

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS
SANITARIOS

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN ECONOMÍA AMBIENTAL

PRESENTA

OSCAR MAURICIO GRACIA PIÑA

DIRECTOR DE LA TESINA: DR. HÉCTOR MAURICIO NÚÑEZ AMORTEGUI

AGUASCALIENTES, AGS.

JUNIO, 2017

A mis padres y hermanos cuyo apoyo a lo largo de estos dos años en la maestría fue fundamental.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis compañeros de clase en particular a Valeria por brindarme su apoyo y amistad a lo largo de la maestría.

A mis profesores por las valiosas enseñanzas a lo largo de estos dos años, particularmente al Dr. Héctor Nuñez cuya paciencia y apoyo fueron importantes y de gran ayuda para la finalización de ésta tesina.

A mi lectora la Dra. Laura Atuesta cuyos comentarios fueron de gran ayuda para la mejora del presente trabajo.

Resumen

En este trabajo se estudian las ganancias en bienestar debido a la implementación de instrumentos de política, que incentiven el aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios en México. Para lograr este objetivo, se desarrolla un modelo de equilibrio general y se realiza un análisis numérico que muestra como varía el valor monetario de la utilidad total de los individuos ante cambios derivados de la aplicación de distintos instrumentos de política. Se encuentra que, la implementación de un subsidio a los productores de biogás pudiera traer una disminución de la utilidad total del consumidor, mientras que un mandato que obligue a los productores de energía eléctrica al uso de biogás, traería consigo un incremento en el bienestar de los individuos. Sin embargo, para el estado actual de la industria de biogás en México pudiera ser difícil que el mandato se cumpliera, debido a que ésta es incipiente y poco desarrollada.

Palabras clave: biogás, rellenos sanitarios, instrumentos de política, bienestar

Clasificación JEL: Q42, Q53

Contenido

1	Introducción	1
2	Revisión de la literatura	3
3	Modelo	8
3.1	First Best	10
3.2	Second Best	14
3.3	Análisis numérico	16
4	Conclusiones	22
	Referencias	24

Lista de tablas

3.1	Valores de parámetros 1	17
3.2	Valores de parámetros 2	18
3.3	Valor de un cambio en la utilidad escenario base	19
3.4	Valor de un cambio en la utilidad bajo un subsidio	20
3.5	Valor de un cambio en la utilidad en el caso de un mandato	21

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años el gas natural se ha convertido en uno de los energéticos predilectos a nivel mundial. Esto como resultado de su bajo precio, de las menores cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero que se producen cuando se utiliza y de su alta eficiencia para la generación de energía eléctrica. Sus ventajas sobre otros combustibles fósiles ha llevado a un incremento en su consumo, para el año 2014 la demanda mundial de gas natural aumentó en 0.4% con respecto a 2013, alcanzando los 328,280.7 millones de pies cúbicos diarios (mmpcd) (Secretaría de energía 2014). México no ha sido la excepción y al igual que muchos otros países ha incrementado su consumo de gas natural. Para 2015, la demanda nacional de gas natural aumento en 4.1% con respecto al año 2014, de la cual, la mayor demanda la tuvo el sector eléctrico con el 43%. El sector eléctrico en México utiliza al gas natural como su principal insumo, pues representa el 69.1% del total de sus insumos; esto debido a que el 50.1% de la energía eléctrica generada en México en 2015 fue por medio de ciclo combinado el cuál se caracteriza, por emplear una turbina de vapor para generar electricidad utilizando como combustible gas natural.

Al mismo tiempo que existe una creciente demanda interna de gas natural, su producción disminuyó 2% y hubo un incremento de 24% en las importaciones de gas natural. Por lo que ante la creciente demanda nacional de gas natural y la disminución en la capacidad de producción, es necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energía. Dentro de éstas, se encuentra el biogás, el

cuál es un combustible gaseoso alternativo al gas natural; consiste aproximadamente en 60-65 % de metano (CH₄), 30-35% de CO₂, y porcentajes menores de vapor de agua, H₂, y H₂S (Guo et.al 2015). Éste puede obtenerse a partir diversas fuentes como: residuos orgánicos depositados en rellenos sanitarios, aguas residuales provenientes de industrias y drenaje público, así como desechos y productos agrícolas.

El biogás producido en los rellenos sanitarios, sería una fuente de energía que ayudaría a reducir la dependencia de energías fósiles. Su producción, adicionalmente contribuiría a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, eliminaría algunas externalidades asociadas a la deposición de basura al aire libre como filtraciones y focos de infección, de igual manera podría representar un ingreso a los hogares por separar la basura.

A pesar de los múltiples beneficios asociados al biogás, su uso es reducido tanto a nivel mundial como en México. Actualmente, la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de biogás en México es de 82.83 (MW). Esto representa apenas el 0.12% del total de la capacidad de generación de energía a partir de energías renovables, y existen pocos proyectos por parte de la Secretaría de Energía (SENER) para el desarrollo de esta tecnología.

Para el caso de México, la literatura existente (Rios y Kaltschimdt, 2016; Vera-Romero et al., 2014; Melendez y L., 2015; Gutierrez, Xia, y Murphy, 2016; Escamilla, Tavera, Sandoval, Salinas, y Alvarado, 2016) ha estudiado el problema principalmente desde un punto de vista técnico, considerando únicamente cual es el potencial de generación de electricidad a partir del biogás recuperado del relleno sanitario, pero no analizan cuales pudieran ser los instrumentos de política que permitirían desarrollar la industria y observar los beneficios en el bienestar de los individuos.

El objetivo del trabajo es analizar las ganancias en bienestar resultantes de la implementación de instrumentos de política que incentiven el desarrollo de la industria de biogás en México.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

Existe una amplia literatura que ha tenido como objetivo estudiar los beneficios de adoptar biogás en distintos mercados como transporte (Larsson y Grönkvist, 2016; Thamsiriroj, Smyth, y Murphy, 2011), mercado laboral (Guenther, Bergmann, y L., 2016) y principalmente el mercado eléctrico (Ebenezer, Sethumadhavan, y Velraj, 2007; Ribeiro y Silva, 2009; Cervi, Esperancini, y Bueno, 2011). Ebenezer et al. (2007) analizan el potencial de adoptar biogás a nivel mundial, para ello hacen un recuento de la capacidad instalada y las políticas llevadas a cabo por los países líderes en la producción de biogás, del cual concluyen que la penetración de biogás en los mercados de energía irá creciendo a altas tasas siempre y cuando se logren resolver las limitantes económicas (falta de inversión, limitado acceso a fuentes de financiamiento, incentivos fiscales que promuevan el desarrollo la industria), así como incentivos a la adopción de nuevas tecnologías. Por otro lado Ribeiro y Silva (2009) estiman el potencial del biogás para generar energía eléctrica en Brasil; para ello miden la cantidad de biogás que se podría recuperar por cada una de sus fuentes (rellenos sanitarios, drenaje, residuos agrícolas).

A pesar de los trabajos antes mencionados, ésta literatura deja margen para seguir estudiando los beneficios asociados a la adopción de biogás. De hecho, una amplia área de estudio, analiza cada una de las fuentes de biogás. De las tres principales fuentes de biogás (rellenos sanitarios, drenaje, residuos agrícolas) una de gran importancia es la recuperación de residuos urbanos.

Si bien todas tienen beneficios asociados a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, el aprovechamiento de estos permite tener un mejor manejo de la basura de zonas urbanas, que actualmente representa un importante problema para las grandes ciudades.

Estudios como los de Shin (2009); Bosello, Campagnolo, Eboli, y Parrado (2012); Zuberi y Ali (2015) han analizado los impactos de la recolección de biogás de rellenos sanitarios. Bosello et al. (2012), para el caso italiano, utiliza un modelo de equilibrio general computable (CGE) para estimar en primera instancia que una política de recuperación de biogás de rellenos sanitarios impactaría solo en el 0.6% de participación de la matriz energética. Si bien este resultado es poco alentador para diseño de políticas encaminadas a la recuperación de rellenos sanitarios, ya que existen alternativas al manejo de residuos como la incineración de basura, la cual permite recuperar cantidades mayores de energía por tonelada de basura, en el estudio de Zuberi y Ali (2015) para Pakistán, encuentran que un manejo responsable de los rellenos sanitarios reduciría en 88% las emisiones de gases de efecto invernadero que éstos producen, y en caso de que el 75% de los residuos fueran recolectados y el 50% alcanzara a transformarse en biogas, pudieran generar 83.17 MW de energía eléctrica. Para el caso de Pakistán representaría una contribución del 1.4% de la demanda de energía, que en un país en el que su economía se ha visto mermada por una oferta insuficiente de energía eléctrica podría tener un impacto positivo. Si bien los resultados obtenidos por Bosello et al. (2012) sugieren que la participación de biogás dentro de la oferta de energía no es muy significativa, los resultados obtenidos por Zuberi y Ali (2015) sugieren que los beneficios asociados a la recuperación de biogás de rellenos sanitarios pudieran tener un impacto positivo en beneficios medioambientales, principalmente en países en vías de desarrollo como México, en el cual la mayor parte de la deposición de basura se realiza en tiraderos a cielo abierto y vertederos, los cuales carecen de controles estrictos que permitan un manejo correcto de lixiviados que pueden llegar a contaminar mantos freáticos o aguas de ríos, así como una nula recuperación de gases como el metano que contribuye cuatro veces más al calentamiento global.

Para el caso de México, si bien el uso de biogás es limitado y poco estudiado desde el punto

de vista económico, existe una amplia literatura (Rios y Kaltschimdt, 2016; Vera-Romero et al., 2014; Melendez y L., 2015; Gutierrez et al., 2016; Escamilla et al., 2016) que ha analizado el potencial de usar biogás proveniente de residuos orgánicos urbanos. La mayoría de los estudios existentes utilizan métodos de costo-beneficio para establecer la viabilidad económica de proyectos de biogás, y a partir de los resultados establecer líneas de política, Escamilla et al. (2016) realizan un análisis costo-beneficio de generar electricidad a partir de residuos urbanos en la Ciudad de México, para ello utilizan el software LFGcost-WebV3.0, desarrollado por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), el cual se utiliza para evaluar proyectos de recuperación de energía, los autores realizan simulaciones a 20 años, considerando incrementos constantes en los precios de la electricidad y la posibilidad de vender la misma a CFE por plazos de 20 años, encontrando que los beneficios son mayores a los costos. De forma similar Vera-Romero et al. (2014) realizan un análisis costo-beneficio en tres municipios en el estado de Michoacán y utilizan el modelo mexicano de biogás, el cuál es un modelo desarrollado por SCS Engineers en colaboración con la EPA y utilizado para estimar la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios mexicanos. Ellos obtienen resultados parecidos a los encontrados por Escamilla et al. (2016). Los resultados obtenidos por estos trabajos apuntan en la misma dirección que la propuesta por Zuberi y Ali (2015) y representan una oportunidad para el estudio de diseño de políticas, que busquen incentivar el desarrollo tecnologías que permitan el aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios.

Sin embargo, para poder discutir el diseño de políticas y el impacto de las mismas, los anteriores análisis son limitados y se deben hacer uso de distintas herramientas que abarquen más sectores, como por ejemplo modelos de equilibrio general. Estos, permiten tener una visión más general de como una política incide sobre la toma de decisiones de industrias e individuos y de ésta manera poder establecer que instrumentos de política (impuesto, subsidio, mandato) pueden generar un mayor beneficio para la sociedad.

La literatura existente de modelos de equilibrio aplicados principalmente al sector de los biocombustibles es amplia y creciente aunque especializada principalmente en biocombustibles

líquidos, que sin embargo puede llevarse al caso del biogás . Por ejemplo, Lapan y Moschini (2009) desarrollan un modelo de equilibrio parcial para comparar los efectos de subsidios o mandatos sobre el desarrollo de la industria de biocombustibles en Estados Unidos, particularmente en el caso del etanol. Ellos encuentran que el uso de subsidios o de mandatos por si solos no logran todos los objetivos de política (una disminución del impacto ambiental por consumo de energía y una disminución de la dependencia de Estados Unidos a fuentes extranjeras de energía), por lo que es necesario combinarlos con otros instrumentos como impuestos sobre las gasolinas. Otro resultado importante al que llegan es que el uso de mandatos sobre la producción y al consumo generan un mayor nivel de bienestar que el uso de subsidios.

Una ampliación a los resultados presentados por Lapan y Moschini (2009) es el trabajo de Cui, Lapan, Moschini, y Cooper (2011) en donde realizan simulaciones del modelo original. Los autores encuentran que los beneficios que se obtienen del “second-best” para el escenario donde hay un impuesto a la gasolina y un subsidio al etanol, son muy cercanos a los que se obtendrían con el “first best”. De igual manera, encuentran que el consumo máximo de etanol, se alcanza cuando se tiene una política de mandato con un impuesto a la gasolina (como lo habían propuesto Lapan y Moschini), sin embargo el monto del impuesto necesario sobre la gasolina es menor que los requeridos por el “first best” y el “second best”, esto trae como consecuencia que no se consigan grandes reducciones de gases de efecto invernadero. Asimismo encuentran que los principales beneficios de éstas políticas se dan a través de la disminución de importaciones de petróleo.

Para el caso de biogás proveniente de rellenos sanitarios la literatura en este sentido es escasa, por lo que es necesario considerar modelos que no solo consideren el mercado de biocombustibles, sino que consideren los efectos de la contaminación así como mecanismos de manejo de residuos sólidos. Considerando lo anterior existen modelos como el de Fullerton y Heutel (2007) en el que desarrollan un modelo de equilibrio general para analizar los efectos que tiene la implementación de mandatos sobre la toma de decisiones de la empresas. Es un modelo de dos sectores donde permiten que uno de ellos utilice a la contaminación como factor productivo,

ya sea como complemento o sustituto de alguno de los otros factores. La intención de incluir a la contaminación como factor productivo, es el de analizar el efecto de la implementación de cuatro mandatos distintos. Ellos encuentran que al igual que los impuestos el uso de estas políticas tiene efectos limitantes sobre la producción final de bienes y por lo tanto de sus precios relativos. Adicional a sus resultados sugieren que su modelo puede ser utilizado en distintos contextos, pues se pueden incluir limitantes sobre cualquier factor de la producción, así como el uso de subsidios y mercados imperfectos. Por otro lado Fullerton y Kinnaman (1994) desarrollan un modelo de equilibrio general en el que estudian distintas políticas para un manejo eficiente de residuos urbanos. Ellos consideran los efectos de aplicar cobros por cada bolsa de basura que genera un consumidor y como éstos impactan en su decisión a la hora de reciclar, depositar o quemar la basura.

Para el presente trabajo se buscará combinar los modelos desarrollados por Fullerton y Kinnaman (1994) y Fullerton y Heutel (2007) para poder calcular cual sería el cambio en el bienestar social de la recuperación de biogás de rellenos sanitarios. La intención será modelar las a partir de la generación de basura por parte de los hogares como distintos instrumentos de política impactaran sobre el bienestar

Capítulo 3

Modelo

Para poder analizar los efectos de la recolección y uso de biogás de rellenos sanitarios, consideremos una economía con N hogares idénticos, donde los consumidores producen basura como una función de la cantidad de bienes que consumen.

$$t = t(c) \tag{3.1}$$

con $t_c > 0$

Asimismo los individuos tienen una función de utilidad de la siguiente forma

$$U = U(e^h, t(c), k^h; G) \tag{3.2}$$

donde e^h es la cantidad de energía eléctrica que consumen los hogares, c son bienes de consumo distintos a la electricidad, G es la contaminación que generan los rellenos, k^h recursos utilizados en el hogar y t es la producción de basura. Suponemos que la función de utilidad es cuasi-cóncava donde $U_{e^h} > 0$, $U_{k^h} > 0$, $U_G < 0$. Otro supuesto adicional es que los consumidores separan la basura y existe un sistema de recolección de basura “perfecto” que evita la acumulación de basura en los hogares. En este escenario t no representa una externalidad por si misma dando como resultado que $U_t > 0$. Sin embargo la externalidad viene del lado de la cantidad total de basura que se deposita en los rellenos sanitarios, y que produce gases

de efecto invernadero, problemas de salud, filtraciones de lixiviados entre otras. Para este caso tenemos que $G = (1 - \alpha)Nt$ donde α es la proporción de basura orgánica que se utiliza para la producción de biogás.

Del lado de la producción, tenemos que la función de producción de los bienes de consumo es de la siguiente manera:

$$c = c(e^i, k^c) \quad (3.3)$$

donde e^i es la cantidad de electricidad usada por la industria para producir bienes de consumo y k^c son los recursos empleados para producir bienes de consumo. Suponemos que la función presenta rendimientos constantes a escala y las derivadas parciales son $c_{e^i} > 0$, $c_{k^c} > 0$ y $\frac{\partial c_{e^i}}{\partial e^i} < 0$, $\frac{\partial c_{k^c}}{\partial k^c} < 0$. Por simplificación se omiten los costos de transacción de los bienes de consumo.

Por otro lado, la electricidad es producida de la siguiente manera:

$$e = e(f, b, k^e) \quad (3.4)$$

donde f son combustibles fósiles, para los cuales se asume que existe una cantidad fija $f = \bar{f}$, b es biogás y k^e son recursos utilizados en la generación de energía eléctrica. La función tiene derivadas parciales que se comportan de la siguiente manera $e_f > 0$, $e_{k^e} > 0$, $e_b > 0$ y $\frac{\partial e_f}{\partial f} < 0$, $\frac{\partial e_{k^e}}{\partial k^e} < 0$, $\frac{\partial e_b}{\partial b} < 0$. Se asume que no hay pérdidas de energía en el proceso de distribución de electricidad a la industria, ni a los hogares. Asimismo debe cumplirse que $e = e^i + e^h$.

Por último el biogás se obtiene de la siguiente manera:

$$b = b(\alpha t, k^b) \quad (3.5)$$

donde αt la cantidad de basura orgánica que puede transformarse en biogás, con $0 < \alpha < 1$ y k^b son los recursos utilizados en la generación de biogás. La derivadas parciales se comportan

de la siguiente manera; $b_t > 0$, $b_{k^b} > 0$, y $\frac{\partial b_t}{\partial t} < 0$, $\frac{\partial b_{k^b}}{\partial k^b} < 0$. Se impone que no pueden utilizarse más recursos que los existentes en la economía por lo que debe cumplirse que $K = k^c + k^b + k^e + k^h$.

3.1 First Best

Bajo esta situación el planificador social buscará maximizar la función de utilidad (3.2) sujeto a las restricciones de factibilidad y a las funciones de producción (3.3, 3.4 y 3.5).

La función de Lagrange asociada es la siguiente:

$$L = U(e^h, t(c), k^h; (1 - \alpha)nt(c)) + \lambda[c((e(f, b(\alpha t, k^b), K - k^b - k^c - k^h) - e^h), k^c) - c] \quad (3.6)$$

donde $k^e = K - k^c - k^b - k^h$, $e^i = e(f, b(\alpha t, k^b), K - k^b - k^c - k^h) - e^h$. El planificador escoge k^h , e^h y c Las condiciones de primer orden son:

$$U_{e^h} = \lambda c_{e^i} \quad (3.7)$$

$$U_{k^h} = \lambda e_{k^e} \quad (3.8)$$

$$U_{t_c} + n(1 - \alpha)t_c U_G = \lambda[1 - c_{e^i} e_b \alpha b_t t_c] \quad (3.9)$$

Las condiciones indican que la utilidad marginal que se obtiene de un incremento de c , k^h o e^h , es igual a su costo marginal social.

En un mercado descentralizado, tenemos que los productores resuelven los siguientes problemas de optimización:

Productores de electricidad

$$\pi_e = p^e e(k^e, f, b) - p^k k_e - p^f f - p^b b \quad (3.10)$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi}{\partial k^e} &= p^e e_{k^e} = p^k \\ \frac{\partial \pi}{\partial f} &= p^e e_f = p^f \\ \frac{\partial \pi}{\partial b} &= p^e e_b = p^b\end{aligned}$$

Como puede verse los beneficios marginales de cada uno de los insumos es igual a su costo marginal.

Productores de bienes de consumo

Por simplicidad para el caso de los bienes de consumo se considerará que representa el numerario por lo que su precio es 1.

$$\pi_c = c(e^i, k^c) - p^k k^c - p^e e^i \quad (3.11)$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi}{\partial k^c} &= c_{k^c} = p^k \\ \frac{\partial \pi}{\partial e^i} &= c_{e^i} = p^e\end{aligned}$$

Al igual que en el caso de los productores de electricidad tenemos que los beneficios marginales de producir bienes de consumo igualan a sus costos marginales.

Productores de biogás:

$$\pi_b = p^b b(\alpha t, k^b) - p^k k^b - p^t t \quad (3.12)$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi}{\partial k^b} &= p^b b_{k^b} = p^k \\ \frac{\partial \pi}{\partial f} &= p^b e_t = \frac{p^t}{\alpha}\end{aligned}$$

Para la producción de biogás los beneficios marginales de la basura tienen que ser iguales al costo marginal de la basura orgánica.

Por otro lado se cobran impuestos pigouvianos para corregir la externalidad que generan los

consumidores, por lo que se enfrentan a una restricción presupuestaria de la siguiente forma:

$$(\tau^e + p^e)e^h + (1 + \tau^c)c + (\tau^k + p^k)k^h = p^k(k^c + k^e + k^b + k^h) + p^t\alpha t \quad (3.13)$$

Donde τ^e , τ^c y τ^k son impuestos a la electricidad, el consumo y los recursos que usan los hogares respectivamente y los consumidores reciben un pago p^t por la basura que separan y es adquirida por los productores de biogás, así como un pago por los recursos de la economía existentes en la economía.

De las condiciones de maximización de los productores tenemos que:

$$p^e = c_{ei}$$

$$p^f = c_{ei}e_f$$

$$p^k = c_{ei}e_{ke}$$

$$p^b = c_{ei}e_b$$

$$p^t = \alpha c_{ei}e_b$$

Sustituyendo en la restricción (3.13) tenemos que:

$$(\tau^e + c_{ei})e^h + (1 + \tau^c)c + (\tau^k + c_{ei}e_{ke})k^h = c_{ei}e_{ke}(k^c + k^e + k^b + k^h) + \alpha c_{ei}e_b t \quad (3.14)$$

Así el problema del consumidor es maximizar (3.2) sujeto a (3.14). Las condiciones de primer orden son:

$$U_{eh} = \omega[\tau^e + c_{ei}] \quad (3.15)$$

$$U_{kh} = \omega\tau^k \quad (3.16)$$

$$U_t t_c = \omega[(1 + \tau_c) - \alpha^2 c_{ei}e_b t_c] \quad (3.17)$$

Para este caso es claro que las condiciones de optimalidad en un mercado competitivo no son las mismas que las óptimas socialmente, sin embargo si consideramos $\tau_e = 0$ tenemos que $\omega = \lambda$ por las condiciones (3.7) y (3.15) y $\tau^k = c_{e_2}e_{ke}$. Por último de (3.9) y (3.17) tenemos que:

$$\lambda[(1 + \tau^c) - \alpha p^t t_c] = \lambda[1 - p^t b_t t_c] - n(1 - \alpha)U_G t_c$$

Simplificando:

$$\lambda(1 + \tau^c) - \lambda\alpha p^t t_c = \lambda - \lambda p^t b_t t_c - n(1 - \alpha)U_G t_c$$

$$\lambda\tau^c = \lambda\alpha p^t t_c - \lambda p^t b_t t_c - n(1 - \alpha)U_G t_c$$

Donde $p^t = \alpha c_{e^i} e_b$, sustituyendo obtenemos:

$$\tau^c = [\alpha - b_t] \alpha c_{e^i} e_b t_c - n(1 - \alpha) t_c \frac{U_G}{\lambda}$$

donde $-n(1 - \alpha) t_c \frac{U_G}{\lambda} > 0$.

Para poder determinar si τ^c es un impuesto o un subsidio es necesario analizar dos casos.

Caso 1:

Si $\alpha \geq b_t$ tenemos que τ^c es un impuesto, en este escenario la proporción de basura orgánica que se deposita en los rellenos sanitarios es mayor que la cantidad de biogás que se obtiene por cada unidad de basura adicional, en este caso se deben cubrir los costos de la externalidad.

Caso 2:

Si $\alpha < b_t$ pueden presentarse dos escenarios adicionales, 1) si $|\alpha - b_t| \alpha c_{e^i} e_b t_c < -n(1 - \alpha) t_c \frac{U_G}{\lambda}$ seguiría siendo un impuesto, este caso puede se presenta cuando los beneficios monetarios que se obtienen por el uso de biogás son menores que el costo monetario de la desutilidad de la externalidad, sin embargo 2) si $|\alpha - b_t| \alpha c_{e^i} e_b t_c > -n(1 - \alpha) t_c \frac{U_G}{\lambda}$ tendríamos que τ^c a un subsidio, este caso es el inverso del anterior si los beneficios que se obtienen del biogás superan a los costos sociales de la externalidad el subsidio incentivaría a que la gente consumiera más y así aumentar los beneficios del biogás.

Para alcanzar el óptimo social deberá de conocerse cuales son los productos marginales de

la industria y poder determinar costos correctos a la externalidad, lo que hace difícil la implementación de un impuesto pigouviano al consumo. Por lo que es necesario estudiar alternativas que pudieran disminuir el impacto de la externalidad como una situación de second best.

3.2 Second Best

Para corregir la externalidad se busca incentivar la industria de biogás por lo que el gobierno puede optar por dar un subsidio a los productores de biogás.

Esto da como consecuencia que ahora los productores de biogás resuelvan:

$$\pi_b = (p^b + s^b)b(\alpha t, k^b) - p^t \alpha t - p^k k^b \quad (3.18)$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial \pi}{\partial k^b} = (p^b + s^b)b_{k^b} = p^k$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = (p^b + s^b)b_t = p^t$$

Puede observarse que el producto marginal de la basura es igual al costo marginal de la basura orgánica.

El problema de optimización del consumidor es el siguiente.

$$\max U(e^h, t(c), k^h; G) \quad (3.19)$$

sujeto a:

$$p^e e^h + c + p^k k^h = p^k (k^c + k^e + k^b + k^h) + p^t \alpha t \quad (3.20)$$

Resolviendo la función Lagrangeana asociada tenemos que las condiciones de primer orden son las siguientes:

$$U_{e_1} = \lambda p_e \quad (3.21)$$

$$U_{k_h} = 0 \quad (3.22)$$

$$U_t t_c = \lambda[1 - \alpha p^t t_c] - U_G t_c n(1 - \alpha) \quad (3.23)$$

Ahora consideremos cuál sería el impacto en la utilidad de los consumidores ante este subsidio. Para esto tomamos la diferencial total de (3.19)

$$dU = U_{e^h} de^h + U^{k^h} dk^h + U_t dt + U_G t_c n(1 - \alpha) dc$$

Sustituyendo (3.21, 3.22 y 3.23) en la diferencial total tenemos que

$$dU = \lambda p^e de^h + 0 + \left[\frac{\lambda}{t_c} [1 - p^t] - \frac{(1 - \alpha)}{t_c} n t_c U_G \right] dt + U_G t_c n(1 - \alpha) dc$$

Por otro lado tomando la diferencial total de (3.1) tenemos que:

$$dt = t_c dc$$

Sustituyendo de nueva cuenta en la diferencial total de 3.19 tenemos que:

$$dU = \lambda p^e de^h + \left[\frac{\lambda}{t_c} [1 - p^t \alpha t_c] - \frac{(1 - \alpha)}{t_c} n t_c U_G \right] t_c dc + U_G t_c n(1 - \alpha) dc$$

Agrupando tenemos que:

$$dU = \lambda p^e de^h + [\lambda[1 - p^t \alpha t_c]] dc$$

Que para expresarla en términos monetarios es:

$$\frac{dU}{\lambda} = p^e e^h \hat{e}^h + [1 - p^t \alpha t_c] c \hat{c} \quad (3.24)$$

Donde $p^t = (p^b + s^b) b_t$

En este caso la implementación de un subsidio por parte del gobierno tendría una disminución en la utilidad del consumidor, esto pudiera deberse a que los consumidores no estarían dispuestos a transferir una parte de su ingreso en forma de un impuesto de suma fija para que el gobierno pueda aplicar el subsidio.

Ahora consideremos el caso de un mandato. En este escenario los productores de electricidad por ley deben producir con una cantidad mínima de biogás m . Por lo tanto los productores

resuelven:

$$\pi_e = p^e e(k^e, f, b) - p^k k_e - p^f f - p^b b$$

$$\text{s.a} \quad \frac{b}{b+f} = m$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial k^e} &= p^e e_{k^e} = p^k \\ \frac{\partial \pi}{\partial b} &= p^e e_b + p^e e_f \left[\frac{1}{m} - m \right] = p^b + p^f \left[\frac{1}{m} - m \right] \end{aligned}$$

Entonces:

$$p^e = \frac{p^b + p^f \left[\frac{1}{m} - m \right]}{e_b + e_f \left[\frac{1}{m} - m \right]} \quad (3.25)$$

Sustituyendo 3.25 en 3.24 tenemos que:

$$\frac{dU}{\lambda} = \frac{p^b + p^f \left[\frac{1}{m} - m \right]}{e_b + e_f \left[\frac{1}{m} - m \right]} e^h \hat{e}^h + [1 - p^t \alpha t_c] c \hat{c} \quad (3.26)$$

En este caso la implementación de un mandato aumentaría la utilidad de los consumidores, por lo que sería preferible proponer un mandato al uso de biogás en la producción de electricidad a aplicar un subsidio a los productores de biogás. Esto pudiera deberse a que los consumidores preferirían que el costo de corregir la externalidad se trasladara a los productores. Si bien el precio de la electricidad es más alto, los consumidores pudieran sustituir electricidad por bienes de consumo y la externalidad disminuirían.

3.3 Análisis numérico

El objetivo de esta sección no es una estimación de cada uno de los parámetros que intervienen en la ec. 3.24, sino la de mostrar como varía el valor monetario del bienestar de los individuos ante cambios en los parámetros clave que se derivan de instrumentos de política. Para lograr

dicho objetivo, se consideran tres escenarios, para distintas zonas del país y diversos productos agrícolas. El primero es el escenario base donde no hay una intervención gubernamental, en el segundo escenario se considera un subsidio de 10% a los productores de biogás y en el tercer escenario se considera la implementación de un mandato, en el que los productores de electricidad deben utilizar por lo menos 10% de biogás en la generación de electricidad.

Para el cálculo de cada uno de los escenarios, fue necesario asignar valores para el precio de la electricidad (p^e), del gas natural (p^f), de la basura (p^t), del biogás (p^b) y del consumo (p^c), así como la proporción de basura orgánica depositada (α) en los vertederos en México, las productividades marginales del biogás (e_b) y el gas natural (e_f) en la producción de energía eléctrica, de igual manera de la productividad marginal del consumo en la generación de basura y la productividad marginal de la basura en la producción de biogás, y por último a los cambios proporcionales en los bienes de consumo ($\frac{dc}{c}$) y en la producción de electricidad ($\frac{de}{e}$), los cuales se encuentran resumidos en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores de parámetros 1

Parámetro	Valor	Descripción	Fuente
p^f	49.79	Precio gas natural	SENER
p^t	35.04	Precio de la basura	Fullerton(1994)
p^e	0.00196	Precio de la electricidad	SENER
p^c	1	Precio del consumo	Normalización
p^b	191.5	Precio del biogás	So CalGas
s^b	0.1	Subsidio al biogás	Dato estilizado
α	0.5	Proporción de basura orgánica	SEMARNAT
M	0.1	Mandato	Dato estilizado
t_c	0.5	Prod. marg. del consumo	Dato estilizado
b_t	0.5	Prod. marg. de la basura	Ríos(2016)

Fuente: Elaboración propia

De los datos anteriores, para el caso de México, no se encontraron estudios que estimaran el precio del biogás, por lo que se considero un valor de \$ 10 dlls ¹ por m^3 de biogás, el cual fue obtenido de SoCal Gas, que es la principal empresa proveedora de gas en Estados Unidos. Los

¹Los valores expresados en dólares, se convirtieron a pesos utilizando un tipo de cambio de 19.15 pesos por dólar

precios del gas natural y de la electricidad se obtuvieron de la Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030, mientras que el precio de la basura se obtuvo de Fullerton y Kinnaman (1994), mientras que la productividad marginal de la basura es de $0.5 m^3$ de gas por kilogramos de basura (Rios y Kaltschimdt, 2016). Por otra parte los datos estilizados que se consideraron fueron los valores de los instrumentos de política, donde ambos (mandato, subsidio al biogás) se establecieron en 10%, así como la productividad marginal del consumo en la generación de basura, el cual se estableció en 0.5; pues no se encontraron estudios que calcularan este valor.

Para el caso de la implementación de un mandato fue necesario la construcción del precio de la energía eléctrica a partir de la ec. 3.25. En este escenario se consideraron dos valores (teórico y técnico) para la productividad marginal del biogás en la generación de energía eléctrica. Esto debido a la posibilidad de distintas concentraciones de CH₄ en el biogás, los cuales dependerán de la tecnología disponible y de los procesos de transformación de los residuos orgánicos en biogás. Dichos valores fueron tomados de Rios y Kaltschimdt (2016), y pueden observarse en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Valores de parámetros 2

Parámetro	Valor		Descripción	Fuente
	Técnico	Teórico		
e_f	9.8	9.8	Producto marginal de los combustible fósiles	SENER
e_b	4.9	6.6	Producto marginal de la basura	SENER
P^e	0.006715	0.00605	Precio de la electricidad	Ec. 3.25

Fuente: Elaboración propia

Las regiones que se consideraron en el análisis, están basadas en la zonas establecidas por el Sistema Interconectado Nacional, de las cuales se seleccionaron aquellas que presentan un mayor consumo de energía eléctrica (zona occidental, zona oriental, zona norte y zona central). Éstas a su vez, también coinciden con la mayor producción de basura, pues actualmente en México se generan 86 mil 343 toneladas de basura (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), de las cuales el 87% se depositan en botaderos a cielo abierto. De éstas la mayor cantidad proviene

del centro del país (Ciudad de México con 19.7% y el Estado de México con 9.6%), el occidente (Jalisco 7.6%) y el norte (Nuevo León y Tamaulipas con el 3.7% y 3.6% respectivamente).

Para los bienes de consumo se consideraron como bienes representativos del consumo a los principales productos agropecuarios consumidos en el país que suelen no empacarse para su consumo, esto debido a que los residuos orgánicos provienen principalmente de residuos de productos alimenticios consumidos por los hogares, sin embargo no todos los alimentos producen basura orgánica. Los que destacan en orden de consumo son el maíz (A), frijol (B), trigo (C), arroz (D) y carne de puerco (E).

Tabla 3.3: Valor de un cambio en la utilidad escenario base

	Norte	Oriente	Occidente	Central
A	631.99	2886.71	2838.34	289.95
B	1097.65	3352.37	3304.00	755.61
C	1127.04	3381.76	3333.39	785.00
D	1107.50	3362.22	3313.85	765.46
E	1094.60	3349.32	3300.95	752.56

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.3 se muestra el escenario base, el cual fue calculado utilizando la ec. 3.24 y los datos antes mencionados. Se puede observar que la región centro y la zona norte es donde el valor monetario de un cambio en la utilidad es menor, esto puede deberse a que los incrementos tanto en el consumo de bienes, como en electricidad en la zona centro y la zona norte son menores. Lo que significaría que los mayores beneficios en bienestar estarían en las ciudades pequeñas, y no en las grandes ciudades que generan mayor cantidad de basura, contrario a lo que se pudiera esperar.

Para el caso de un subsidio (tabla 3.4) podemos observar que el valor de la utilidad es menor que el escenario base tal y como se esperaba, esto puede deberse a que si bien hay una reducción de la externalidad, los individuos deben realizar una transferencia al gobierno (posiblemente en forma de impuesto de suma fija) reduciendo su ingreso disponible.

Mientras que para el caso del mandato (tabla 3.5), el precio de la electricidad se vería afectado por el precio del biogás, el precio del gas natural y de la productividad marginal del biogás.

Tabla 3.4: Valor de un cambio en la utilidad bajo un subsidio

	Norte	Oriente	Occidente	Central
A	570.81	2825.53	2777.16	228.77
B	1089.04	3343.76	3295.39	747.00
C	1121.75	3376.46	3328.10	779.71
D	1100.00	3354.72	3306.35	757.96
E	1085.65	3340.36	3292.00	743.61

Fuente: Elaboración propia

En este escenario se consideran dos casos, uno donde la cantidad de metano en el biogás alcanza un nivel teórico máximo y un escenario donde se tiene un nivel técnico donde la composición de biogás se ve afectado por la composición de la basura y distintas condiciones dentro del proceso de descomposición de basura. Para el escenario teórico se considera un valor de 4.9 kwh por m^3 mientras que en el teórico es de 6.6 kwh por m^3 (tabla 3.2). Puede observarse que la ganancia es sustancialmente mayor, a pesar de que el precio de la electricidad se incrementa, así mismo entre mayor contenido calórico presente el biogás el precio de la electricidad será menor.

Tabla 3.5: Valor de un cambio en la utilidad en el caso de un mandato

	Norte		Oriente		Occidente		Central	
	Técnico	Teórico	Técnico	Teórico	Técnico	Teórico	Técnico	Teórico
A	3480.12	3414.14	11205.14	11012.42	11039.43	10849.42	2308.23	2261.47
B	3945.78	3879.80	11670.81	11478.08	11505.09	11315.08	2773.89	2727.13
C	3975.17	3909.19	11700.20	11507.47	11534.48	11344.47	2803.28	2756.52
D	3955.63	3889.65	11680.66	11487.93	11514.94	11324.93	2783.74	2736.98
E	3942.74	3876.75	11667.76	11475.03	11502.04	11312.03	2770.85	2724.08

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Conclusiones

La deposición de basura en botaderos a cielo abierto trae externalidades medioambientales negativas, pueden presentarse filtraciones de lixiviados que pueden contaminar mantos freáticos o fuentes de agua cercanas al botadero, así como emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, por lo que el desarrollo de políticas que logren disminuir el deterioro ambiental debe ser prioritario. Una alternativa para reducir la externalidad causada por la emisión de gases de efecto invernadero es la recuperación del biogás para su uso en la generación de energía eléctrica. En este trabajo se muestra que, la implementación de impuestos pigouvianos sobre el consumo pudiera no tener un efecto en la reducción de la externalidad pues se podría presentar el escenario donde los beneficios que se obtienen de la producción de biogás, pueden superar los costos sociales de la externalidad. Éste caso incentivaría el consumo y por consiguiente el incremento de la cantidad de basura que se genera en las ciudades, acrecentando los costos de recolección y manejo de residuos.

Por otro lado, la implementación de subsidios para incentivar la industria de biogás pudiera traer una disminución de la utilidad total del consumidor, mientras que un mandato en la generación de energía eléctrica traería consigo un incremento en la utilidad total. Sin embargo para el estado actual de la industria de biogás en México pudiera ser difícil de cumplirse ya que ésta es incipiente y poco desarrollada.

Es importante mencionar que en el modelo no se consideran alternativas al manejo de la basura, desde la incineración de basura que representa una alternativa muy parecida al desarrollo de biogás o reciclaje. También se considera una estructura de mercado competitivo, por lo que el estudio pudiera generalizarse a estructuras de competencia imperfecta y casos donde se consideren estructuras de precios escalonadas. Otra extensión natural al modelo sería aplicarlo a un modelo de equilibrio computable, para poder analizar más detalles de los diferentes mercados involucrados.

Esta tesis ha sido presentada como parte del proyecto del CIDE en el Clúster Biocombustible Gaseosos número 247006 del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética-2014-05.

Referencias

- Bosello, F., Campagnolo, L., Eboli, F., y Parrado, R. (2012). "Energy from waste: generation potential and mitigation opportunity." *Environmental Economics and Policy Studies*, 14, 403-420.
- Cervi, R., Esperancini, M., y Bueno, O. (2011). "Viabilidad económica de la utilización de biogás para la conversión de energía eléctrica." *Información Tecnológica*, 2, 3-14.
- Cui, J., Lapan, H., Moschini, G., y Cooper, J. (2011). "Welfare impacts of alternative biofuel and energy policies." *American Journal of Agricultural Economics*, 93, 1235-1256.
- Ebenezer, A., Sethumadhavan, R., y Velraj, R. (2007). "Biogas: Can it be an important source of energy?" *Environmental Science and Pollution Research - International*, 14, 67-71.
- Escamilla, P., Tavera, M., Sandoval, R., Salinas, E., y Alvarado, H. (2016). "Economic feasibility analysis for electrical generation from biogas in waste disposal sites in Mexico City." *Applied Economics*, 48, 5761-5771.
- Fullerton, D., y Heutel, G. (2007, November). *The General Equilibrium Incidence of Environmental Mandates*.
- Fullerton, D., y Kinnaman, T. (1994). "Garbage, recycling, and illicit burning or dumping." *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 78-91.
- Guenther, W., Bergmann, H., y L., T. (2016). "Potential analysis of the biogas production- as measured by effects of added value and employment." *Journal of Cleaner Production*, 129, 556-564.
- Gutierrez, E., Xia, A., y Murphy, J. (2016). "Can slurry biogas systems be cost effective without

subsidy in mexico?” *Renewable Energy*, 95, 22-30.

Larsson, M., y Grönkvist, S. A. P. (2016). “Upgraded biogas for transport in sweden- effects of policy instruments on production, infrastructure development and vehicle sales.” *Journal of Cleaner Production*, 112, 3774-3784.

Melendez, G., y L., V. (2015). “Characterization of greenhouse gases emissions from urban solid waste in baja california: A proposal to incorporate technical input into decision-making.” *Frontera Norte*, 27, 5-28.

Ribeiro, K., y Silva, E. (2009). “Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in brazil.” *Biomass and Bioenergy*, 33, 1101–1107.

Rios, M., y Kaltschmidt, M. (2016). “Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in mexico.” *Renewable and Sustainable Energy Review*, 54, 384-395.

Shin, P. J. K. S. y. S. E., H.C. (2009). “Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in korea using leap model.” *Energy Policy*, 33, 1261–1270.

Thamsiriroj, T., Smyth, H., y Murphy, J. (2011). “A roadmap for the introduction of gaseous transport fuel: A case study for renewable natural gas in ireland.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4642-4651.

Vera-Romero, I., Martínez, J., Espíritu-Barragán, C., Estrada-Jaramillo, M., Ortiz-Soriano, A., y Orozco-Medina, L. (2014). “Biogas estimation as a basis for the implementation of an intermunicipal landfill:michoacan, mexico.” *Journal of Environmental Protection*, 5, 577-582.

Zuberi, J., y Ali, S. (2015). “Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landlls in pakistan.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 117–131.