y los mecanismos más utilizados para calcular la distancia óptima donde debe ubicarse una estación de transferencia, de acuerdo con la longitud recorrida entre un punto origen y el relleno sanitario más cercano. Asimismo, son incluidas las técnicas datos panel y diferencia en diferencias para llevar a cabo las estimaciones.

A. Análisis de costos de producción de transporte y tamaño del mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia

Aunque los marcos teóricos, metodológicos y guías desarrolladas en el ámbito internacional establecen la distancia o tiempo de recorrido, entre el punto de origen y el relleno sanitario más cercano, como el principal determinante para establecer una o más estaciones de transferencia. Previamente, es importante calcular el tamaño óptimo del mercado o cantidad de residuos sólidos a recoger (Q^* : toneladas-año) de acuerdo con el comportamiento del costo marginal (CMg) y medio (CMe) de recolección (véase Gráfico 1), con el fin de conocer la viabilidad de instaurar, por lo menos, una estación de transferencia.

Gráfico 1. Cantidad óptima de recolección y costo del transporte de residuos sólidos



Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, y tal como lo muestra el Gráfico 1, el monto adecuado de residuos sólidos a recolectar puede derivarse de un análisis del costo total de producción de transporte con estación de transferencia (CT). Así, la carga mínima (Q^*) generadora del menor costo es el resultado de igualar el costo marginal (CMg) y medio (CMe), dicho de otra forma, es el punto donde se cruzan las curvas en el Gráfico 1. Esta situación garantiza la viabilidad de instalar una estación de transferencia, dado que con cantidades inferiores a esta carga mínima, el CMe es superior al CMg , situación que genera pérdidas para los oferentes del servicio de transporte y recolección de residuos sólidos.

Lo anterior, es posible determinarlo a partir de las ecuaciones de la Tabla 1, las cuales presentan la función de costo total (CT) determinada por la cantidad de toneladas de residuos sólidos recolectados (Q). Donde, α_0 , α_1 , α_2 , γ_0 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , δ_0 y δ_1 describen los respectivos parámetros en cada modelo. Mientras θ y λ son los coeficientes de transformación no lineales para la función Box-Cox.

Tabla 1. Funciones de costo total, marginal y medio

Nombre	Ecuación forma funcional CT	$CMg = \frac{\partial CT}{\partial Q}$	$CMe = \frac{CT}{Q}$
Cuadrática	$CT = \alpha_0 - \alpha_1 Q + \alpha_2 Q^2$	$-\alpha_1 + 2\alpha_2 Q$	$\frac{\alpha_0}{Q} - \alpha_1 + \alpha_2 Q$
Cúbica	$CT = \gamma_0 + \gamma_1 Q - \gamma_2 Q^2 + \gamma_3 Q^3$	$\gamma_1 - 2\gamma_2 Q + 3\gamma_3 Q^2$	$\frac{\gamma_0}{Q} + \gamma_1 - \gamma_2 Q + \gamma_3 Q^2$
No lineal (Box-Cox)	$\frac{CT^\theta - 1}{\theta} = \delta_0 + \delta_1 \frac{Q^\lambda - 1}{\lambda}$	$\delta_1 \frac{Q^{\lambda-1}}{CT^{\theta-1}}$	$\frac{\left(\theta \left[\delta_0 + \delta_1 \frac{Q^\lambda - 1}{\lambda} \right] + 1 \right)^{1/\theta}}{Q}$

Fuente: Elaboración de los autores con base en información de Nicholson (2002), Chiang (1984), Mendieta y Perdomo (2008), Perdomo (2010 y 2011), Perdomo y Hueth (2011).

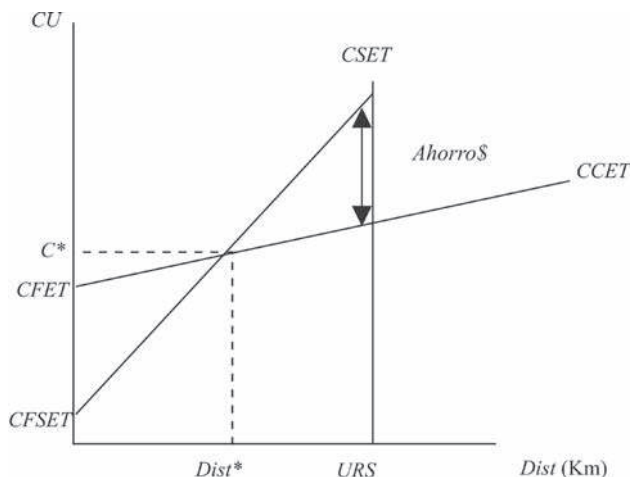
De este modo, y con el fin de hallar la cantidad óptima (Q^*) a partir de CMg y CMe , debe especificarse una aproximación cuadrática, cúbica o Box Cox². De tal forma, y de acuerdo con De Rus y Campus (2003), en los costos (fijos y variables) incurridos por las firmas recolectoras y transportadoras, deben incluirse los costos de construcción, operación y mantenimiento de una estación de transferencia.

2 Porque en una función lineal es imposible determinar las cantidades, dado que la variable Q se cancela cuando es igualado y solucionado el CMg y CMe .

B. Evolución de los costos de transporte de residuos sólidos al relleno sanitario con y sin estaciones de transferencia

Adicionalmente, la razón económica es la principal causa para incentivar la construcción de estaciones de transferencia, dado que su establecimiento genera reducción en los gastos de transporte de residuos sólidos. Lo cual puede determinarse mediante el comportamiento de sus costos unitarios ($CU, \frac{\$}{Ton}$) como función de la distancia recorrida ($Dist$) entre el punto de origen y el relleno sanitario más cercano (véase Gráfico 2)³.

Gráfico 2. Análisis de costos unitarios a lo largo del recorrido entre el origen de recolección y relleno sanitario



Fuente: Ouano (1983, p. 2).

Así, el Gráfico 2 muestra que una vez determinada la distancia existente entre el lugar de origen y el punto de corte (PC) o cruce entre las curvas de costos lineales con y sin estación de transferencia ($CCET$ y $CSET$, respectivamente), se puede señalar la distancia adecuada ($Dist^*$) donde debe situarse un sitio de disposición final de residuos sólidos. Sin embargo, cuando la ubicación del relleno sanitario (URS) se encuentra más distante del lugar óptimo destacado, es necesario implementar en esta área una o más estaciones de transferencia para disminuir el costo unitario del transporte de residuos sólidos o generar ahorros hasta su sitio de disposición final. Adicionalmente, el Gráfico ilustra el

3 Para más información, véase United States Environmental Protection Agency –EPA– (2001).

diferencial de costos fijos unitarios con y sin estación de transferencia (*CFET* y *CFSET*, respectivamente). Donde el primero es superior al segundo, debido a los representativos gastos iniciales que implica la implementación de una estación de transferencia.

Los costos de este proceso se determinan a partir de las ecuaciones en la Tabla 2, donde, φ_0 y β_0 representan los costos fijos unitarios *CFET* y *CFSET* (correspondientemente), φ_1 , φ_2 , φ_3 , β_1 , β_2 y β_3 describen el efecto marginal en cada modelo⁴ o respectiva pendiente, de acuerdo con la forma funcional establecida⁵. Asimismo, las expresiones de la Tabla 2 son estimables econométricamente, y a partir de sus resultados es posible encontrar la distancia óptima (*Dist**)⁶ donde debe ubicarse el relleno sanitario, o en su defecto ser situada la estación de transferencia, cuando el sitio de disposición final se encuentra más distante de este lugar indicado⁷.

Tabla 2. *Función lineal de costo unitario con y sin estación de transferencia (ET)*

Costo Unitario	Lineal	Cuadrática	Cúbica
Con ET	$CUT = \varphi_0 + \varphi_1 Dist$	$CUT = \varphi_0 - \varphi_1 Dist + \varphi_2 Dist^2$	$CUT = \varphi_0 + \varphi_1 Dist - \varphi_2 Dist^2 + \varphi_3 Dist^3$
Sin ET	$CU = \beta_0 + \beta_1 Dist$	$CU = \beta_0 - \beta_1 Dist + \beta_2 Dist^2$	$CU = \beta_0 + \beta_1 Dist - \beta_2 Dist^2 + \beta_3 Dist^3$

Fuente: Elaboración de los autores con base en información de Ouano (1983).

C. Especificación de datos panel

Con el fin de evidenciar el marco teórico expuesto en los dos incisos anteriores y dado que la información disponible es de corte transversal (500 empresas) a través del tiempo (anual: 2006, 2007 y 2008) las estimaciones econométricas serán concebidas mediante datos panel. En la ecuación (1) se identifica, de manera general, la estructura panel de las ecuaciones en las Tablas 1 y 2.

4 El mejor ajuste será determinado econométricamente a través del menor valor del criterio Akaike (*AIC*) $AIC = -2 \frac{Lnf}{n} + 2 \frac{k}{n}$, donde *Lnf* es el logaritmo de la función de verosimilitud, *n* el número de observaciones y *k* la cantidad de parámetros estimados (Perdomo y Hueth, 2011).

5 Es importante establecer que los signos de los coeficientes garantizan el mínimo costo o una función convexa en la función cuadrática y cúbica, la cual puede determinarse en la condición de segundo orden $(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2})$. (Perdomo y Ramírez, 2010).

6 Si la forma funcional es distinta a la lineal (cuadrática o cúbica) este valor puede derivarse igualando.

7 Además de la distancia adecuada para ubicar una estación de transferencia, es necesario tener en cuenta otros factores técnicamente relevantes, como los ambientales, los económicos, los sociales y los políticos. Adicionalmente, en Colombia, deben considerarse las condiciones viales y la presencia de peajes. No obstante, en este trabajo estas últimas fueron tenidas en cuenta de forma implícita, según lo extraído de la información secundaria (véase sección III), mientras para los otros determinantes no fue posible conseguir información estadística secundaria.

$$Y_{it}(\beta, X_{it}, \varepsilon_{it}) = f(\beta, X_{it}, \varepsilon_{it}). \quad (1)$$

Donde Y_{it} distingue la respectiva variable dependiente (costos de producción totales y unitarios), X_{it} las correspondientes independientes (Q –Ton–, distancia –Dist– y otras exógenas cualitativas o dicótomas de control), β el vector de parámetros concernientes, ε_{it} el término del error del modelo determinado, con $i =$ empresa 1, empresa 2, ..., empresa 500 y $t =$ 2006, 2007 y 2008. Asimismo, cada firma cuenta con información completa durante 2006, 2007 y 2008, por consiguiente la especificación en la ecuación 1 se refiere a un panel balanceado⁸ en ausencia de autocorrelación residual⁹.

Además, se distinguieron los tres procedimientos fundamentales en panel a partir de los resultados de las pruebas estadísticas Fisher (F), Lagrange (ML) y Hausman (H)¹⁰, entre los cuales, se destacan el método agrupado (*pooled data*), efectos fijos y aleatorios¹¹. Estos procedimientos permiten obtener estimadores insesgados y eficientes cuyos resultados determinaran el verdadero impacto de las estaciones de transferencia sobre los costos de producción, y así tomar decisiones correctas de política.

No obstante, debido a las diferencias de tamaño entre empresas, a la cantidad de toneladas de residuos generadas en el mercado servido, y que dos de ellas cuentan con estaciones de transferencia (Palmaseca y Valle de Aburra, a partir de abril de 2009 y septiembre de 2005 respectivamente, en los municipios de Cali y Medellín), los estimadores deben ser obtenidos a través de efectos fijos (EF) o aleatorios (EA).

De igual forma, es importante comprender los modelos de datos panel con el fin de realizar análisis mediante diferencia en diferencias. Este método permite evaluar el impacto que tiene el implementar estaciones de transferencia sobre los ahorros derivados de las mismas e igualmente determinar el tamaño del mercado con el cual es viable establecer el proyecto.

8 Ver más detalles al respecto en Gujarati (2003), Greene (2003), Cameron y Trivedi (2009) y Rosales *et al.* (2010).

9 En este caso se llevó a cabo la prueba de Baltagi-Wu LBI, cuyos valores inferiores a 1,5 indica autocorrelación residual positiva, conduciendo a estimadores no eficientes. Ver más detalles en Baltagi y Wu (1999) y Engelhardt y Prskawetz (2004).

10 Ver más detalles al respecto en Gujarati (2003), Greene (2003), Cameron y Trivedi (2009) y Rosales *et al.* (2010).

11 *Ibid.*

D. Diferencia en diferencias

Con el enfoque diferencia en diferencias¹² se busca evaluar el impacto de la estaciones de transferencia sobre el comportamiento de los costos de transporte y recolección de residuos sólidos para las firmas prestadoras del servicio. Se denominará como grupo de tratamiento a las firmas que han llevado a cabo este proyecto (*CP*), en caso contrario pertenecerán al conjunto de control (*SP*, aquellas sin implementación de lugar de transferencia).

En este sentido, las empresas de tratamiento y control son reconocidas mediante dos variables discretas binarias (D_{cp} y D_d). La primera será igual a uno (1) cuando las compañías prestadoras del servicio están ubicadas en Cali o Medellín, de forma similar lo hará la segunda variable con respecto a los años 2005 y 2009, fechas en las que iniciaron labores las estaciones de transferencia del Valle de Aburra y Palmaseca. Análogamente, estas dos variable discretas asignan un valor de cero (0) a las demás empresas en el resto del país durante los años 2006, 2007 y 2008, dado que no cuentan con el proyecto (véase ecuación 2).

$$Y_{it}(\beta, X_{it}, D_{cp}, D_t, \gamma D_{cp} D_t, \varepsilon_{it}) = f(\beta, X_{it}, D_{cp}, D_t, \gamma D_{cp} D_t, \delta D_{cp} D_t X_{it}, \varepsilon_{it}) \quad (2)$$

$$\gamma = (\bar{cP}_{2008,cp} - \bar{cP}_{2008,sp}) - (\bar{cP}_{2007,cp} - \bar{cP}_{2007,sp}) - (\bar{cP}_{2006,cp} - \bar{cP}_{2006,sp}) \quad (3)$$

Por consiguiente, la ecuación 2 es una prolongación de la función de datos panel en la ecuación 1, que involucra el efecto del proyecto sobre el promedio de los costos de transporte y recolección (\bar{cP}). En otras palabras, la nueva especificación implica las variables binarias descritas y su interacción (D_{cp} , D_t y $D_{cp} D_t$), con ellas se concibe el estimador diferencia en diferencias (γ)¹³ en la ecuación 3. No obstante, el impacto del proyecto también puede determinarse mediante el cambio en la pendiente (δ)¹⁴, los cuales son explícitos en la estructura panel a estimar, y cuyos resultados se presentan en la siguiente sección.

III. Datos y análisis empírico

Tras exponer el marco teórico y metodológico sobre el análisis económico, datos panel y técnica diferencia en diferencias, para conocer la viabilidad de implementar una o más estaciones de transferencia en Colombia, se realiza una

12 Para más detalles de los aspectos teóricos de este método de evaluación de impacto ver Bernal y Peña (2011), Rosales *et al.* (2010) y Cameron y Trivedi (2009).

13 Ver más detalles Wooldridge (2002).

14 Estableciendo condiciones de primer orden $\frac{\partial y}{\partial x} = \beta + \delta$ (Perdomo y Ramírez, 2010).

caracterización de la información empleada, los resultados de las estimaciones panel y el análisis estático comparativo de optimización matemática efectuada. De este modo, los datos para este estudio fueron concebidos a partir de información secundaria reportada por 2.111 empresas de aseo, durante los años 2006, 2007 y 2008 en Colombia, al Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI), donde se encuentran sus principales aspectos financieros y balances contables, discriminados a partir del plan único de cuentas (PUC). Esta información permitió determinar la cantidad de residuos sólidos recolectados, la distancia recorrida entre el lugar de origen y el sitio de disposición final, agregar los costos fijos y variables de su transporte para conformar los costos totales y unitarios, coherente a las variables en las Tablas 1 y 2 y estructura panel¹⁵, que fueron descritos en el inciso anterior.

Adicional e implícitamente, la información del SUI contiene el valor incurrido por el pago de peajes (de acuerdo con la cantidad de ejes del camión), consumo de combustible, mantenimiento y depreciación de los vehículos (recolectores y a granel); rubro que refleja las condiciones viales y tiempos de recorrido enfrentados por cada firma. Igualmente, los costos totales calculados fueron deflactados a precios de 2008 y discriminados mediante las variables cualitativas dicótomas (cero y uno) para diferenciar el grupo de tratamiento y control a lo largo del tiempo; de acuerdo con lo expuesto en el inciso D (sección II) sobre el método diferencia en diferencias.

En este orden de ideas, la Tabla 3 contiene las estadísticas descriptivas de las variables mencionadas y empleadas en el estudio. Luego, el promedio anual del costo total, unitario, toneladas recolectadas y distancia recorrida de una firma recolectora corresponde a \$3.130 millones de pesos, \$268 mil pesos, 44 mil toneladas y 32 kilómetros (km). Equivalentemente, sus valores máximos son \$133 mil millones, \$35 millones, 6,6 millones de toneladas y 250 km, y sus valores mínimos son \$2,1 millones, \$125 pesos, 12 toneladas y 0 km, respectivamente.

15 Que contiene información completa de los años 2006, 2007 y 2008 para 500 empresas de 2.111 en el SUI. Se eliminaron las observaciones incompletas e inconsistentes, lo cual permitió conformar un panel balanceado para el debido desarrollo del trabajo empírico.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas

Nombre de la variable	N° de observaciones	Promedio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Costo Total/año	500	3.130.000.000	12.100.000.000	2.165.000	133.000.000.000
Costo Unitario/año	500	267.763	1.553.880	125,97	35.000.000
Distancia recorrida al relleno sanitario	500	32,02	42,56	0	250
Toneladas de residuos sólidos transportados/año	500	44.274,98	309.779,6	12	6.609.960

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, para estas variables la desviación estándar es muy grande y versátil, como resultado del amplio rango obtenido entre los valores máximos y mínimos. Situación que se presenta porque la muestra incluye las firmas que atienden mercados pequeños, medianos y grandes en Colombia. Donde la cantidad de residuos sólidos producidos, difieren ampliamente de acuerdo con el tamaño territorial y poblacional de los municipios atendidos por las empresas prestadoras del servicio, lo cual conduce normalmente a tener datos atípicos.

Sin embargo, los resultados preliminares de las variables de interés son confiables porque no disciernen de lo esperado, de acuerdo con el volumen del mercado servido. Garantizando que la información suministrada por el SUI es confiable y adecuada para realizar el ejercicio estadístico, econométrico y matemático. En este sentido, la Tabla 4 resume los principales resultados¹⁶ obtenidos mediante datos panel (aplicando diferencia en diferencias) para las funciones de costo total cuadrática, cubica y Box-Cox¹⁷, expuestas en la Tabla 1. Con el fin, de determinar la viabilidad de instaurar una estación de transferencia según el tamaño óptimo del mercado o la cantidad de residuos sólidos a recoger (Q^* : toneladas-año).

16 En Stata 11, utilizando errores estándar robustos y mínimos cuadrados generalizados para remover Heteroscedasticidad. Igualmente, vale la pena destacar que de acuerdo con los resultados obtenidos para los parámetros de transformación (θ y λ) en Box-Cox, no se encuentra unida en la misma una forma funcional conocida (lineal, logarítmica, lin-log, log-lin y recíproca).

17 El mejor ajuste fue determinado econométricamente a través del menor valor del criterio Akaike (AIC).

Tabla 4. Resultados formas funcionales de costo total

Variable dependiente-costo total a precios constantes de 2008	Cuadrática	Cúbica
Variabes independientes	Estimadores	
Intercepto	806.000.000**	620.000.000**
Toneladas año (Q)	-3.691,947	28.731,93***
Toneladas al cuadrado (Q ²)	0,000358	-0,0144***
Toneladas al cubo (Q ³)	-	0,00000000162***
Variable empresa con ET combinada con Ton/año (Q)	65.5876,8***	-22.100.000***
Variable empresa con ET combinada con Ton/año al cuadrado (Q ²)	-1,066***	90,09***
Variable empresa con ET combinada con Ton/año al cubo (Q ³)	-	-0,0000914***
Dcp-Variable empresa con ET (cualitativa binaria con valor de uno si la empresa tiene ET y cero sin ET)	13.200.000.000***	8.270.000.000***
Dt-Variable empresa con ET (cualitativa binaria con valor de uno para el año de operación de ET)	3.950.000.000***	62.300.000.000***
Empresa grande (cualitativa binaria con valor de uno si es grande y cero mediana o pequeña)	24.200.000.000***	13.800.000.000***
Empresa mediana (cualitativa binaria con valor de uno si es mediana y cero grande o pequeña)	4.150.000.000	3.300.000.000***
Theta (Θ , Box-Cox)	-	-
Lambda (λ , Box-Cox)	-	-
Akaike (AIC)	31.975	30.816
Rho (ρ)	0,4	0,4
Hausman	0,0006	0,002
Baltagi-Wu LBI	2,14	2,14
N° de observaciones (n)	760	760
Carga mínima (Q*) generadora del menor costo, igualando CMg y CMe.	-	162.922

Indica relevancia, a los niveles del (*) 10%, (**) 5% y (***) 1% de significancia.

Fuente: Elaboración propia.

Así, y de acuerdo con el menor valor de Akiake ($AIC=30.816$), la función cúbica es la forma mejor ajustada a la información disponible. Igualmente, mediante el resultado de la prueba de Hausman puede establecerse que los estimadores insesgados y eficientes (ausencia de autocorrelación residual; Baltagi-Wu $LBI=2,14$) provienen del modelo de datos panel bajo efectos aleatorios. Cuyos resultados mantienen relación teórica y fueron estadísticamente relevantes. Por consiguiente, calculando el costo marginal y medio e igualándolos se obtuvo 162.922 toneladas (ton) de residuos sólidos al año (de acuerdo con el Gráfico 1). Lo cual indica la cantidad óptima a recolectar en un año (448 ton/día) o tamaño de mercado a partir del cual es viable contar con estaciones de transferencia.

Simultáneamente, la distancia óptima donde debería estar ubicado el relleno sanitario es determinada con los resultados en la Tabla 5¹⁸. Obtenidos, mediante datos panel (aplicando diferencia en diferencias) para las funciones de costo unitario lineal, cuadrática y cúbica¹⁹; expuestas en la Tabla 2. De esta forma, y de acuerdo con el menor valor de Akiake ($AIC=22.112$), la función cúbica es la forma mejor ajustada a la información disponible. Igualmente, mediante el resultado de la prueba de Hausman puede establecerse que los estimadores insesgados y eficientes (ausencia de autocorrelación residual; Baltagi-Wu $LBI=2,99$) provienen del modelo de datos panel bajo efectos aleatorios. Cuyos resultados mantienen relación teórica y fueron estadísticamente relevantes.

Por consiguiente, igualando, despejando y eliminando los términos semejantes se obtuvo una distancia óptima ($Dist^*$) de 39 km (de acuerdo con el Gráfico 2). Lo cual indica el recorrido o longitud máxima al relleno sanitario antes de implementar una estación de transferencia. En otras palabras, si el sitio de disposición final de residuos sólidos se encuentra, en tramo relativamente distante, a 39 km, es necesario construir una estación de transferencia. Así, se obtiene un ahorro por kilometro adicional de recorrido equivalente a \$1.918 por tonelada transportada, esto como consecuencia de la disminución de gastos unitarios por el transporte a granel empleado y suprimiendo el uso de camiones recolectores para trasladar directamente los residuos sólidos al relleno sanitario, cuando el mismo se encuentra a más de 39 km.

18 En Stata 11, utilizando errores estándar robustos y mínimos cuadrados generalizados para remover heteroscedasticidad.

19 El mejor ajuste fue determinado econométricamente a través del menor valor del criterio Akaike (AIC).

Tabla 5. Resultados formas funcionales de costo unitario

Variable dependiente-costo unitario a precios constantes de 2008	Lineal	Cuadrática	Cúbica
Variables independientes	Estimadores		
Intercepto	177.252**	721.740***	190.126***
Distancia (Dist)	-494*	4.757	1.475***
Distancia al cuadrado (Dist ²)	-	-24,22	-27,01***
Distancia al cubo (Dist ³)	-	-	0,08**
Variable empresa con ET combinada con km (dist)	-1.504	-3.573	-1.921*
Dist*Empresa grande (cualitativa binaria con valor de uno si es grande y cero mediana o pequeña)	3.323	1.955	3.049*
Dcp*Dt (Dcp, cualitativa binaria con valor de uno si la empresa tiene ET y cero sin ET) y (Dt, cualitativa binaria con valor de uno para el año de operación de ET)	45.645	-95.204	56.379*
Costo unitario rezagado un periodo (t-1)	0,52***	-1,87***	0,52***
Empresa grande (cualitativa binaria con valor de uno si es grande y cero mediana o pequeña)	-184.289	74.959	-185.611***
Empresa mediana (cualitativa binaria con valor de uno si es mediana y cero grande o pequeña)	-121.343	71.317	-125.187***
Akaike (AIC)	29.751	27.256	22.112
Rho (ρ)	0	0	0
Hausman	1,05	1,88	5,61
Baltagi-Wu LBI	2,14	2,99	2,99
Nº de observaciones (<i>n</i>)	510	510	510
Distancia óptima (<i>Dist*</i>)	-	-	38,43
Ahorro unitario con ET por km adicional a 39 km.	-	-	1.918

Indica relevancia, a los niveles del (*) 10%, (**) 5% y (***) 1% de significancia.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y sugerencias

De acuerdo con el objetivo planteado, la revisión literaria y los resultados obtenidos en la sección anterior (estadística, econométrica y matemáticamente), finalmente se presentan las principales conclusiones y sugerencias del caso. Así, mediante la metodología diferencias en diferencias (a través de modelos de datos panel con efectos aleatorios, y análisis estático comparativo de optimización matemática), se observa que un mercado que genera un monto mayor o igual a 448 toneladas de residuos sólidos/día puede contar con una o más estaciones de transferencia. Igualmente, es el tamaño del mercado, a partir del cual es viable construirla, lo que garantiza el cubrimiento de los costos variables en el corto plazo para los productores de transporte que cuentan con estaciones de transferencia. Esta cantidad, les permitiría percibir un precio techo donde al menos sus beneficios son nulos, sin incurrir en pérdidas económicas.

Por otra parte, las estaciones de transferencia son concebidas como una solución costo eficiente al manejo, recolección y transporte de residuos sólidos cuando se generan grandes cantidades en áreas urbanas y el tramo para trasladarlos, entre el sitio de origen y el de destino, es extenso; dado que, ocasionan reducciones en tiempos de viajes, prolongan la vida útil de los vehículos recolectores y disminuyen la cantidad de mano de obra empleada.

La ubicación ideal de este tipo de proyectos debe ser relativamente cerca al centroide de la población servida, para minimizar costos de recolección y transporte, o sobre la ruta que conduce al relleno. Asumiendo, que es situado en un lugar con las condiciones ambientales requeridas, evitando riesgos sobre la salud humana e incomodidades a la sociedad. No obstante, bajo la consideración económica y comparando el comportamiento de los costos bajo un escenario sin y con estaciones de transferencia (ET), es posible obtener la distancia o tiempo adecuado donde preferiblemente debe realizarse el proyecto.

En ese sentido, la evidencia internacional señala que rellenos ubicados por encima de los 20 a 40 km (Malarin y Vaughan, 1997) o entre 30 y 60 minutos de recorrido (Victorian Government Department of Sustainability and Environment, 2009) necesitan apoyarse en una estación de transferencia para disminuir los costos de recolección y transporte de residuos sólidos; distancia y tiempo determinado a partir del punto de quiebre en el Gráfico 2, el cual diagnostica la viabilidad del proyecto.

Conforme con lo presentado en la metodología sobre diferencias en diferencias, las empresas que implementan estaciones de transferencia tienen un impacto representativo en sus costos fijos unitarios anuales de \$56.379 pesos

(\$155 día) aproximadamente. Valor superior para el mismo rubro en firmas que no llevan a cabo este tipo de proyectos. No obstante, en Colombia la distancia óptima de referencia donde debe ubicarse el relleno sanitario es 39 km.

En otras palabras, indica el recorrido o longitud máxima al relleno sanitario antes de implementar una estación de transferencia. Por consiguiente, si el sitio de disposición final de residuos sólidos se encuentra, en tramo relativamente distante, a 39 km, es necesario construir una estación de transferencia. Cuyo ahorro por kilometro adicional recorrido equivale a \$1.918 por tonelada transportada. Debido a la disminución de gastos unitarios por el transporte a granel empleado y suprimiendo el uso de camiones recolectores para trasladar directamente los residuos sólidos al relleno sanitario, cuando el mismo se encuentra a más de 39 km.

Aunque el impacto de implementar una estación de transferencia es representativo y genera mayores costos fijos unitarios anuales, el efecto marginal de un kilometro adicional a recorrer entre el centroe origen y el relleno por encima de los 39 km, implica una reducción en el costo unitario anual de \$1.918 aproximadamente para firmas con el proyecto.

No obstante, las estaciones transferencia preferiblemente deben ubicarse antes de los peajes o donde potencialmente puedan existir. Así la variabilidad del cobro, dadas la características propias de los vehículos, puede homogeneizarse sólo pagando el rubro máximo correspondiente a las tractomulas de mayor capacidad, evitando de esta forma la heterogeneidad en el pago de peajes que pueden causar los camiones recolectores y de transferencia.

Este trabajo permite a las entidades del Estado encargadas de ejecutar las políticas sobre el manejo de residuos sólidos, evidenciar algunos de los beneficios de las estaciones de transferencia para contar con mecanismos adicionales que ayuden a generar nuevos proyectos de este tipo. Mediante los cuales, las firmas pueden disminuir sus costos de operación y mantenimiento, y así reducir la tarifas de aseo cobrado a los usuarios del servicio prestado por la recolección, manejo y transporte de residuos sólidos en Colombia.

Referencias

- BALTAGI, Badi and WU, Ping (1999). "Unequally Spaced Panel Data Regression with AR (1) Disturbances", *Econometric Theory*, Vol. 15, pp. 814-823.
- BERNAL, Raquel y PEÑA, Ximena (2011). *Guía práctica para la evaluación de impacto*, Bogotá, Ediciones Uniandes.

- BOVEA, María; POWELL, Jane; GALLARDO, Antonio and CAPUZ-RIZO, Salvador (2007). “The Role Played by Environmental Factors in the Integration of a Transfer Station in a Municipal Solid Waste Management System”, *Waste Management*, Vol. 27, Issue 4, pp. 545-553.
- CAMERON, Collin and TRIVEDI, Pravin (2009). *Microeconometrics: Methods and Applications*, New York, Cambridge University Press.
- CHIANG, Alpha (1984). *Fundamental Methods of Mathematical Economics*, 3rd ed., New York, McGraw-Hill.
- DE RUS, Ginés; CAMPOS, Javier y NOMBELA, Gustavo (2003). *Economía del transporte*, Barcelona, Antoni Bosch.
- ALCALDIA DE BOGOTÁ (2002). Decreto 1713 de 2002. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5542> (Noviembre de 2011).
- ENGELHADRT, Henriette and PRSKAWETZ, Alexia (2004). “A Pooled Time-Series Analysis on the Relations between Fertility and Female Employment”, *European Demographic Research Paper*, Working Paper.
- GREENE, William (2003). *Econometric Analysis*. 5rd ed., New York, Pearson Prentice-Hall.
- GUJARATI, Damodar (2003). *Econometría Básica*. 4rd ed., México D.F., McGraw-Hill.
- KOMILIS, Dimistris (2008). “Conceptual Modeling to Optimize the Haul and Transfer of Municipal Solid Waste”, *Waste Management*, Vol. 28, Issue 11, pp. 2355-2365.
- MALARIN, Hector y VAUGHAN, William (1997). “An Approach to the Economic Analysis of Solid Waste Disposal Alternatives”, disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=358892> (Noviembre de 2011).
- MCCARTHY, Patrick (2001). *Transportation Economics Theory and Practice*, Oxford, Blackwell Publisher.
- MENDIETA, Juan Carlos y PERDOMO, Jorge Andrés (2008). *Fundamentos de economía de transporte: teoría, metodología y análisis de política*, Bogotá, Ediciones Uniandes.
- MINISTRY OF ENVIRONMENT (2005). “Guidelines for Establishing Transfer Stations for Municipal Solid Waste”, Gobierno de British Columbia, disponible en: <http://www.env.gov.bc.ca/epd/epdpa/mpp/gfetsfms.html> (Noviembre de 2011).
- NICHOLSON, Walter (2002). *Microeconomic Theory*. 8rd ed. South-Western, Thomson Learning.

- OUANO, Ely (1983). "Hauling Distance and Transfer Station Location", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, Issue 6, pp. 1429-1433.
- PERDOMO, Jorge Andrés y RAMÍREZ, Juan Andrés (2010). "Estrategia sobre ubicación y funcionamiento de estaciones de transferencia para el manejo de residuos sólidos en Colombia", *Documentos CEDE*, No 31, pp. 1-20.
- PERDOMO, Jorge Andrés y HUETH, Darrel (2011). "Funciones de producción, análisis de economías a escala y eficiencia técnica en el eje cafetero colombiano: una aproximación con frontera estocástica", *Revista Colombiana de Estadística*, Vol. 34, Issue 2, pp. 377-402.
- PERDOMO, Jorge Andrés (2010). "Una propuesta metodológica para estimar los cambios sobre el valor de la propiedad: estudio de caso para Bogotá aplicando Propensity Score Matching y Precios Hedónicos espaciales", *Lectura de Economía*, Vol. 73, pp. 49-65.
- PERDOMO, Jorge Andrés (2011). "A Methodological Proposal to Estimate Changes of Residential Property Value: Case Study Developed in Bogotá", *Applied Economics Letters*, Vol. 18, pp. 605-610.
- ROSALES, Ramón; PERDOMO, Jorge Andrés; MORALES, Carlos y URREGO, Alejandro (2010). "Fundamentos de econometría intermedia: teoría y aplicaciones", *Apuntes de Clase CEDE*, No. 1.
- SÁNCHEZ, Jorge y ESTRADA, Ricardo (1996). "Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas", *Instituto Nacional de Ecología*, disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/105.pdf> (Noviembre de 2011)
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME –UNEP– (2005). "Solid Waste Management (Volume I)", CalRecovery Incorporated, disponible en: http://www.unep.or.jp/ietc/publications/spc/solid_waste_management/ (Noviembre de 2011).
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY –EPA– (2001). "Waste Transfer Stations: a Manual for decision-Making", disponible en: <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/r02002.pdf> (Noviembre de 2011).
- Victorian Government Department of Sustainability and Environmental (2009). *Metropolitan Waste and Resource Recovery Strategic Plan*, disponible en: http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Executive_summary1.pdf (Noviembre de 2011).
- WOOLDRIDGE, Jeffrey (2002). *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. 2nd ed., New York, Thomson Learning.