

## Estimación de externalidades por la contaminación atmosférica asociada a la quema de bagazo



### Estimation of externalities for atmospheric contamination associated with bagasse burning

<http://opn.to/a/CCySF>

Alina Roig-Rassi<sup>1\*</sup>, Elieza Meneses-Ruiz<sup>1\*</sup>, Iveitty Soto-Guevara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA), La Habana, Cuba

**RESUMEN:** La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, produce diferentes impactos negativos. Estos impactos provocados por la generación de electricidad son considerados *Costos Externos o Externalidades* cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía y por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. El uso de la biomasa en Cuba para la generación de electricidad se realiza principalmente en centrales azucareros con doble finalidad, la producción de calor y electricidad. En el trabajo se determinan las externalidades atmosféricas del uso de bagazo como fuente de energía a partir de las emisiones de material particulado. Para esto se empleó la Metodología de Vías de Impacto. Se evaluaron tres centrales considerando dos escenarios: base y mitigación. Se obtuvo que los mayores costos totales del daño fueron para el Central Uruguay (667.2 MCUC). El valor promedio de las externalidades para el escenario base por impacto en salud fue de 1.2 CUC/kWh, lo cual se corresponde con los reportados por los estudios europeos para la generación de electricidad y calor a partir del bagazo de caña.

**Palabras clave:** externalidades, bagazo, generación de electricidad.

**ABSTRACT:** The generation of electricity from fossil fuels produces different negative impacts. These impacts caused by the generation of electricity are considered External Costs or Externalities when they are not included in the prices of the energy market and therefore distort optimal economic decisions. The use of bagasse in Cuba for the generation of electricity take place mainly in sugar mills with dual purpose, the production of heat and electricity. The work determines the atmospheric externalities of the use of bagasse as an energy source from particulate matter emissions. Was used the Impact Pathway Methodology. Considering two scenarios were evaluated three plants: base and mitigation. The highest damage costs were for Uruguay sugar mill (667.2 MCUC). The averages of externalities for the scenario bases for impact on health was of 1.2 CUC/kWh, value that belongs together with those reported by the European studies for the production of heat and electricity from the bagasse burning.

**Keywords:** externalities, bagasse, electricity generation.

\*Autores para correspondencia: Alina Roig-Rassi y Elieza Meneses-Ruiz. E-mail: [arrassi@cubaenergia.cu](mailto:arrassi@cubaenergia.cu), [emeneses@cubaenergia.cu](mailto:emeneses@cubaenergia.cu)

Recibido: 16/08/2018

Aceptado: 06/11/2018

## INTRODUCCIÓN

El uso de la energía en todas sus formas proporciona un enorme beneficio a la sociedad, sin embargo, también está asociado a numerosos desafíos medioambientales y sociales. La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, produce diferentes impactos negativos. Los más significativos, a nivel local, la contaminación atmosférica, a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global, el cambio climático.

Estos impactos provocados por la generación de electricidad son considerados *Costos Externos o Externalidades* cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía y por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. Las sociedades modernas se encuentran ante el reto de poder “internalizar” los costos asociados a estos impactos. Sin embargo, aunque no lleguen a ser propiamente internalizados, el simple hecho de conocerlos, ayuda a crear condiciones más favorables para el trazado de políticas y estrategias con vistas a reducir las emisiones generadas por este sector, entre las que podrían incluirse: la introducción de tecnologías de reducción o control de emisiones, el empleo de combustibles más eficientes y/o menos contaminantes entre otros. Nuestros estudios se enfocan básicamente en los daños provocados por la contaminación atmosférica.

El uso de la biomasa en Cuba para la generación de electricidad se realiza principalmente en centrales azucareros con doble finalidad, la producción de calor y electricidad. En los llamados periodos de zafra los actuales centrales azucareros son capaces, a partir de los residuos de la caña, de producir la electricidad que necesitan y entregar el sobrante al Sistema Electroenergético Nacional.

Una capacidad instalada de 755 MW se espera incorporar paulatinamente hasta 2030 como parte de la estrategia actual de introducción de las fuentes renovables. La industria azucarera está llamada a cambiar la matriz energética actual con una participación de un 30% en el año 2030. Para las nuevas inversiones son indispensables las evaluaciones de impacto ambiental, demostrando que las nuevas instalaciones cumplen las normas ambientales establecidas y no agravan los

problemas existentes. En el caso de los centrales azucareros los problemas de contaminación atmosférica no son tratados, ni sujetos a normativa. En la actualidad ningún central cuenta con tecnología de control de emisiones de partículas, existiendo quejas de la población por las emisiones de las mismas en poblados cercanos a estas instalaciones.

En el trabajo se determinan las externalidades atmosféricas del uso del bagazo como fuente de energía a partir de las emisiones de material particulado (PM<sub>10</sub>) de tres centrales. Para el estudio se contemplaron dos escenarios:

- el escenario base, considerando las toneladas de bagazo quemadas para la producción de electricidad en el 2015 y el factor de emisión de 15.6 lb/ton
- el escenario de mitigación, donde se considera un proceso con control de emisiones con factor de emisión 1.36 lb/ton

## MATERIALES Y MÉTODOS

La [figura 1](#) se muestra el ciclo de vida de la biomasa cañera. A partir de las etapas del ciclo de vida se pueden estimar los impactos medioambientales generados en cada una de ellas. Aunque sean identificados los impactos en el caso que describe la figura es necesario poder cuantificar los mismos.

Las externalidades atmosféricas como consecuencia de la quema de bagazo, debido a la emisión de material particulado, se pueden determinar utilizando la metodología vías de impacto ([ExternE, 2005](#)). Esta sigue el camino de los contaminantes desde que son emitidos hasta los receptores afectados, identificando y cuantificando las afectaciones (impactos) para posteriormente estimar los costos asociados.

Esta metodología comprende cuatro etapas ([figura 2](#)):

1. Caracterización de la fuente emisora: localización, datos de la chimenea, flujos de contaminantes emitidos, entre otros.
2. Dispersión: cálculo del incremento de las concentraciones de los contaminantes emitidos en las regiones afectadas (dominio local y regional), utilizando modelos de dispersión o transporte de contaminantes atmosféricos.

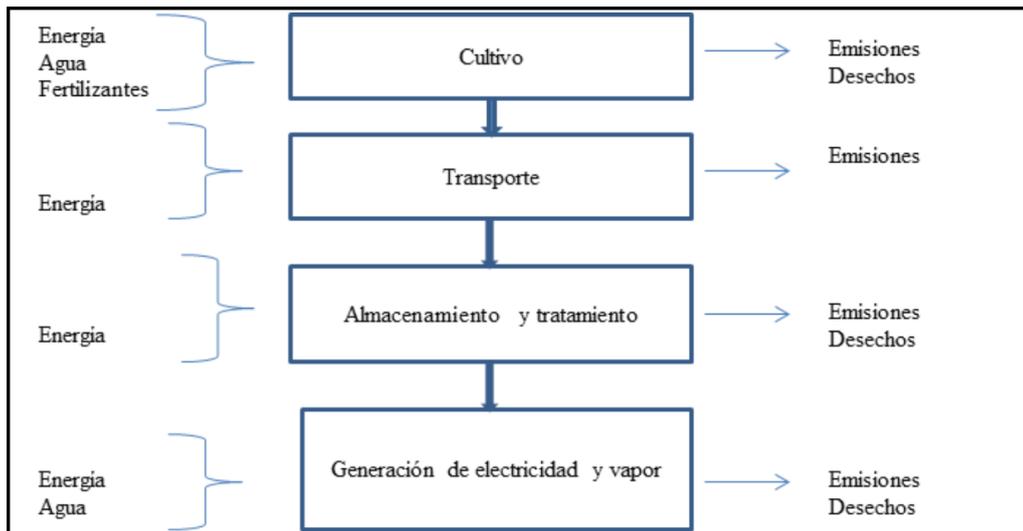


Figura 1. Ciclo de vida de la biomasa cañera

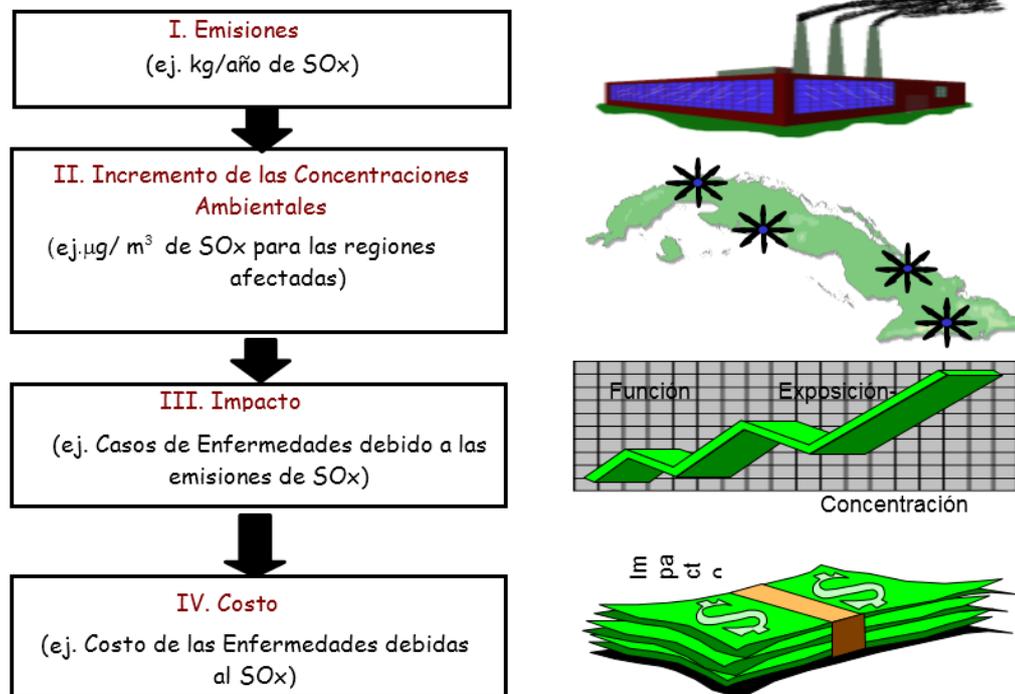


Figura 2. Metodología Vías de Impacto

3. Evaluación de impactos: evaluación de funciones exposición-respuesta, las cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud con una exposición dada a un contaminante.
4. Costos: evaluación monetaria de los impactos en la salud, tanto de morbilidad como de mortalidad.

### 1-Método de los factores de emisión para la determinación de las emisiones

Este método se utiliza con frecuencia para calcular las emisiones cuando no están

disponibles datos de monitoreo específico para la fuente. Un factor de emisión (FE) es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con la actividad que genera esa liberación (actividad que pueda ser fácilmente medida como la cantidad de material procesado o combustible utilizado).

El modelo básico simplificado para el estimado de las emisiones, en su variante más simple, consiste en el producto de al menos dos variables: estadística de actividad (o datos de

actividad) y un factor de emisión (FE) típico promedio para la actividad.

$$E = A*FE*(1 - EC/100) \quad (1)$$

donde:

E - Tasa de emisión.

A - Tasa de actividad

FE - Factor de emisión

EC - eficiencia de control de la emisión (%)

Para esta investigación se consideró que el factor de emisión de PM<sub>10</sub> es para el tipo de proceso no controlado, ya que en el caso nuestro las tecnologías de quema de biomasa no tienen control de emisión. Por lo tanto, la [ecuación 1](#) queda de la siguiente manera:

$$E = A*FE \quad (2)$$

En los casos modelados se empleó como tasa de actividad las toneladas de bagazo quemado por cada planta. Los FE de emisión empleados fueron 15.6 lb/ton para el caso base y 1.36 lb/ton para el caso de mitigación donde se asume un entorno controlado con limpiadores húmedos y el factor empleado es teniendo en cuenta una eficacia del 90% de estos ([EPA, 2001b](#)).

## 2-Dispersión local de contaminantes atmosféricos

Para resolver la dispersión local de contaminantes se utilizó el Sistema AERMOD (AERMAP-AERMET-AERMOD). Para el Sistema AERMOD se utilizaron las últimas versiones liberadas por la EPA ([EPA, 2001](#)) y algunas herramientas de cálculo complementarias desarrolladas por el equipo de CUBAENERGÍA, haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones del país.

Las características y localización de las fuentes de emisiones contempladas en el estudio se muestran en la [Tabla 1](#) y [figura 3](#).

El dominio de modelación empleado para el estudio de la dispersión de los contaminantes fue de 50 x 50 km, 25 km al Norte, 25 al Este, 25 km al Sur y 25 al Oeste del punto considerado origen. Dentro del dominio se define una rejilla cartesiana uniformemente espaciada. La rejilla cubre todo el dominio e incluye 121 receptores con separación de 5 x 5 km. En el estudio se contemplan en total 100 celdas.

La [Tabla 2](#) muestra los datos utilizados en la modelación de dispersión de las partículas desde la fuente considerada para cada escenario y fuente: flujo másico de emisiones del contaminante en g/s, flujo volumétrico de emisiones de los gases de escape en m<sup>3</sup>/s y temperatura de salida de los gases de la combustión en grados K.

Para la evaluación se consideró que el tamaño del 90% de las partículas emitidas eran igual o menor a 10µm.

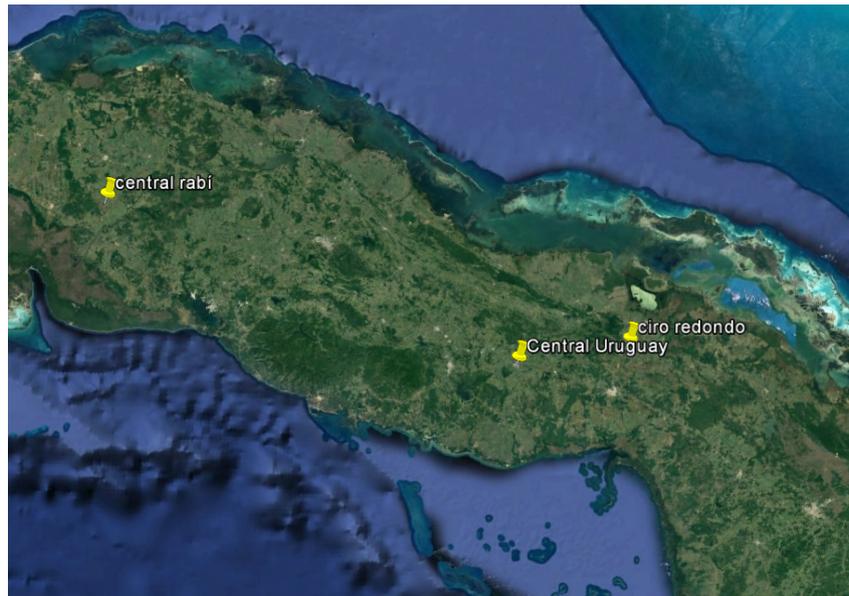
## 3-Evaluación de impactos y costos

La medición del impacto de la contaminación atmosférica sobre la salud se realiza a través de “funciones exposición-respuesta” (FERs), las que relacionan el incremento de los niveles de concentración de los contaminantes durante un período de tiempo (exposición) con el incremento de la probabilidad de ocurrencia del efecto adverso (riesgo), determinando la proporción de sujetos afectados en la población (respuesta) ([Rabl, 2002](#)) ([WHO, 2000](#)).

El estudio actual propone seguir la metodología propuesta por Rabl ([Rabl, 2002](#)), y empleada en modelo de acuerdo a la [ecuación 3](#). Esta metodología asume las FER lineales, sin umbral, calculando la pendiente de la FER como el incremento del riesgo relativo (IRR) al

**Tabla 1.** Características de las fuentes de emisión y su localización

ID	Fuente	Altura [m]	Diámetro [m]	Coordenadas en UTM	
				x [m]	y [m]
Jesús Rabí	Una chimenea (centro del dominio)	62	3.65	509744	2492301
Uruguay	Dos chimeneas (el centro del dominio es el punto medio entre ambas)	83.5	4.0	689216.71	2426247.88
		70.6	3.8	689232.53	2426329.15
Ciro Redondo	Dos chimeneas (el centro del dominio es el punto medio entre ambas)	83	5.48	736940.86	2435745.60
		83	5.48	736899.86	2435778.60



**Figura 3.** Ubicación de las fuentes consideradas en el estudio

**Tabla 2.** Principales datos de entrada que se le suministra al AERMOD

Escenario	Central	Parámetros	Chim1	Chim2
Uruguay		Emisiones de PM <sub>10</sub>	36.27 g/s	18.13 g/s
		Temperatura de salida de los gases	473.15 °K	473.15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	142.22 m <sup>3</sup> /s	71.11 m <sup>3</sup> /s
Base	Jesús Rabi	Emisiones de PM <sub>10</sub>	31.79 g/s	-
		Temperatura de salida de los gases	473.15 °K	-
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63.19 m <sup>3</sup> /s	-
Ciro Redondo		Emisiones de PM <sub>10</sub>	19.83 g/s	19.83 g/s
		Temperatura de salida de los gases	503.15 °K	503.15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63.21 m <sup>3</sup> /s	63.21 m <sup>3</sup> /s
Uruguay		Emisiones de PM <sub>10</sub>	3.15 g/s	1.58 g/s
		Temperatura de salida de los gases	473.15 °K	473.15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	142.22 m <sup>3</sup> /s	71.11 m <sup>3</sup> /s
Mitigación	Jesús Rabi	Emisiones de PM <sub>10</sub>	2.8 g/s	-
		Temperatura de salida de los gases	473.15 °K	-
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63.19 m <sup>3</sup> /s	-
Ciro Redondo		Emisiones de PM <sub>10</sub>	1.8 g/s	1.8 g/s
		Temperatura de salida de los gases	503.15 °K	503.15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63.21 m <sup>3</sup> /s	63.21 m <sup>3</sup> /s

impacto, multiplicado por la incidencia base por la fracción de la población en riesgo.

$$S_{FER} = IRR(\% / (\mu\text{g} / \text{m}^3)) \cdot \text{Incidencia} (\text{casos} / (\text{receptor} - \text{año})) \cdot \text{fpop} \quad (3)$$

donde:

fpop - se corresponde con la fracción de la población en riesgo.

IRR - es el cambio en la tasa de ocurrencia de una enfermedad (efecto adverso o variable respuesta) para una población expuesta al factor de riesgo objeto de análisis (en este

caso el contaminante), por unidad de cambio en la concentración ambiental ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para un tiempo de exposición promedio dado (horas, día, semanas, año).

La tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular es la línea base, la cual se expresa en casos al año normalizado por persona (probabilidad individual de sufrir el efecto). Para la mortalidad, la línea base es la tasa anual de mortalidad para el grupo receptor. Este

IRR se estima de la misma manera que coeficiente  $\beta$ , en los estudios log-lineales:

$$IRR = \ln(RR) / \Delta C \quad (4)$$

donde:

RR - es el riesgo relativo y es la relación que existe entre la tasa de ocurrencia de un efecto entre un grupo poblacional expuesto y otro no expuesto.

Utilizando el valor de pendiente obtenido en la [ecuación 3](#), los casos anuales atribuibles se podrán expresar de la siguiente forma:

$$\Delta Y = \sum S_{FER} (POP_j) (\Delta C_j) \quad (5)$$

donde:

$\Delta Y$  - Incremento en el número de casos anuales

$POP_j$  - es el número de receptores en la localización j.

$\Delta C_j$  - es el cambio anual (variabilidad) en las concentraciones de un contaminante dado en el área j.

Las funciones exposición-respuesta más actuales de material particulado han sido obtenidas fundamentalmente para  $PM_{2.5}$  o  $PM_{10}$ . Teniendo en cuenta que los incrementos de concentraciones se obtuvieron para material particulado total y  $PM_{10}$ , se asumirán las siguientes relaciones:

- la toxicidad de  $PM_{10}$  igual a 0.6 la de  $PM_{2.5}$  ( $S_{FER} PM_{10} = 0.6 * S_{FER} PM_{2.5}$ ).
- la toxicidad de las PM igual a 0.55 la de  $PM_{10}$  ( $S_{FER} PM = 0.55 * S_{FER} PM_{10}$ ).

Estas relaciones han sido utilizadas previamente por otros autores como ExternE ([ExternE, 2005](#)) y Ostro ([Ostro, 1996](#)).

Para la mortalidad crónica, en este caso, se estiman los años de vida perdidos (AVP). Para este caso se utiliza el valor de pendiente  $S_{FER}$  determinada en estudio realizado por Meneses ([Meneses et al, 2008](#)) basada en la metodología anterior.

$$S_{FER} = 1.92 \cdot 10^{-4} AVP / (\text{persona} \cdot \text{año} \cdot \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ de } PM_{10}) \quad (6)$$

Los estudios desarrollados para la morbilidad son menos frecuentes. En ausencia de estadísticas nacionales que recojan las incidencias de los efectos incluidos en el estudio se decidió utilizar como referencia la incidencia empleadas en los estudios de  $PM_{10}$ . Las fracciones de la población se sacaron del anuario estadístico correspondiente al año 2015. El porcentaje de asmáticos se asumió igual al 8%. En el caso de las funciones obtenidas para niños se decidió aplicarla a una población entre 5-14 años. Los valores considerados son resumidos en la [tabla 4](#).

La [tabla 5](#) constituye un resumen de los incrementos expuestos anteriormente, estos fueron determinados por Meneses ([Meneses et al, 2016](#)).

ExternE en sus diferentes fases, ha asumido que una muerte aguda equivale a 6 meses 0.5 AVP. Por tanto para el cálculo de la pendiente de la función se utilizará el incremento mostrado en la tabla anterior multiplicada por los AVP/Caso, en este caso 0.5, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_{FER} = IRR \cdot I_{ref} \cdot 0.5 AVP / (\text{persona} \cdot \text{año} \cdot \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ de } PM_{10}) \quad (7)$$

donde:

$I_{ref}$  - se corresponde con el valor de incidencia base

**Tabla 4.** Tasa de incidencia base y fracciones de la población

Efecto	Receptores	Incidencia base	Fracción de la población
Bronquitis crónica	$\geq 27$ años	0.0038	0.63
Infarto agudo de miocardio, no fatal	$\geq 65$ años	0.017	0.14
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	Población Total	0.014	1
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	$\geq 65$ años	0.010	0.14
Visitas a salas de urgencia (Asma)	Asmáticos	0.094	0.08
Bronquitis aguda niños	Niños (5-14 años)	0.043	0.12
Días laborales perdidos	Adultos (18-65 años)	0.006	0.68
Síntomas respiratorios	Niños (5-14 años)	0.0012	0.12
Mortalidad Crónica	$\geq 30$ años	0.0078	0.62
Mortalidad Aguda	Población Total	0.0083	1

Como receptores se seleccionó a la salud por constituir el ser humano el más vulnerable a los efectos de la contaminación atmosférica. El valor total para la sociedad relacionado con un efecto adverso en salud tiene dos componentes: la primera el costo de la enfermedad para el paciente donde está incluido el valor total de los recursos médicos usados, más la pérdida de productividad y la segunda, la voluntad individual a pagar (WTP), entre otras, para evitar el dolor y el sufrimiento relacionado con la enfermedad. La primera puede valorarse con precios de mercado mientras que la segunda no tiene precios de mercado que puedan servir como referencia.

Los costos de mortalidad se valoran utilizando la metodología de voluntad a pagar (VAP). Existen diferentes métodos para estimar la voluntad a pagar para evitar una enfermedad, entre ellos el método de precios hedónicos, diferencias salariales y valoración contingente.

Para seleccionar los costos unitarios a emplear en el estudio se tomaron dos estudios de referencia: los valores propuestos por el proyecto ExternE y los valores propuestos por U.S.

Environmental Protection Agency, (EPA, 2017). Estos costos son expresados de USD a CUC de acuerdo a la tasa de cambio vigente en el año 2015, alrededor de 1 (ONEI, 2017). Para los días laborales perdidos se asume la conversión de 1 CUP = 1 USD.

En la [tabla 6](#) se muestra el resumen de los costos utilizados en el estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Concentraciones de PM<sub>10</sub> obtenidas

En las [tablas 7](#) y [8](#) se muestran las concentraciones máximas obtenidas para el período modelado (diciembre-abril) y para 24 horas respectivamente.

Para evaluar el impacto de la calidad de aire, el tamaño de la rejilla debe ser menor que el empleado. Lo recomendado es usar rejillas de 500 x 500 m o de 1 x 1 km, pues las concentraciones se diluyen al aumentar el área de la misma. En este trabajo la determinación de la calidad del aire no es el objetivo principal de estudio, por lo cual este aspecto no fue analizado.

**Tabla 5.** Incrementos recomendados

Efecto	Receptores	IRR (%/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para PM
Bronquitis crónica	$\geq 27$ años	0.822
Infarto agudo de miocardio, no fatal	$\geq 65$ años	0.132
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	Población Total	0.126
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	$\geq 65$ años	0.042
Visitas a salas de urgencia (Asma)	Asmáticos	0.336
Bronquitis aguda niños	Niños (5-14 años)	1.632
Días laborales perdidos	Adultos (18-65 años)	0.460
Síntomas respiratorios	Niños (5-14 años)	1.140
Mortalidad Aguda	Población Total	-

**Tabla 6.** Valores de costos expresados en CUC

Efecto	Costo Total
Bronquitis crónica	121847
Infarto agudo de miocardio. no fatal	51576
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	121847
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	51576
Bronquitis aguda niños	8707
Visitas a salas de urgencia (Asma)	8803
Días laborales perdidos	30
Síntomas Respiratorios	68
AVP. crónico	18310

### Costos externos obtenidos para los centrales

Para los centrales azucareros los mayores costos del daño por las emisiones de PM<sub>10</sub> fueron para el central Uruguay, seguidos por Ciro Redondo y Jesús Rabí. Estos resultados se muestran en la [Tabla 9](#).

Los mayores costos, en todos los casos de estudios, están asociados a la bronquitis crónica. Esto es debido a la cantidad de casos que se reportan de este efecto y al valor de su costo empleado en el estudio según la [Tabla 6](#).

Los valores obtenidos en CUC por tonelada de contaminante emitidos se muestran en la [tabla 10](#). Estos son comparables con los obtenidos para las

CTEs con áreas de impacto que no incluyen grandes ciudades.

En el escenario de mitigación los costos por toneladas de material particulado disminuyen apreciablemente, por lo cual queda en evidencia la importancia de considerar las tecnologías de reducción de emisiones tanto para disminuir el impacto en salud como en los costos asociados a las emisiones.

Desde el punto de vista de impacto en salud, se estimaron los incrementos en los casos de enfermedad como resultado del impacto del PM<sub>10</sub> emitido por las plantas evaluadas. En la [Tabla 11](#) para los impactos de morbilidad se indica el número de casos al año, mientras que para la mortalidad se muestran el número de años de

**Tabla 7.** Concentraciones de PM<sub>10</sub> máximas obtenidas para el período de trabajo del central

Central	Concentración máxima para escenario base [µg/m <sup>3</sup> ]	Concentración máxima para escenario mitigación [µg/m <sup>3</sup> ]
Uruguay	38.402	3.346
Jesús Rabí	0.631	0.055
Ciro Redondo	1.536	0.139

**Tabla 8.** Concentraciones de PM<sub>10</sub> máximas obtenidas para 24 horas

Central	Concentración máxima para escenario base [µg/m <sup>3</sup> ]	Concentración máxima para escenario mitigación [µg/m <sup>3</sup> ]
Uruguay	475.22	41.42
Jesús Rabí	3.05	0.26
Ciro Redondo	13.89	1.26

**Tabla 9.** Costos Totales del Daño en MCUC por planta y por efecto debido a las emisiones de PM<sub>10</sub>

Efecto	Escenario Base			Escenario Mitigación		
	Uruguay	Jesús Rabí	Ciro Redondo	Uruguay	Jesús Rabí	Ciro Redondo
Bronquitis crónica	256.1517	36.6356	95.9862	22.3153	3.2268	8.7571
Infarto agudo de miocardio, no fatal	17.3095	2.4757	6.4863	1.5080	0.2181	0.5918
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	16.4079	2.3467	6.1484	1.4294	0.2067	0.5609
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	0.5530	0.0791	0.2072	0.0482	0.0070	0.0189
Visitas a salas de urgencia (Asma)	0.3131	0.0448	0.1173	0.0273	0.0039	0.0107
Bronquitis aguda niños	0.8546	0.1222	0.3203	0.0745	0.0108	0.0292
Días de actividad restringida	0.0601	0.0086	0.0225	0.0052	0.0008	0.0021
Síntomas Respiratorios Bajos	0.0119	0.0017	0.0045	0.0010	0.0002	0.0004
AVP. crónico	375.5571	53.7134	140.7303	32.7176	4.7309	12.8392
Costos Totales	667.2190	95.4278	250.0230	58.1264	8.4051	22.8103

vida perdidos (AVP). Los valores mostrados son el total para ambos escenarios.

Desde el punto de vista de impacto en salud el total de casos por año que resulta de la evaluación es de 59, que disminuyen a 4 casos al tener en cuenta tecnología de control de emisiones. El central que más casos aporta es el Uruguay, en correspondencia con las mayores externalidades calculadas. Para este, el total de casos al año en el escenario base, es de 39, mientras que para el escenario de mitigación disminuye sustancialmente obteniéndose solo 3.

Los costos de impacto por kWh de generación, que se muestran en la [Tabla 12](#), son superiores a los obtenidos para las CTEs en estudios

anteriores ([ExternE, 2005](#)). En estos el costo fue de 0.95 USD por kWh como promedio y los valores oscilaron entre 1.22 y 0.56 USD por kWh. En el escenario de mitigación estos costos se reducen en un orden.

En el estudio se considera que todo el bagazo quemado se emplea para generar electricidad y a partir de aquí se determinan los costos, por lo cual los valores reales deben ser menores, pues parte del bagazo se emplea en generar calor para los procesos del central.

En el proyecto CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems) ([CASES, 2008](#)) que tuvo como objetivo obtener una evaluación completa y coherente de los costos totales de las

**Tabla 10.** CUC/tonelada de PM<sub>10</sub> emitida

Escenarios	Central	\$/ton PM <sub>10</sub>
Escenario Base	Uruguay	388.9
	Jesús Rabí	95.2
	Ciro Redondo	199.9
Escenario Mitigación	Uruguay	33.8
	Jesús Rabí	8.3
	Ciro Redondo	18.1

**Tabla 11.** Casos al año por tipo de efecto

Efecto en salud	Total de casos/año	
	Escenario base	Escenario mitigación
Bronquitis crónica	3	0
Infarto agudo de miocardio, no fatal	1	0
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	3	0
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	0	0
Visitas a salas de urgencia (Asma)	4	0
Bronquitis aguda niños	14	1
Días laborales perdidos	3	0
Síntomas respiratorios bajos	0	0
Mortalidad Crónica, AVP	31	3
Total	59	4

**Tabla 12.** Centavos de CUC por kWh generado

Escenarios	Central	CUC/kWh
Escenario Base	Uruguay	2.0
	Jesús Rabí	0.8
	Ciro Redondo	0.8
Promedio Escenario Base		1.2
Escenario Mitigación	Uruguay	0.2
	Jesús Rabí	0.1
	Ciro Redondo	0.1
Promedio Escenario Mitigación		0.13

fuentes energéticas que incluían los costos externos y los costos privados, se obtuvo como resultado que para la quema de biomasa (paja) para la generación de calor y electricidad, las externalidades por el impacto en salud fueron de 1.5 centavos de euros/kWh. En nuestro estudio las externalidades promedios para el escenario base fueron de 1.2 centavos CUC/kWh, por lo cual los resultados obtenidos se consideran en el orden de los estudios europeos.

### CONCLUSIONES

Para los centrales azucareros evaluados los costos totales del daño, debido a la emisión de PM<sub>10</sub>, fueron superiores para el Central Uruguay (667.2 MCUC). Estos costos disminuirían considerablemente al considerar una tecnología de control de emisiones.

Los costos de impacto por kWh de generación en los centrales, son superiores a los obtenidos para las CTEs, lo que demuestra que hay un volumen alto de emisiones por generación de electricidad. Esto hace imprescindible un estudio económico con vistas al control de las emisiones de los centrales azucareros.

Las externalidades promedios para el escenario base por impacto en salud fueron de 1.2 centavos CUC/kWh, por lo cual, los resultados obtenidos se consideran en el orden de los estudios europeos que reportan en la quema de biomasa (paja) para la generación de calor y electricidad, externalidades por impacto en salud de 1.5 centavos de euros/kWh.

Las externalidades ambientales atmosféricas deben ser consideradas tanto en los estudios de factibilidad económica como en los de planificación como un costo evitado. Las metodologías propuestas constituyen un análisis de varias metodologías existentes y que consideramos se ajustan a las condiciones de Cuba. Sin embargo, teniendo en cuenta que cada caso de estudio tiene sus particularidades existirán impactos que necesiten ser evaluados para casos muy particulares.

### REFERENCIAS

CASES (2008): European Commission, 2008. Project No 518294 SES6, CASES - Cost Assessment of Sustainable Energy Systems, WP6 - DELIVERABLE D.6.1. "Full cost

estimates of the use of different energy sources". Last update: September 2008

EPA (2001): Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric, [http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm#aermod](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm#aermod)

EPA (2001b): Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources. Updates 2001 to present.

EPA (2017): U.S. Environmental Protection Agency / Office of Air Quality Planning and Standards BenMAP-Environmental Benefits Mapping and Analysis Program, User's Manual. Abt Associates Inc.: US EPA; April 2017.

ExternE (2005): European Commission, ExternE (2005), Externalities of Energy: Methodology 2005 Update, (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France

Meneses et al (2008). PROGRAMA NACIONAL DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE. Código del proyecto: 00613312, Externalidades del transporte. Propuesta de funciones exposición-respuesta a emplear en los estudios de externalidades del transporte.

Meneses et al (2016). Salida de proyecto No. 1-2016: "METODOLOGÍA EVALUACIÓN DE IMPACTOS Y COSTOS". Proyecto, "Evaluación de externalidades ambientales de tecnologías energéticas en Cuba". Código: P211LH003-017, Programa Energía Renovable.

NC 1020: 2014 CALIDAD DEL AIRE - CONTAMINANTES - CONCENTRACIONES MÁXIMAS ADMISIBLES Y VALORES GUÍAS EN ZONAS HABITABLES.

ONEI (2017): Anuario estadístico de Cuba 2015, ONEI (2017): Anuario estadístico de Cuba 2015, <http://www.onei.cu> , consultado mayo 2017

Ostro B. (1996). A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects, World Health Organization, Ginebra.

Rabl. (2002). Airpacts exposure response functions. Austria: International Atomic Energy Agency

WHO (2000): World Health Organization. Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment. Guideline document. Copenhagen. WHO Regional Office for Europe.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)