



Cenizas Volantes de Carbón Aerosolizadas: factor de riesgo de cáncer de pulmón

Mark Whiteside¹ y J. Marvin Herndon^{2*}

¹Florida Department of Health in Monroe County, 1100 Simonton Street, Key West, FL 33040, USA.

²Transdyne Corporation 11044 Red Rock Drive, San Diego, CA 92131, USA.

Contribución de los autores

Este documento se ha elaborado conjuntamente por los autores en el marco de una colaboración continua orientada a poner de relieve las implicaciones científicas, médicas, de salud pública y las evidencias del uso de cenizas volantes de carbón aerosolizadas, en actividades encubiertas de geoingeniería a nivel mundial. El autor MW se encargó de las consideraciones médicas y de salud pública y JMH de las mineralógicas y geofísicas. Ambos autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Información del artículo

DOI: 10.9734/JAMMR/2018/39758

Editor(ess):

(1) Andrea S. Melani, Department of Cardiothoracic Disease, Azienda Ospedaliera Universitaria Senese, Italy.

Revisores:

(1) Ketan Vagholkar, D. Y. Patil University, School of Medicine, India.

(2) Diana C. Tapia-Pancardo, National Autonomous University of México, México.

(3) Giovanni Ghirga, Italy.

Historial de la revisión: <http://www.sciencedomain.org/review-history/23219>

Recibido el 29 de noviembre de 2017

Aceptado del 12 de febrero de 2018

Publicado el 18 de febrero de 2018

Review Article

RESUMEN

Traducción: www.guardacielos.org

Objeto: Las cenizas volantes de carbón (CVC) son un contribuyente importante de la contaminación del aire en China y en India, si bien en las naciones occidentales son capturadas y almacenadas. A este respecto, existe una mayor incidencia de enfermedades respiratorias, incluido el cáncer de pulmón para las personas permanentemente expuestas a estas cenizas. Nuestro objetivo es el de revisar los múltiples compuestos carcinógenos de las cenizas volantes aerosolizadas y la relación con su potencial para causar cáncer de pulmón.

Método: Revisamos publicaciones científicas médicas interdisciplinarias.

Resultados: Las CVC contienen una variedad de elementos potencialmente carcinógenos incluyendo aluminosilicatos, óxido del hierro con fracciones magnéticas, varios elementos tóxicos de traza, nanopartículas y radionucléidos emisores de partículas alfa. También contienen sílice, arsénico, cadmio y cromo hexavalente, todos asociados con el aumento del riesgo de cáncer de pulmón. La generación radical catalizada por metales de transición asociados con partículas presentes en las cenizas volantes de carbón puede resultar en una cascada de señalización celular, la activación del factor de transcripción y la liberación del mediador. El hierro férrico en la fase de cristal de aluminio-silicato de las cenizas volantes de carbón es una fuente de hierro biodisponible.

Existen evidencias emergentes de que el hierro reactivo induce células madre de cáncer y fenotipos agresivos en el cáncer de pulmón. La toxicidad pulmonar potencial y la carcinogenicidad de las cenizas volantes de carbón en aerosol se infiere de los estudios de amianto, un silicato fibroso que también contiene óxido de hierro. Las cenizas volantes de carbón contienen una abundancia de partículas ultrafinas y nanopartículas, incluyendo magnetita (Fe_3O_4). Estas diminutas partículas son tóxicas para las células pulmonares, capaces de producir estrés oxidativo, citotoxicidad y genotoxicidad. En las cenizas volantes de carbón se concentran sustancias radiactivas. Estas cenizas se alojan profundamente en los pulmones donde sus radionucléidos emisores de partículas alfa plantean un riesgo significativo de cáncer de pulmón.

Conclusiones: Considerando las conocidas y múltiples toxicidades de las cenizas volantes de carbón, el público debe ser informado de los riesgos potenciales de cáncer de pulmón y de enfermedades respiratorias graves planteadas por las cenizas volantes de carbón aerosolizadas, incluido su uso en operaciones de manipulación del clima.

Palabras clave

Aerosoles, cenizas volantes de carbón, manipulación del clima, geoingeniería, contaminación del aire, cáncer, nanopartículas, magnetita.

1. INTRODUCCIÓN

La combustión del carbón en las centrales térmicas genera un 10% de cenizas. Las cenizas pesadas caen por su peso mientras que las cenizas ligeras, denominadas cenizas volantes de carbón, se condensan y acumulan en el flujo de gases. En India y China, generalmente no se capturan las cenizas volantes de carbón que salen de las chimeneas pero en las naciones occidentales se capturan y almacenan por razones de salud pública. No obstante, la gente está siendo expuesta a las cenizas volantes de carbón aerosolizadas como consecuencia de mecanismos ineficientes de captación, especialmente en el rango de 0.1-1 μm [1,2], y de la dispersión de las mismas por el viento en los lugares de almacenamiento [3], sin olvidar los trabajadores en la industria de cenizas volantes [4]. Existen evidencias epidemiológicas que indican que las partículas contaminantes aerosolizadas en el rango de $\leq 2.5 \mu\text{m}$ están asociadas con numerosos riesgos para la salud, no sólo de cáncer de pulmón [5]. A pesar de todo ello, existen evidencias forenses consistentes con la amplia dispersión aérea de cenizas volantes de carbón para actividades de manipulación troposférica del clima en Norteamérica y Europa [6,7]. En la literatura científica se encuentra información significativa sobre los riesgos para la salud de las cenizas volantes de carbón aerosolizadas. Las implicaciones correspondientes tienen que ver con la exposición, por ejemplo, de los trabajadores de limpieza de los vertidos de cenizas volantes [8]. Como consecuencia de las actividades encubiertas de manipulación del clima, los pilotos y el personal de vuelo pueden estar sujetos a una exposición más intensa que la población en tierra.

2. MÉTODO

La literatura científica es rica en información en relación con el tema de esta revisión. No obstante, esa información está fragmentada y dispersa entre las distintas fuentes de publicación. Nosotros revisamos las publicaciones científicas médicas para exponer y relacionar de manera lógica la

información disponible sobre el potencial de las cenizas volantes de carbón para generar cáncer.

3. RESULTADOS Y DEBATE

Las cenizas volantes de carbón son un residuo mayor de las centrales térmicas de carbón que se forma por condensación y acumulación en el flujo caliente de los gases, generalmente en forma de esferas, oscilando entre 01 – 50 μm de diámetro. Estas cenizas son consideradas muy tóxicas para permitir que salgan por las chimeneas, razón por la que en las naciones occidentales son recogidas por precipitadores electrostáticos y almacenadas. Las cenizas volantes de carbón, constituyen uno de los mayores residuos industriales en el mundo, tienen la granulometría apropiada para ser dispersadas como aerosoles con un procesamiento mínimo. Los principales elementos en las cenizas volantes de carbón son óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio, con menores cantidades de magnesio, azufre, sodio y potasio [9]. Los componentes primarios de las cenizas volantes de carbón son silicatos de aluminio y fracciones de hierro que incluyen magnetita (Fe_3O_4) [10]. Entre los elementos de traza en las cenizas volantes de carbón encontramos arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, plomo, manganeso, níquel, fósforo, selenio, talio, titanio y zinc [10]. Además, en las cenizas volantes de carbón también hay núclidos radiactivos de uranio ^{235}U , ^{238}U , torio ^{232}Th y potasio ^{40}K , al igual que sus productos derivados que incluyen el plomo radiactivo ^{210}Pb , el radio ^{226}Ra y el radón ^{222}Rn [11-13]. Estas cenizas también contienen partículas de carbón no quemado algunas de las cuales se conocen como hollín [14,15]. Y pequeñas cantidades de moléculas orgánicas como hidrocarburos policíclicos tales como el benzopireno que es considerado carcinógeno [16].

Las cenizas volantes de carbón aerosolizadas utilizadas en la manipulación del clima constituyen una forma de contaminación deliberada del aire; en la actualidad existen evidencias suficientes sobre la contaminación del aire y el creciente aumento de las enfermedades

respiratorias y el cáncer de pulmón [17,18]. En los Estados Unidos la exposición larga acumulativa a las finas partículas contaminantes se asocia con el cáncer de pulmón y la mortandad cardiopulmonar [19]. Estudios recientes documentan que el 31% del aumento del adenocarcinoma de pulmón entre los no fumadores [20] guarda relación con el aumento de la contaminación del aire PM 2.5. Los proyectos de manipulación del clima que utilizan cenizas volantes de carbón, constituyen una forma deliberada de contaminación encubierta del aire casi global de PM 2.5. La exposición crónica, no reconocida, a las cenizas volantes de carbón dispersadas en la atmósfera con fines de manipulación del clima, puede constituir un factor medioambiental de riesgo importante para el desarrollo del cáncer de pulmón.

El cáncer de pulmón lidera la causa de muerte por cáncer en el mundo y constituye la enfermedad profesional más común de todos los tipos de cáncer [21]. El sílice, uno de los principales componentes de las cenizas volantes de carbón [9], es conocido por causar silicosis y puede predisponer al cáncer de pulmón. Estudios recientes han demostrado una alta mortandad en los trabajadores expuestos al sílice que no tienen silicosis y que nunca han fumado [22]. Las cenizas volantes de carbón contienen carcinógenos conocidos como el arsénico, el cadmio y el cromo, el último de los cuales es alrededor de 10% hexavalente [23]. El arsénico inorgánico es único en el sentido que ha sido identificado como causante de cáncer de pulmón por exposición a través de la ingestión e inhalación [24]. Aunque investigaciones precedentes habían relacionado el cadmio con el cáncer de pulmón estaban confundidas por la presencia de arsénico, estudios más recientes señalan un riesgo independiente del cadmio en la mortalidad del cáncer de pulmón [25]. La inhalación del cromo hexavalente se asocia con el aumento del riesgo del cáncer de pulmón en varias industrias, principalmente la producción de cromo [26].

El hierro es un componente omnipresente de las cenizas volantes de carbón; todas las muestras de cenizas volantes de carbón examinadas en un estudio [27] estaban compuestas en su mayor parte por esferas de aluminosilicato amorfo con una menor cantidad de esferas ricas en hierro. La mayoría de las esferas ricas en hierro contenían dos componentes: óxido de hierro y aluminosilicato amorfo. La espectroscopia de Mössbauer indica que el hierro férrico en la fase de vidrio de aluminosilicato en las cenizas volantes de carbón es una fuente de hierro biodisponible [28]. Las diferencias de la movilización de hierro en las partículas de contaminación están correlacionadas con la minerología, especiación química y morfología de las partículas. En el tamaño de las cenizas volantes fraccionadas, las partículas más pequeñas producen mayores cantidades de hierro movilizado a partir de una fuente dada [29].

El hierro elemental es esencial para el crecimiento celular y la homeostasis, pero a través del ciclo redox puede ser tóxico para las células y los tejidos. Este metal de transición es carcinógeno debido a su efecto catalítico en la formación de radicales hidroxilos, la supresión de las células de defensa del huésped y su potenciación de la proliferación de células cancerígenas. El estrés oxidativo catalizado por hierro causa la peroxidación lipídica, la modificación proteica y daño al ADN con la consiguiente potenciación de la mutagénesis [30,31]. El desarrollo de neoplasias primarias en zonas corporales de depósitos excesivos de hierro es evidente tanto en animales como en seres humanos. El huésped invadido intenta retener el hierro de las células cancerosas mediante el secuestro del metal en la ferritina recién formada, la principal forma de almacenamiento de hierro en el cuerpo. La evaluación cuantitativa del hierro corporal y de las proteínas que almacenan hierro como la ferritina tiene un valor de pronóstico en pacientes con cáncer, incluyendo aquellos con cáncer de pulmón [32].

Estudios epidemiológicos y de laboratorio han demostrado que el exceso de hierro, o el desequilibrio, está asociado con la tumorigénesis del cáncer de pulmón y el crecimiento de las células de cáncer de pulmón. Las vías de absorción, almacenamiento, eflujo y regulación del hierro están todas alteradas en el cáncer, lo que sugiere que la reprogramación del metabolismo del hierro es una característica clave de la supervivencia de las células tumorales [33]. El cultivo celular múltiple, los modelos animales y los estudios epidemiológicos relacionan el hierro con el desarrollo de células no pequeñas de cáncer de pulmón [31]. Un estudio reciente proporciona pruebas contundentes de que el hierro induce células madre cancerígenas y fenotipos agresivos en células de cáncer de pulmón en humanos [34]. El hierro es uno de los iones más reactivos en la contaminación atmosférica producida por las cenizas volantes de carbón. El hierro participa en el efecto anti-apoptótico de la materia particulada y dado que la resistencia a la muerte celular es un sello distintivo de las células cancerosas, este hallazgo puede relacionarse con el desarrollo del cáncer de pulmón como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica [35].

Existe una preocupación creciente por los elementos radiactivos de los productos del carbón. Estos agentes se producen naturalmente en el carbón, pero durante la combustión se concentran en los residuos del mismo. Las cenizas volantes y las cenizas pesadas contienen entre 5 y 10 veces más radionucleidos naturales que el carbón vegetal, pero están más concentradas [12]. El uranio, el torio y el potasio están formados, en su totalidad o en parte, por radionucleidos con vidas medias extremadamente largas. Aunque el cuerpo humano contiene mucho potasio, sólo el 0,012% de ese potasio es el radionucleido ^{40}K , que se descompone tanto por captura de electrones como por decaimiento beta. El uranio y el torio, por otra parte, no son naturalmente nativos en el tejido humano, y en el proceso para 3 convertirse en plomo no radiactivo se descomponen

a través de una serie de productos derivados que emiten 6-8 partículas alfa altamente dañinas. En el cuadro 1 se muestran las concentraciones de actividad de algunos núclidos radioactivos en las cenizas volantes de carbón.

Cuadro 1.

Concentraciones de actividad de algunos núclidos radiactivos en cenizas volantes de carbón (CVC) en muestras de Uttar Pradesh, Bengala Occidental (India) y Kentucky (EE.UU.) determinadas por espectrometría de radiación gamma. Las unidades son Becquerelios por kilogramo que es igual a 16,66 veces el número de desintegraciones por minuto por gramo. Después de tres medias vidas de ^{222}Rn (11,4 días) en las que se establece el equilibrio secular, las concentraciones de la actividad de ^{222}Rn y de ^{226}Ra se vuelven casi iguales [36].

CVC	Referencia de concentración de actividad	Núclido	Bq/kg	
		^{226}Ra	118.6 ± 7.4	[37]
		^{222}Rn	118.6 ± 7.4	[38]
		^{210}Pb	241.7 ± 16.3	[38]
		^{232}Th	147.3 ± 3.4	[37]
			112.9 ± 0.3	[11]
		^{238}U	99.3 ± 1.3	[11]
		^{40}K	352.0 ± 4.5	[37]
			308.9 ± 2.5	[11]

El radionúclido más abundante en las cenizas volantes de carbón es el torio, presente exclusivamente como ^{232}Th . El torio produce niveles más altos de radiación que el uranio ^{235}U y el ^{238}U , siendo los principales radionúclidos. La mortandad de cáncer de pulmón es más alta que en los controles tanto para los mineros de torio [39] como para los mineros de uranio [40],

y se supone que es consecuencia de la exposición al radón: ^{222}Rn de la serie de decaimiento ^{238}U . La exposición al radón (^{222}Rn) a partir de ^{238}U en las rocas puede ser la segunda causa más común de cáncer de pulmón y el primer factor de riesgo en los no fumadores [41].

El tamaño de grano pequeño de las cenizas volantes de carbón se extiende hasta el rango nanoparticulado, lo cual significa que cuando se inhalan estas partículas quedan atrapadas en las vías aéreas terminales y en los alvéolos, donde permanecen durante largos períodos de tiempo. Los estudios de seguimiento de fisión de las partículas vítreas en las cenizas volantes de carbón, demuestran que el uranio se distribuye más o menos uniformemente en sus superficies [38]. Las partículas alfa emitidas desde esas superficies pueden dañar el tejido pulmonar y como se evidencia [42], causar cáncer de pulmón. Por lo general, el radón, emisor de radionúclidos alfa y los radionúclidos de plomo con vidas medias comparativamente largas, se consideran un factor de riesgo, léase ^{222}Rn y ^{210}Pb [43]. Pero las pequeñas partículas aerosolizadas que se inhalan y se fijan profundamente en los pulmones, pueden causar cáncer por parte de los emisores de partículas alfa de vida corta y larga (Cuadro 2).

Estudios toxicológicos tradicionales sobre las cenizas volantes de carbón no fraccionadas señalaron que las partículas más gruesas eran relativamente inertes con efectos respiratorios mínimos en estudios con animales [45]. No obstante, estudios más recientes sobre los efectos de las partículas de cenizas volantes de carbón, fraccionadas por tamaño, muestran una toxicidad pulmonar significativa de partículas ultrafinas y nanopartículas de estas cenizas [46]. Cuanto menor sea el tamaño de la partícula, mayor será su área de superficie y su ratio de volumen, y mayor será su reactividad química y biológica [47]. Las partículas ultrafinas y nanopartículas son lo suficientemente pequeñas como para entrar en el cuerpo de forma transdérmica [48,49]. Al margen de la forma y el tamaño, se presta cada vez más atención a la química de las partículas y de las fibras en tanto que determinante de variables como el comportamiento de disolución, el intercambio iónico, las propiedades de sorción y la reactividad superficial [50,51].

Cuadro 2. Núclidos emisores de partículas alfa en las cenizas volantes de carbón. Se indica el porcentaje de abundancia isotópica de los núclidos progenitores. Datos de [44]

Núclidos emisores de partículas alfa en CVC	Uranio		Torio
	^{238}U (99.2746%)	^{235}U (0.720%)	^{232}Th (100%)
Uranio	^{238}U ^{234}U	^{235}U	
Protactinio		^{231}Pa	
Torio	^{230}Th	^{227}Th	^{232}Th ^{228}Th
Actinio)		^{227}Ac	
Radio	^{226}Ra	^{223}Ra	^{224}Ra
Francio		^{223}Fr	
Radon	^{222}Rn	^{223}Rn	^{220}Rn
Astatina	^{218}At	^{219}At ^{215}At	
Polonio	^{218}Po ^{214}Po ^{210}Po	^{215}Po ^{211}Po	^{216}Po ^{212}Po
Bismuto	^{214}Bi ^{210}Bi	^{211}Bi	^{212}Bi
Plomo	^{210}Pb		

El uso de gránulos ultrafinos de partículas de cenizas volantes de carbón en aerosol para la manipulación del clima presenta ventajas a la hora de aumentar el tiempo de residencia en la troposfera convectiva, pero esta actividad aumenta los riesgos respiratorios. En las cenizas volantes de carbón se encuentran partículas ultrafinas (0,1-1 μm) y partículas de tamaño nanométrico (<100 nm). La clave para entender la toxicidad de las nanopartículas es que su tamaño diminuto, más pequeño que las células y organelos celulares, les permite penetrar en estas estructuras biológicas, alterando su normal funcionamiento [52]. Las nanopartículas de cenizas volantes de carbón con con metales pesados tóxicos superficiales pueden actuar como sustancias tóxicas celulares y de ADN, capaces de inducir inflamación, estrés oxidativo, daño al ADN y muerte celular [47].

La exposición a partículas y fibras está asociada con muchas enfermedades pulmonares, incluyendo cáncer de pulmón, mesotelioma, bronquitis crónica, enfisema, neumonitis y neumoconiosis. Todas las partículas y fibras tienen la capacidad de presentar un estrés oxidativo al pulmón [53], y entre las características compartidas por todas estas partículas introducidas en el pulmón está la creación de una interfaz sólido-líquido en el tracto respiratorio inferior. En esta interfaz sólido-líquida se puede observar la producción de radicales libres por fibras y partículas en coordinación con metales de transición con dos estados de valencia estables [53-55]. Por ejemplo, el mismo carácter divalente del hierro que desempeña un papel biológico importante también puede causar toxicidad al mantener condiciones oxidativas [56]. La generación radical catalizada por metales asociados con fibras y partículas puede resultar en una cascada de señalización celular, activación del factor de transcripción y mediador de liberación [57-59]. Las manifestaciones clínicas de este proceso pueden presentarse como enfermedad inflamatoria, fibrótica y neoplásica.

Investigaciones de microscopía electrónica de transmisión revelan una abundancia de nanopartículas de magnetita entre las partículas de cenizas volantes de carbón ultrafinas [60]. Hay un número creciente de informes de toxicidad pulmonar por inhalación de magnetita, incluyendo magnetita nanoparticulada. Cuatro tallas de fracciones diferentes de magnetita en las células de los alvéolos pulmonares humanos mostraron efectos adversos incluyendo citotoxicidad, genotoxicidad y aumento de la producción de especies de oxígeno reactivo [61]. Las células epiteliales pulmonares, tratadas con diversas concentraciones de nanopartículas magnéticas, mostraron que las células tratadas con magnetita inducen el estrés oxidativo, agotan los niveles de antioxidantes y afectan la vía apoptótica [62].

Obsérvese la similitud: el óxido de hierro es un componente de la contaminación del aire, de las cenizas volantes de carbón, y del asbestos [56,63,64]; la magnetita (Fe_3O_4) se encuentra incluso en el humo y en la ceniza de los cigarrillos [65].

En las cenizas volantes de carbón también se encuentran nanopartículas ricas en titanio (TiO_2 NP). Mientras que los aluminosilicatos son dominantes en el rango de tamaño micrométrico en las cenizas volantes de carbón, hay un gran número de partículas de hierro y titanio en el rango de tamaños ultrafinos. El análisis MET (Microscopía Electrónica de Transmisión) de las cenizas volantes de carbón, revela nanopartículas tanto de óxido de hierro como de titanio que muestran altas características cristalinas [66]. Los análisis de largo plazo por método de instilación intratraqueal confirman la carcinogenicidad de las nanopartículas de óxido de titanio submicrónicas en ratas [67]. Existe evidencia de que las nanopartículas de titanio pueden inducir citotoxicidad, daño significativo al ADN y apoptosis en células humanas de cáncer de pulmón de células no pequeñas, células A549 [68]. En las cenizas volantes de carbón se encuentran igualmente nanopartículas de níquel biodisponible FA [69]. El nanoparticulado metálico de níquel y de óxido de níquel es tóxico para las células epiteliales pulmonares humanas [70].

Del estudio del asbesto, un silicato fibroso, surgen otras implicaciones de toxicidad pulmonar y de potencial carcinogenicidad de las cenizas volantes de carbón aerosolizadas [71]. La presencia de metales de transición como el hierro en las fibras de asbesto y la capacidad de estas fibras para atraer el hierro del entorno pueden ser factores clave de la toxicidad del asbesto y de la formación en el pulmón de los cuerpos de asbestos (ferruginosos) que caracterizan la enfermedad pulmonar causada por la asbestosis. La microscopía de rayos X basada en el sincrotrón ha demostrado que las fibras de amianto y las partículas de larga duración causan una gran movilización del hierro en las células circundantes (principalmente los macrófagos alveolares) y en los tejidos, lo que es parcialmente consecuencia de la adsorción continua de hierro sobre las fibras y / o la degradación del asbesto y la liberación de metales [56]. El hierro (incluida la magnetita) es un componente integral de las fibras de asbestos patógenas de amfiboles (crocidolita, amosita) y se presenta como contaminante mineral del asbesto crisotilo (serpentina) [48, 72]. Varios estudios sugieren que el crisotilo no es tóxico y que simplemente actúa como portador de hierro dentro de la célula, pero en realidad, la actividad redox del hierro se potencia cuando está organizada en la superficie de la fibra en sitios cristalográficos específicos con estados de coordinación capaces de generar radicales libres [73].

Los datos científicos publicados demuestran que las cenizas volantes de carbón, un peligro ambiental conocido [74], son consistentes con el material, no divulgado, utilizado en la manipulación generalizada y persistente del clima como aerosoles atmosféricos [6,7,75-79].

Cuadro 3. Nucléidos emisores de partículas alfa en las cenizas volantes de carbón. Se indica el porcentaje de abundancia isotópica de los núclidos progenitores. Datos de [44]

Agentes carcinógenos con suficiente evidencia en humanos comunes a, o contenidos en las CVC
Arsénico y compuestos arsénicos inorgánicos
Berilio y compuestos del berilio
Cadmio y compuestos del cadmio
Cromo(VI) compuestos
Carbón, emisiones de combustion doméstica
Radiación gamma
Fundición de hierro y acero
Compuestos de níquel
Partículas contaminantes del aire exterior
Radon- ²²² y sus productos de descomposición
Polvo de sílice, cristalino
Hollín

El carácter encubierto de estas operaciones limita actualmente la posibilidad de cuantificar la exposición humana a esta forma deliberada de contaminación del aire o separarla de otras formas de contaminación atmosférica causadas por la actividad humana. El nivel de exposición de una persona a la contaminación atmosférica depende de una variedad de factores relacionados con el huésped, el ambiente y su interacción. Las nuevas técnicas de biomonitorización deberían permitir mediciones más precisas de la exposición a determinados contaminantes atmosféricos [80], que pueden ser útiles para estimar la respuesta a la dosis, la evaluación de la exposición y la caracterización del riesgo a partir de los datos publicados sobre los componentes tóxicos conocidos de las cenizas volantes de carbón [74].

En esta revisión hemos revelado algunos de los riesgos potenciales para la salud pública de las cenizas volantes de carbón aerosolizadas, centrándonos en los riesgos especiales para el cáncer de pulmón. En las naciones occidentales, donde se practica su captura y almacenamiento, puede haber una falsa suposición de que sólo aquellos que viven o trabajan cerca de vertederos de cenizas volantes de carbón se arriesgan a un potencial riesgo de exposición. Considerando que las principales partículas no reveladas utilizadas en las operaciones de manipulación del clima son consistentes con las cenizas volantes de carbón [6,7], un producto de desecho ampliamente disponible, que requiere poco procesamiento, el riesgo de exposición no es ni localizado ni limitado en escala. Potencialmente cientos de millones de personas podrían estar en riesgo incluso a niveles bajos de exposición; las tripulaciones de vuelo de las líneas aéreas y los aviadores habituales pueden estar más en peligro. Al igual que el riesgo de cáncer de pulmón por fumar cigarrillos, las consecuencias de este tipo de contaminación del aire podrían aparecer en décadas.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha elaborado una serie de monografías de clasificación de carcinógenos humanos durante más de 40 años. Los investigadores reorganizaron esos datos de

acuerdo con zonas específicas de cáncer para cada carcinógeno pertinente y subdividieron las mismas en causas conocidas y sospechadas de cáncer [81]. En el Cuadro 3 se extraen de esa tabulación los carcinógenos conocidos relevantes para el cáncer de pulmón que son componentes de, o, comunes a las cenizas volantes de carbón.

4. CONCLUSIÓN

Claramente, las cenizas volantes de carbón aerosolizadas contienen una plétora de agentes potencialmente carcinógenos que pueden tener interacciones acumulativas aditivas y / o sinérgicas con la exposición a largo plazo. La industria de las cenizas volantes de carbón puede ser diligente en minimizar la posibilidad de aerosolización de estas cenizas por el bien de los trabajadores y de aquellos que viven cerca de los vertederos. No obstante, la fumigación aérea con cenizas volantes de carbón en la región atmosférica donde se forman las nubes, representa un potencial factor, no reconocido, de riesgo global a largo plazo para enfermedades respiratorias y cáncer de pulmón, especialmente para las poblaciones más vulnerables.

AUTORIZACIÓN

No aplicable

DECLARACIÓN ÉTICA

No aplicable

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la asociación *Environmental Voices* y a sus donantes, la cobertura de los gastos de publicación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS

1. Mohr M, Ylätaalo S, Klippel N, Kauppinen E, Riccius O, Burtscher H. Submicron fly ash penetration through electrostatic precipitators at two coal power plants. *Aerosol Science and Technology*. 1996;24: 191-204.
2. Zhuang Y, Kim YJ, Lee TG, Biswas P. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*. 2000;48:245-260.
3. Baxter M. Environmental radioactivity: A perspective on industrial contributions. *IAEA Bulletin*. 1993;35:33-38.
4. Stierum R, Hageman G, Welle I, Albering H, Schreurs J, Kleinjans J. Evaluation of exposure reducing measures on parameters of genetic risk in a population occupationally exposed to coal fly ash. *Mutation Research/Genetic Toxicology* 1993;319:245-255.
5. Beeson WL, Abbey DE, Knutsen SF. Long-term concentrations of ambient air pollutants and incident lung cancer in California adults: Results from the AHSMOG Study. *Environ Health Perspect*. 1998;106(12):813-22.
6. Herndon JM, Whiteside M. Further evidence of coal fly ash utilization in tropospheric geoengineering: Implications on human and environmental health. *J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn*. 2017;9:1-8.
7. Herndon JM, Whiteside M. Contamination of the biosphere with mercury: Another potential consequence of on-going climate manipulation using aerosolized coal fly ash. *J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn*. 2017;13:1-11.
8. Liberda EN, Chen LC. An evaluation of the toxicological aspects and potential doses from the inhalation of coal combustion products. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2013;63:671-680.
9. Moreno N, Querol X, Andrés JM, Stanton K, Towler M, Nugteren H, Janssen-Jurkovicová M, Jones R. Physico-chemical characteristics of european pulverized coal combustion fly ashes. *Fuel*. 2005;84:1351-1363.
10. Fisher GL. Biomedically relevant chemical and physical properties of coal combustion products. *Environ. Health Persp*. 1983;47: 189-199.
11. Mahur A, Kumar R, Sengupta D, Prasad R. Estimation of radon exhalation rate, natural radioactivity and radiation doses in fly ash samples from durgapur thermal power plant, west bengal, india. *Journal of environmental radioactivity*. 2008;99:1289-1293.
12. Pandit GG, Sahu SK, Puranik VD. Natural radionuclides from coal fired thermal power plants – estimation of atmospheric release and inhalation risk. *Radioprotection*. 2011; 46:S173–S179.
13. Suloway JJ, Roy WR, Skelly TR, Dickerson DR, Schuller RM, Griffin RA. *Chemical and Toxicological Properties of Coal Fly Ash*; Illinois Department of Energy and Natural Resources; Illinois; 1983.
14. Külaots I, Hurt RH, Suuberg EM. Size distribution of unburned carbon in coal fly ash and its implications. *Fuel*. 2004;83: 223-230.
15. Veranth JM, Fletcher TH, Pershing D, Sarofim A. Measurement of soot and char in pulverized coal fly ash. *Fuel* 2000;79: 1067-1075.
16. Roy WR, Thiery R, Suloway JJ. Coal fly ash: A review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts. *Environ. Geology Notes #96*; 1981.
17. World Health Organization. *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. In *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*; 2016.
18. Ma J, Ward E, Siegel R, Jamal A. Temporal trends in mortality in the United States, 1969-2013. *JAMA*. 2015;314(16): 1731-9.
19. Pope A, Burnett R, Thun M, Thurston G. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 2002;287:1132-1141.
20. Gharibvand L, Beeson WL, Shavlik D, Knutsen R, Ghamsary M, Soret S, Knutsen SF. The association between ambient fine particulate matter and incident adenocarcinoma subtype of lung cancer. *Environmental Health*. 2017;16:71.
21. Spyrtos D, Zarogoulidis P, Porpodis K, Tsakiridis K, Machairiotis N, Katsikogiannis N, Kougioumtzi I, Dryllis G, Kallianos A, Rapti A. Occupational exposure and lung cancer. *Journal of thoracic disease*. 2013;5:S440.

22. Steenland K, Ward E. Silica: A lung carcinogen. *CA Cancer J. Clin.* 2014; 64:63-69.
23. Meij R. Health aspects of coal fly ash. In *International Ash Utilization Symposium*, University of Kentucky: Center for Applied Energy Research; 2001.
24. Bergdahl IA, Toren K, Eriksson K, Hedlund U, Nilsson T, Flodin R, Järholm B. Increased mortality in COPD among construction workers exposed to inorganic dust. *European Resp. J.* 2004;23:402-406.
25. Park RM, Stayner CT, Peterson MR, Finley-Couch M, Hornung R, Rice C. Cadmium and lung cancer mortality accounting for simultaneous arsenic exposure. *Occup. Environ. Med.* 2012;69: 303-309.
26. Proctor DM, Suh M, Camplemen SL. Assessment of the mode of action for chromium-induced lung cancer following inhalation exposures. *Toxicology.* 2014; 325:169-179.
27. Kutchko BG, Kim AG. Fly ash characterization by sem-eds. *Fuel.* 2006; 85:2537-2544.
28. Veranth JM, Smith KR, Huggins F, Hu AA, Lighty JS, Aust AE. Mössbauer spectroscopy indicates that iron in an aluminosilicate glass phase is the source of the bioavailable iron from coal fly ash. *Chemical Research in Toxicology.* 2000; 13:161-164.
29. Veranth JM, Smith KR, Aust AE, Dansie SL, Griffin JB, Hu AA, Huggins ML, Lighty JAS. Coal fly ash and mineral dust for toxicology and particle characterization studies: Equipment and methods for pm2.5-and pm1-enriched samples. *Aerosol Science & Technology.* 2000;32:127-141.
30. Steegmann-Olmedillas JL. The role of iron in tumour cell proliferation. *Clinical and Translational Oncology.* 2011;13:71-76.
31. Torti SV, Torti FM. Iron and cancer: More ore to be mined. *Nature reviews. Cancer.* 2013;13:342.
32. Weinberg E. The role of iron in cancer. *Eur J Cancer Prev.* 1996;5:19-36.
33. Xiong W, Wang L, Yu F. Regulation of cellular iron metabolism and its implications in lung cancer progression. *Medical Oncology.* 2014;31:28.
34. Chanvorachote P, Luanpitpong S. Iron induces cancer stem cells and aggressive phenotypes in human lung cancer cells. *American Journal of Physiology-Cell Physiology.* 2016;310:C728-C739.
35. Lovera-Leroux M, Crobeddu B, Kassis N, Petit PX, Janel N, Baeza-Squiban A, Andreau K. The iron component of particulate matter is antiapoptotic: A clue to the development of lung cancer after exposure to atmospheric pollutants? *Biochimie.* 2015;118:195-206.
36. Kovler K, Perevalov A, Steiner V, Metzger L. Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1—scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2005;82:321-334.
37. Gupta M, Mahur AK, Varshney R, Sonkawade R, Verma K, Prasad R. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in fly ash samples from a thermal power plant and estimation of radiation doses. *Radiation Measurements.* 2013;50:160-165.
38. Zielinski RA, Budahn JR. Radionuclides in fly ash and bottom ash: Improved characterization based on radiography and low energy gamma-ray spectrometry. *Fuel* 1998;77:259-267.
39. Chen X-A, Cheng Y-E, Rong Z. Recent results from a study of thorium lung burdens and health effects among miners in china. *Journal of Radiological Protection.* 2005;25:451.
40. Sevc J, Kunz E, Placek V. Lung cancer in uranium miners and long-term exposure to radon daughter products. *Health Physics.* 1976;30:433-437.
41. Sheen S, Lee KS, Chung WY, Nam S, Kang DR. An updated review of case-control studies of lung cancer and indoor radon-is indoor radon the risk factor for lung cancer? *Annals of Occupational and Environmental Medicine.* 2016;28:9.
42. Samet, J.M. Radon and lung cancer. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute.* 1989;81:745-758.
43. Lauer N, Hower JC, Hsu-Kim H, Taggart RK, Vengosh A. Naturally occurring radioactive materials in coals and coal combustion residuals in the united states. *Environ. Sci. & Tech.* 2015;49:11227-11233.
44. Walker FW, Kirouac GJ, Rourke FM. Chart of the nuclides. General Electric Company, Educational Relations; 1977.
45. Borm PJA. Toxicity and occupational health hazards of coal fly ash (cfa). A review of data and comparison to coal

- mine dust. *Ann. occup. Hyg.* 1997;41:659-676.
46. Gilmour MI, O'Connor S, Dick CAJ, Miller CA, Linak WP. Differential pulmonary inflammation and in vitro cytotoxicity of size-fractionated fly ash particles from pulverized coal combustion. *Air & Water Manage. Assoc.* 2004;54:286-295.
 47. Sambandam B, Devasena T, Islan VIH, Prakhya BM. Characterization of coal fly ash nanoparticles and their induced in vitro cellular toxicity and oxidative DNA damage in different cell lines. *Indian J. Experiment. Biol.* 2015;53:585-593.
 48. Mossman BT, Borm PJ, Castranova V, Costa DL, Donaldson K, Kleeberger SR. Mechanisms of action of inhaled fibers, particles and nanoparticles in lung and cardiovascular diseases. *Particle and Fiber Toxicology.* 2007;4:4.
 49. Integrated Science Assessment for Particulate Matter (final report) U.S. Environmental Protection Agency; Washington, DC; 2009.
 50. Osinubi O, Gochfeld M, Kipen H. Health effects of asbestos and nonasbestos fibers. *Envir. Health Persp.* 2000;108:665-674.
 51. Guthrie GD. Mineral properties and their contribution to particle toxicity. *Environ. Health Perspect.* 1997;105:1003-1011.
 52. Buzea C, Pacheco I, Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases 2 MR* 2007, 17.
 53. Ghio AJ, Churg A, Roggli V. Ferruginous bodies: Implications in the mechanism of fiber and particle toxicity. *Toxicologic Pathology.* 2004;32:643-649.
 54. Lund LG, Aust AE. Iron-catalyzed reactions may be responsible for the biochemical and biological effects of asbestos. *Biofactors.* 1991;3:83-89.
 55. Dai J, Churg A. Iron loading makes a nonfibrogenic model air pollutant particle fibrogenic in rat tracheal explants. *Am. J. Respir. Cell. Mol. Biol.* 2002;26:685-693.
 56. Pascolo L, Gianoncelli A, Schneider G, Salomé M, Schneider M, Calligaro C, Kiskinova M, Melato M, Rizzardi C. The interaction of asbestos and iron in lung tissue revealed by synchrotron-based scanning x-ray microscopy. *Sci. Rep.* 2013;3:1123.
 57. Brown DM, Donaldson K, Borm PJ, Schins RP, Dehnhardt M, Gilmour P, Jimenez LA, Stone V. Calcium and ros-mediated activation of transcription factors and tnfr- α cytokine gene expression in macrophages exposed to ultrafine particles. *Am. J. Physiol.* 2004;286:L344-L353.
 58. Cummins AB, Palmer C, Mossman BT, Taatjes DJ. Persistent localization of activated extracellular signal-regulated kinases is epithelial cell-specific in an inhalation model of asbestosis. *Am. J. Pathol.* 2003;162:713-720.
 59. Ramos-Nino ME, Haegens A, Shukla A, Mossman B. Role of mitogen-activated protein kinases in cell injury and proliferation by environmental particulates. *Mol. Cell. Biochem.* 2002;234-235:111-118.
 60. Chen Y, Shah N, Huggins FE, Huffman GP. Transmission electron microscopy investigation of ultrafine coal fly ash particles. *Environ. Science and Technol.* 2005;39:1144-1151.
 61. Könczöl M, Ebeling S, Goldenberg E, Treude F, Gminski R, Gieré R, Grobety B, Rothen-Rutishauser B, Merfort I, Mersch-Sundermann V. Cytotoxicity and genotoxicity of size-fractionated iron oxide (magnetite) in A549 human lung epithelial cells: Role of ROS, JNK, and NF- κ B. *Chem. Res. Toxicol.* 2011;24:1460-1475.
 62. Ramesh V, Ravichandran P, Copeland CL, Gopikrishnan, R, Biradar S, Goornavar V, Ramesh GT, Hall JC. Magnetite induces oxidative stress and apoptosis in lung epithelial cells. *Mol. Cell. Biochem.* 2012; 363:225-234.
 63. Cathcart JD, Reynolds RL, Brownfield ME, Hower JC. Chemical, mineralogical, and magnetic characterization of sized fly ash from a coal-fired plant in Kentucky. 1997 *Int. Ash Util. Symp. Proc.* 1997;785-792.
 64. Magiera T, Strayszcz Z, Jabłońska M, Bzowska G. Characterization of magnetic particulates in urban and industrial dusts. *WIT Transaction on Ecology and the Environment.* 2010; 136:171-184.
 65. Jordanova N, Jordanova D, Henry B, Le Goff M, Dimov D, Tsacheva T. Magnetism of cigarette ashes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2006;301:50-66.
 66. Chen Y, Shah N, Huggins F, Huffman G, Dozier A. Characterization of ultrafine coal fly ash particles by energy filtered TEM. *Journal of Microscopy.* 2005;217:225-234.
 67. Roller M. Carcinogenicity of inhaled nanoparticles. *Inhalation Toxicology.* 2009; 21:144-157.

68. Wang Y, Cui H, Zhou J, Li F, Wang J, Chen M, Liu Q. Cytotoxicity, DNA damage, and apoptosis induced by titanium dioxide nanoparticles in human non-small cell lung cancer A549 cells. *Environ Sci Pollut Res.* 2015;22:5519-5530.
69. Dwivedi S, Saquib Q, Al-Khedhairy AA, Ali A-YS, Musarrat J. Characterization of coal fly ash nanoparticles and induced oxidative DNA damage in human peripheral blood mononuclear cells. *Science of the Total Environment.* 2012; 437, 331-338.
70. Pietruska JR, Liu X, Smith A, McNeil K, Weston P, Zhitkovich A, Hurt R, Kane AB. Bioavailability, intracellular mobilization of nickel, and hif-1 α activation in human lung epithelial cells exposed to metallic nickel and nickel oxide nanoparticles. *Toxicological Sciences.* 2011;124:138-148.
71. Brims FJ. Asbestos – A legacy and persistent problem. *J. R. Nav. Serv.* 2009; 95:4-11.
72. Virta R. Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses. U.S. Department of the interior – U.S. Geological Survey open-file report 02-149.
73. Gazzano E, Turci F, Fioretti E, Putzu MG, Aldieri E, Silvagno F, Lesci IG, Tomatis M, Riganti C, Romano C, et al. Iron-loaded synthetic chrysotile: A new model solid for studying the role of iron in asbestos toxicity. *Chem. Res. Toxicol.* 2007;20:380-387.
74. Izquierdo M, Querol X. Leaching behavior of elements from coal combustion fly ash: An overview. *Int. J. Coal Geol.* 2012;94:54-66.
75. Herndon JM. Aluminum poisoning of humanity and earth's biota by clandestine geoengineering activity: Implications for India. *Curr. Sci.* 2015;108:2173-2177.
76. Herndon JM. Obtaining evidence of coal fly ash content in weather modification (geoengineering) through analyses of post-aerosol spraying rainwater and solid substances. *Ind. J. Sci. Res. and Tech.* 2016;4:30-36.
77. Herndon JM. Adverse agricultural consequences of weather modification. *AGRIVITA Journal of agricultural science.* 2016;38:213-221.
78. Herndon JM. An indication of intentional efforts to cause global warming and glacier melting. *J. Geography Environ. Earth Sci. Int.* 2017;9:1-11.
79. Herndon JM. Evidence of variable earth-heat production, global non-anthropogenic climate change, and geoengineered global warming and polar melting. *J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn.* 2017; 10:16.
80. Steinle S, Reis S, Sabel CE. Quantifying human exposure to air pollution – moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment. *Sci. Total Environ.* 2013;443:184-193.
81. Coglianò VJ, Baan R, Straif K, Grosse Y, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, Freeman C. Preventable exposures associated with human cancers. *Journal of the National Cancer Institute.* 2011;103: 1827-1839.

© 2018 Whiteside and Herndon; © 2018 Whiteside and Herndon; Este es un artículo de Acceso Abierto distribuido bajo los términos de la Licencia de Atribución de Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que el trabajo original sea debidamente citado.

Historial de revision :

<http://www.sciencedomain.org/review-history/23219>