

El conocimiento científico actual sobre los impactos del carbono negro en el cambio climático y las estrategias recomendadas para reducir sus emisiones - Una síntesis para la toma de decisiones

Octubre 2009

El objetivo del Consejo Internacional para el Transporte Limpio (International Council on Clean Transportation, ICCT) es mejorar significativamente el desempeño ambiental y la eficiencia de los automóviles, camiones, barcos, aviones y sistemas de transporte que los soportan, a fin de proteger y mejorar la salud pública, el medio ambiente y la calidad de vida. La organización está dirigida por un Consejo de representantes de gobierno y de expertos provenientes de mercados automotrices líderes en todo el mundo quienes participan de manera individual para aportar su experiencia en temas relacionados con la calidad del aire y el transporte.

Los siguientes participantes del ICCT han aprobado de este documento*

Michael Walsh

Asesor de Transporte Internacional,
Estados Unidos de América

Mary Nichols

Presidente
Junta de Recursos del Aire de California
Estados Unidos de América

Dr. Adrián Fernández Bremauntz

Presidente
Instituto Nacional de Ecología
México

Dra. Leonora Rojas Bracho

Directora General
Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional
Instituto Nacional de Ecología
México

Dr. Martin Williams

Director
Programa de Calidad Atmosférica y Contaminación
Industrial,
Departamento de Medio Ambiente, Alimentos y
Asuntos Rurales,
Reino Unido

Dr. Axel Friedrich

Ex-Director
División de Medio Ambiente, Transporte y Ruido
Agencia Federal de Medio Ambiente
Alemania

Dr. Alan Lloyd

Presidente
Consejo Internacional para el Transporte Limpio
Estados Unidos de América

Dan Greenbaum

Presidente
Instituto de Efectos sobre la Salud
Estados Unidos de América

Jiro Hanyu

Presidente
Instituto de Transporte Internacional de Japón
Japón

Dagang Tang

Director
Centro de Control de Emisiones de Vehículos
Ministerio de Protección Ambiental
China

Dr. Yasuhiro Daisho

Profesor de Ingeniería,
Universidad de Waseda,
Japón

Dr. Mario Molina

Profesor
Departamento de Química y Bioquímica
Universidad de California, San Diego
y
Presidente
Centro Mario Molina
México

Las siguientes personas asistieron al Taller Internacional sobre Carbono Negro realizado el 5 y 6 de enero de 2009 en Londres, Reino Unido. El presente documento se realizó a partir de los debates que se desarrollaron en el taller y del seguimiento posterior con los participantes.*

Dr. Alan Lloyd	Consejo Internacional para el Transporte Limpio	EE. UU.
Anumita Roy Chowdhury	Centro para la Ciencia y el Medio Ambiente	India
Dr. Axel Friedrich	Asesor internacional	Alemania
Bart Croes	Junta de Recursos del Aire de California	EE. UU.
Ben DeAngelo	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.	EE. UU.
Dr. Bruce Hill	Fuerza de Tareas para el Aire Limpio	EE. UU.
Catherine Witherspoon	Asesora, Fundación ClimateWorks	EE. UU.
Dr. David Fahey	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica	EE. UU.
Dr. David Lee	Universidad Metropolitana de Manchester	Reino Unido
Dr. David Warrilow	Departamento para el Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales	Reino Unido
Dennis Clare	Instituto para el Gobierno y el Desarrollo Sustentable	EE. UU.
Dr. Drew Shindell	Universidad de Columbia	EE. UU.
Elisa Dumitrescu	Programa Ambiental de las Naciones Unidas	Kenia
Elen Baum	Fuerza de Tareas para el Aire Limpio	EE. UU.
Dr. He Kebin	Universidad de Tsinghua, China	China
Dr. James Corbett	Universidad de Delaware	EE. UU.
Dr. Jan Fuglestedt	Centro para la Investigación Internacional del Clima y el Medio Ambiente	Noruega
John Guy	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.	EE. UU.
Kate Blumberg	Consejo Internacional para el Transporte Limpio	EE. UU.
Dr. Keith Shine	Universidad de Reading	Reino Unido
Dr. Richard Mills	Foro Mundial de Contaminación del Aire	Reino Unido
Dr. Kirk Smith	Facultad UC Berkeley de Salud Pública	EE. UU.
Dra. Leonora Rojas Bracho	Instituto Nacional de Ecología, México	México
Dr. Mark Jacobson	Universidad de Stanford	EE. UU.
Martin Green	Johnson Matthey	Reino Unido
Dr. Martin Rocholl	Fundación para el Clima de la UE	Alemania
Dr. Martin Williams	Departamento para el Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales	Reino Unido
Michael Walsh	Asesor internacional	EE. UU.
Dr. Olivier Boucher	Centro Hadley de la Oficina de Meteorología	Reino Unido
Dr. Piers Forster	Universidad de Leeds	Reino Unido
Ray Minjares	Consejo Internacional para el Transporte Limpio	EE. UU.
Dr. Tami Bond	Universidad de Illinois - Urbana Champaign	EE. UU.
Tim Williamson	Departamento para el Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales	Reino Unido
Dr. V Ramanathan	Instituto Scripps de Oceanografía	EE. UU.

* Todas las presentaciones y los materiales entregados en el taller de Reino Unido se encuentran disponibles en línea en <http://www.theicct.org>. La asistencia al taller no implica necesariamente la adhesión a las opiniones expresadas en este documento. El ICCT asume la responsabilidad total por su contenido.

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento proporciona orientación relacionada con la creación de políticas para reducir las emisiones de carbono negro. La información aquí incluida es consistente con el Cuarto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), publicado en 2007 y se complementa con el Taller Internacional sobre Carbono Negro realizado en Londres en 2009 de ¹ y con discusiones posteriores con los participantes del taller.

El carbono negro es, en esencia, una partícula sólida emitida durante una combustión incompleta.

A todas las emisiones de partículas de una fuente de combustión se les conoce comúnmente como “material particulado” (PM) y suelen clasificarse, por su tamaño, en aquellas inferiores a los 10 micrómetros (PM₁₀) y aquellas inferiores a los 2,5 micrómetros (PM_{2.5}). El carbono negro es la fracción sólida de las PM_{2.5} que tiene un enorme poder de absorción de luz y convierte esa energía en calor. Cuando se emite a la atmósfera y se deposita sobre el hielo o nieve, el carbono negro genera cambios globales de temperatura, derretimiento de nieve y hielo y modificaciones en los patrones de precipitación.

La quema de combustibles fósiles en el transporte, el uso de biomasa (como la leña) en la cocción de alimentos o para la calefacción en el hogar, así como los incendios forestales y las quemadas agrícolas controladas son el origen de aproximadamente el 85 por ciento de las emisiones mundiales de carbono negro.

En este sentido, se estima que, al 2030, estas emisiones pueden reducirse, cuando mucho, hasta en 2,8 Tg/año de carbono negro, una reducción del 60% respecto de la línea base. Los contaminantes emitidos a la par del carbono negro y la ubicación geográfica de las emisiones de este contaminante determinarán el impacto neto sobre el clima de las estrategias de control seleccionadas para alcanzar esta reducción en emisiones.

La protección de la salud pública es, por sí sola, un argumento lo suficientemente convincente para tomar medidas con el objetivo de controlar las emisiones de carbono negro.

La exposición a las partículas causa cientos de miles de muertes año tras año en todo el mundo. Las acciones destinadas a reducir las emisiones de material particulado, tales como la aplicación de nuevas normas que regulen la emisión de los gases de escape en los vehículos y la industria, el uso de combustibles con menor contenido de azufre, el cambio a combustibles alternativos y la reducción en el consumo de combustible, contribuyen

sustancialmente a reducir las emisiones de carbono negro. Además de los beneficios relacionados con la protección del clima, la reducción de estas emisiones tiene un alto impacto en la preservación de la salud pública.

Los impactos del carbono negro sobre el clima refuerzan la necesidad de tomar medidas para controlar las emisiones de material particulado en pos de la salud pública. Según el IPCC, el carbono negro es el tercer factor más importante que contribuye al forzamiento radiativo positivo que causa el cambio climático². Según las estimaciones de este mismo organismo³, un kilogramo de carbono negro emitido es aproximadamente 460 veces más potente que la cantidad equivalente de dióxido de carbono en un período de 100 años a futuro y 1600 veces más potente en un período de 20 años a futuro. Estas estimaciones respecto del forzamiento radiativo del carbono negro son conservadoras comparadas con otras estimaciones presentadas en la literatura publicada.

El control de las emisiones de carbono negro puede producir beneficios climáticos rápidos, tanto regionales como globales. Al igual que las partículas de aerosoles, el carbono negro permanece poco tiempo en la atmósfera, pues se deposita rápidamente a unos pocos miles de kilómetros de su origen, por lo que produce esencialmente un forzamiento radiativo de poca duración. Sin embargo, este forzamiento genera fuertes impactos climáticos regionales que se extienden más allá de la región específica del forzamiento. En conjunto, estos impactos regionales que ocurren en varios lugares se convierten en un problema global. Por lo anterior, una estrategia de mitigación del cambio climático que incluya la reducción de emisiones de agentes de forzamiento de poca duración como el carbono negro puede disminuir más rápidamente el forzamiento radiativo positivo que causa el cambio climático, especialmente en los casos en que se requieren medidas rápidas para impedir la inminente materialización de impactos a gran escala como la pérdida del hielo del Mar Ártico en verano y el derretimiento de los glaciares tibetanos de los Himalayas o del casquete glaciar de Groenlandia.

Las reducciones en las emisiones de carbono negro complementan pero no sustituyen a las medidas para controlar las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero. Un punto central en la mitigación del cambio climático es reducir todos los agentes que causan forzamientos radiativos positivos y, dado que el dióxido de carbono es el más importante, cualquier demora en la reducción de las emisiones de CO₂ hace que se prolonguen sus impactos climáticos. Por lo tanto, las medidas encaminadas a reducir las emisiones de carbono negro y dióxido de

carbono en paralelo podrán contribuir de forma más efectiva a la reducción del forzamiento radiativo positivo total.

El control de las emisiones de carbono negro permitirá reducir tanto el forzamiento radiativo positivo como el negativo; por ese motivo, las acciones que se tomen para proteger el clima deben concentrarse en el efecto neto. El carbono negro se emite junto con otros contaminantes que reflejan la luz y, por lo tanto, compensan su forzamiento positivo. Entre estos contaminantes se encuentran el carbón orgánico primario y secundario, los sulfatos y los nitratos emitidos en cantidades que varían de acuerdo con el tipo de combustión y el tipo de combustible de cada fuente de emisión. El efecto neto de estas fuentes de emisión varía dependiendo del transporte y del depósito de sus emisiones de carbono negro sobre el hielo y la nieve. Por lo tanto, las principales fuentes de emisión de agentes que producen forzamiento negativo en la atmósfera pueden tener un efecto neto de forzamiento positivo si sus emisiones de carbono negro se depositan en cantidad suficiente en el Ártico o en la cima de los glaciares montañosos.

Estrictamente desde la perspectiva de la mitigación climática, se requiere reducir, de manera prioritaria, las emisiones de las fuentes que causan forzamiento radiativo positivo neto, como el uso de combustibles fósiles con bajo contenido de azufre en el transporte y el depósito de carbono negro sobre superficies de hielo y nieve. Por ejemplo, los vehículos pesados de carga y de transporte y los equipos agrícolas y de construcción para caminos de tierra que utilizan diesel de bajo azufre como combustible, la combustión de carbón en usos residenciales y los hornos para producir ladrillos industriales son generalmente forzadores positivos netos. La quema agrícola a cielo abierto, el uso residencial de biocombustibles y el transporte marítimo comercial se consideran normalmente forzadores negativos, pero pueden convertirse en forzadores positivos a nivel local si, a partir de sus emisiones, se deposita carbono negro sobre la nieve y el hielo.

EVALUACIÓN CIENTÍFICA

Las actividades humanas están causando cambios en el clima de la Tierra. Entre los cambios más importantes podemos mencionar un aumento en la temperatura global promedio inducido por la absorción de radiación infrarroja de onda larga por parte de los gases de efecto invernadero y los aerosoles con fuerte poder de absorción de luz. Los científicos dedicados al estudio de la atmósfera denominan forzamiento radiativo positivo a este cambio. En contraste, la reflexión de la energía se

considera un factor de forzamiento negativo asociado con el enfriamiento. El IPCC estima que, a partir del año 1750, las actividades humanas están asociadas con un forzamiento radiativo positivo neto total de $1,6 \text{ Wm}^{-2}$ [0,6 a 2,4] que, a su vez, está asociado con un incremento de $0,8^\circ\text{C}$ [$\pm 0,2$] en la temperatura global promedio desde finales del siglo XIX.

El término “carbono negro” se refiere a diversas partículas de combustión con fuerte poder de absorción de luz; siendo el hollín la más potente de ellas⁴. Las partículas varían en tamaño pero, generalmente, son mucho más pequeñas que $\text{PM}_{2,5}$ y es posible que no lleguen a superar $\text{PM}_{0,1}$. El carbono negro siempre forma parte del material particulado emitido por fuentes de combustión, pero la cantidad emitida varía según el tipo de combustible utilizado, el proceso de combustión y la efectividad de la tecnología o práctica de control de emisiones empleada.

El carbono negro perdura aproximadamente una semana en la atmósfera pero este período puede variar hasta en un factor de tres, dependiendo del proceso de combustión y de la ubicación geográfica de la emisión⁵. El dióxido de carbono, por el contrario, produce perturbaciones de larga duración de un modo tal que la mayor parte de CO_2 emitida hoy tendrá un impacto climático a futuro durante 30 a 100 años, e incluso, en algunas ocasiones, durante un período más prolongado.

El carbono negro es un factor importante que contribuye al forzamiento radiativo positivo que causa el cambio climático. La mayor parte de este forzamiento proviene de la absorción directa de energía lumínica en la atmósfera. El IPCC estima que, mediante este efecto, el carbono negro es responsable de aproximadamente $0,34 \text{ Wm}^{-2}$ [$\pm 0,25$] de forzamiento radiativo, promediado a nivel mundial⁶. Los estudios citados en el informe del IPCC muestran que este efecto de calentamiento puede verse magnificado cuando se incorporan (o se mezclan) partículas de carbono negro con otras partículas que diseminan energía lumínica como los sulfatos⁷; sin embargo, la mayoría de los modelos climatológicos usados por el IPCC no toman en cuenta esta amplificación. En consecuencia, esta estimación probablemente sea conservadora.

Entre algunos de los impactos de este forzamiento radiativo directo se incluyen no solamente aumentos en la temperatura sino, además, modificaciones en los patrones de precipitaciones y en la visibilidad de la superficie. Las emisiones de carbono negro pueden suprimir la convección en la atmósfera y estabilizarla de tal forma que se obstruyen los patrones normales de precipitación. Asimismo, la superficie de la Tierra se oscurece cuando se depositan, reduciendo así los

patrones de evaporación que son el origen de la formación de las nubes.

El carbono negro también produce forzamiento radiativo positivo al modificar la reflexividad o el albedo de superficies brillantes como la nieve y el hielo. En perfecto estado, estas superficies reflejan gran parte de la energía solar hacia el espacio, pero las partículas de carbono negro presentes sobre estas superficies o suspendidas sobre ellas absorben una fracción importante de esta energía y la reemiten como calor. Este hecho no sólo reduce la cantidad de energía solar reflejada sino que, además, evapora las nubes y derrite la nieve y el hielo. Esta disminución en la reflexión de las superficies de nieve y hielo genera un ciclo de realimentación que puede provocar mayor calentamiento y derretimiento. El IPCC estima que el efecto de albedo global del carbono negro sobre la nieve es de $0,1 \text{ Wm}^{-2}$ [$\pm 0,1$].

Dados los efectos de forzamiento radiativo directo y sobre el albedo de la nieve estimados por el IPCC, se estima que el forzamiento radiativo total del carbono negro es de $0,44 \text{ Wm}^{-2}$ [$\pm 0,35$]. Estas cifras ubican al carbono negro como el tercer agente más importante de forzamiento climático positivo, después del dióxido de carbono y del metano.

El IPCC parece proporcionar una orientación conservadora con respecto al carbono negro. Por ejemplo: la definición que adoptó es genérica y la estimación de forzamiento radiativo se encuentra en el punto más bajo del rango posible. Esto se debe a una situación en la que la ciencia climatológica del carbono negro está desarrollándose rápidamente pero el ritmo en que la comunidad científica puede filtrar, debatir y consolidar este nuevo conocimiento es lento.

El IPCC no cuantificó el aporte del carbono negro al efecto de enfriamiento de las nubes, factor que podría reducir la estimación de su forzamiento radiativo total. La mayoría de los modelos tampoco toman en cuenta la mezcla interna, factor que podría aumentar las cifras estimadas. Es probable que el próximo informe del IPCC, previsto para el año 2013, incluya mayores conocimientos acerca de la mezcla interna y el aporte a la carga de nubes.

VALOR ESTRATÉGICO

Las reducciones en los niveles de emisión de carbono negro redundarán en importantes beneficios para la salud pública que, en sí mismos, representan un excelente motivo para reducir las emisiones. Se ha demostrado que el carbono negro es una fracción de emisiones de

material particulado asociadas con muerte prematura, incapacidad y enfermedades crónicas. El carbono negro podría incluirse dentro de la categoría de las partículas ultrafinas o $\text{PM}_{0,1}$, que imponen graves riesgos para la salud. Estas pequeñas partículas son emitidas principalmente por fuentes de combustión. La Organización Mundial de la Salud estima que en el año 2000, la contaminación del aire en ciudades fue responsable de 800.000 muertes prematuras y que el humo en lugares cerrados proveniente de la quema de combustibles sólidos causó 1,6 millones de muertes prematuras. La mayoría de estos decesos se produjo en países en vías de desarrollo.

Combatir las emisiones de carbono negro permitirá conseguir beneficios climáticos más rápidos que los que generaría una estrategia enfocada únicamente en el dióxido de carbono. El carbono negro forma parte de un reducido grupo de agentes de forzamiento climático de corta vida; por ese motivo, la implementación de controles sobre las emisiones continuas producirá una disminución relativamente rápida de las concentraciones atmosféricas de este contaminante. El diseño de las estrategias de abatimiento puede tomar ventaja de esto para rápidamente reducir el forzamiento radiativo que causa el cambio climático, con el objeto de apoyar el esfuerzo de hacer más lento el ritmo del cambio climático global y de reducir la ya comprometida situación del calentamiento global. Además, la reducción de emisiones de carbono negro puede resultar útil para demorar y quizás evitar que se materialicen algunos riesgos regionales inminentes de mayor magnitud, como la pérdida del hielo del Mar Ártico en verano y la desaparición de los glaciares tibetanos de los Himalayas. El proceso de desaparición de estos cuerpos de hielo avanza rápidamente pero, dado el fuerte forzamiento localizado proveniente del carbono negro, los controles sobre su emisión pueden redundar en beneficios significativos.

La comunidad responsable de crear las políticas debe tomar la precaución de no sustituir las medidas relacionadas con el dióxido de carbono por las destinadas a controlar las emisiones de carbono negro. Ambos producen forzamiento radiativo positivo, causante del cambio climático, y es necesario tomar medidas sobre los dos elementos para reducir el forzamiento y así alcanzar metas climáticas. Las medidas más deseadas son aquéllas que reduzcan la mayor parte del forzamiento radiativo positivo; por ese motivo, las políticas que puedan reducir simultáneamente tanto las emisiones de carbono negro como las de dióxido de carbono pueden resultar más efectivas que una estrategia que se concentre simplemente en abordar cada factor en forma individual.

Es posible que se requieran reducciones en el nivel de

emisiones de carbono negro para compensar la disminución en las emisiones de otros agentes de forzamiento de corta duración. Un ejemplo es el control constante de las emisiones de dióxido de azufre. Estas emisiones se están reduciendo rápidamente en todo el mundo a medida que se imponen controles sobre los combustibles e, indudablemente, estas medidas son necesarias para eliminar impactos adversos sobre la salud pública. Como los sulfatos tienen un elevado poder de reflexión de la luz, estos controles reducen el forzamiento radiativo negativo, lo que equivale a un forzamiento radiativo positivo. Y, como los precursores de la formación de sulfatos en la atmósfera tienen vida corta, este forzamiento positivo se materializa relativamente rápido. Pero las reducciones en el nivel de emisiones de carbono negro pueden, asimismo, disminuir el forzamiento radiativo positivo en un período de tiempo similar. Es más, muchos de los controles necesarios para reducir las emisiones de carbono negro, como los aplicados en el transporte, son permitidos por las mismas políticas diseñadas para reducir las emisiones de azufre.

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Los siguientes pasos en la toma de decisiones, si se está convencido de la importancia estratégica de reducir las emisiones del carbono negro, es la aplicación del potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) al inventario total de emisiones, la evaluación de la reducción potencial de CO₂ equivalente de emisiones multicontaminantes y el análisis de las estrategias de control más costo - efectivas. El carbono negro impone cierta complejidad en este proceso y primero se deberán encontrar las respuestas a algunas preguntas fundamentales, tales como: ¿Cuál es la meta última de las políticas? ¿Es necesario incluir al carbono negro en un grupo de varios contaminantes? De ser así, ¿cómo se debería diseñar la métrica para comparar las emisiones de gases de efecto invernadero? Estas pautas son necesarias para estudiar las opciones inherentes a la aplicación de factores de ponderación.

El GWP es un factor de ponderación diseñado para informar la relación entre el forzamiento radiativo integrado de un gas de efecto invernadero y las emisiones de dióxido de carbono. El forzamiento radiativo integrado es simplemente la suma del forzamiento radiativo que produce un gas de invernadero en un determinado horizonte temporal. Por ejemplo: en su cuarta evaluación, el IPCC determinó que el GWP del metano para una escala de tiempo de 100 años es de 25. En otras palabras, una emisión de un pulso⁸ de metano

producirá durante su vida veinticinco veces el forzamiento radiativo que generaría la misma cantidad de dióxido de carbono en un período de 100 años.

El IPCC proporciona valores de GWP a 20, 100 y 500 años para cada uno de los principales gases de efecto invernadero. Por lo tanto, se requiere seleccionar el horizonte temporal deseado para aplicar el GWP. En el caso del carbono negro, esta selección puede parecer difícil porque el horizonte temporal genera una amplia variación en los valores de GWP. Esta variación se explica por las diferencias entre los impactos de los agentes de forzamiento de vida corta y prolongada que dependen del tiempo. En el caso del carbono negro, por ejemplo, un horizonte temporal corto como 20 años captura todo su forzamiento radiativo pero sólo una fracción del forzamiento debido al dióxido de carbono, que es un agente de vida más prolongada. Un horizonte temporal más extenso como el de 100 años también captura todo el forzamiento del carbono negro pero, además, captura una porción más importante del forzamiento debido al dióxido de carbono. Por ese motivo, las diferencias entre su forzamiento total disminuyen a medida que se amplía el plazo temporal. Este hecho explica por qué el GWP a 100 años del carbono negro es mucho menor que su GWP a 20 años.

Sin embargo, la selección de la escala de tiempo no debería depender de las emisiones de gases de efecto invernadero que se están evaluando. En cambio, debe depender de la meta final de las políticas. Por ejemplo, si la meta es impedir impactos globales en un plazo de 100 años, entonces la métrica apropiada es el GWP a 100 años (GWP100). De la misma manera, los impactos globales esperados en un plazo de 20 años exigen el GWP a 20 años (GWP20). Las partes firmantes del Protocolo de Kyoto optaron por utilizar principalmente el plazo de 100 años para calcular sus inventarios de emisiones, lo que demuestra una preferencia por impactos a largo plazo y, en consecuencia, por gases de efecto invernadero de vida más prolongada. De haberse elegido la escala de tiempo más reducida de 20 años, se habría indicado una preocupación por impactos climáticos a corto plazo y un mayor énfasis en los efectos del carbono negro y de otros agentes de forzamiento de corta vida.

El carbono negro es un agente de forzamiento climático muy potente, lo que se refleja en su GWP. Pese a que IPCC nunca ha informado explícitamente el GWP del carbono negro, en la información proporcionada en el cuarto informe de evaluación se incluyó una representación gráfica de este GWP en la Figura 2.22 de la página 206 de Forster et al (2007). Además, la información incluida en la Tabla 2.5 de la página 164 del mismo informe brinda la información necesaria para

estimar este valor.

La fórmula del GWP incluida en la página 210 es la siguiente:

$$GWP_i \equiv \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

donde GWP_i es el forzamiento radiativo medio global integrado en el tiempo de una emisión de un pulso de 1 kilogramo del compuesto i en relación a la emisión del gas de referencia CO_2 . TH es el horizonte temporal, a_i es la eficiencia radiativa del componente i y $[C_i(t)]$ es la abundancia dependiente del tiempo de i . Al numerador y al denominador de la fórmula se les conoce como el potencial absoluto de calentamiento global (Absolute Global Warming Potential, AGWP). Los valores del AGWP de CO_2 para 20, 100 y 500 años pueden encontrarse en la página 211 del informe.

Dado que la vida promedio del carbono negro es inferior a 1 año, el forzamiento radiativo (RF) promedio anual equivale al forzamiento radiativo integrado para cualquier horizonte temporal (20, 100 o 500 años). Y, si se conocen las emisiones anuales por medio de cualquier estimación de RF promedio, la relación entre ambos proporciona el RF integrado por kilogramo de emisiones, lo que equivale al AGWP. Este método fue aplicado a cada uno de los estudios de AEROCOM presentados en la Tabla 2.5 para generar un GWP independiente; posteriormente se promediaron estos GWP. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Este enfoque es conservador ya que proporciona sólo el GWP para el efecto directo del carbono negro y no incluye los efectos semidirectos, indirectos o sobre el albedo de la nieve.

Tabla 1. Potenciales de calentamiento global (Global Warming Potentials, GWP) extraídos del Cuarto informe de evaluación del IPCC

	GWP20	GWP100	GWP500
Carbono negro	1600	460	140
Metano	72	25	7.6
Óxido nitroso	289	298	153
Óxidos de azufre	-140	-40	-12
Carbono orgánico	-240	-69	-21
Dióxido de carbono	1	1	1

Nota: La metodología utilizada para el carbono negro también se empleó para el carbono orgánico y los óxidos de azufre. Los valores correspondientes al carbono negro, al carbono orgánico y a los óxidos de azufre no fueron publicados por el IPCC y no son estimaciones

La aplicación del GWP supone que las emisiones que se comparan producen un forzamiento radiativo que se disemina uniformemente por todo el planeta; por ese motivo, dos emisiones cualesquiera producen un forzamiento radiativo equivalente independientemente de su ubicación geográfica. Pero, como el carbono negro tiene vida corta y su forzamiento radiativo se concentra en la región, esta suposición carece de validez. Los aerosoles de vida corta recorren distancias reducidas y producen un fuerte forzamiento radiativo regional en ocasiones conocido como “áreas conflictivas”. La ubicación y la duración de este forzamiento varían de acuerdo con las condiciones locales que influyen la vida y el transporte de las partículas. En consecuencia, no se puede esperar que dos emisiones cualesquiera de carbono negro ponderadas por el GWP produzcan un forzamiento radiativo equivalente. Esto sugiere que las emisiones de carbono negro ponderadas por el GWP no necesariamente representan un valor equivalente al CO_2 .

El IPCC reconoció las limitaciones del GWP en su aplicación a agentes de forzamiento de vida corta y solicitó la creación de una nueva métrica para emisiones de vida reducida en su informe del año 2007. Textualmente: “To assess the possible climate impacts of short-lived species and compare those with impacts of the LLGHGs [long-lived greenhouse gases], a metric is needed.” (“Se necesita una métrica para evaluar los posibles impactos climáticos de especies de vida corta y compararlos con los impactos de los gases de efecto invernadero de larga duración.”). En el año 2009, confirmó al GWP como la métrica estándar pero dejó abiertas las posibilidades para enfoques alternativos en su quinto informe de evaluación previsto para el año 2013¹⁰.

Pese a esto, el forzamiento radiativo regional de carbono negro produce impactos climáticos tanto regionales como globales. El forzamiento radiativo causa un calentamiento que se extiende más allá de la región. En conjunto, las diversas regiones de forzamiento representan un problema global.

Como métrica alternativa al GWP se sugiere el Potencial de Cambio de la Temperatura Global (Global Temperature Change Potential, GTP). Es la relación entre el cambio de temperatura generado por una emisión de un pulso de una especie que afecta al clima con la de dióxido de carbono. Los contaminantes de vida prolongada y de vida corta que sean equivalentes en términos de emisiones ponderadas por el GTP producirán una respuesta equivalente en la temperatura media global para un año determinado. En otras palabras, en comparación con el GWP, el GTP ofrece una representación más precisa de los impactos del carbono negro en una escala equivalente a los producidos por el CO_2 . Sin embargo, los tomadores de decisiones

todavía deben elegir el período de tiempo sobre el que se calculará el valor¹¹.

Si bien el IPCC menciona al GTP en su último informe, no publica ningún valor de referencia. Un documento de autoría compartida entre científicos líderes que redactaron fragmentos del informe del IPCC, a punto de ser publicado, ofrece los valores que se incluyen en la Tabla 2.

El GTP utiliza un parámetro de impacto que se concentra más en la cadena causa-efecto y se acerca más a los impactos sobre la sociedad; sin embargo, se introducen mayores incertidumbres: varía según las estimaciones de la sensibilidad climática y el tiempo de respuesta del clima. Cuando se mejoren estas estimaciones se deberá volver a calcular el GTP para emisiones específicas. Al igual que el GWP, variará con las estimaciones de las condiciones de fondo y no cuantifica los impactos sobre las precipitaciones o el derretimiento de nieve que podrían revestir importancia cuando se analicen los aerosoles que emiten carbono negro. Sin embargo, el GTP es una probable alternativa para reemplazar al GWP.

Tabla 2. Potenciales de Cambio de Temperatura Global (Global Temperature Change Potentials, GTP) para el carbono negro y otros contaminantes

	GTP20	GTP100
Carbono negro	470	64
Metano	57	4
Óxido nitroso	303	265
Carbono orgánico	-71	-10
Óxidos de azufre	-41	-5.7
dióxido de carbono	1	1

Fuente: Fuglestvedt, J., K. Shine, T. Berntsen, et al. (2009) Transport impacts on Atmosphere and Climate: Metrics. Atmos Environ (Impactos del Transporte sobre la Atmósfera y el Clima: Métricas. Medio ambiente atmosférico) En impresión.

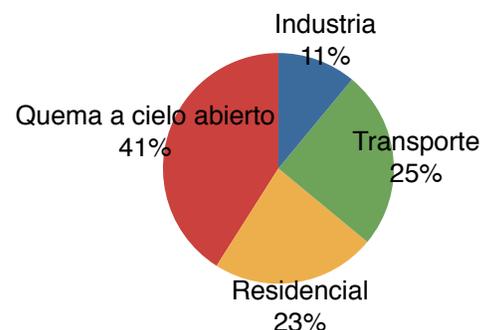
Sin una vara común para comparar forzadores climáticos de vida corta y larga, una opción podría ser excluir al carbono negro de análisis de varios contaminantes y establecer objetivos independientes para su mitigación.

FUENTES Y OBJETIVOS

Los datos de inventario más recientes demuestran que las principales fuentes de carbono negro son la quema de combustibles fósiles en la industria, la generación de energía, el transporte y las actividades residenciales.

También son importantes el uso residencial de biocombustibles, los incendios agrícolas y los incendios forestales.

Figura 1. Proporción de las emisiones globales de carbono negro de todas las fuentes en el año 2000



Fuente: Bond, T. (2009) Black carbon: Emission sources and prioritization (Carbono negro: Fuentes de emisión y priorización). Presentación en el Taller internacional 2009 sobre carbono negro. 5 y 6 de enero de 2009. Londres, Reino Unido.

Como el carbono negro siempre es emitido junto con diversos aerosoles, incluidos algunos con poder de reflexión de la luz, es necesario evaluar no sólo el inventario de emisiones sino, además, la absorción o reflexión neta de dichas emisiones y la magnitud de su efecto cuando se deban identificar los objetivos prioritarios. El carbono orgánico y los sulfatos reflejan la luz, por lo tanto, las emisiones que generen la proporción más baja de estos componentes en relación al carbono negro causarán el mayor grado de forzamiento positivo. Este análisis también debe tener presente las estimaciones del transporte y el depósito de carbono negro sobre hielo y nieve. Las emisiones que depositan gran parte del carbono negro sobre estas superficies producirán el mayor forzamiento negativo en la superficie. El umbral exacto de forzamiento negativo a positivo de las principales fuentes no es objeto de las investigaciones en curso.

Basándonos en nuestros conocimientos acerca de la composición de las emisiones de las principales fuentes de carbono negro, el uso de combustibles fósiles con bajo contenido de azufre genera forzamiento radiativo positivo neto mientras que el uso residencial de biocombustibles, la quema de combustibles fósiles con alto contenido de azufre y la quema a cielo abierto pueden causar forzamiento negativo neto. Sin embargo, cuando estas fuentes se encuentran muy próximas al hielo y la nieve, pueden causar forzamiento positivo local (cuya magnitud se desconoce) que podría compensar en forma parcial o total cualquier forzamiento negativo. En la Tabla 3 se describen los objetivos de fuentes prioritarias para el carbono negro sobre la base de este enfoque y en la Tabla 4 se ofrecen las reducciones factibles máximas por cada categoría de fuente principal.

Tabla 3. Metas “Sin arrepentimiento” para mitigar los impactos climáticos del carbono negro

I. Combustión diesel en ...	
A.	Vehículos pesados en ruta
B.	Vehículos agrícolas, para la construcción y otros, fuera de camino
II. Emisiones cercanas al Ártico de ...	
C.	Combustión de biomasa originada en incendios forestales e incendios agrícolas controlados
D.	Combustión diesel en embarcaciones comerciales
III. Emisiones cercanas a glaciares de ...	
E.	Biocombustible en combustión en equipos residenciales de calefacción y cocina
IV. Combustión de carbono con bajo contenido de sulfuro en ...	
F.	Equipos residenciales de calefacción y cocina
G.	Hornos de ladrillos industriales

Tabla 4: Máximas reducciones factibles con respecto al nivel base de emisiones en 2030 (Gg/año)

	Carbono negro	Carbono orgánico	Óxidos de azufre
Industria	621	502	457
Quema a cielo abierto	373	1.177	166
Transporte	1.032	397	1.950
Residencial	750	2,404	2,043
Total	2.776	4.480	4.616

Fuente: Cifras adaptadas de estimaciones efectuadas por el Instituto Internacional para Análisis de Sistemas Aplicados (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA); Michael Walsh, Asesor internacional y Corbett & Winebrake, Asociados para la Investigación de la Energía y el Medio Ambiente (Energy and Environmental Research Associates, EERA).

Nota: Las estimaciones de emisiones equivalentes en carbono requieren un factor de ponderación como GWP o GTP. Por ejemplo: las emisiones de carbono negro equivalentes a CO₂ para la industria en el año 2030 al emplear el GWP a 20 años son 621*1600=993.600 eq. MMTCO₂ (GWP20).

ESTRATÉGIAS DE MITIGACIÓN

Transporte carretero

La implementación de estrictos controles sobre el nivel de emisiones en países industrializados con elevada motorización como Estados Unidos de América y la Unión Europea están generando una reducción global en

las emisiones de carbono negro relacionadas con el transporte; sin embargo, se prevé que la flota vehicular global se triplicará al llegar el año 2050.¹² De no tomarse ninguna medida, se espera que estas emisiones vuelvan a elevarse y alcancen niveles que, en 2050, superen en un 20 por ciento los del año 2000. Se espera que los vehículos pesados a diesel altamente contaminantes sigan siendo la principal fuente de emisiones de carbono negro relacionada con el transporte durante este período; sin embargo, también se deberá apuntar a las motocicletas, a los vehículos ligeros a gasolina y diesel.

La principal y más efectiva estrategia para lograr una reducción de los niveles de emisión es la instalación de filtros de partículas (también llamados DPFs) en vehículos diesel. De esta manera prácticamente se pueden eliminar las emisiones de carbono negro si se les utiliza con combustible de ultra-bajo contenido de azufre en 15 partes por millón (ppm) o menos; además, estos beneficios pueden materializarse inmediatamente después de instalado el dispositivo.

Estas estrategias se pueden traducir en instrumentos de política como: estándares de emisión para vehículos nuevos que requieran el uso de filtros de partículas en vehículos diesel y combustibles con bajo contenido de azufre, medidas para alentar o exigir el reacondicionamiento de vehículos en uso con filtros de partículas, regímenes efectivos de verificación y cumplimiento y retiro temprano de vehículos antiguos con altas emisiones. Todas estas estrategias han sido implementadas con éxito en varios países y generarán sustanciales beneficios en la calidad del aire y la salud pública locales.

Los enfoques que también merecen ser considerados son aquellos que generan reducciones de carbono negro y de dióxido de carbono en tándem. Podemos mencionar: combustibles con bajo contenido de carbono, motores más eficientes, vehículos más livianos y más aerodinámicos e, incluso, modos que permiten emisiones nulas de carbono. Para poder lograr una acción simultánea y efectiva sobre las emisiones de carbono negro y de CO₂, es importante permitir una transición rápida en dirección de tecnologías avanzadas de control de emisiones y progresar en la búsqueda de fuentes de energía renovables en todos los sectores para minimizar compensaciones entre los efectos de unos y otros y alcanzar las metas climáticas en todas las regiones. También son importantes los cambios en la demanda de transporte y las conductas de viaje para reducir las actividades contaminantes. Para esto se requieren inversiones en infraestructura para respaldar el mayor uso de medios masivos de transporte, las bicicletas, caminar, el trabajo a distancia y otros medios alternativos de movilidad. Asimismo, es necesario incursionar en

cambios en el uso de suelo y en la política económica para alentar y facilitar estas modificaciones sin comprometer las necesidades de movilidad de la población ni debilitar el desarrollo económico. Todos estos enfoques impulsan el avance de los sistemas de transporte hacia mayores niveles de eficiencia, menores costos y menor cantidad de emisiones.

Transporte no carretero

Las embarcaciones marinas, las locomotoras, los vehículos agrícolas, los equipos para construcción y otros vehículos comerciales caen en la categoría de transporte no carretero. Las emisiones de estas fuentes son más inciertas y, probablemente, tiendan a estar reguladas con menos rigurosidad que las provenientes del transporte carretero. La calidad del combustible para otros medios también tiende a ser menor. Las estrategias para controlar las emisiones provenientes del transporte no carretero son similares a las aplicadas al transporte carretero, incluidas las tecnologías de post-tratamiento como los filtros de partículas que se pueden utilizar con combustibles con menor contenido de azufre. Las estrategias para las embarcaciones también pueden incluir medidas operativas como controles de velocidad y electrificación con toma exterior en puerto, entre otras. El combustible de transporte marítimo utilizado en embarcaciones contiene niveles mucho más elevados de azufre que los combustibles para vehículos carreteros; sin embargo, las regulaciones recientemente implementadas en diferentes partes del mundo pretenden reducirlos en más del 80 por ciento antes del año 2020. Como el conjunto actual de políticas para la reducción de azufre mejora la calidad del combustible, es absolutamente necesario lograr reducciones concomitantes en las emisiones de carbono negro para compensar cualquier impacto potencial que pudieran generar estas reducciones.

Carbón y biocombustibles residenciales

En todo el mundo, las cocinas y estufas residenciales que utilizan carbón y biomasa representan un área de oportunidad que brinda beneficios indiscutibles desde una perspectiva de la salud pública y los posibles impactos climáticos de las emisiones refuerzan la necesidad de contar con cocinas de combustión más ecológica. Se están desarrollando cocinas y estufas más eficientes con combustibles más ecológicos. Sin embargo, las estrategias destinadas a esta categoría de fuente enfrentan varios desafíos para poder cumplir con las necesidades locales de calefacción y cocina a partir de las fuentes de combustibles disponibles con tecnologías apropiadas. Las fuentes renovables ecológicas y avanzadas a largo plazo son particularmente importantes en el sector doméstico para evitar la expansión masiva de la red basada en combustibles fósiles.

Fuentes industriales identificadas como objetivo

Desafortunadamente, las emisiones industriales de carbono negro son uno de los aspectos más débiles de los inventarios de emisiones globales dada la ausencia de mediciones de campo consistentes. No obstante, los expertos han sugerido que los hornos de ladrillos son la fuente industrial más importante de carbono negro por su uso predominante de carbón. Las emisiones de carbono negro provenientes de generadores diesel se incluyen en la categoría de otros medios de los inventarios globales pero vale también reconocer su función en actividades industriales. Los controles de los niveles de emisiones se materializarán en gran medida reemplazando hornos de ladrillos con gran poder de emisiones con tecnologías alternativas.

Quema de biomasa a cielo abierto cerca de nieve y hielo

La quema a cielo abierto es una importante fuente de emisiones de carbono orgánico por lo que su efecto directo probablemente sea el enfriamiento; sin embargo, las emisiones de carbono negro que llegan a superficies de nieve y hielo durante períodos propensos al derretimiento pueden producir fuertes efectos de calentamiento y derretimiento a nivel regional. Entre las estrategias para evitarlo se puede incluir la implementación obligatoria de prohibiciones por temporada para la quema agrícola y otras prácticas de control de incendios.

NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Medidas de inventario

Las estimaciones del total de emisiones de carbono negro como las del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC presentan grandes incertidumbres. La calidad de la información referida a emisiones para determinados sub-grupos de fuentes también es deficiente. Las mejoras de inventario en curso incluyen mejoras en los datos de actividad y mediciones específicamente diseñadas para confirmar la composición y las cantidades de los aerosoles. De esta manera se ayudará a lograr una selección y un análisis específicos mejorados.

Potencial de calentamiento global

Es necesario iniciar investigaciones para determinar la dependencia del diseño de métricas respecto de la formulación de una política climática. También se requiere iniciar investigaciones sobre la posibilidad de expandir las políticas referentes a varios gases para incluir sustancias de vida corta, ya sea en el mismo “grupo” que los agentes de forzamiento de vida prolongada o en un grupo aparte.

Impactos climáticos de las estrategias de control

El impacto climático neto de una estrategia de control de emisiones sobre la colección de aerosoles emitidos de una fuente tiene más relevancia para la formulación de políticas que los impactos de contaminantes individuales vistos desde una perspectiva que carezca de este contexto. Se necesitan análisis específicos por fuente y por región geográfica de los impactos netos de las estrategias de control para fortalecer la fundamentación del caso para su implementación.

Incertidumbre del forzamiento radiativo

El cálculo estimativo del forzamiento radiativo desde épocas anteriores a la industrialización otorgado por el IPCC y las estimaciones más recientes del material revisado por colegas exhiben una diferencia de factor tres. Poder explicar esta diferencia y llegar a un consenso sobre el valor correcto mejoraría nuestros conocimientos acerca del aporte relativo del carbono negro al cambio climático global.

Agradecimientos

Este documento comenzó a redactarse en el mes de enero de 2009 con el aporte de diversos oradores del taller de Londres. A partir de ese momento, efectuamos una revisión completa del Cuarto informe de evaluación del IPCC e identificamos cada una de las menciones del carbono negro. Se ha extraído toda la información relevante encontrada y se la ha incorporado en el presente documento. También agradecemos la gran ayuda y orientación de Jan Fuglestvedt y Terje Berntsen en todo lo relacionado con los GWP y la métrica en líneas generales. Tami Bond nos ofreció su paciencia y su generosidad para dedicar su tiempo y proporcionó comentarios muy interesantes en varias versiones preliminares. Tanto la primera versión preliminar como las siguientes han sido sometidas a tres rondas completas de comentarios que suman un total de aproximadamente 18 grupos completos de comentarios independientes con modalidad de control de cambios. Incluyen comentarios de Martin Williams, Alan Lloyd, Michael Walsh, Tami Bond, Catherine Witherspoon, Mark Jacobson, Olivier Boucher, Ellen Baum, John Guy, Jan Fuglestvedt, Drew Shindell, Elisa Dumitrescu, personal del Programa Ambiental de las Naciones Unidas, Anumita Roy Chowdhury, Ben DeAngelo y Kate Blumberg. Muchas gracias a todos ellos. Para esta traducción en español damos gracia a nuestros colegas Leonora Rojas Bracho, Verónica Garibay Bravo y Rodolfo Iniestra Gómez.

Notas

¹ El Taller Internacional 2009 sobre Carbono Negro fue organizado por el Consejo Internacional sobre los Transportes Limpios (International Council on Clean Transportation, ICCT) y tuvo lugar en Londres, Reino Unido, los días 5 y 6 de enero. La agenda, la lista de oradores y las presentaciones se encuentran disponibles en el sitio <http://www.theicct.org>.

² Hace referencia al forzamiento radiativo acumulativo en escala mundial desde épocas anteriores a la industrialización (1750-2005). Los impactos climáticos son consecuencia del forzamiento radiativo.

³ Hace referencia al forzamiento radiativo integrado, también conocido como potencial de calentamiento global (GWP), que se evalúa según diferentes horizontes temporales a futuro. El IPCC no publicó valores de GWP para el carbono negro y solicitó la creación de una métrica alternativa para los agentes de forzamiento de vida prolongada. No obstante, sí publicó los datos necesarios para derivar valores de GWP, valores que se calcularon para redactar este documento. En la sección

sobre potenciales de calentamiento global se ofrece un debate completo.

⁴ La definición de carbono negro del IPCC incluye al hollín, al carbón y a la materia orgánica refractaria; sin embargo, estos dos últimos elementos absorben entre cinco y diez veces menos luz por masa que el hollín y tendrían valores de GWP inferiores.

⁵ Tabla 2.5 de Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, et al. (2007) Changes

in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (Cambios en los Elementos Constitutivos de la Atmósfera y en el Forzamiento Radiativo). En: Climate

Change 2007: The Physical Science Basis (Cambio Climático 2007: La Base de la Ciencia Física). Aporte del Grupo de trabajo I del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU.

⁶ Ibid Tabla 2.13 pág. 207

⁷ Las propiedades radiativas del carbono negro dependen de su estado de mezcla. Esto describe si el carbono negro está incorporado dentro de otras partículas (mezcla interna) o es independiente de ellas (mezcla externa). Las simulaciones con modelos y los estudios de laboratorio demuestran que el carbono negro se manifiesta predominantemente como mezcla interna, que se asocia con un mayor forzamiento radiativo positivo que la mezcla externa.

⁸ Una emisión de un pulso genera un aumento instantáneo en la concentración atmosférica de un gas o aerosol de forzamiento climático.

⁹ Forster et al (2007) pág. 211

¹⁰ Informe resumido de la Reunión de Expertos del IPCC sobre la Ciencia de las Métricas Alternativas, 18 al 20 de marzo de 2009, Oslo, Noruega.

¹¹ El período de tiempo debe orientarse en pos de una meta de políticas, como ser el objetivo de la UE de evitar un calentamiento superior a los 2 grados Celsius o impedir momentos críticos como la pérdida del hielo del Mar Ártico en verano.

¹² Informe 2008 de Perspectivas en Tecnología de Energía de la Agencia internacional de Energía (International Energy Agency Energy Technology Perspectives 2008). Disponible en línea en <http://www.iea.org/Textbase/techno/etp/index.asp>