

MINERÍA Y SALUD AMBIENTAL

Un análisis desde la
producción de carbón,
ferróniquel y oro en
Colombia





Presidente del Consejo de Fundadores

P. Diego Jaramillo Cuartas, cjm

**Rector General Corporación Universitaria
Minuto de Dios – UNIMINUTO**

P. Harold Castilla Devoz, cjm

Vicerrectora General Académica

Marelen Castillo Torres

Rector Cundinamarca

Jairo Enrique Cortes Barrera

Vicerrectora Académica Cundinamarca

Carolina Tovar Torres

Directora General de Publicaciones

Rocío del Pilar Montoya Chacón

Director de Investigación Cundinamarca

Juan Gabriel Castañeda Polanco

Coordinadora de publicaciones Cundinamarca

Diana Carolina Díaz Barbosa

Minería y salud ambiental : un análisis desde la producción de carbón, ferróníquel y oro en Colombia / Karina Susana Pastor Sierra, Adriana Acevedo Supelano, Daniel Augusto Acosta Leal...[y otros 10.]; Compilador Camilo José González Martínez. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios. UNIMINUTO, 2020.

ISBN: 978-958-763-392-4
238 p.

1.Salud Ambiental -- Colombia 2 Industria del Carbón -- Aspectos Ambientales -- Colombia 3.Industria del Oro -- Aspectos Ambientales -- Colombia 4.Salud Pública -- Estudios de casos – Colombia 5.Residuos de la Minería -- Aspectos Ambientales -- Colombia i.Acevedo Supelano, Adriana ii.Acosta Leal, Daniel Augusto iii.Espitia Pérez, Lyda iv.Gómez Rendón, Claudia Patricia v.Gómez Barrera, Luis Alejandro vi.Gutiérrez Fernández, Fernando vii.Porras Ramírez, Alexandra viii.Rico Mendoza, Alejandro ix.Salcedo Arteaga, Shirley x.Espitia Pérez, Pedro Juan xi.Galeano Páez, Claudia Milena xii.Jiménez Vidal, Luisa Fernanda xiii.González Martínez, Camilo José (compilador)

CDD: 363.709861 M45m BRGH Registro Catálogo UNIMINUTO No. 99551

Archivo descargable en MARC a través del link: <https://tinyurl.com/bib99551>

Autores

Camilo José González-Martínez; Karina Susana Pastor-Sierra; Adriana Acevedo-Supelano; Daniel Augusto Acosta-Leal; Lyda Espitia-Pérez; Claudia Patricia Gómez-Rendón; Luis Alejandro Gómez-Barrera; Fernando Gutiérrez-Fernández; Alexandra Porras-Ramírez; Alejandro Rico-Mendoza; Shirley Salcedo-Arteaga; Pedro Juan Espitia-Pérez; Claudia Milena Galeano-Páez; Luisa Fernanda Jiménez-Vidal.

Compilador

Camilo José González - Martínez

Coordinador editorial

Diana Carolina Díaz Barbosa

Corrector de estilo

Karen Grisales Velosa

Diseño y diagramación

Sandra Milena Rodríguez Ríos

ISBN Impreso: 978-958-763-392-4

ISBN Digital: 978-958-763-393-1

Primera edición: 2020

©Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO

Calle 81B No. 72B-70 Piso 8

Teléfono +57(1) 2916520 Ext. 6012

Impreso en Colombia – Printed in Colombia

Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Todos los capítulos publicados en el libro Minería y salud ambiental: Un análisis desde la producción de carbón, ferróníquel y oro en Colombia son seleccionados por el Comité Editorial de acuerdo a los criterios establecidos. Está protegido por el Registro de Propiedad Intelectual. Los conceptos expresados en los capítulos competen a sus autores, son su responsabilidad y no comprometen la opinión de UNIMINUTO. Se autoriza su reproducción parcial en cualquier medio, incluido electrónico, con la condición de ser citada clara y completamente la fuente, siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales.

Contenido

Prólogo		9
Presentación		11
Introducción		17
01	Capítulo Minería: análisis desde la salud de los ecosistemas para la promoción y prevención de la salud humana	27
02	Capítulo Minería de carbón: impactos en el medio ambiente y la salud	49
03	Capítulo Minería de níquel: producción de ferroníquel, salud ambiental y salud pública	95
04	Capítulo Minería de oro en Colombia y el mercurio como residuo	121
05	Capítulo Legislación minera y políticas públicas en Colombia	159
06	Capítulo Estudios ecológicos: una herramienta epidemiológica	191

Lista de Figuras

Figura 1.	Índice de contribución minera ICB y participación en el PIB por continente	37
Figura 2.	Identificación geográfica de los principales productores de carbón del mundo	55
Figura 3.	Distribución geográfica de las reservas de carbón en Colombia	56
Figura 4.	Deposición del material particulado en las vías respiratorias	64
Figura 5.	Efectos en la salud causados por la exposición de corto y largo plazo a metales	67
Figura 6.	Principales mecanismos de inducción de carcinogénesis por HAPs	67
Figura 7.	Principales impactos sobre el medio ambiente originados por sistemas de minería a cielo abierto y subterránea	69
Figura 8.	Movimiento de los principales residuos de la explotación de carbón en el medio en sistemas de minería a cielo abierto y subterránea	71
Figura 9.	Emisión de material particulado por la producción de ferroníquel	99
Figura 10.	Ubicación geográfica mina de Cerro Matoso (CMSA), Montelíbano-Córdoba, Colombia	102
Figura 11.	Problemáticas asociadas a la exposición ocupacional y ambiental a residuos de minería de Ferro-níquel en el departamento de Córdoba- Colombia	103
Figura 12.	Efectos en la salud por exposición a residuos de minería de níquel	107
Figura 13.	Proceso de producción tecnificada de oro por el proceso químico de cianuración, en el marco de la eliminación del uso de mercurio para Colombia	129
Figura 14.	Ciclo biogeoquímico del mercurio residual de minería aurífera	135
Figura 15.	Marco de la exposición al mercurio, OMS	139
Figura 16.	Aspectos más relevantes en las leyes mineras en Colombia desde 1823 y que son la base del actual cuerpo normativo	165

Agradecimientos

Al presidente del Consejo de Fundadores, padre Diego Jaramillo Cuartas, cjm y al rector general de UNIMINUTO, padre Harold Castillo Devoz, cjm.

A la Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, Rectoría Cundinamarca, al rector Ph.D. Jairo Enrique Cortés Barrera, a la vicerrectora licenciada Carolina Tovar Torres y al Centro Regional Zipaquirá, y su coordinadora académica, la profesora Erika Pérez Rojas.

A la coordinadora del Programa de Ingeniería Agroecológica del Centro Regional Zipaquirá, MVZ Teresa Ospina Novoa.

Al equipo de trabajo de la Rectoría Cundinamarca, el director de investigaciones Juan Gabriel Castañeda Polanco, el profesor José Daza Acosta y la profesora Diana Díaz Barbosa. Al área de investigación del Centro Regional Zipaquirá, coordinadora de investigación, profesora Jenifer Paola Garza Puentes, profesora Lilibeth Jiménez y profesora Magnolia Posada.

A la rectora de la Universidad El Bosque, la Dra. María Clara Rangel Galvis, al decano de la Facultad de Medicina, el Dr. Hugo Cárdenas López. A la directora del Doctorado en Salud Pública, Ph.D. Adriana Pacheco Coral. Al decano de la Facultad de Ingeniería, el ingeniero Julio Cesar Sandoval Villareal. Al director del programa Ingeniería Ambiental, el ingeniero Kenneth Ochoa Vargas.

A la rectoría general de la Universidad del Sinú UNISINÚ, la Dra. Ilse Bechara Castilla. Al decano de la Facultad de Ciencias de la Salud Universidad del Sinú, el Dr. Álvaro Bustos González. A la oficina de Investigaciones de la Universidad del Sinú. Al equipo de trabajo de docentes investigadores y auxiliares de investigación adscritos al laboratorio de Investigaciones Biomédica y Biología Molecular UNISINÚ.

A los profesores y compañeros del Programa de Ingeniería Agroecológica, Javier Cuervo, Sandra Parada, Alexandra García, Adriana Bernal. A los integrantes de los semilleros de investigación ENS, MAEC y TEA.

Al Ph.D. Carlos Eduardo Maldonado Castañeda, profesor de la Facultad de Medicina de la Universidad El Bosque. A los profesores Ricardo Tobón y la profesora Paula Borda, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad El Bosque.

A todas las personas que apoyaron y creyeron en el proyecto de investigación IA 01 ZIP 17 - 2020, Proyecto Nygua: Principales minerales, rocas y suelos de las provincias de Sabana Centro y Ubate, Cundinamarca y en la pertinencia de esta publicación.

Prólogo

La minería es una actividad económica importante en diversos países del mundo. En Colombia es uno de los renglones más relevantes de la economía. Esta actividad no es nueva, por el contrario, se practica desde hace muchos años para la explotación de los recursos derivados de hidrocarburos, metales, piedras preciosas, entre otros.

Con el pasar de los años, la minería artesanal ha sido reemplazada por la de gran escala, variando sus técnicas e insumos para la obtención de los productos finales. Esto ha conllevado al uso de diversos tipos de sustancias químicas o procesos físicos, para poder aislar y obtener los recursos finales. La problemática ambiental que estos procesos han generado no ha dado espera, y son diversos los debates que alrededor de esto se han presentado.

Adicionalmente, un aspecto importante y que también ha sido asunto de discusión, es el de la salud laboral de los trabajadores mineros, que se relacionaría directamente con la formalidad de la vinculación laboral, de la cual muchos de estos trabajadores carecen. La actividad minera pueda conllevar a afectaciones de la salud de los trabajadores por causas ocupacionales, que no son reconocidas y tratadas desde el ámbito de la salud laboral. Todos estos puntos descritos anteriormente, se relacionan con un área del conocimiento de la salud pública.

Este libro *Minería y salud ambiental. Un análisis desde la producción de carbón, ferroníquel y oro en Colombia* es el resultado de un proceso académico que intenta dar cuenta de estos puntos en los que convergen la minería de oro, carbón y ferroníquel con la afectación a la salud y la salud pública en Colombia. El lector podrá encontrar en el mismo, desde la visión de la salud de los ecosistemas, una descripción detallada de los procesos de explotación minera de oro, carbón, y níquel, pasando por el marco legal vigente en que se enmarca esta actividad, para finalizar con una perspectiva epidemiológica para aplicar estudios, y de esta manera generar la evidencia para evaluar el impacto de la minería sobre la salud pública.

Este esfuerzo reflexivo invita al lector a ir más allá en el conocimiento de las ventajas económicas que puede representar esta actividad, para tener una visión más amplia y nutrida sobre el efecto que la misma tiene sobre el ambiente, los trabajadores mineros, las comunidades aledañas a las minas y el país en general. Además, explora la relación entre la salud de los ecosistemas, el ambiente, la salud humana y la minería, así como el nexo con las políticas y normas vigentes que regulan este tipo de actividad económica.

Esta investigación brinda al lector la posibilidad de un espacio reflexivo y propone el uso de un tipo de estudios epidemiológicos, con miras a contribuir en el ámbito científico; pero también para que la investigación en minería y salud pueda usarse en la toma de decisiones a nivel político, con miras a mejorar las condiciones de salud de las poblaciones afectadas.

Esperamos que disfruten la lectura de este libro, que busca generar consciencia sobre un tema tan relevante en el país. También, que pueda ser usado por académicos, estudiantes y público en general como texto de referencia para sus estudios y publicaciones.

Ph.D. Adriana Pacheco Coral

Directora Doctorado Salud Pública
Facultad de Medicina. Universidad El Bosque

Presentación

Colombia cuenta con un territorio que destaca por su gente, su alta biodiversidad, su riqueza geológica y su inigualable belleza paisajística; recorrer este maravilloso país otorga experiencias visuales, auditivas, gastronómicas y sensoriales que engrandecen la cosmovisión de todo ser humano.

La riqueza natural colombiana se vislumbra magníficamente desde municipios como Puerto Nariño, Amazonas; Ipiales, Nariño; Orito, Putumayo; San Juanito, Meta; Zipaquirá, Cundinamarca; Muzo, Boyacá; Pozo Azul, Casanare; Saravena, Arauca; Monte Líbano, Córdoba; Albania, La Guajira; Barranco Minas, Vichada; El Litoral del San Juan, Chocó; Providencia, San Andrés, Providencia y Santa Catalina y cómo no mencionar la región geográfica de La Mojana en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre.

Colombia es un país con una expresión orogénica majestuosa e imponente: la cordillera de Los Andes, siendo el Macizo Colombiano la representación del foco de la génesis hídrica en los departamentos de Cauca, Huila y Nariño; allí donde tiene origen el gran río Magdalena. Posteriormente, esta formación montañosa se trifurca majestuosamente

en tres cordilleras que cubren el territorio nacional, otorgando características particulares a cada metro cuadrado; por lo tanto, la riqueza natural es una expresión producto de los orígenes geológicos, Colombia es un país que magnifica la cordillera de Los Andes a lo largo y ancho del territorio.

Consecuentemente, se cuenta con una riqueza mineral significativa, lo cual se atribuye a un potencial geológico minero de interés económico, como el carbón; metales como el oro, la plata y el platino; piedras preciosas como las esmeraldas; minerales metálicos como el hierro, el cobre, el níquel y el plomo; y minerales no metálicos como la roca fosfórica, la sal, arenas y gravas, entre otros; siendo la minería de carbón, ferroníquel y oro los procesos mineros más representativos para Colombia.

En el contexto económico, la economía extractiva es el modelo de explotación y venta de recursos naturales, predominantemente geológicos, por lo cual la minería es un renglón importante del producto interno bruto de Colombia (PIB), alcanzando reportes del 6% al 7% como PIB minero. Aun siendo una actividad económica regulada, el Estado ha generado mecanismos de control que no logran el cometido de establecer límites en el marco de los accionares ilegales y criminales, por lo que en nuestro territorio la minería es prácticamente un tabú.

Un primer ejercicio de reflexión es poder ver alrededor, en cualquier lugar habitacional, laboral o urbe; describir este lugar es dar cuenta de diversos tipos de minería: vías, ladrillos, muros, concreto, vidrio, combustible, bombillas, cerámica, aluminios, acero, joyería, fertilizante, sal de mesa, desinfectantes, etc. La cotidianidad se puede describir en minería; sin embargo, los diferentes tipos y escalas de minería que se desarrollan en Colombia, así como el nivel de tecnificación, la dificultad para ejercer control estatal y la clandestinidad hacen que los procesos mineros sean vistos como perjudiciales para las personas y sobre todo para el medio ambiente.

El anterior ejercicio es un dilema inicial para cuestionar los estilos de vida, pero, la minería es mucho más que un estilo de vida para comunidades que subsisten gracias a esta actividad. En este sentido, un segundo ejercicio de reflexión apunta a la necesidad de subsistencia de familias, poblaciones y comunidades enteras que tienen como única fuente de ingresos los productos mineros, los cuales son obtenidos de formas artesanales y con mínimos niveles de cuidado ocupacional y ambiental.

Aun así, las reflexiones en torno a la minería siempre asumirán un juicio de valor respecto a los mineros en Colombia y el mundo; sin embargo, las actividades mineras deben realizarse desde mecanismos tecnificados, con responsabilidad ambiental y garantizando que la exploración, explotación y procesamiento no afecte la seguridad en el trabajo y la salud ocupacional de los operarios y el medio ambiente. No obstante, extraer material geológico mecánicamente y procesarlo por mecanismos químicos, sin controles estatales y de maneras irregulares, genera pérdida de la calidad ambiental en agua, aire y suelo, lo cual es un proceso completamente irreversible, es decir, un daño ambiental irreparable.

La cuestión de fondo se aborda a través de este libro: la salud de las personas y las poblaciones relacionadas, directa e indirectamente al deterioro ambiental, es una de las consecuencias de los principales procesos mineros en Colombia. Para esto, se analiza la salud ambiental desde un concepto holístico de salud, citando un postulado teórico desde la epigenética:

La salud es un continuo que va más allá de lo humano, que responde y se retroalimenta de la salud de las plantas, los animales, los ecosistemas, el planeta y las relaciones entre estos; además, es una compleja red expresada en los seres humanos pues emerge a partir de la relación entre la genética, la epigenética, la cultura, lo social, lo económico, el pensamiento, las vivencias y las experiencias, siendo el reflejo de lo que nos hace plenamente humanos. (González-Martínez, 2019, p. 7).

A veces pretender cerrar un ciclo es prácticamente aislar un sistema natural, lo cual sería adecuado dentro de un marco de análisis lineal y en condiciones ideales; sin embargo, los sistemas sociales no corresponden a la linealidad para su comprensión. La idea central de este libro es poder relacionar las implicaciones en la salud de las personas a nivel poblacional para los tres principales procesos mineros en Colombia, desde una perspectiva de la salud pública; por lo tanto, la salud ambiental es el marco científico para su asociación dentro de las alteraciones ambientales.

Considerando que la minería tiene consecuencias medibles a nivel ocupacional y de difícil medición en escalas ambientales, para las poblaciones y habitantes expuestos a las consecuencias adversas de la minería, el enfoque científico presentado es un abordaje desde la salud pública, salud ambiental y las ciencias ambientales *per se*.

Previamente a la lectura, me permito invitarle a una última reflexión, manifiestamente sin juicio de valor y esperando que esta le acompañe durante los próximos seis capítulos, y sobre todo, durante su cotidianidad:

¿Cuántas vidas humanas, personas enfermas, pérdida de costumbres y cultura, de especies y vidas de animales y plantas, de ecosistemas, selvas y bosques, contaminación de agua dulce, pérdida de servicios ecosistémicos, deterioro de la vida submarina y daño ambiental irreparable, cuesta realmente la producción minera en Colombia?

Ph.D (c). Camilo José González-Martínez

Ingeniero ambiental

▣ Referencias

González-Martínez, C. (2019). Epigenética y salud: un análisis desde el pensamiento complejo. *Revista Salud El Bosque*, 9(2), 10-18. doi: <https://doi.org/10.18270/rsb.v9i2.2796>

Introducción

En este libro se encuentra una exhaustiva revisión de la minería de carbón, ferroníquel y oro en Colombia, fundamentada en los principales reportes oficiales de este eslabón productivo y su aporte a la economía del país. También se aborda desde las implicaciones que este ejercicio extractivo genera tanto para la salud humana como para la salud ambiental, más aún cuando los procesos de microminería y de pequeña minería carecen de planes ambientales para el manejo responsable de los residuos generados en esta actividad.

Colombia tiene un producto interno bruto (PIB) de US\$330,228 billones (Banco Mundial, 2018) lo que representa un crecimiento de 2,7 respecto al año 2017 (DANE, 2018). La participación por actividades en el PIB para el segundo semestre de 2017 la lideraron los sectores de establecimientos financieros, seguros, actividades inmobiliarias y servicios a las empresas con 21,31%; seguido por servicios sociales, comunales y personales con el 15,73%; luego se ubican, comercio, reparación, restaurantes y hoteles con el 12,09%; industrias manufactureras con el 10,83%; construcción con el 7,3%; transporte, almacenamiento y comunicaciones con el 7,01%; agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca con el 6,2% y suministro de electricidad, gas y agua con el 3,35%. Lo relacionado con impuestos, derechos y subvenciones representó el 9,89%.

En términos económicos la minería en Colombia corresponde a un sector que aporta un 6,03% al PIB como lo reporta el DANE (2018); para el segundo semestre de 2017 se estimó el aporte de minerales metalíferos en el PIB, incluyendo el oro, en un 16,73% en el PIB minero y en un 0,32% en el PIB total (Ministerio de Minas y Energía, 2017). Debido a que Colombia cuenta con una riqueza natural de gran importancia en términos geológicos y mineralógicos, tal como se presentan en departamentos como Cesar, La Guajira y Córdoba, donde sobresale la minería a gran escala a cielo abierto, resulta indispensable conocer cuál es el impacto que estas actividades generan en la salud humana.

En Colombia se presenta minería de carbón, oro, plata, platino, níquel, hierro y minerales no metálicos como caliza, sal, esmeraldas y azufre (Ministerio de Minas y Energía, 2016; UPME, 2014). Para entender la magnitud volumétrica de este renglón de la economía es necesario mencionar dos de las minas más relevantes colombianas: el Cerrejón, una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo, que extrae carbón térmico en una proporción de 32 millones de toneladas al año y Cerro Matoso S.A donde se transforma el níquel desde un proceso energético en ferroníquel (CHM Minería, 2014).

Según la Agencia Nacional de Minería (2018) y el Ministerio de Minas y Energía (2015), en Colombia se desarrolla todo tipo de minería en términos de escalas desde 1 hasta 10000 hectáreas, tipos, modalidades o procesos; en el caso de la obtención de oro, se presentan dos procesos geoquímicos, la cianuración y la amalgamación. Güiza (2013) plantea que la microminería y la pequeña minería se desarrollan fundamentalmente por personas naturales quienes con métodos rudimentarios extraen los minerales y metales para generar ingresos de subsistencia. La Defensoría del Pueblo (2015) presenta un hallazgo en términos de migración de un gran número de personas en las zonas mineras, en donde los compuestos y elementos de interés se extraen y procesan por métodos rudimentarios sin ningún tipo de control ambiental y sin ningún control de los residuos generados.

Colombia presenta en algunos departamentos información censada sobre la minería a pequeña escala, tal es el caso de Boyacá (2024 minas), Antioquia (1395 minas), Bolívar (967 minas), Santander (954 minas), Cundinamarca (764 minas) y Magdalena (505 minas), considerando la explotación diversa (Güiza, 2013) Así mismo, en el año 2013 el 66% de la minería a pequeña escala es ilegal, en departamentos como Chocó (100%), La Guajira (100%), Magdalena (100%), Córdoba (95%), Bolívar (92%), Atlántico (91%), Risaralda (91%), Cauca (90%) y Antioquia (85%) (Castro, 2011; Contraloría General de la Nación, 2013; Güiza, 2013)

En la actualidad, de acuerdo con Cabrera *et al.* (2013), se presenta pérdida de servicios ecosistémicos como afectación de plantas cultivadas con fines medicinales. Esto debido a la suma de varios problemas ambientales entre los que se encuentran la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, el aumento de los fenómenos climáticos extremos, el aumento del nivel del mar y otros factores que conllevan a problemas asociados a la salud humana. Entre las afecciones más comunes se encuentran golpes de calor, inseguridad alimentaria por pérdidas de tierras cultivables, contaminación de fuentes hídricas, bioacumulación de metales pesados y demás factores que se abordarán más adelante.

En términos de salud pública, el Ministerio de Salud y Protección Social (2012) define salud ambiental como: “La interacción entre los grupos humanos y los factores físicos, químicos, biológicos y sociales que se encuentran en el medio que habita y que a su vez se encuentra modulado por la estructura social” (p.1), lo cual permite establecer una relación entre la dinámica minera y la salud pública. Congruentemente con el Departamento Nacional de Planeación (2008), se conceptualiza la salud ambiental como “el área de las ciencias que trata la interacción y los efectos que, para la salud humana, representa el medio en el que habitan las personas” (p.3), correspondiendo al enfoque de análisis de este libro.

Desde la perspectiva de salud ambiental para Colombia este libro abordará los tres principales procesos mineros de Colombia: la minería de carbón, la minería de ferroníquel y la minería de oro, considerando la relación de estas con la salud pública y la salud humana. De acuerdo con este abordaje, el capítulo 1 analiza la salud de los ecosistemas en los procesos mineros, siendo un marco para la salud humana desde el contexto ecológico, permitiendo un primer acercamiento a la relación entre minería, salud ecosistémica, salud ambiental y salud pública.

Para el capítulo 2, la minería de carbón se presenta como una de las más voluminosas del mundo; para el 2016 su producción alcanzó los 90,5 millones de toneladas, con aportes de 1,35 billones de pesos colombianos en regalías, que representan el 80,2% del total recaudado por el sector minero (Habib, 2017). Sin embargo, estas bondades económicas se contrarrestan con la liberación de material particulado que afecta de manera negativa a la salud ambiental y humana, tema que redundo en un problema de salud pública (Olivero-Verbel, 2010).

El capítulo 3 aborda el problema de la minería de ferroníquel (FeNi), expuesto como un resultado del material particulado, generado durante la extracción y procesamiento como principal problema en el marco de la salud pública. Estas partículas con diferentes diámetros aerodinámicos producen afecciones en la salud humana porque pueden penetrar más profundamente en el sistema respiratorio. Las partículas finas de esta minería contienen concentraciones más altas de metales tóxicos, tales como plomo, cadmio y níquel (Kauppinen y Pakkanen, 1990).

En términos de minería aurífera, de acuerdo con Díaz-Arriaga (2014), los principales departamentos asociados a la explotación de oro en los años comprendidos entre 2009 y 2013 son: Antioquia (43,0 %), Chocó (37,0 %), Bolívar (8,0 %), Cauca (4,0 %), Caldas (3,0 %) y Nariño (2,0 %), datos que coinciden con el Ministerio de Minas y Energía (2005, 2018). Sin embargo, el Ministerio de Minas y Energía (2016), a través de la Política Minera de Colombia, plantea la necesidad de que la totalidad

de la minería aurífera debería operar bajo el amparo de un título minero y contar con un instrumento de gestión ambiental, lo cual no se presenta en el territorio nacional.

En cuanto a la minería de oro, en el capítulo 4 se considerará el agua como el componente ambiental de interés, el recurso hídrico es el principal recurso contaminado por el mercurio durante la cadena productiva del oro (Betancur-Corredor, Loaiza-Usuga, Denich y Borgemeister, 2018; Castro, 2011; Díaz-Arriaga, 2014; González-Martínez, Acosta, Guzmán y Rodríguez, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012; OMS, 2013). Esta problemática ambiental es solo una de las causas del uso del mercurio en la explotación aurífera, ya que esta no cuenta con un manejo adecuado de los residuos propios de la extracción ilegal, pues, también durante el proceso de minería ilegal las personas se exponen a problemas de salud pública como el ataque de mosquitos del género *Anopheles sp.*, dando lugar a numerosos casos reportados de malaria en las regiones donde existe una exposición al vector de esta peligrosa enfermedad.

Luego de abordar las principales amenazas que enfrenta la salud pública en cuanto al sector minero, en el capítulo 5 se presenta un trabajo de análisis en materia de legislación minera y políticas públicas. Se aborda una evolución histórica normativa, que data de finales de siglo XVI hasta la fecha, en donde el último aporte es la formulación de la política minera de Colombia por medio de la Resolución 40391 de 2016, la cual considera grandes retos, como los altos niveles de ilegalidad e informalidad, la inseguridad jurídica, la falta de coordinación institucional y el ordenamiento territorial con respecto al uso del suelo.

Como cierre se presenta el capítulo 6, como herramienta epidemiológica para abordar los estudios asociados al ámbito ecológico en la explotación minera, se describe desde la mirada crítica de la utilidad práctica de resultados publicados para proyectar el efecto de la minería en la ecología y posteriormente en la salud de las personas y a nivel poblacional. Así pues, una suposición común en los análisis ecológicos

es que los efectos siguen un modelo de regresión lineal múltiple, que es a la vez natural y algo engañosa; entre las regresiones individuales y ecológicas, representarían una falla en presencia de no aditivos o no lineales y efectos dentro de los grupos ecológicos, lo que hace de los estudios ecológicos la vía más adecuada para abordar los asuntos mineros como causas de alteraciones en la salud humana, en términos de incidencia y prevalencia (Dobson, 1988; Greenland y Robins, 1994; Lasserre, Guihenneuc-Jouyaux y Richardson, 2000; Prentice y Sheppard, 1995; Richardson, Stücker y Hémon, 1987; Vaupe, Manton y Stallard, 1979).

En resumen, este libro ha indagado en fuentes primarias y secundarias a fin de presentar un análisis consolidado de las problemáticas de salud pública asociadas a los principales tipos de minería en Colombia. A continuación, cada una de los temas abordados se desglosarán capítulo a capítulo, por investigadores y académicos que han compilado la información de fuentes confiables para aclarar el panorama actual de la minería en Colombia, sus implicaciones en la salud ambiental y los retos para la salud pública *per se*.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2018). *Características generales. Rankings Mundiales 2017. Datos Económicos. Producción de oro En Colombia*. Bogotá DC. Recuperado de: <http://mineriaencolombia.anm.gov.co/images/Presentaciones/FICHA-MINERAL---ORO-2018.pdf>
- Banco Mundial. (2018). *PIB US\$ a precios actuales*. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/pais/colombia>
- Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J. C., Denich, M. y Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.142
- Cabrera, M., Espitia, J., Fierro, J., Negrete, R., Pardo, L., Rudas, G. y Vargas, F. (2013). Minería en Colombia. Fundamentos para superar el modelo extractivista. Madrid: Contraloría general de la República. Recuperado de: <https://www.las2orillas.co/wp-content/uploads/2013/07/informeMINERIAluisjorgegaray.pdf#page=82%0Ahttp://www.uexternado.edu.co/facecono/econstitucional/workingpapers/jgonzalezresena28.pdf>
- Castro, L. (2011). *Minería de oro artesanal y a pequeña escala en Timbiquí-Cauca una aproximación histórica a sus efectos socioambientales desde la perspectiva de los actores locales*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12439>
- CHM Minería. (2014). *Colombia Minera*. Recuperado de: <http://www.chmminería.com.co/colombia-mineria>
- Contraloría General de la Nación. (2013). Informe especial. Minería Ilegal, 19. Recuperado de: <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/198738/Separata-Mineria-Ilegal.pdf/4d3d5cbe-4bda-430a-831e-ef2f6bbf5d0d?version=1.0>

- DANE. (2018). *Producto interno bruto (PIB). Cuarto trimestre 2017 y año 2017*. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/cp_PIB_IVtrim17_oferta.pdf
- Defensoría del Pueblo. (2015). *La Minería sin control: Un enfoque desde la vulneración de los Derechos la vulneración Humanos*. Bogotá DC. Recuperado de: <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/InformedeMinerIa2016.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2008). Conpes 3550 de 2008. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes_3550_2008.pdf
- Díaz-Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 947-957. doi: 10.15446/rsap.v16n6.45406
- Dobson. (1988). Proportional hazards models for average data for groups. *Statistics in Medicine*, 7(5),613-618.
- Greenland, S. y Robins, J. (1994). Accepting the limits of ecologic studies. *American Journal of Epidemiology*, 139,769-771.
- González-Martínez, C., Acosta, D., Guzmán, R. y Rodríguez, D. (2019). *Reforestación agroecológica: una alternativa para la protección del recurso hídrico*. (1st ed.). Bogotá DC.: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Güiza, L. (2013). La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. *Dyna* 80(181),109-117. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n181/v80n181a12.pdf>
- Habib, S. (2017). *Está evolucionando el negocio*. Recuperado de: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/esmeraldas-historias-por-contar-/articulo/silvana-habib-habla-sobre-el-promedio-de-regalias-de-la-industria-esmeraldifera/538719>

- Kauppinen, E.I. y Pakkanen, T.A. (1990). Coal combustion aerosols: a field study. *Environmental Science & Technology*, 24(12) 1811-1818. doi: 10.1021/es00082a004
- Lasserre, V., Guihenneuc-Jouyaux, C. y Richardson, S. (2000). Biases in ecological studies: utility of including within-area distribution of confounders. *Statistics in Medicine*, 19(1), 45-59.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Diagnóstico nacional de salud ambiental*. Recuperado de: [Https://Www.Minsalud.Gov.Co/Sites/Rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.Pdf](https://www.minsalud.gov.co/Sites/Rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.Pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Glosario técnico minero para Colombia. Recuperado de: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). Política minera de Colombia. Bases para la minería del futuro. *Minminas*, 1-62. <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2016/04/politica-nacional-minera-resolucion-40391-2016.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Cambio climático en Colombia*. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico>
- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Análisis del comportamiento del PIB minero en el tercer trimestre de 2017*. Recuperado de: https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23900781/050917_pib_ii_trim_2017.pdf/60375c5e-c46b-47ad-8225-189789dbbaf7
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Producción de oro en Colombia*. Recuperado de: <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>

- Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). *Salud ambiental*. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/salud/publica/ambiental/Paginas/Salud-ambiental.aspx>
- Olivero-Verbel, J. (2010). *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana*. Recuperado de: <http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Miner%C3%ADa-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jes%C3%BAAs-Olivero-Verbel.pdf>
- OMS. (2013). Efectos de la exposición al mercurio en la salud de las personas que viven en comunidades donde se practica la minería aurífera artesanal y en pequeña. *Who.Int*, 1-8. Recuperado de: https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury_asgm_es.pdf?ua=1
- Prentice, R. y Sheppard, L. (1995). Aggregate data studies of disease risk factors. *Biometrika*, 82(1), 113 -25.
- Richardson, S., Stücker, I. y Hémon, D. (1987). Comparison of relative risks obtained in ecological and individual studies: some methodological considerations. *International Journal of Epidemiology*, 16(1), 111-120.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). *Indicadores de la minería en Colombia*. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Indicadores_de_la_mineria_en_Colombia.pdf
- Vaupe, J., Manton, K. y Stallard, E. (1979). The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality. *Demography*, 16, 439-454.

Capítulo 1

Claudia Patricia Gómez-Rendón
Fernando Gutiérrez-Fernández



Minería: análisis desde la salud de los ecosistemas para la promoción y prevención de la salud humana



En la actualidad son numerosas las investigaciones abordan la relación entre minería, problemas ambientales y pérdida de biodiversidad, indicando que se está llegando a umbrales críticos, y que existen cambios globales asociados al detrimento ambiental como el cambio del clima, el aumento de los fenómenos climáticos extremos, el incremento de la temperatura, la disminución de la precipitación media y las consecuentes sequías, el aumento del nivel del mar, la pérdida de diversidad biológica y la extinción de especies que inciden sobre la pérdida de los servicios ecosistémicos y de especies usadas, por ejemplo, con fines medicinales (Leal y Morales, 2013; Acosta-Bueno, 2016; Pérez y Betancur, 2016). Esto conlleva a problemas asociados a la salud humana, como los golpes de calor, la inseguridad alimentaria por pérdidas de tierras cultivables, la contaminación de fuentes hídricas, la bioacumulación de metales pesados transfiriéndose de un nivel trófico a otro, incrementando su concentración a través de la cadena alimenticia o biomagnificándose, entre otros.

Un escalofriante ejemplo de la pérdida de biodiversidad se encuentra en el Informe Planeta Vivo de 2018 publicado por la World Wildlife Fund (WWF), en el cual se expone la evaluación de la salud del planeta, rastreando el estado de la biodiversidad mundial, encontrando que en la actualidad hay unas 8000 especies amenazadas o casi amenazadas que se encuentran reportadas en la Lista Roja de la International Union for Conservation of Nature (UICN), de un total de 82 845 especies evaluadas.

Las anteriores cifras tienen como común denominador que la principal fuerza motriz es la sobreexplotación humana del ecosistema, la recolección de especies de la naturaleza a tasas que no se pueden compensar con la reproducción o el recrecimiento (Maxwell, Fuller, Brooks y Watson, 2016), encontrando la explotación de los depósitos minerales como una actividad que aporta a esa degradación y que se está asentado en la cultura y la economía de países como Colombia.

El Índice Planeta Vivo-IPV global, calculado con los datos disponibles para todas las especies y regiones, muestra en conjunto una disminución general del 60 % en el tamaño de las poblaciones de vertebrados entre 1970 y 2014 que es el indicador principal utilizado, es decir, una disminución media mayor que la mitad en menos de 50 años (WWF, 2018).

Los enormes cambios de forma global, que se han producido sobre el planeta por la actividad humana, guían desde hace muy pocos años a científicos como Steffen, Broadgate, Deutsch, Gaffney y Ludwig (2015); Waters, Zalasiewicz, Summerhayes, Barnosky, Poirier, Gałuszka y Jeandel (2016); Zamora, Huerta, Maqueo, Badillo y Bernal (2016), quienes han comenzado a proponer que la Tierra se encuentra en una nueva época geológica, denominada como Antropoceno; lo cual es un claro referente a la magnitud de la transformación planetaria, del daño infringido a la salud de los ecosistemas y cómo estos de forma resiliente han comenzado a adaptarse. Si bien no es la primera vez que ocurren extinciones en masa, sí es la humanidad la principal causa en esta ocasión, lo que ha implicado un cambio en la visión de la estructura de la Tierra, sus esferas

–atmósfera, biosfera, geosfera, hidrosfera y antroposfera o sociosfera– y cómo emerge finalmente como un organismo finito, pequeño, dinámico y frágil.

El cálculo de los bienes y servicios que la naturaleza provee anualmente se estima a escala mundial en unos 110 billones de euros al año (WWF, 2018); pero, más allá del valor económico, el cual es indudablemente fundamental para que perdure la antroposfera-sociosfera, la pregunta es si la sociedad está preparada para afrontar un deterioro de la salud del planeta, que conlleve a un detrimento de la salud humana, por la reducción en la disponibilidad de los elementos esenciales de la tierra como agua, suelo y aire, que cada vez se encuentran más contaminados, acarreando la pérdida de tierras cultivables, disminución y contaminación de alimentos desde el cultivo, aumento en las catástrofes ambientales, con impactos cada vez más severos y eventos más recurrentes entre otros.

Colombia es un país catalogado como megabiodiverso, llegando a considerarse el de mayor número de especies del planeta por km², ostentando el primer puesto en aves, al poder avistar en su territorio casi una quinta parte (1934 especies, excluyendo especies exóticas que no han establecido poblaciones) equivalente a casi el 19 % de las 10507 aves conocidas en la Tierra, en tan sólo el 0,8 % de la superficie terrestre del planeta (Donegan *et al.*, 2018). Se caracteriza por su respeto ambiental desde lo jurídico, prueba de ello es la Carta Magna, reconocida por su naturaleza “verde”, que ha sido garante de la regulación legal desde la perspectiva constitucional de una gran gama de derechos y garantías ambientales, al establecer en el supremo rango normativo el reconocimiento de derechos fundamentales relacionados con el ambiente como fórmula derivada de la protección al derecho a la vida (Gómez, 2013), lo que reconoce claramente la estrecha relación entre la salud de los ecosistemas y la salud humana desde lo jurídico.

Aspectos de orden filosófico, dogmático y estructural enriquecen un esquema creado para la protección ambiental como un derecho ligado a la vida, la salud, la recreación, la infancia, la vejez, entre muchos otros, que buscan el desarrollo de la población con estándares altos de calidad en un país envuelto en un manto de riqueza natural (Gómez, 2013).

Ahora bien, el Estado bajo la necesidad de regular el grado de permisividad legal para la protección ambiental, determinó en la Ley 685 de 2001 (modificada por la Ley 1382 de 2010) un régimen aplicable para la autorización de explotación minera, el cual debía acogerse a estudios previos de factibilidad que comprobaría el menoscabo ambiental en dicho entorno, evaluando no solo el impacto social, sino también el deterioro que se podría ocasionar con el proceso de extracción mineral del recurso y la industrialización derivada de la producción masiva del yacimiento (Gómez, 2013).

Aunque mayormente regulada en la actualidad, la minería no es un elemento nuevo en el territorio colombiano, siempre ha sido un renglón económico importante para el país. En la época prehispánica las comunidades indígenas realizaban rituales donde el oro era un elemento esencial y también enterraban valiosas piezas de orfebrería junto con sus muertos, ejemplo de ello fueron los hallazgos de los sepulcros del Sinú, que posteriormente llevaron a un proceso de gUAQUERÍA. Sin embargo, en ese momento los procesos utilizados para la extracción eran menos nocivos al ambiente que los posteriormente desarrollados, tanto por los elementos utilizados como por la magnitud de la actividad, ya que es hasta 1550-1560, cuando se cambia el procedimiento de amalgamación para la extracción de plata y hace presencia el mercurio (Noejovich, Salazar-Soler, Suárez, Glave y Salas, 2009).

En la época colonial se puede señalar que el extractivismo fue un renglón de la economía de suma relevancia, el cual desde que en 1530 se localizaran los primeros yacimientos de oro de Nueva Granada, en el Magdalena y en el Cauca (Salazar-Soler, 2009) fue cobrando mayor relevancia con el transcurrir del tiempo; ejemplo de ello, es que una vez avanzados los descubrimientos de yacimientos auríferos, fueron fuertemente impulsados desde España con una importante reducción de impuestos y subsidios a los insumos para desarrollar la extracción, impulsando la minería de forma dinámica en el Virreinato de la Nueva Granada (para una economía precapitalista), llegando a crecer a tasas del 2,5% anual entre 1750 y 1800, convirtiéndose en el sector líder de la economía colonial (Kalmanovitz, 2008a).

En estos primeros años el proceso de purificación del oro consistía en realizar una:

separación de la arena de los ríos o de algunas rocas, cuando se encontraba en vetas. La batea o el lavado por medio de la desviación de aguas fue la solución. Luego, seguía la amalgamación. Pero el oro siempre se presentaba juntamente con otros minerales y la amalgamación producía una aleación de ambos. El método utilizado para separarlos fue por medio del ácido nítrico. (Bakewell, 1987, como se citó en Salazar-Soler, 2009, p. 114).

Podría considerarse a estas primeras etapas en la purificación de oro como menos contaminantes, ya que no se empleaba el mercurio, el cual está generalizado en la minería de oro de la época actual, el responsable de este cambio fue el español Bartolomé Medina, quien propuso en 1557 el método del beneficio del patio para la amalgamación en frío de los minerales de plata (Español-Cano, 2012).

En el período reciente, si se mira Colombia desde su política pública a partir de la década de los noventa, su economía ha girado en torno a un modelo de explotación principalmente de minerales e hidrocarburos, impulsado además por las expectativas crecientes en la demanda internacional de *commodities*, por lo que puede decirse que la economía nacional siempre ha estado gravitando alrededor de esta actividad. No obstante, su impulso ha cobrado fuerza en los últimos años, donde desde el 2010 pasa a jugar un rol fundamental en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, Prosperidad para todos, que identifica la minería como una de las locomotoras de crecimiento, proyectando para 2014 una producción de 72 toneladas/año de oro y 124 millones de toneladas/año de carbón. De igual forma, en el Plan Nacional para el Desarrollo Minero visión al año 2019 –Colombia País Minero– se resaltan tres grandes funciones del Estado frente a la minería: facilitar la actividad minera, promover el desarrollo sostenible en la minería y fiscalizar el aprovechamiento minero.

Lo anterior ha conducido al país a la adopción de un modelo extractivista de los recursos naturales no renovables, generando la proliferación de títulos mineros y, de manera consecuente, el incremento de actividades mineras en gran parte del territorio nacional. Esta situación ha originado que se privilegien estas actividades extractivas por parte de diferentes entidades del Estado sobre otro tipo de actividades productivas, e incluso sobre los derechos fundamentales y colectivos de los colombianos, lo que ha convertido a la minería en una actividad generadora de conflictos sociales, ambientales, económicos y culturales en varias regiones del territorio nacional (Garay-Salamanca, 2013).

A pesar de la larga historia de minería en Colombia, la actividad aún es muy incipiente y se lleva a cabo principalmente en pequeña escala (Güiza, 2013), de acuerdo con los resultados del censo minero 2010-2011 se encontraron 14 357 unidades de producción minera, de las cuales tan solo el 37% tenían título minero y la actividad era realizada en su mayoría por hombres (>90%) (Ministerio de Minas y Energía, 2012).

Lo anterior puede explicar la prevalencia de la informalidad en la explotación minera, que sumado a la antigüedad de la actividad ha generado pasivos ambientales mineros, que de acuerdo con la definición de Aramburo y Olaya (2012), se trata de áreas “donde existe la necesidad de restauración, mitigación o compensación por un daño ambiental o impacto no gestionado, producido por actividades mineras inactivas o abandonadas que pone en riesgo la salud, calidad de vida o bienes públicos o privados”. (p.126)

Lo anterior se traduce en zonas donde existen filtraciones de ácido, lavado de metales, aumento en sedimentos, pérdida de vegetación, pozos abiertos (*open shafts*), entre otros, generando un riesgo de pérdida o disminución del patrimonio físico, humano y/o ambiental, por lo que se requiere identificar el daño y estimar el riesgo que este representa (incluida la afectación a la salud humana) y desarrollar valoraciones del riesgo, combinadas con metodologías para la pérdida de bienes y servicios ambientales, desde la disciplina de la economía ambiental (Aramburo y Olaya, 2012).

Lo previo, muestra cómo la minería no está siendo analizada adecuadamente, desde la salud ambiental y desde la salud humana, y peor aún, hay estudios que demuestran que pese al impulso gubernamental, la importancia de la minería no se ve reflejada totalmente para Colombia, ya que a partir de la modelación econométrica, realizada por Castillo, Rincón y Sánchez (2018), se encuentra que la nación a pesar de haberle apostado a una economía especializada en actividades extractivas ha generado resultados contrarios a los esperados. El *boom* en los precios internacionales de los minerales y combustibles no ha logrado permear la dimensión económica en su conjunto, resultando al menos cuestionable desde la sostenibilidad ambiental y social, que se gaste el sustrato natural con el fin de atender demandas especulativas de recursos agotables, más aún cuando no están logrando fortalecer el aparato productivo, ni cerrar la brecha que existe en su población, como lo refleja el índice GINI de 0,517 para el 2018 y 27,0% de la población colombiana clasificada como pobres (DANE, 2019).

Si bien el estudio realizado por Castillo, Rincón y Sánchez define un horizonte temporal comprendido entre 1990 y 2014, años que marcaron el antes y el después del *boom* extractivista en el país, se puede decir que la minería a través de la historia colombiana tampoco ha podido saldar la creciente deuda social y ecológica que ocasiona desde el análisis territorial, ejemplo de esto, como lo menciona Miguel Urrutia (2008), es que las minas hasta el siglo XX se encontraban localizadas lejos de los centros urbanos y ni siquiera eran promotoras del desarrollo agrícola local, pudiendo considerarse como típicos enclaves donde existe una ausencia de relaciones con el resto de la economía.

Si se remonta aún más en la historia, se puede encontrar evidencia que nunca ha existido una verdadera sostenibilidad de la actividad minera en el país, ya que algunos autores sugieren que la explotación y exportación de oro en Colombia hasta la mitad del siglo XIX ni siquiera favorecía el desarrollo económico individual, y en efecto hubo muy poco crecimiento en el ingreso per cápita antes de 1850 (Kalmanovitz y

López, 2008; Urrutia, 2008), a pesar que la Nueva Granada era considerada una economía dependiente de los recursos naturales, teniendo el sector minero como parte fundamental del excedente del Virreinato, contribuyendo para 1800 con un 12% del PIB (Kalmanovitz, 2006).

Ejemplos del interés económico sobre lo ambiental y lo social se han visto a través de la historia, y de hecho, a principios del siglo XX la nación por su afán de aumentar las arcas, descuidó temas legales que la llevaron de ser el principal exportador de platino del mundo entre 1916 y 1926, cuando los precios del metal estaban excepcionalmente altos, a no recibir regalías por la extracción de ese metal por parte de la Compañía Minera Chocó Pacífico, ubicada en el río Condoto (Leal-León, 2009), lo que ejemplifica aún más que el beneficio ha sido para unos muy pocos.

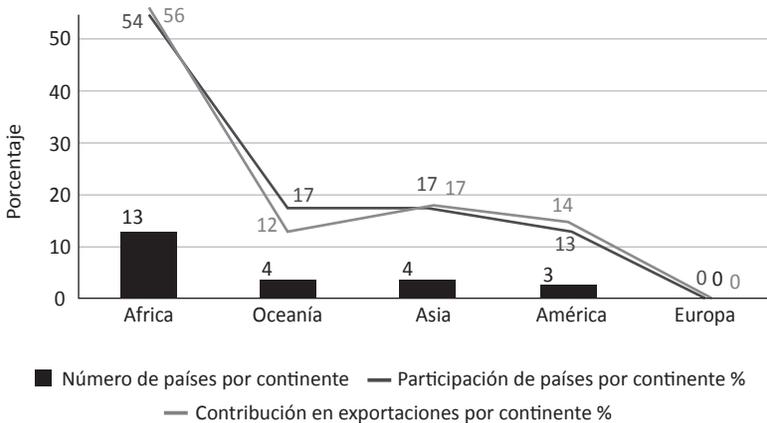
Bajo la premisa que el sector de la minería y los metales contribuyen al progreso social y económico, los territorios y las técnicas de exploración y explotación se han transformado a costa de dañar la salud ambiental, siendo preciso expresar que por su naturaleza la actividad es económicamente costosa, ambientalmente agresiva y socialmente no justa, lo cual claramente no es sostenible; sin embargo, a pesar de esto, muchos países le han apostado a una economía fundamentada en la minería y diversas empresas han sido las que han apalancado tal desarrollo.

Como se dijo anteriormente, algunas naciones ven como uno de sus pilares económicos a la actividad minera, pero no ha podido desarrollarse sosteniblemente, prueba de ello es el informe del International Council on Mining & Metals, en donde se confirma a la luz del Índice de Contribución Minera (ICM) que los países siguen dependiendo de sus recursos naturales. De ahí que, en el reporte “Rol de la Minería en la Economía Nacional, 2ª Edición” se reflejan datos correspondientes al año 2014, siendo preciso mencionar que los que mayoritariamente aportan a la economía de sus países son solo 24, es decir el ICM es superior a los 80 puntos y se concentran en el continente africano, seguido de

Oceanía, Asia y América; de igual manera sucede con el comportamiento de la contribución porcentual de exportaciones en el año 2012, como se observa en la figura 1.

Figura 1.

Índice de contribución minera ICB y participación en el PIB por continente



Fuente: elaboración propia a partir de datos de International Council on Mining & Metals (ICMM, 2016).

Es de anotar que de los 214 países listados, Colombia se encuentra en la posición 35, toda vez que su ICM fue de 76 puntos y la contribución de la minería al producto interno bruto (PIB) como ingresos netos fue de 72.7%.

Al revisar el mismo índice, pero ahora para el año 2014 y con referencia de los primeros 25 países, se refleja que el ICM oscila entre los 95,1 y 96,2 puntos continuando el continente africano como el mayor contribuyente minero a nivel mundial, elevando la posición respecto al periodo anterior Asia y América.

Al comparar los resultados entre los periodos de los reportes de los años 2014 y 2016 se precisa:

- ▶ La República Democrática del Congo elevó su *ranking* del índice, pasando del cuarto lugar en el año 2014 al primero en el 2016.
- ▶ Fue Ruanda el país que subió en el grupo significativamente al virar de la posición 77 a la 19 en el año 2016.

Ahora bien, se estimó en 914,4 US bn el monto de la producción del sector minero a nivel mundial en el año 2014, de los cuales los primeros 20 países aportaron el 87,5% de la cifra, es decir, 800,1 US bn, encontrándose Colombia en el puesto 19. Su producción fue de 6,6 US bn que sin considerar la de carbón fue de 2,9 US, bn equivalente al 0,7% del total de la producción mundial (ICMM, 2016).

El último informe del Consejo data del año 2018, en el que se muestra que son 21 países los que registran un ICM superior a 80% y Colombia se posiciona en el lugar 30 entre 182, es decir, registra un ICM entre 60 y 80% significando 72 puntos dado que su contribución en la exportación por minerales metálicos y carbón que fue de 21,5%, cifra que en el *ranking* lo hace subir al lugar 40 a nivel mundial respecto a la posición del año 2016 (ICMM, 2018).

Esta prevalencia histórica de lo económico, sobre lo social y lo ecológico, ha ocasionado que el deterioro ambiental sea un determinante clave en los procesos de enfermedad y un detonante negativo sobre la salud humana. Esto se ha evidenciado desde que el doctor Agapito Uribe Calad realizara en 1892 un diagnóstico en el campo de la higiene industrial, siendo este uno de los primeros registros que relacionó el trabajo minero y varias enfermedades.

Al respecto escribió:

la atmósfera de los socavones está casi siempre saturada de vapor de agua, lo que se puede probar colocando un cuerpo metálico de superficie bien pulida en el interior de una galería; el vapor de agua se condensa y aparece en forma de gotas sobre el cuerpo de la experiencia. Este vapor de agua condensado cae sobre la espalda y las otras partes del cuerpo

del trabajador y le produce enfriamientos que repetidos con frecuencia lo debilitan poco a poco. (Uribe, 1892, como se citó en Gallo y Márquez, 2011, p. 125).

Aunque en la actualidad son cada vez más evidentes los problemas de salud por los procesos de la minería, no está muy estudiada la relación; citando a Jesús Olivero-Verbel (2010), “la razón no es que los impactos y situaciones no existan, sino, que se ha realizado poca investigación” (p.3), por lo que este libro pretende ser un referente en el tema para Colombia.

Si bien existen algunos estudios toxicológicos, por ejemplo para el mercurio ampliamente utilizado en la minería de oro, en donde son investigadas las tres formas: elemental, inorgánico –sales de mercurio y óxido de mercurio– y orgánico, por poseer espectros diferentes de toxicidad, aunque todas ellas tienen en común su capacidad de inducir cambios en los sistemas neuronales de los humanos (Español-Cano, 2012); para el carbón se ha revisado la polución del aire y del agua ocasionada por el polvillo del carbón rico en cenizas y CO (Pulido, 2014), evidenciando que existen consecuencias sobre la salud humana. Sin embargo, no se han hecho evidentes problemas estructurales como la pobreza y la miseria presentes en las zonas donde se realizan los procesos extractivos, que se dan como una retroalimentación negativa del sistema al degradar el entorno y que ocasiona mayores niveles de empobrecimiento, combinado con las precarias condiciones en las que viven las personas, conllevando al detrimento generalizado de la calidad de vida de la comunidad y el abandono integral del Estado.

En estos territorios de minería y pobreza según la Organización Interamericana del Trabajo (OIT) se dan principalmente cinco riesgos para la salud asociados a la exposición al polvo (silicosis), la exposición al mercurio y a otros productos químicos, los efectos del ruido y la vibración, los efectos de la ventilación deficiente (calor, humedad, falta de oxígeno) y los efectos del esfuerzo excesivo, espacio insuficiente para trabajar y equipo inadecuado, generando condiciones de alto riesgo ocupacional (Español-Cano, 2012).

En cifras la dimensión social en la minería es poco relevante como lo demuestra la cobertura, ya que el 76% de los trabajadores de las minas, en pequeña escala sin título minero, se encuentran afiliados al régimen subsidiado de salud, lo que en la práctica indica que no se están reportando como empleados de las minas y por lo tanto el Estado los subsidia por su condición de desempleados. De igual forma, cabe destacar que en el 15% de las minas ilegales, los trabajadores no se encuentran afiliados a ningún sistema de salud. Así mismo, solo en el 7% de las minas en pequeña escala ilegales tienen afiliados a sus trabajadores al sistema de seguridad social en pensión y riesgos profesionales (Güiza, 2013).

Sin embargo, existen problemas no solo desde la salud y seguridad en el trabajo, como se ha venido señalando, se trata también de los problemas emergentes y sinérgicos, que deben verse de forma integral y que requieren una especial atención por su magnitud como son la presencia de mercurio en el aire y el suelo en las áreas auríferas del sur de Bolívar y del noreste antioqueño, que está siendo respirado por sus habitantes; la transformación en metilmercurio fluyendo hacia cuerpos de agua, incorporándose por bioacumulación en peces, el alimento de los pobladores (Olivero-Verbel, 2011); de forma que el sistema de retroalimentación negativa o círculo vicioso no se pueda romper generando mayores índices de pobreza, ignorancia y problemas de daños en la salud humana y de los ecosistemas.

De acuerdo a lo anterior, y parafraseando a Casadiego, Guzmán y Avendaño (2016), un desarrollo sin incluir la dimensión ambiental y social ocasiona que la riqueza minera de un país como Colombia, en lugar de un foco equilibrado de desarrollo, profundice la historia de miseria y violencia que ha sido la característica a lo largo de la historia ancestral de las regiones ricas en minería, como Chocó, Cesar, Cauca, sur de Bolívar y Antioquia.

Antioquia, por ejemplo, tiene como su principal producto minero el oro, ubicándose la minería en los municipios de Amalfi, Segovia, Remedios, Zaragoza, El Bagre, Frontino, Abriaquí, Caramanta y Cáceres; trayendo consigo que el mercurio entre en los ecosistemas terrestres y acuáticos y contamine la atmósfera.

En suelos, los estudios de Sánchez-Arredondo, Molina-Escobar y Machado-Serrano (2019) encontraron altos valores de mercurio (Hg) en el noreste antioqueño, los cuales están relacionados con depósitos de oro y plata, principalmente con las mineralizaciones filonianas de Segovia-Remedios, de Anorí y Bajo Cauca, donde se detectaron valores por encima de $860 \mu\text{g kg}^{-1}$ del metal. Estos valores son muy superiores al límite máximo permisible de $150 \mu\text{g kg}^{-1}$ (los suelos normales contienen típicamente entre 20 y $150 \mu\text{g kg}^{-1}$ Hg) (Kabata-Pendias y Pendias, 2001); la mediana del contenido de Hg en los sedimentos activos finos de corriente en el estudio de Sánchez Arredondo *et al.* (2019) fue de $67 \mu\text{g kg}^{-1}$.

En la atmósfera, Olivero-Verbel, Young-Castro y Caballero-Gallardo (2014) encontraron un alto grado de exposición a mercurio en el Distrito Minero de San Martín de Loba, ubicado en el sur de Bolívar, resultado del proceso de amalgamación de oro; concordando con estudios realizados en cabello humano proveniente de 12 sitios del sur de este departamento; los cuales revelaron que los niveles más altos fueron observados en personas que habitan los municipios de La Raya, donde se encontraron $5.27 \pm 0.32 \mu\text{g/g}$, Achi con $2.44 \pm 0.22 \mu\text{g/g}$ y en Montecristo $2.20 \pm 0.20 \mu\text{g/g}$, áreas cercanas a las zonas mineras. De igual forma se encontró que las concentraciones disminuían a medida que se alejaba de estas zonas (Olivero-Verbel, 2011).

En agua, Olivero-Verbel *et al.* (1998) encontraron que en la Ciénaga Grande de Achí (río Cauca) las especies de los eslabones más altos de la cadena trófica –consumidores terciarios– como *Ageneiosus caucanus* (doncella), *Caquetaia kraussii* (mojarra amarilla) y *Hoplias malabaricus* (moncholo) presentan las concentraciones de mercurio más altas, siendo estas superiores a los límites aceptados internacionalmente de $0,5 \mu\text{g/g}$ de mercurio para consumo de peces (WHO, 1991), llegando a $1,236 \mu\text{g/g}$ de mercurio en el primero. Posteriormente, Mancera-Rodríguez y Álvarez-León (2006) detectaron concentraciones de mercurio en tejidos musculares de *Brycon meeki*, *Rhamdia wagneri*, *Pomadasys bayanus* y *Hoplias malabaricus* procedentes del río Condoto, siendo esta última

especie la que presentó mayor cantidad de mercurio en sus tejidos con valores máximos de 0,731 mg Hg/Kg. Posteriormente este valor es superado por la especie *Sorubín cuspicaudus* con 0,743 mg Hg/Kg, de acuerdo al estudio realizado en la ciénaga de Ayapel, municipio de Córdoba (Gracia, Marrugo y Alvis, 2010), en donde se realiza minería aurífera de tipo aluvial, y que ha sido desarrollada de forma desordenada, registrando entre 1979 y 1998 el período de mayor explotación llegando a conformarse 40 centros mineros en las subcuencas de Quebradona, La Escobilla, Malanoche y Caño Barro (Díaz, 2009).

La cantidad de mercurio liberado al medio ambiente no ha sido calculada con exactitud, pero ha sido estimada en cerca de 80-100 toneladas al año (Olivero y Johnson, 2002), lo cual ha afectado la salud de los ecosistemas como se mostró anteriormente en las matrices agua, suelo y aire, y con ello la salud humana.

▣ Referencias

- Acosta-Bueno, D. M. (2016). *Impactos ambientales de la minería de carbón y su relación con los problemas de salud de la población del municipio de Samacá (Boyacá), según reportes ASIS 2005-2011* (tesis de especialización). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Aramburo, M. A. y Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Gestión y ambiente*, 15(3), 125-133.
- Casadiego, A. M., De Guzmán, B. P. y Avendaño, Á. E. (2016). Análisis de la iniciativa minera en Colombia. *Ingeniería y Región*, 15, 85-93.
- Castillo, J. S., Rincón, M. P. y Sánchez, M. G. (2018). Desvinculación económica del sector extractivo en Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(2), 38-45.
- DANE. (2019). *Boletín Técnico Pobreza Monetaria en Colombia. Año 2018*. Bogotá, Colombia.
- Díaz, M. M. (2009). Ciénaga de Ayapel: riqueza en biodiversidad y recursos hídricos. *Revista del Banco de la República, Centro de Estudios Regionales*, 112, 1-74.
- Donegan, T., Ellery, T., Pacheco, A., Verhelst, J. C. y Salaman, P. (2018). Revision of the status of bird species occurring or reported in Colombia 2018. *Conservación Colombiana*, 25, 4-47.
- Español-Cano, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*, 32(3), 309-312.
- Gallo Vélez, Ó. y Márquez Valderrama, J. (2011). La enfermedad oculta: una historia de las enfermedades profesionales en Colombia, el caso de la silicosis (1910-1950). *Historia Crítica*, 1(45), 114-143.

- Garay-Salamanca, L. J. (2013). *Minería en Colombia*. Bogotá, Colombia: Contraloría General de la República.
- Gracia, L., Marrugo, J. L. y Alvis, E. M. (2010). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28(2), 118-124.
- Gómez Bautista, J. A. (2013). La minería y los principios de precaución y prevención en las políticas públicas ambientales en el eje cafetero. *Revista Jurídicas*, 10(1), 225-238.
- Güiza, L. (2013). La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. *Dyna*, 80(181), 109-117.
- ICMM. (2016). *Metals & minerals*. Recuperado de: <https://www.icmm.com/en-gb/metals-and-minerals>
- ICMM. (2018). *Mining and national economies*. Recuperado de: <https://www.icmm.com/en-gb/society-and-the-economy/role-of-mining-in-national-economies>
- Kalmanovitz, S. (2006). El PIB de la Nueva Granada en 1800: auge colonial, estancamiento republicano. *Revista de Economía Institucional*, 8(15), 161-183.
- Kalmanovitz, S. y López, E. (2008). *El ingreso colombiano en el siglo XIX*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/228990054_El_ingreso_colombiano_en_el_siglo_XIX
- Kalmanovitz, S. (2008a). Consecuencias económicas de la independencia en Colombia. *Revista de Economía Institucional*, 10(19), 207-233.
- Kabata-Pendias A. y Pendias, H. (2001) *Trace elements in soils and plants*. Florida: CRC press LLC.

- Leal, M. C. y Morales, J. F. (2013). Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia. En L.J., Garay (Ed.), *Minería en Colombia: Derechos, Políticas Públicas y Gobernanzas*. (89-119). Bogotá, Colombia: Contraloría General de la República.
- Leal, C. (2009). La compañía Minera Chocó Pacífico y el auge del platino en Colombia, 1897-1930. Universidad de los Andes, Colombia. *Historia Crítica. Edición Especial*, 1, 150-164.
- Mancera-Rodríguez, N. J y Álvarez-León, R. (2006). Current State of Knowledge of the Concentration of Mercury and Other Heavy Metals in Fresh Water Fish in Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3-23.
- Maxwell, S. L., Fuller, R. A., Brooks, T. M. y Watson, J. E. (2016). Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature News*, 536(7615), 143-145.
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). *Censo minero departamental 2010-2011*. Bogotá, Colombia.
- Noejovich, H., Salazar-Soler, C., Suárez, M., Glave L. M. y Salas, M. (2009). *Compendio de historia económica del Perú II: Economía del período colonial temprano*. Lima: Banco Central de Reserva del Perú.
- Olivero-Verbel, J., Solano, B. y Acosta, I. (1998). Total mercury in muscle of fish from two marshes in goldfields, Colombia. *Toxicol*, 61(1), 182-187. doi:10.1007/s001289900746
- Olivero-Verbel, J. (2013). Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana. Recuperado de: <http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Minería-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jesús-Olivero-Verbel.pdf>

- Olivero-Verbel, J. y Johnson, B. (2002). *El lado gris de la minería del oro: la contaminación con mercurio en el norte de Colombia*. Colombia: Editorial Universitaria.
- Olivero-Verbel, J., Young-Castro, F. y Caballero-Gallardo, K. (2014). Mercury air pollution in the gold mining district of the municipality of San Martín de Loba, Bolívar Department, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 7-13.
- Pérez, M. M., y Betancur, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad y Ambiente*, (10), 95-112.
- Pulido, T.I. (2014). Impacto ambiental del polvillo del carbón en la salud en Colombia. *CES Salud Pública*, 5(1), 77-81.
- Salazar-Soler, C. (2009). *Minería y moneda en la época colonial temprana*. Lima, Perú: IEP Instituto de Estudios Peruanos, Banco Central de Reserva del Perú.
- Sánchez Arredondo, L. H., Molina Escobar, J. M. y Machado Serrano, R. I. (2019). Línea base del mercurio, departamento de Antioquia: sedimentos activos finos de corriente escala 1:500.000. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 13-23. doi: 10.22395/rium.v18n34a1
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. y Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98.
- Tirado, V., García, M. A., Moreno, J., Galeano, L. M., Lopera, F. y Franco, A. (2000). Pneuropsychological disorders after occupational exposure to mercury vapors in El Bagre (Antioquia, Colombia). *Revista de Neurología*, 31(8), 712-716.

- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2006). Colombia País Minero – Plan Nacional para el Desarrollo Minero visión al año 2019. Bogotá, Colombia.
- Uribe Calad, Agapito. (1892). *Trastornos medulares de origen complejo en los mineros*. Medellín: Imprenta del departamento.
- Urrutia, M. (2008). Los eslabonamientos y la historia económica de Colombia. *Revista Desarrollo y Sociedad*, (62), 67-88.
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Gałuszka, A. y Jeandel, C. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269). doi: 10.1126/science.aad2622
- World Wide Fund for Nature (WWF). (2018). Informe Planeta Vivo - 2018: Apuntando más alto - Resumen. En M. Grooten y R.E.A, Almond (Eds). *WWF, Gland, Suiza*. Recuperado de: http://awsassets.wwf.es/downloads/informe_planeta_vivo_2018.pdf
- Zamora, M. E., Huerta, A. H., Maqueo, O. P., Badillo, G. B. y Bernal, S. I. (2016). Cambio global: el Antropoceno. CIENCIA ergo-sum. *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 23(1), 67-75.

Capítulo 2

Lyda Espitia-Pérez
Karina Pastor-Sierra
Claudia Galeano-Páez

Pedro Juan Espitia-Pérez;
Shirley Salcedo-Arteaga
Luisa Jiménez-Vidal



Minería de carbón: impactos en el medio ambiente y la salud



▣ Introducción

La minería es un sector estratégico para el desarrollo económico mundial y, por supuesto, para Colombia; los tratados de libre comercio, el aumento de la inversión extranjera y el amplio respaldo del gobierno nacional a la llamada locomotora minera ha permitido que las utilidades económicas de este sector hayan aumentado en los últimos quince años, extendiendo el auge de los procesos extractivos e incentivando la inversión en el sector minero (Otero, 2012).

En el país la minería de carbón ha sido la de mayor importancia, dado que el territorio colombiano es el principal productor de carbón en América Latina, ocupando el undécimo lugar en el mundo, y constituyéndose en el quinto mayor exportador; adicionalmente la minería de carbón ha sido la de mayor dinamismo con una tasa anual promedio de crecimiento de 6,7%, cifras históricas de producción de 90,5 millones de toneladas, aportes de 1,35 billones de pesos en regalías en 2016, que representan el 80,2% del total recaudado por el sector minero (Hernández-Jatib *et al.*, 2014).

A pesar de las bondades económicas de la extracción de carbón, esta actividad posee unas de las mayores capacidades de polución. Lo anterior dado que las operaciones de extracción de carbón generan material particulado (PM), que por su pequeño tamaño pueden transportarse a través de grandes distancias, ocasionando implicaciones ambientales

sobre la salud de las comunidades humanas y biológicas, que empiezan a nivel local y se expanden a un ámbito regional, resultando en un problema de salud pública. (Olivero-Verbel, 2010).

Los diferentes componentes del material particulado pueden tener diversos impactos en la salud y, aunque el aumento de la concentración de partículas está asociado con el aumento de la mortalidad y la morbilidad, diversas investigaciones sobre los mecanismos de la toxicidad inducida por PM han coincidido en que estos mecanismos se encuentran mediados por la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO), estrés oxidante, daño oxidante y daño en el ADN (Espitia-Pérez, Jiménez-Vidal y Espitia-Pérez, 2019).

Las partículas de PM ingresan al organismo vía inhalación, penetrando y depositándose en el tracto respiratorio en función de su diámetro y composición. Una vez son absorbidos por los alvéolos actúan como cuerpos extraños, produciendo una variedad de efectos celulares relacionados con procesos inflamatorios, daño en el ADN e inestabilidad genómica, pudiendo actuar como potenciales desencadenantes de problemas respiratorios, cardiopulmonares, neurodegenerativos y cancerígenos (Santibañez *et al.*, 2017).

En el presente capítulo se realiza un análisis de la explotación de carbón en Colombia, describiendo las principales características de cada sistema de minería, procesos de explotación y sus efectos en el ambiente y la salud de las comunidades con exposición ocupacional y ambiental. Todos estos aspectos son analizados a la luz de estudios científicos recientes que permiten abordar los procesos extractivos de este mineral bajo un enfoque de riesgo.

Minería de carbón

Generalidades

El carbón es el segundo recurso natural no renovable después del petróleo, utilizado para procesos tecnológicos e industriales, que de manera directa o indirecta hace parte del sustento económico y capacidad de

desarrollo de las naciones. Es una roca sedimentaria, que al igual que todos los combustibles fósiles, consiste en una compleja y variada mezcla de componentes orgánicos sólidos fosilizados a lo largo de millones de años (Aneja, Isherwood y Morgan, 2012). En su estructura química incluye átomos de carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre asociados con otros elementos rocosos (como arenisca, limolita y diamictitos) y minerales (como la pirita) siendo una de las mayores fuentes naturales de hidrocarburos.

A nivel mundial, el carbón es considerado la principal fuente de energía eléctrica, generando cerca del 40% de la energía primaria empleada en el mundo (Mfumo y González, 2017). Su calidad está directamente asociada al contenido de carbono y varía de acuerdo con el tipo y edad del yacimiento (Chadwick, Highton y Lindman, 2013). En función del grado de carbonificación, el carbón puede ser categorizado en cuatro clases considerando la composición y las condiciones de presión y temperatura –grado de metamorfismo– a los cuales estuvo sometido durante su formación (UPME, 1995). Una de las clasificaciones más exactas al respecto se muestra en la tabla 1 y corresponde a la realizada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM D-388-777).

Producción Mundial

El mundo consume actualmente más de 4050 millones de toneladas (Mt) de carbón al año, por lo que este se ha mantenido como combustible en la generación de energía para una amplia gama de usos (generación de electricidad, la producción de hierro y acero, la producción de cemento y como combustible líquido). Se espera que la producción global de carbón alcance los 7000 millones de toneladas en 2030, distribuida de la siguiente manera: carbón térmico 5200 millones de toneladas, carbón de coque 624 millones de toneladas y carbón bituminoso 1200 millones de toneladas.

Así, existen tres grandes mercados de carbón: el asiático, el europeo y el estadounidense. El primero actualmente representa el 54% del consumo mundial y es abastecido esencialmente por Australia, Indonesia, Canadá,

Sudáfrica y China; siendo el territorio asiático el mayor productor de carbón, estimulado por el acelerado crecimiento económico que a su vez también lo ha transformado en el mayor consumidor mundial.

Europa se ha destacado en el uso de este combustible fósil y hoy la zona de los montes Urales, al este de Rusia, es la principal productora del continente, y también se mantiene la importancia de Alemania, Polonia, Países Bajos y Reino Unido; sin embargo, el mercado europeo es abastecido además por Sudáfrica, Colombia y EE. UU. El mercado estadounidense se autoabastece dado que dispone de reservas y que cuenta con factores importantes como la calidad e infraestructura.

América del Sur, al contrario de los vecinos del norte, no es un continente que sobresalga en la actualidad por su producción de carbón. Sin embargo, Colombia se destaca por sus importantes reservas; es el mayor productor de carbón del continente y figura en el puesto número 10 de los grandes productores mundiales (Moreno, 2017).

Producción en Colombia

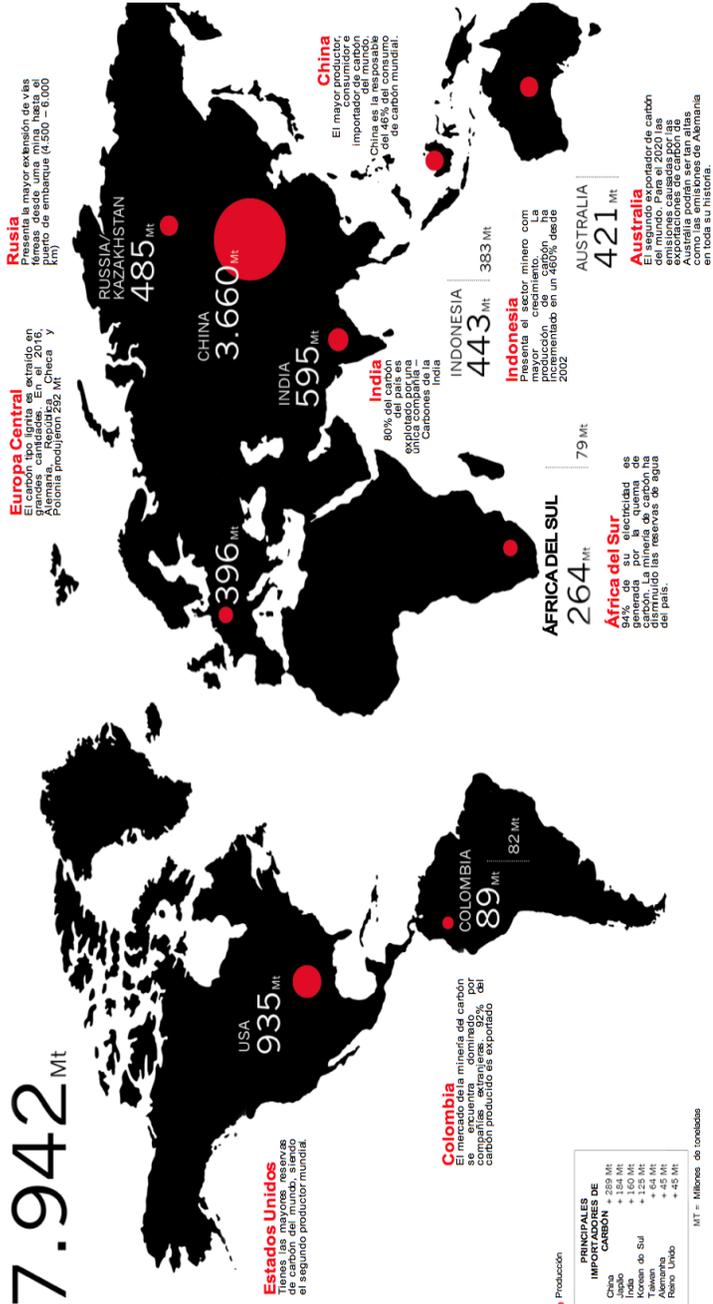
Colombia posee las mayores reservas de carbón de América Latina y hace parte del grupo de exportadores más jóvenes del mercado mundial. La mayor parte de las reservas se encuentran localizadas en la Costa Atlántica (90% de la producción de carbón de Colombia es extraído en las zonas mineras de Cesar y La Guajira por empresas multinacionales como BHP-Billiton, Xtrata, Drummond, Glencore y Anglo-American), donde el 90% corresponde a carbón de tipo térmico, que a su vez corresponde al 98% del carbón nacional. El 10% restante de la producción es generado por pequeños y medianos mineros como Interamerican Coal, Carbones del Caribe, Argos, Milpa, Mineralex, Acerías Paz del Río, Gemsa, Coquecol y Carbocoque en zonas mineras de los departamentos de Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca (figura 2) (Jähnig, 2013).

Figura 2.

Identificación geográfica de los principales productores de carbón del mundo

Producción global 2015

7.942 Mt



● Producción

PRINCIPALES IMPORTADORES DE CARBÓN	
China	+ 289 Mt
India	+ 160 Mt
Korea del Sur	+ 125 Mt
Alemania	+ 64 Mt
Reino Unido	+ 45 Mt

MT = Millones de toneladas

Fuente: Adaptado de Schucking (2013).

Figura 3.

Distribución geográfica de las reservas de carbón en Colombia



Fuente: Modificado de Jähnig (2013).

Los recursos potenciales son de aproximadamente de 16 569 millones de toneladas (Mt), que lo ubican como uno de los países con las mayores reservas a nivel mundial. La producción de carbón colombiano

(figura 3) corresponde al 1,2% de la producción mundial equivalente a 89,5 Mt de carbón anual, 93% de este es exportado, lo que nos convierte en el quinto exportador mundial de carbón. Así, la producción de carbón en el país concentra el 47% de la actividad de minería del país y representa el 1,36% del producto interno bruto colombiano, lo que significa el 67,5% (USD 3.235,1 millones) del PIB minero y el 87,7% del total de regalías mineras recaudadas (UPME, 1995).

Sistemas de minería de carbón

Se entiende como sistema minero al conjunto interrelacionado de técnicas y procesos que llevan a cabo la extracción de los minerales en una forma repetitiva, rutinaria e iterativa. Los métodos de extracción de carbón están determinados por las condiciones geológicas del yacimiento (tamaño, calidad, profundidad, etc.), por el valor del recurso y por las restricciones ambientales y legales prevalecientes al momento del desarrollo del proyecto. En función de esto, de los sistemas de arranque y transporte, los procedimientos específicos para la extracción de los materiales y los equipos utilizados, se distinguen en la literatura dos métodos de explotación:

- ▶ **Minería a cielo abierto:** es la minería más común, y es posible cuando las capas de carbón se encuentran a pocos metros desde la superficie. El proceso de extracción consiste en la remoción de grandes cantidades de suelo y subsuelo, dejando expuestas las capas de carbón que luego son explotadas utilizando maquinaria pesada.
- ▶ **Minería subterránea:** en este tipo de minería el carbón se encuentra localizado a grandes profundidades desde la superficie, por lo que se requiere de maquinaria especializada para la perforación de las capas de tierra, el establecimiento de instalaciones eléctricas, de ventilación e iluminación previo a los procesos de excavación manual o sistematizada del carbón (Finkelman *et al.*, 2002).

La elección entre un método de extracción y otro, además de los aspectos antes mencionados, considera la calidad del carbón en la veta y la superficie expuesta de un manto de carbón. Gran parte de los carbones explotados contienen impurezas o materiales no carboníferos, localizados juntos, por debajo o por encima de la veta, que afectan el poder calorífico del carbón, las emisiones relacionadas con su quema y su precio en el mercado. Por ejemplo, la concentración y presencia de impurezas puede afectar las emisiones atmosféricas generadas durante la quema del carbón, incidiendo en la capacidad de ser utilizado en industrias como la eléctrica, al no cumplir con la normatividad de emisiones permitidas. En un sistema de extracción a cielo abierto estas impurezas pueden ser separadas en los denominados *pits* (áreas de explotación) o por la maquinaria de superficie sin necesidad de establecer una planta de procesamiento adicional. Sin embargo, en la minería subterránea, el carbón es extraído junto con otras impurezas como arcilla, pirita y sílice, muchas veces para mantener una altura adecuada para el trabajo de los operarios o para la estabilidad del techo del socavón. Este carbón “impuro” debe posteriormente ser limpiado en la superficie en una planta de procesamiento. Esta necesidad de limpiar prácticamente todo el carbón extraído en minas subterráneas aumenta considerablemente el costo de este tipo de minería (Schucking, 2013).

Residuos generados durante la minería de carbón

La minería de carbón es una de las actividades con mayor capacidad de contaminar. Dependiendo del sistema de producción utilizado en el yacimiento existen diferentes tipos de residuos que afectan en menor o mayor medida la salud de las poblaciones biológicas y el medio ambiente (Zakrzewski, 2002).

La tabla 1 muestra algunos de los principales contaminantes ambientales y sustancias químicas detectadas en sistemas de minería subterránea y a cielo abierto alrededor del mundo. Según los datos allí consignados, mientras que los principales residuos de la explotación a cielo abierto

incluyen al material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) constituido por elementos orgánicos volátiles y metales (Espitia-Pérez *et al.*, 2016), en sistemas de minería subterráneos son más comunes los gases de invernadero, que pueden migrar hasta la superficie y generar riesgos de explosiones y los hidrocarburos alifáticos producto de la combustión espontánea del carbón en contacto con la atmósfera. En las siguientes páginas revisaremos las principales características y efectos de algunos de estos residuos.

Tabla 1.

Principales compuestos detectados en el PM sistemas de minería subterránea y a cielo abierto alrededor del mundo.

Compuesto	Tipo de muestra	País	Tipo	Ref.
Compuestos orgánicos volátiles (COV)				
Etilbenzeno, Benzeno	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Antraceno	Muestras incendiadas de escoria	Portugal	Subterránea	(Ribeiro, da Silva y Flores, 2010)
Pireno, Fenantreno	Filtros de PM_{10} , $PM_{2.5}$	Grecia	A cielo abierto	(Evagelopoulos <i>et al.</i> , 2010)
Benzo[a]antraceno	Filtros de PM_{10} , $PM_{2.5}$	Grecia	A cielo abierto	(Evagelopoulos <i>et al.</i> , 2010)
Benzo[k]fluorantreno	Muestras incendiadas de escoria	Portugal	Subterránea	(Ribeiro, da Silva y Flores, 2010)
Fluoreno	Muestras incendiadas de escoria	Portugal	Subterránea	(Ribeiro, da Silva y Flores, 2010)
Hidrocarburos halifáticos				
Etano	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Eteno	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
1-Buteno	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Cis-2-penteno	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
n- Heptano	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Ciclopentano	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
n-Octano	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Gases de invernadero y otros				
Metano	Gases de carbón	E. U	Subterránea	(Kirchgessner, Piccot y Masemore, 2000)
Monóxido de carbono	Gases de carbón	EE. UU	Subterránea	(Kirchgessner, Piccot y Masemore, 2000)

Compuesto	Tipo de muestra	País	Tipo	Ref.
Dióxido de carbono	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Óxidos				
SiO ₂	Muestras de carbón y cenizas	Rep. Checa	A cielo abierto	(Tichý y Mejstřík, 1996)
K ₂ O	Cenizas de carbón	China	A cielo abierto	(Xing <i>et al.</i> , 2016)
Ti ₂ O	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
CaO	Cenizas de carbón	China	A cielo abierto	(Xing <i>et al.</i> , 2016)
Na ₂ O	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Fe ₂ O ₃	Muestras de escoria y cenizas	China	A cielo abierto	(Zhao <i>et al.</i> , 2008)
CaSO ₄	Muestras de escorias y ventilas	China	Subterránea	(Querol <i>et al.</i> , 2008)
SO ₃	Gases de fumarolas	Sudáfrica	Subterránea	(Pone <i>et al.</i> , 2007)
Metales				
C	Filtros de PM ₁₀	Colombia	A cielo abierto	(Huertas, Huertas y Solis, 2012)
Ca	Muestras de carbón	EE. UU	A cielo abierto	(Damle y Ranade, 1981)
Cd	Muestras de TSP*	Grecia	A cielo abierto	(Petaloti <i>et al.</i> , 2006)
Al	Muestras de TSP*	Grecia	A cielo abierto	(Petaloti <i>et al.</i> , 2006)
Cu	Filtros de PM _{2.5}	Colombia	A cielo abierto	(Espitia-Pérez <i>et al.</i> , 2018)
Cr	Filtros de PM _{2.5}	Colombia	A cielo abierto	(Espitia-Pérez <i>et al.</i> , 2018)
As	Filtros de PM _{2.5}	Colombia	A cielo abierto	(Espitia-Pérez <i>et al.</i> , 2018)
S	Filtros de PM _{2.5}	Colombia	A cielo abierto	(Espitia-Pérez <i>et al.</i> , 2018)
Be	Muestras de escoria y cenizas	China	A cielo abierto	(Zhao <i>et al.</i> , 2008)
Si, Se	Muestras de escoria y cenizas	China	A cielo abierto	(Zhao <i>et al.</i> , 2008)
Pb	Muestras de escoria y cenizas	China	A cielo abierto	(Zhao <i>et al.</i> , 2008)
Zn	Muestras de TSP*	Grecia	A cielo abierto	(Petaloti <i>et al.</i> , 2006)

*Material Particulado Suspendido Total;

Fuente: Modificado de Espitia-Pérez *et al.* (2016)

Material particulado PM10, PM2.5 y PM0.1

El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) puede ser dividido básicamente en tres grupos definidos según el tamaño aerodinámico: el primer grupo es PM₁₀ (con tamaños entre 2.5 y 10 micrómetros), también llamado fracción gruesa o fracción respirable, por su capacidad de ingresar al tracto respiratorio; esta fracción es producida principalmente por procesos mecánicos. El segundo grupo es PM_{2.5} o fracción fina derivado principalmente de fuentes de combustión secundaria y aerosoles y cuyo diámetro aerodinámico es $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (Li *et al.*, 2016). Finalmente, hablamos de partículas ultrafinas con un tamaño aerodinámico $< 0.1 \mu\text{m}$; estas son generadas por procesos fotoquímicos y de combustión (Li *et al.*, 2016). Esta división es bastante conveniente considerando que las fracciones de diámetros aerodinámicos diferentes poseen propiedades físicas y químicas distintas e igualmente mayor o menor impacto en los organismos vivos (Queiroz, Jacomino, y Menezes, 2007).

El PM generado en las minas de carbón es una mezcla compleja de partículas que varían no solo en tamaño y morfología, sino también en sus características químicas y físicas que a su vez dependen de la composición del carbón (López y Ward, 2008; Valentim, Guedes, Flores, Ward, y Hower, 2009). Las actividades de minería de carbón que generan estas partículas son la perforación, detonación, carga y descarga del carbón y el transporte terrestre en caminos no pavimentados (Huertas, Huertas y Solis., 2012). El PM inhalable (que engloba las partículas finas y gruesas) se encuentra constituido por sulfatos, nitratos, amoníaco, metales Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y otros) y agua (Yanagi, Assunção y Barrozo, 2012)

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente. Durante los procesos de explotación de carbón a cielo abierto, la combustión espontánea del material almacenado luego de los procesos de extracción puede liberar emisiones del tipo de

los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) (Stracher, Prakash y Sokol, 2010). Los HAPs son sustancias orgánicas constituidas por átomos de carbono e hidrógeno agrupados en por lo menos dos estructuras de anillos aromáticos, que pueden ser divididos en:

- ▶ **HAPs de bajo peso molecular:** formados por menos de 5 anillos condensados
- ▶ **HAPs de alto peso molecular:** formados por más de 5 anillos condensados

Las características lipofílicas de los HAPs permiten su fácil difusión en las membranas celulares (Yu, Tsunoda y Tsunoda, 2011). Las principales vías de exposición a los HAPs en la población general son la inhalación, la ingestión y el contacto dérmico; sin embargo, algunas exposiciones pueden involucrar varias vías de exposición simultánea como la dérmica por la inhalación de aire contaminado, afectando la dosis total de absorción (ACGIH, 2005).

Metales

Los metales son sustancias con alta conductividad eléctrica, maleabilidad y brillo con un alto potencial reductor (Jaishankar *et al.*, 2014). A pesar de que son elementos presentes naturalmente en la corteza terrestre, la mayoría de la contaminación ambiental con metales es resultado de actividades antrópicas como las operaciones de minería y fundición, producción industrial y uso doméstico y agrícola de compuestos con contenido metálico (Adriano, 2001; He, Yang, y Stoffella, 2005; Madejón *et al.*, 2002).

Algunos de los elementos generados durante las actividades de extracción de carbón que han sido asociados con problemas de toxicidad incluyen algunos metales pesados altamente presentes en el carbón como el cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni), vanadio (V), zinc (Zn) y azufre (S), los cuales también pueden estar presentes en la combustión de este mineral (Tchounwou *et al.*, 2012).

Efectos sobre la salud de algunos residuos generados en la minería de carbón

El tamaño es un factor importante que influencia la forma como el PM se deposita en el tracto respiratorio y cómo afecta la salud humana. Las partículas grandes son filtradas por la nariz y la garganta y no necesariamente causan problemas; sin embargo, la fracción $PM_{2.5}$, puede llegar fácilmente a los bronquiolos y alvéolos terminales, desde donde puede ser fagocitado por los macrófagos alveolares y atravesar la barrera alveolar capilar para ser transportado a otros órganos por la circulación sanguínea, por esta razón representa un alto riesgo para la salud (Barja *et al.*, 2013; Kaonga y Kgabi, 2011).

Las partículas ultrafinas por su tamaño más pequeño y su mayor relación superficie/masa pueden tener una mayor biodisponibilidad de los productos químicos. Una vez en la corriente sanguínea, los metales y partículas en la superficie del PM puede generar daños oxidativos y genotoxicidad (daño en el DNA) (figura 4). El grado de deposición del $PM_{2.5}$ en el pulmón es determinada por la concentración inhalada, la estructura del tejido y la capacidad de compensación de los cilios de las vías aéreas.

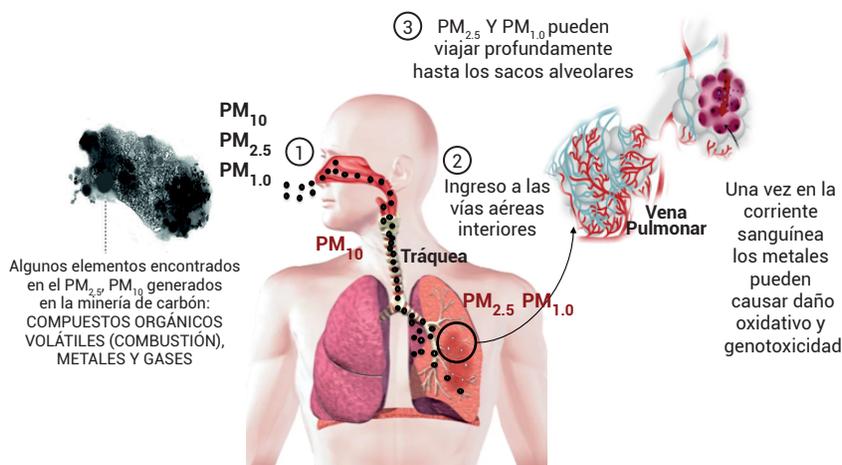
El daño resultante para los cilios de las vías aéreas y la reducida capacidad de ejecutar la limpieza de las vías aéreas impide la eliminación oportuna del $PM_{2.5}$ de los pulmones (Ling y van Eeden, 2009). En un ambiente contaminado, cada alveolo entra en contacto con un promedio de 1500 moléculas en un período de 24 horas (Oyarzún, 2010).

Aproximadamente el 50% de los depósitos de PM ocurren en el alveolo, 96% de los cuales son constituidos por $PM_{2.5}$ (Valavanidis, Fiotakis y Vlachogianni, 2008). Una revisión detallada sobre la asociación entre los residuos de material particulado generados durante las actividades de minería de carbón y la presencia de algunas enfermedades es descrita en la tabla 2. La agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos (USEPA) ha demostrado que la polución con PM tiene una

relación directa con cambios en la función pulmonar y enfermedades respiratorias en las poblaciones expuestas. Este tipo de polución también se encuentra relacionada con un aumento en la mortalidad a corto plazo. De hecho, la tasa de mortalidad inducida por la polución varía entre el 2% y el 8% por cada $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM inhalado (Roy *et al.*, 2016).

Figura 4.

Deposición del material particulado en las vías respiratorias



Fuente: Adaptado de USEPA (1996)

Tabla 2.

Principales estudios sobre la prevalencia de cáncer y otras enfermedades relacionadas con la exposición (OCU) y ambiental (AMB) a PM generado por la minería de carbón.

Área de estudio	Tipo de exposición	Principales conclusiones	Ref.
Colombia	AMB	Niños de corregimientos próximos a depósitos mineros y de corregimientos con tráfico del Departamento del Cesar tuvieron mayor proporción de casos probables de asma; mientras que los del corregimiento con tráfico se ausentaron más días por enfermedad respiratoria aguda.	(Quiroz <i>et al.</i> , 2013)

Área de estudio	Tipo de exposición	Principales conclusiones	Ref.
España	AMB	Las operaciones de minería pueden liberar sustancias tóxicas que pueden causar problemas de salud en las poblaciones. Los autores detectaron un exceso de mortalidad por cáncer colorectal, cáncer de vejiga, leucemia y cáncer de pulmón, especialmente relacionados con la proximidad a sistemas de minería a cielo abierto.	(Fernández-Navarro et al., 2012)
Gran Bretaña	OCU	La mortalidad por cáncer de pulmón está asociada con la exposición a material particulado con alto contenido de cuarzo de las minas de carbón.	(Miller y MacCalman, 2010)
Estados Unidos	AMB	La exposición ambiental a PM o agentes tóxicos presentes en el carbón y que son liberados en los procesos de minería/procesamiento pueden estar involucrados en la alta tasa de mortalidad por enfermedad cardíaca, respiratoria y renal en áreas de minería de carbón.	(Hendryx, 2009)
	AMB	La exposición ambiental a residuos de minería de carbón a cielo abierto se encuentra significativamente relacionada con las tasas de hospitalización por enfermedades respiratorias. Esta relación no es significativa para el caso de pobladores en proximidades de minas subterráneas.	(Brink et al., 2014)
	AMB	Altos niveles de producción de carbón están directamente correlacionados con las altas tasas de enfermedades cardiovasculares, hipertensión, enfermedades pulmonares, enfermedades renales etc.	(Hendryx y Ahern, 2008)
China	OCU	La neumoconiosis de los mineros, caracterizada por lesiones inducidas por el PM en las regiones de intercambio gaseoso en el pulmón, está asociada a la minería de carbón, principalmente por la inhalación de PM _{2.5} .	(Finkelman et al., 2002)
	OCU	El riesgo de cáncer de pulmón fue superior entre trabajadores de minas de carbón que en individuos de una población control.	(Hosgood et al., 2012)
Inglaterra	AMB	Los niños residentes de comunidades en proximidad a minas de carbón a cielo abierto están expuestos a una significativa cantidad de PM ₁₀ . Igualmente fueron encontradas evidencias sobre la posible asociación entre residir en las proximidades de las minas y el incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias como asma grave.	(Pless-Mulloli et al., 2000)
	OCU	Identificaron evidencias de que la neumoconiosis y otras enfermedades respiratorias están asociadas con la exposición a material particulado respirable con alto contenido de cuarzo.	(Love et al., 1997)

Fuente: elaboración propia, 2020.

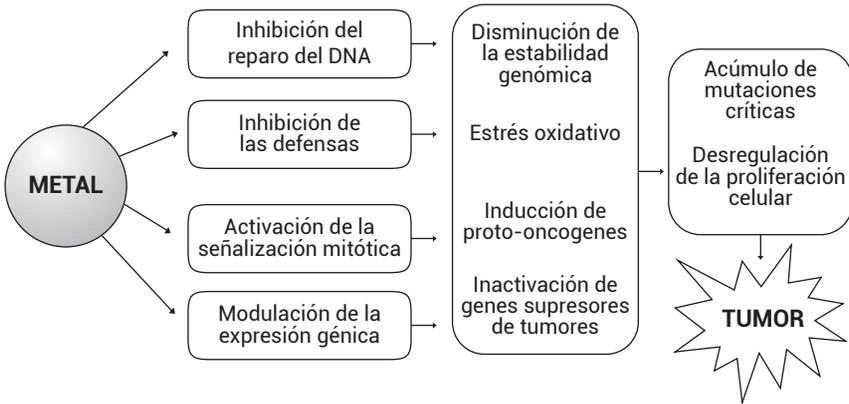
Además del PM, la exposición aguda a HAPs, ha sido relacionada con la reducción de la función pulmonar en asmáticos y efectos trombóticos en personas expuestas afectadas por enfermedades cardíacas y coronarias (ACGIH, 2005). En poblaciones con exposición ocupacional, a niveles elevados de mezclas de contaminantes que contienen HAPs han sido relacionados con la presencia de síntomas como irritación de ojos, náuseas, vómitos, diarrea, etc (Unwin *et al.*, 2006). Otros estudios en la misma población sugieren una relación directa con el riesgo de cáncer de piel, pulmón, vejiga y gastrointestinal (Bach *et al.*, 2003; Boffetta, Jourenkova y Gustavsson, 1997; Olsson *et al.*, 2010).

La exposición crónica a bajos niveles de algunos HAPs (por ejemplo Pireno y Benzo(a)pireno) han sido relacionados con la aparición de cáncer en animales de laboratorio (Diggs *et al.*, 2012). Otros efectos sobre la salud relacionados con la exposición crónica a HAPs pueden incluir la disminución de la función inmunológica, cataratas, daños en el riñón e hígado (ictericia) (ATSDR, 1995), problemas respiratorios con síntomas semejantes al asma y alteraciones de la función pulmonar (Srogi, 2007). Las figuras 5 y 6 muestran algunos de los principales efectos sobre la salud originada por la exposición aguda y crónica a metales y HAPs respectivamente.

Además de las reacciones características de algunos metales que pueden ser la causa de reacciones alérgicas, envenenamiento, daño a órganos específicos como riñones e hígado (Järup, 2003), uno de los principales impactos de la exposición a metales se relaciona con su capacidad de generar procesos carcinogénicos (Beyersmann y Hartwig, 2008).

Figura 5.

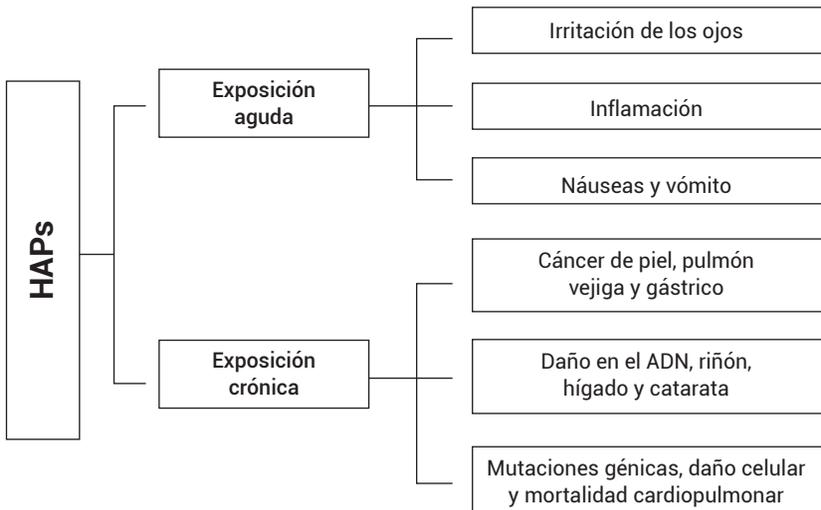
Efectos en la salud causados por la exposición de corto y largo plazo a metales



Fuente: Adaptado de Rengarajan et al.(2015).

Figura 6.

Principales mecanismos de inducción de carcinogénesis por HAPs



Fuente: Beyersmann y Hartwig (2008).

Aspectos ambientales relacionados con la minería de carbón

Impactos ambientales sobre diferentes matrices bióticas

Los procesos de extracción y procesamiento de carbón comprenden una serie de acciones que producen significativos impactos ambientales, que perduran más allá de la duración de las operaciones de extracción. Estudios sobre los impactos ambientales de la minería de carbón han demostrado que los principales efectos de los sistemas de explotación tanto a cielo abierto como subterráneos ocurren sobre la atmósfera, el suelo, el agua, la vegetación, la fauna y el paisaje (Adriano, 2001; Madejón *et al.*, 2002). La figura 7 resume los principales impactos de los sistemas de minería de carbón sobre las diferentes matrices bióticas y abióticas, dichos impactos se amplían a continuación haciendo énfasis en los sistemas de minería en Colombia.

Atmósfera

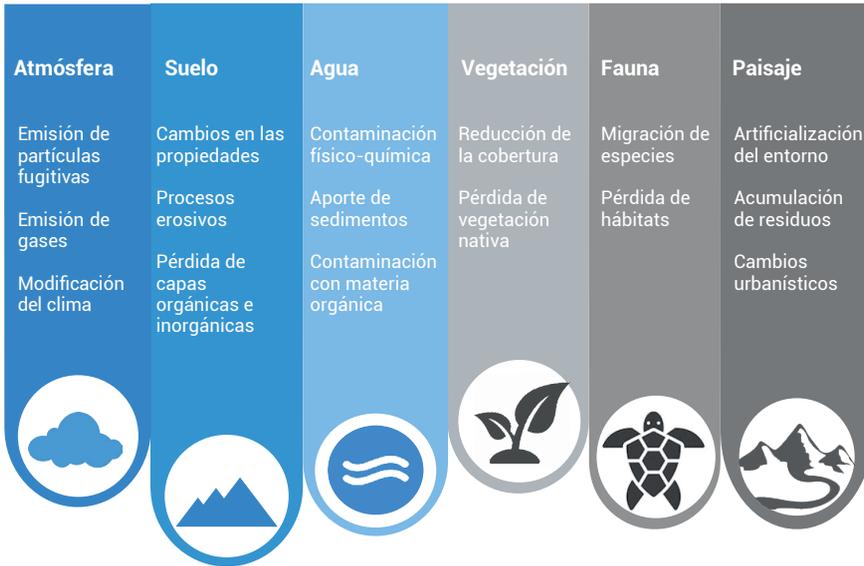
En la atmósfera los impactos están relacionados con la alteración de la calidad del aire por PM, emisión de gases e incremento de niveles de ruido. El PM es el grupo de contaminantes de mayor generación, principalmente por las actividades de remoción de las capas de suelo, cargue, transporte y de los procesos de trituración del carbón, al llegar a la atmósfera pueden ser esparcidos por varios kilómetros por acción del viento, generando luego su deposición (Consejo Nacional de Investigación, 2006) y ocasionando alteraciones de las condiciones meso y microclimáticas.

Estudios sobre la composición del material particulado atmosférico confirman la actividad minera como la fuente principal de emisión de contaminantes metálicos en la atmósfera sobre la región de La Guajira, algunos de ellos como el arsénico que sobrepasa el límite permisible de la OMS en las zonas durante diferentes períodos de muestreo (Doria

y Fagundo, 2017) En la misma zona, Espitia-Pérez, Da Silva, Espitia-Pérez, Brango, Salcedo-Arteaga, Hoyos-Giraldo y Henriques (2018) encontraron 13 elementos por encima del límite de detección: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, S, Cr, Cl, Cu y Zn en muestras del material particulado PM_{2.5} de las zonas controles y expuestas, lo que sugiere un origen a partir de fuentes antropogénicas en ambas regiones; sin embargo, existen diferencias en los factores de enriquecimiento para las concentraciones de azufre y cromo en el área de minería y en las áreas control. Los mismos investigadores determinaron en extractos polares del PM de la zona, hidrocarburos aromáticos policíclicos oxidados (Oxy-HAPs), un grupo de derivados de los HAPs altamente persistentes en el medio, que tienden a ser más tóxicos que los HAPs.

Figura 7.

Principales impactos sobre el medio ambiente originados por sistemas de minería a cielo abierto y subterránea



Fuente: elaboración propia.

Los gases (nitrógeno, anhídrido carbónico, monóxido de carbono, gas nitroso, anhídrido sulfuroso, gas sulfhídrico y gas grisú) son contaminantes de interés principalmente en minería subterránea, provienen fundamentalmente de la liberación debida a la descompresión de la roca, y en algunos casos a los gases producto de las voladuras. Estas concentraciones de gases pueden ser letales dentro del ambiente confinado de la mina.

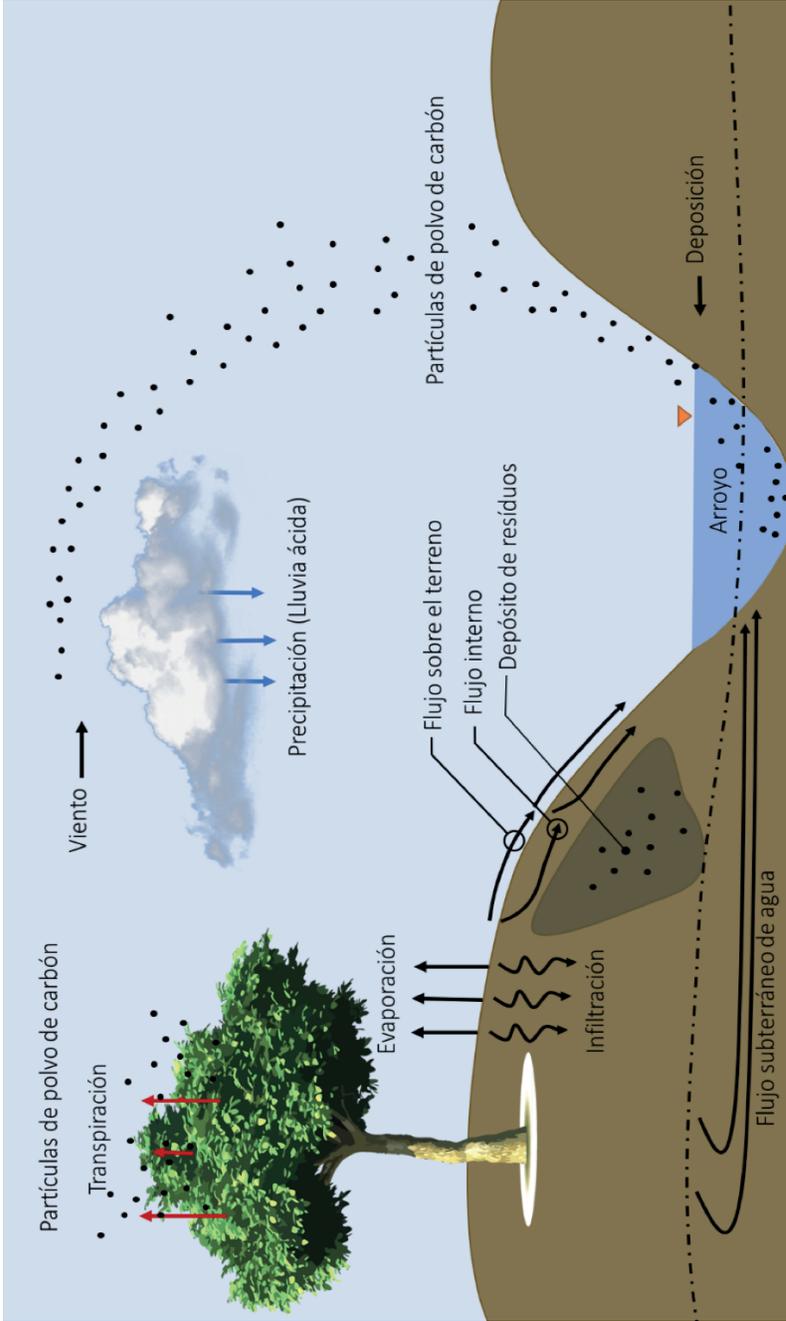
Agua

Los impactos sobre ecosistemas acuáticos lénticos (aguas quietas) y lóticos (fluviales) son dados dado por el aumento en la concentración de partículas en suspensión producido por manejo inadecuado de residuos, alteración de calidad físico-química y microbiana, cambios en la dinámica hidrológica, por alteración o destrucción de cuerpos de agua, pues el agua que antes era utilizada para el consumo humano es utilizada para el lavado del carbón.

Una breve revisión del ciclo del agua ofrece una perspectiva de los procesos hidrológicos que afectan la dispersión en el medio de los residuos de carbón ubicados en la superficie de las minas. La precipitación que cae sobre la superficie de la tierra puede penetrar en el suelo por proceso de infiltración o formar escorrentías sobre la superficie (flujo sobre el terreno) antes de alcanzar los cuerpos de agua cercanos (arroyos, ríos, etc.) (Consejo Nacional de Investigación, 2006). En este proceso los residuos son inevitablemente arrastrados a las fuentes de agua desde donde entran al medio, ver figura 8.

Figura 8.

Movimiento de los principales residuos de la explotación de carbón en el medio en sistemas de minería a cielo abierto y subterránea



Fuente: Modificado de Drever (1988).

En Colombia es escasa la literatura que aborde de manera detallada o directa los efectos de la minería de carbón sobre el componente hidrobiológico. No obstante, los efectos de la minería de carbón sobre el componente hidrobiológico son variados e incluyen desde una marcada reducción del pH, la lixiviación de agentes tóxicos como SO_4 y otros iones como Cd, Cr, Fe, Mn, Al, y aportes de material fino sedimentario (Silva, Wollenschlager y Oliveira, 2011).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Medicina Legal (2016), los valores de oxígeno disuelto, pH, temperatura, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, turbidez, sólidos totales y fosfatos del río Ranchería no presentan mayor variación luego de recorrer áreas de extracción de carbón. Sin embargo, Roa-Fuentes y Pérez-Mayorga (2018) señalan que las transformaciones de los sistemas acuáticos por actividades extractivas de carbón afectan de manera negativa las características físicas de los cauces, propiedades fisicoquímicas y consecuentemente la estructura y función de la biota acuática sin embargo, y debido a la escasa información sobre la biota (ocurrencia de especies, ciclos biológicos, relación hábitat-especie) el grado de impacto real de las actividades de extracción de carbón sobre los ecosistemas acuáticos no se ha podido establecer.

Otros tipos de residuos derivados de la combustión del carbón como los COV también ingresan al medio a través de las fuentes de agua. Las condiciones hidrogeológicas de la zona de la explotación determinan el potencial de los COV de ser transportados lejos de su área de depósito por la acción del agua. En las minas de carbón los flujos de aguas subterráneas son normalmente el primer mecanismo para el transporte de los contaminantes derivados de los COV, desde las zonas de depósito hasta los receptores principales (organismos acuáticos en arroyos alimentados por los flujos subterráneos, organismos terrestres o residentes locales que utilizan las fuentes de agua). En contacto con el agua los COV son capaces de generar ácidos resultado de la oxidación de los minerales de azufre (pirita, FeS) que constituyen al carbón o que se

encuentran en el suelo circundante (Consejo Nacional de Investigación, 2006). Este drenaje ácido contiene elevadas iones metálicos disueltos de hierro, manganeso, aluminio, metales pesados y elementos traza como arsénico, níquel y zinc, que pueden ser transportados por las fuentes de agua cercanas.

Flora y fauna

La reducción del pH en un sistema acuático con baja capacidad de amortiguación puede, por ejemplo, liberar iones metálicos al ambiente los cuales son altamente tóxicos para los peces. Condiciones muy ácidas pueden también reducir la diversidad y composición de flora y microflora de los sistemas acuáticos (Smol, 2009). Organismos acuáticos como macroinvertebrados y peces detritívoros que ingieren sedimentos contaminados con estos metales pesados pueden presentar procesos de bioacumulación en la red trófica. Gradientes en la fuerza de iones de metales pesados en cuerpos acuático, originados por minería de alta montaña, han indicado igual una reducción en la diversidad de macroinvertebrados con pérdidas de grupos importantes como *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera* (Pond *et al.*, 2008).

Las partículas de polvo pueden obstruir los estomas (Li *et al.*, 2016), reducir la radiación fotosintética activa (Zhan-Yi *et al.*, 2016) o incrementar la temperatura de las hojas a través de la absorción de excesiva radiación (Hirano, Kiyota y Aiga, 1995; Zhan-Yi *et al.*, 2016), adicionalmente, el polvillo de carbón sobre las hojas reduce el crecimiento de la planta (Sharifi, Gibson y Rundel, 1997) a través de su efecto sobre el intercambio de gases.

En un estudio dirigido a la determinación del efecto de la deposición del polvo de carbón sobre la superficie foliar del mangle, se demostró que los ubicados en proximidad a las fuentes de polvo de carbón, en apariencia presentaban un estado de desarrollo pobre, en relación de aquellos ubicados en áreas distantes (Naidoo y Chirkoot, 2004).

Paisaje

En el paisaje, los impactos se han asociado a la calidad sensorial/perceptual, por alteración de condiciones escénica y contaminación visual, al igual que la disminución de componentes naturales en el área de explotación y escombreras. A raíz de ello, se forman depresiones y excavaciones donde ocurren deslizamientos, movimientos de masas y formación de nuevos relieves, alteración del color, rotura de la cuenca visual, focalización de la percepción en la mina en detrimento de otros puntos. Los cambios serán intensos, localizados, permanentes e irreversibles en gran parte (Hernández-Jatib *et al.*, 2014). Otros impactos paisajísticos incluyen el deterioro de tradiciones y condiciones para el turismo y el deterioro del patrimonio arqueológico e histórico.

Riesgos en salud pública asociados a minería del carbón

Los riesgos en salud pública asociados con la minería del carbón dependen del tipo de minería que se realiza ya sea a cielo abierto o subterránea, además de factores implícitos en cada una de las áreas de extracción, como lo son bajo nivel educativo, trabajo infantil, dieta inadecuada, consumo de alcohol y ambiente inapropiados (Díaz, Abril y Garzón, 2010).

En Colombia, los estudios y reportes sobre los potenciales efectos en la salud relacionados a la exposición a residuos de minería de carbón son apenas incipientes, en la literatura se encuentren muy pocas referencias al respecto. La mayoría de los estudios reportados se han llevado en la zona central del país, donde predominan los sistemas de extracción por socavón; mientras que una menor cantidad se han realizado en la Costa Atlántica, donde existen sistemas de minería a cielo abierto. Dichos estudios se han desarrollado desde la perspectiva de la salud ambiental distinguiendo enfermedades de origen ocupacional y de

origen extraocupacional (o del ambiente general). Adicionalmente estos estudios presentan dos abordajes específicos, el primero y más abundante desde la epidemiología clásica y el segundo mediante la evaluación de biomarcadores.

Marcadores de daño genético y muerte celular. De estos estudios el 11% relacionan los efectos en salud con la medición de los niveles ambientales de residuos de minería, particularmente de los niveles de PM en el ambiente.

Evaluación de afectaciones en salud mediante biomarcadores

Con relación a la evaluación de marcadores biológicos, León-Mejía, Quintana, Debastiani, Dias, Espitia-Pérez, Hartmann, Pegas y Da Silva, (2014), publicaron un estudio observacional analítico dirigido a evaluar los efectos genotóxicos de la exposición a residuos de minería de carbón a cielo abierto en una población con exposición ocupacional del área minera del Cerrejón en el departamento de La Guajira en el 2009; encontrando que los marcadores de daño genético y de muerte celular evaluado en linfocitos y células de la mucosa bucal fue significativamente más alto en el grupo expuesto que en el grupo de control no expuestos. No fue encontrada una correlación entre la edad, el consumo de alcohol y el tiempo de servicio con los biomarcadores de genotoxicidad (León-Mejía, Espitia-Pérez, Hoyos-Giraldo, Da Silva, Hartmann, Henriques y Quintana, 2011). Dichos resultados indican que la exposición a los residuos de la minería del carbón podría dar lugar a efectos genotóxicos en los trabajadores de la minería del carbón y se discute la posibilidad de que estos efectos sean consecuencia del daño oxidativo generado por la presencia de elevadas concentraciones de Al y Si en sangre (León-Mejía *et al.*, 2014).

Un segundo estudio realizado por Espitia-Pérez, Da Silva, Espitia - Pérez, Brango, Salcedo - Arteaga, Hoyos, Giraldo y Henriques (2018), el cual tuvo un enfoque extraocupacional sobre exposición ambiental a residuos de minería de carbón y efectos sobre la salud, en poblaciones indígenas (Wayúu) y afrodescendientes alrededor del área de influencia de minas a cielo abierto en La Guajira, analizó el daño citogénético asociado con la exposición ambiental y su relación con los niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ alrededor de las áreas de minería y de un área control. Los autores determinaron los niveles de elementos inorgánicos (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ti, Cr, Mn, Cu y Zn) contenidos en el PM y sus factores de enriquecimiento para identificar la presencia de fuentes de emisión de origen antropogénico en ambas zonas y evaluaron para cada individuo expuesto o control, la frecuencia de alteraciones cromosómicas mediante la prueba micronúcleos con citoma en linfocitos (CBMN-Cyt assay).

El análisis de resultados reveló un aumento significativo en la frecuencia de biomarcadores de daño citogénético en individuos con proximidad residencial a minas de carbón a cielo abierto cuando se les comparó con los residentes del área no minera. Así mismo, el análisis de correlación demostró una asociación altamente significativa (94%) solo entre los niveles de $PM_{2,5}$ y las frecuencias de alteraciones cromosómicas. Los niveles de PM_{10} no presentaron una relación estrecha con el daño. Considerando las características de los biomarcadores. usados en el estudio como predictores del riesgo de cáncer (Bonassi *et al.*, 2011; Bonassi *et al.*, 2007), los autores concluyen que comparados con individuos de áreas no mineras, las poblaciones indígenas y afrocolombianas con proximidad residencial al corredor minero, presentan un mayor riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer. Adicionalmente, esta predisposición también los hace vulnerables de presentar otras enfermedades relacionadas con la exposición, como las respiratorias y cardiopulmonares. Los autores también sugieren que la fracción $PM_{2,5}$ puede inducir la pérdida de cromosomas y que constituye la fracción de mayor riesgo para las comunidades expuestas.

Evaluación de afectaciones en salud, enfoque desde la epidemiología clásica

Efectos en la salud en población con exposición ocupacional

El riesgo para la salud de los trabajadores en el desarrollo de la actividad minera ha sido caracterizado por diversos investigadores, quienes han generado el conocimiento necesario para comprender las características físicas, químicas y biológicas de los factores de riesgo, describir su distribución en las matrices ambientales, sus vías de ingreso al organismo humano o las circunstancias en que se produce la exposición, el mecanismo de acción patogénico y la evolución de las enfermedades con o sin tratamiento.

El Ministerio de Trabajo (2013) en la II Encuesta nacional de condiciones de salud-trabajo, reportó que los trabajadores del sector minero identificaban las vibraciones, las posiciones que generan fatiga, el ruido, los polvos y los humos, como los factores de riesgo de mayor prevalencia con proporciones entre el 26,7 % y el 33,9 %.

Con base en estos riesgos, son varios los efectos de la minería del carbón sobre la salud de los trabajadores, en donde es posible relacionar efectos directos, término utilizado para identificar aquellas enfermedades que se consideran de origen laboral desde el momento de su diagnóstico y otros indirectos, que se desarrollan a continuación.

Neumoconiosis del minero del carbón

Estudios en Colombia han determinado la prevalencia de neumoconiosis en trabajadores vinculados a la minería del carbón en la modalidad de socavón, empleando métodos diagnósticos similares que incluyen lectura de radiografías con el método de la OIT. Así, en Amagá, departamento de Antioquia, se reportaron prevalencias de neumatosis del 2,5%, puntualizando en que los trabajadores de minas mecanizadas tenían

una mayor prevalencia, atribuible a una mayor concentración de polvo respirable; además en este estudio se encontró asociación con un tiempo de vinculación a la actividad económica superior a cinco años en los trabajadores de minas mecanizadas (Rendón, Iván y Grisales, 1997).

Finalmente, un estudio realizado en mineros de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca afiliados a una ARL, reportó una prevalencia de neumoconiosis del 35,9% en el total de la muestra, del 42,3% en Cundinamarca y del 29,9% en Boyacá. Dicha prevalencia fue directamente proporcional a los años de vinculación a la actividad económica. En Boyacá los casos de neumoconiosis estaban expuestos a una mayor concentración de polvo de carbón que los controles ($p=0,02$). En los mineros de Cundinamarca que presentaban neumoconiosis se encontró una mayor frecuencia de tabaquismo ($p= 0,04$) (Torres *et al.*, 2015).

Alteración de parámetros espirométricos

La presencia de patrones espirométricos anormales se ha asociado con una edad superior a 40 años y más de cinco años de servicio. Estudios realizados en trabajadores de la minería del carbón del municipio de Paipa-Boyacá, evaluaron la función pulmonar utilizando la espirometría y la oximetría arterial. González, Roa, Rubiano y Villamil (2011) encontraron un patrón espirométrico anormal en el 26,1% de la muestra, esta proporción de pruebas anormales fue superior en quienes trabajaban bajo superficie. El 3,9% de los trabajadores tenía una saturación de oxígeno menor al 90%. La prevalencia de tos crónica fue del 42,7 %, de expectoración del 31,5% y de disnea del 48,8%; la tos, la expectoración y la disnea fueron más frecuentes en mineros de profundidad (75 %, 72,9% y 67,5%, respectivamente). La prevalencia de disnea fue mayor en menores de 18 años y mayores de 60 años (González Jiménez, Roa Cubáque, Rubiano Díaz y Villamil, 2011). Otro estudio de los mismos autores, realizado entre 2014 y 2016, reportó que un 13,2% de la población evaluada presentaba anomalías en el patrón espirométrico, la mayoría de tipo obstructivo, este encontró asociación entre la edad y patrones obstructivos en la espirometría ($p: 0.002$) (González *et al.*, 2017).

Desórdenes músculo esqueléticos

Este tipo de desórdenes incluyen enfermedades de los músculos, vainas tendinosas, síndromes de atrapamiento nerviosos, alteraciones articulares y neurovasculares. Jiménez-Forero, Zabala y Idrovo (2015), basados en una encuesta de morbilidad sentida, reportaron una prevalencia de enfermedades osteomusculares diagnosticadas del 8,4%, en trabajadores de minas de carbón de Guachetá. Sin embargo, los síntomas dolorosos presentaron prevalencias superiores (dolor lumbar 46 %, dolor en miembros superiores 40% y dolor en miembros inferiores 34%).

Efectos en la salud en poblaciones con exposición ambiental

Además de los mineros y trabajadores directamente implicados, las comunidades cercanas a las minas de carbón pueden verse afectadas en forma adversa por las actividades mineras debido a los efectos de las explosiones, el derrumbe de minas abandonadas y la dispersión de polvo proveniente de los camiones carboneros.

En el estudio, sobre los efectos en la salud relacionados con la exposición a residuos de minería de carbón en áreas de explotación por socavón en el municipio de Samacá, Boyacá, publicado por el hospital municipal Santa Marta de Samacá y el Ministerio de Salud y Protección Social, los autores concluyeron que adultos y neonatos de la población estudiada presentan altas tasas de morbilidad y mortalidad asociadas a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas.

El análisis cruzado de las enfermedades relacionadas con la minería del carbón según informe de Lockwood, Welker-Hood, Rauch y Gottlieb (2009), permitió concluir que es altamente probable que exista una correlación entre la actividad minera y los problemas de salud más prevalentes en los habitantes de Samacá; adicionalmente, el estudio analizó la posible relación entre las enfermedades observadas y la contaminación de matrices ambientales típicamente afectadas por actividades de minería de carbón (aire, agua y suelo), teniendo como puntos de referencia los picos de extracción. Según el análisis, existe una

estrecha coincidencia entre el aumento de las enfermedades del sistema circulatorio, del sistema respiratorio y del sistema urinario, y el aumento histórico de la explotación de carbón durante los años 2005 y 2011. Esta misma tendencia también fue descrita en la población infantil.

En la zona norte del país, estudios dan cuenta de los efectos sobre la salud generados por la exposición ambiental a residuos de minería de carbón en yacimientos a cielo abierto; dicho abordaje se realiza desde la evaluación de los efectos en relación con la proximidad de yacimientos y minas y los niveles de material particulado (PM) generados durante las actividades de extracción. Así, Quiroz, Hernández, Agudelo, Medina, Robledo y Osorio- García (2013), establecieron la prevalencia de síntomas y enfermedades respiratorias en niños menores de 10 años de municipios de la zona carbonífera del departamento del Cesar. El estudio incluyó 1627 niños expuestos a diferentes niveles de PM_{10} en zonas urbanas y rurales con efecto tráfico y sin efecto tráfico, así como corregimientos cercanos a las minas de carbón, y evaluó otros factores sociodemográficos como el uso de leña intramural, la exposición al humo de cigarrillo, estrato socioeconómico, quema de basuras, entre otros, como posibles moduladores de los efectos observados.

Los resultados obtenidos demostraron que los niños residentes en los corregimientos próximos a depósitos de material estéril en sistemas de minería y zonas urbanas con tráfico presentaron en el último año una mayor tasa de consulta médica por disnea y enfermedad respiratoria aguda, comparado con niños de la zona control. Así mismo, tuvieron una mayor frecuencia de sibilancias y tos seca nocturna en el último año y una mayor proporción de casos probables de asma con respecto al grupo control, siendo la prevalencia más alta en el grupo de 1 a 5 años (Quiroz *et al.*, 2013).

▣ Conclusiones

La minería de carbón ha aumentado su aporte a la economía colombiana de manera significativa en los últimos años. No obstante, la actividad de explotación del carbón se ha visto empañada por la manera bajo la cual se ha diseñado y aplicado la política minera del país. La ejecución de este tipo de proyectos ha generado una serie de impactos y consecuencias ambientales, así como en la salud de trabajadores y pobladores del área de influencia. Al hablar de efectos sanitarios y ambientales en las regiones a causa de la explotación minera, es importante hacerlo desde la perspectiva de las implicaciones a la salud que trae la contaminación de las fuentes hídricas, suelos y aire, al hábitat en general de esas zonas.

En cuanto a la información disponible sobre los efectos de esta actividad minera en la salud de las poblaciones residentes y trabajadores, cabe resaltar que la complejidad de las interrelaciones que se establecen entre los distintos elementos que intervienen en el proceso salud-enfermedad, representan un obstáculo para medir la proporción de causa que se puede atribuir exclusivamente a la minería del carbón.

Referencias

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) (2005). *Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) biologic exposure indices (BEI)*. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in the Terrestrial Environment. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals.* (2nd Edition). Nueva York: Springer-Verlag.
- Aneja, V. P., Isherwood, A., y Morgan, P. (2012). Characterization of particulate matter (PM10) related to surface coal mining operations in Appalachia. *Atmospheric Environment*, 54, 496-501. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.02.063
- ATSDR. (1995). Chemical and physical information. En *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)* (pp. 209-221). Atlanta: ATSDR.
- Bach, P. B., Kelley, M. J., Tate, R. C. y McCrory, D. C. (2003). Screening for lung cancer: a review of the current literature. *Chest*, 123(1 Suppl), 72S-82S. doi:10.1378/chest.123.1_suppl.72S
- Barja, B., Mogo, S., Cachorro, V. E., Antuña, J. C., Estevan, R., Rodrigues, A. y de Frutos, A. (2013). Atmospheric particulate matter levels, chemical composition and optical absorbing properties in Camagüey, Cuba. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(2), 440-453. doi: 10.1039/c2em30854a
- Beyersmann, D. y Hartwig, A. (2008). Carcinogenic metal compounds: recent insight into molecular and cellular mechanisms. *Archives of toxicology*, 82(8), 493- 512. doi:10.1007/s00204-008-0313-y

- Boffetta, P., Jourenkova, N. y Gustavsson, P. (1997). Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Causes & Control*, 8(3), 444-472. doi:10.1023/A:1018465507029
- Bonassi, S., Znaor, A., Ceppi, M., Lando, C., Chang, W. P., Holland, N., ... y Bigatti, M. P. (2007). An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*, 28(3), 625-631. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27959887>
- Bonassi, S., El-Zein, R., Bolognesi, C. y Fenech, M. (2011). Micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes and cancer risk: evidence from human studies. *Mutagenesis*, 26(1), 93-100. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21164188>
- Chadwick, M. J., Highton, N. H. y Lindman, N. (2013). *Environmental Impacts of Coal Mining & Utilization: A Complete Revision of Environmental Implications of Expanded Coal Utilization*. (1st ed.). Elsevier Science. doi:10.1016/C2009-0-07886-6
- Consejo Nacional de Investigación. (2006) Gestión de residuos de combustión de carbón en minas. Academias Nacionales de Prensa.
- Díaz, J. M. O., Abril, F.G. y Garzón, J.A. (2010). Salud y trabajo: minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia. *Avances en Enfermería* 28(1), 107-115. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/avenferm/article/view/15660>.
- Damle, A. S., Ensor, D. S. y Ranade, M. B. (1981). Coal Combustion Aerosol Formation Mechanisms: A Review. *Aerosol Science and Technology*, 1(1), 119-133. doi:10.1080/02786828208958582
- Diggs, D. L., Harris, K. L., Rekhadevi, P. V., y Ramesh, A. (2012). Tumor microsomal metabolism of the food toxicant, benzo(a)pyrene, in Apc(Min) mouse model of colon cancer. *Tumour biology : the journal of the International Society for Oncodevelopmental Biology and Medicine*, 33(4), 1255-1260. doi:10.1007/s13277-012-0375-6

- Doria-Argumedo, C. y Fagundo-Castillo, J. (2017). Metal levels in atmospheric particles in the coal mining zone, northern Colombia. *Iteckne 14*(2), 110-121. doi: <http://10.15332/iteckne.v14i2.1765>
- Drever, J. I. (1988). *The geochemistry of natural waters* (Vol. 437). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Espitia-Pérez, L., Da Silva, J., Espitia - Pérez, P., Brango, H., Salcedo-Arteaga, S., Hoyos-Giraldo, L. S. y Henriques, J. A. (2018). *Cytogenetic instability in populations with residential proximity to Open-pit coal mine in Northern Colombia in relation to PM10 and PM2.5 levels (Unpublished work)*. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.10.044
- Espitia-Pérez, L., Jiménez-Vidal, L., y Espitia-Pérez, P. (2019). Particulate Matter Exposure: Genomic Instability, Disease, and Cancer Risk. En *Environmental Health IntechOpen*. doi:10.5772 / intechopen.86536
- Espitia-Pérez, L., Sosa, M. Q., Salcedo-Arteaga, S., León-Mejía, G., Hoyos-Giraldo, L. S., Brango, H. y Henriques, J. A. (2016). Polymorphisms in metabolism and repair genes affects DNA damage caused by open-cast coal mining exposure. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 808, 38-51. doi:10.1016/j.mrgentox.2016.08.003
- Evangelopoulos, V., Albanis, T. A., Asvesta, A. y Zoras, S. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fine and coarse particles. *Global Nest J*, 12(1), 63-70.
- Fernández-Navarro, P., García-Pérez, J., Ramis, R., Boldo, E. y López-Abente, G. (2012). Proximity to mining industry and cancer mortality. *Sci Total Environ*, 435-436, 66-73. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.07.019
- Finkelman, R. B., Orem, W., Castranova, V., Tatu, C. A., Belkin, H. E., Zheng, B. y Bates, A. L. (2002). Health impacts of coal and coal use: possible solutions. *International Journal of Coal Geology*, 50(1-4), 425-443. doi:10.1016/S0166-5162(02)00125-8

- González Jiménez, N., Roa Cubáque, M., Rubiano Díaz, G. y Villamil, E. (2011). Detección de alteración funcional respiratoria en un grupo de mineros del carbón de Paipa, Boyacá (2006-2008). *Medicina (Bogotá)*, 33 (93), 92-100.
- González, N., Díaz, S. L., Wilches, M. R., Franky, M. P, Méndez, C. y del Rosario Herrera, A. (2017). Valoración mediante espirometría de mineros del carbón de Paipa, Colombia. *Biomédica*, 37(4), 498-506. doi: 10.7705/biomedica.v34i2.3364
- He, Z. L., Yang, X. E. y Stoffella, P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *J Trace Elem Med Biol*, 19(2-3), 125-140. doi:10.1016/j.jtemb.2005.02.010
- Hendryx, M. (2009). Mortality from heart, respiratory, and kidney disease in coal mining areas of Appalachia. *Int Arch Occup Environ Health*, 82(2), 243-249. doi:10.1007/s00420-008-0328-y
- Hendryx, M. y Ahern, M. M. (2008). Relations Between Health Indicators and Residential Proximity to Coal Mining in West Virginia. *American Journal of Public Health*, 98(4),669-671. doi:10.2105/AJPH.2007.113472
- Hernández-Jatib, N., Ulloa-Carcasés, M., Almaguer-Carmenate, Y. y Ferrer, Y. R. (2014). Evaluación ambiental asociada a la explotación del yacimiento de materiales de construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba. *Revista Luna Azul*(38), 146-158. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321731214009.pdf>.
- Hill, G. B. y Lyon, L. B. (1962). A new chemical structure for coal. *Industrial & Engineering. Chemistry*, 54(6), 36-41. doi:10.1021/ie50630a005
- Hirano, T., Kiyota, M. y Aiga, I. (1995). Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environ Pollut*, 89(3), 255-261. doi:10.1016/0269-7491(94)00075-0

- Hosgood, H. D., Chapman, R. S., Wei, H., He, X., Tian, L., Liu, L. Z. y Rothman, N. (2012). Coal mining is associated with lung cancer risk in Xuanwei, China. *American Journal of Industrial Medicine*, 55(1), 5-10. doi:10.1002/ajim.21014
- Huertas, J. I., Huertas, M. E. y Solis, D. A. (2012). Characterization of airborne particles in an open pit mining region. *Sci Total Environ*, 423, 39-46. doi: .1016/j.scitotenv.2012.01.065
- Instituto Nacional de Medicina Legal (2016). *Estudio pericial de exposición a níquel en las comunidades indígenas y afrocolombianas de los municipios de Montelíbano, San José de Uré y Puerto Libertador departamento de Córdoba, Colombia*. Recuperado de: <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2017/t-733-17.htm>
- Jähniq, A. (2013). *Coal Deposits of Colombia*. Recuperado de: http://www.geo.tu-freiberg.de/oberseminar/os07_08/andrea_j%E4hnig.pdf
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B. y Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary toxicology*, 7(2), 60-72. doi: 10.2478/intox-2014-0009
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British medical bulletin*, 68(1), 167-182. doi:10.1093/bmb/ldg032
- Jiménez-Forero, C. P., Zabala, I. T. y Idrovo Á, J. (2015). Work conditions and morbidity among coal miners in Guachetá, Colombia: The miners' perspective. *Biomédica*, 35 Spec, 77-89. doi:10.1590/S0120-41572015000500009
- Kaonga, B. y Kgabi, N. A. (2011). Investigation into presence of atmospheric particulate matter in Marikana, mining area in Rustenburg Town, South Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), 213-220. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-010-1683-1>

Kirchgessner, D. A., Piccot, S. D. y Masemore, S. S. (2000). An Improved Inventory of Methane Emissions from Coal Mining in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(11), 1904-1919. doi:10.1080/10473289.2000.10464227

León-Mejía, G., Espitia-Pérez, L., Hoyos-Giraldo, L. S., Da Silva, J., Hartmann, A., Henriques, J. A. y Quintana, M. (2011). Assessment of DNA damage in coal open-cast mining workers using the cytokinesis-blocked micronucleus test and the comet assay. *Sci Total Environ*, 409(4), 686-691. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.10.049

León-Mejía, G., Quintana, M., Debastiani, R., Dias, J., Espitia-Pérez, L., Hartmann, A., Pegas, J.A. y Da Silva, J. (2014). Genetic damage in coal miners evaluated by buccal micronucleus cytome assay. *Ecotoxicol Environ Saf*, 107, 133-139. doi:10.1016/j.ecoenv.2014.05.023

Li, T., Zhang, M., Lu, Z., Herman, U., Mumbengegwi, D. y Crittenden, J. (2016). Effects of Heavy Metals from Soil and Dust Source on DNA Damage of the *Leymus chinensis* Leaves in Coal-Mining Area in Northwest China. *PLoS One*, 11(12), e0166522. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166522

Ling, S. H. y van Eeden, S. F. (2009). Particulate matter air pollution exposure: role in the development and exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 4, 233-243. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2699820/>

Lockwood, A. H., Welker-Hood, K., Rauch, M. y Gottlieb, B. (2009). Coal's assault on human health: A report from physicians for social responsibility. Washington, DC .Recuperado de: <http://www.psr.org/assets/pdfs/coals-assault-exe-executive.pdf>.

López, I. C. y Ward, C. R. (2008). Composition and mode of occurrence of mineral matter in some Colombian coals. *International Journal of Coal Geology*, 73(1), 3-18. doi:10.1016/j.coal.2007.03.005

- Love, R. G., Miller, B. G., Groat, S. K., Hagen, S., Cowie, H. A., Johnston, P. P. y Soutar, C. A. (1997). Respiratory health effects of opencast coalmining: a cross sectional study of current workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 54(6), 416-423. Recuperado de:<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1128802/>
- Madejón, P., Murillo, J. M., Marañón, T., Cabrera, F. y López, R. (2002). Bioaccumulation of As, Cd, Cu, Fe and Pb in wild grasses affected by the Aznalcóllar mine spill (SW Spain). *Science of The Total Environment*, 290(1-3), 105-120. doi:10.1016/S0048-9697(01)01070-1
- Miller, B. G. y MacCalman, L. (2010). Cause-specific mortality in British coal workers and exposure to respirable dust and quartz. *Occupational and Environmental Medicine*, 67(4), 270-276. doi:10.1136/oem.2009.046151
- Ministerio del Trabajo (2013). *II Encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el sistema general de riesgos laborales de Colombia*. Mintrabajo - República de Colombia. Recuperado de: <https://oiss.org/segunda-encuesta-nacional-de/>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). Guía de atención integral basada en la evidencia para dolor lumbar inespecífico y enfermedad discal relacionados con la manipulación manual de cargas y otros factores de riesgo en el lugar de trabajo (1st ed.). Bogotá D.C. Recuperado de: https://www.minsalud.gov.co/Documentos_y_Publicaciones/GATISO-DOLOR_LUMBAR_INESPECÍFICO.pdf
- Moreno Castillo, V. M. (2017). *La producción del carbón y sus efectos en la salud, comunidad el Espavé Distrito de Chame*. Recuperado de: <http://repositorio.umecit.edu.pa/handle/001/640>
- Mfumo, A. F. y González, A. E. C. (Mayo de 2017). Perspectivas para la generación eléctrica a carbón en Mozambique. En 8va Edición de la Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Cuba.

- Naidoo, G. y Chirkoot, D. (2004). The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. *Environ Pollut*, 127(3), 359-366. doi:10.1016/j.envpol.2003.08.018
- Olsson, A. C., Fevotte, J., Fletcher, T., Cassidy, A., t Mannetje, A., Zaridze, D. y Boffetta, P. (2010). Occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk: a multicenter study in Europe. *Occup Environ Med*, 67(2), 98-103. doi:10.1136/oem.2009.046680
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26(1), 16-25.
- Otero, D. (2012). *El sector energético-minero y la economía colombiana*. Bucaramanga: Indepaz. Recuperado de: <http://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2012/04/El-sector-energetico-minero-y-laeconomia-colombiana.pdf>.
- Petaloti, C., Triantafyllou, A., Kouimtzis, T. y Samara, C. (2006). Trace elements in atmospheric particulate matter over a coal burning power production area of western Macedonia, Greece. *Chemosphere*, 65(11), 2233-2243. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.05.053
- Pless-Mulloli, T., Howel, D., King, A., Stone, I., Merefield, J., Bessell, J. y Darnell, R. (2000). Living near opencast coal mining sites and children's respiratory health. *Occupational and Environmental Medicine*, 57(3), 145-151. doi:10.1136/oem.57.3.145
- Pone, J. D. N., Hein, K. A. A., Stracher, G. B., Annegarn, H. J., Finkleman, R. B., Blake, D. R. y Schroeder, P. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72(2), 124-140. doi:10.1016/j.coal.2007.01.001
- Queiroz, P. G. M., Jacomino, V. M. F. y Menezes, M. Â. d. B. C. (2007). Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas

Gerais. *Química Nova*, 30, 1233-1239. Recuperado de: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000500035&nrm=iso

- Querol, X., Izquierdo, M., Monfort, E., Alvarez, E., Font, O., Moreno, T. y Wang, Y. (2008). Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 75(2), 93-104. doi:10.1016/j.coal.2008.04.003
- Quiroz, L., Hernández Flórez, L. J., Agudelo, C., Medina, K., Robledo, R. y Osorio García, S. D. (2013). Enfermedad y síntomas respiratorios en niños de cinco municipios carboníferos del Cesar, Colombia. *Journal of Public Health*; 15 (1),66-79. Recuperado de: <https://www.scielosp.org/article/rsap/2013.v15n1/66-79>
- Rendón, O., Iván, D. y Grisales, R. (1997). Neumoconiosis en la minería subterránea del carbón, Amagá, 1995. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 14(2), 46-67.
- Rengarajan, T., Rajendran, P., Nandakumar, N., Lokeshkumar, B., Rajendran, P. y Nishigaki, I. (2015). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 5(3), 182-189. doi:10.1016/S2221-1691(15)30003-4
- Ribeiro, J., da Silva, E. F. y Flores, D. (2010). Burning of coal waste piles from Douro Coalfield (Portugal): Petrological, geochemical and mineralogical characterization. *International Journal of Coal Geology*, 81(4), 359-372. doi:10.1016/j.coal.2009.10.005
- Roa-Fuentes, C. A. y Pérez, M.A.(2018). Modificación de ambientes lóticos para la extracción de carbón a cielo abierto: efectos sobre la biota y recomendaciones. *Acta Biológica Colombiana* 23(1), 17-29. doi:10.15446/abc.v23n1.61574

- Roy, D., Gautam, S., Singh, P., Singh, G., Das, B. K. y Patra, A. K. (2016). Carbonaceous species and physicochemical characteristics of PM10 in coal mine fire area-a case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 9(4), 429-437. doi:10.1007/s11869-015-0355-2
- Santibáñez-Andrade, M., Quezada-Maldonado, E. M., Osornio-Vargas, Á., Sánchez-Pérez, Y y García-Cuellar, C. M. (2017). Air pollution and genomic instability: the role of particulate matter in lung carcinogenesis. *Environmental Pollution*, 229, 412-422.
- Schucking, H. (2013). *Banking on Coal, urgewald, BankTrack, CEE Bankwatch Network y Polska Zielona Sieć, Rainforest Action Network. Movimiento de Desarrollo Mundial, PowerShift*. Recuperado de: http://www.Banktrack.org/download/banking_on_coal/banking_on_coal_4_67_6.pdf.
- Sharifi, M., Gibson, A. y Rundel, P. (1997). Surface Dust Impacts on Gas Exchange in Mojave Desert Shrubs. *Journal of Applied Ecology*, 34(4), 837-846. doi:10.2307/2405275
- Silva, L. F., M. Wollenschlager y M. L. Oliveira (2011). A preliminary study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil. *Environmental geochemistry and health* 33(1), 55-65. doi: 10.1007/s10653-010-9322-x
- Smol, J. (2009). A Review of Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective. *Lake and Reservoir Management*, 25(2), 224. doi:10.1080/07438140902938308
- Srogi, K. (2007). Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 5(4), 169-195. doi:10.1007/s10311-007-0095-0
- Stracher, G., Prakash, A. y Sokol, E. (2010). *Geology and Combustion. En Coal and Peat Fires (1st ed.)*, (p. 380). London: Elsevier Inc. doi: 10.1016/C2009-0-16444-9

- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K. y Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. En *Molecular, clinical and environmental toxicology* (pp. 133-164). Suiza: Springer, Basel. doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tichý, R. y Mejstřík, V. (1996). Heavy metal contamination from open-pit coal mining in Europe's Black Triangle and possible remediation. *Environmental Reviews*, 4(4), 321-341. doi:10.1139/a96-117
- Torres Rey, C. H., Ibañez Pinilla, M., Briceno Ayala, L., Checa Guerrero, D. M., Morgan Torres, G., Groot de Restrepo, H., y Varona Uribe, M. (2015). Underground coal mining: Relationship between coal dust levels and pneumoconiosis, in two regions of Colombia, 2014. *Biomed Res Int*, 2015, 2-8. doi:10.1155/2015/647878
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2007). Mercado nacional e internacional del carbón colombiano. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Mercado_Carbon.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (1995). *La Cadena del Carbón en Colombia: fuente de energía para el mundo*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K. y Vlachogianni, T. (2008). Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev*, 26(4), 339-362. doi:10.1080/10590500802494538
- Unwin, J., Cocker, J., Scobbie, E. y Chambers, H. (2006). An assessment of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in the UK. *Ann Occup Hyg*, 50(4), 395-403. doi:10.1093/annhyg/mel010
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1996). Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, 1996). Recuperado de <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=2832>

- Valentim, B., Guedes, A., Flores, D., Ward, C.R. y Hower, J.C.(2009). Variations in fly ash composition with sampling location: Case study from a Portuguese power plant. *Coal Combustion and Gasification Products*, 1,14-24. doi:10.4177/CCGP-D-09-00017.1
- Olivero-Verbel, J. (2010). Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana. Recuperado de:<http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Miner%C3%ADa-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jes%C3%ADs-Olivero-Verbel.pdf>
- Xing, P., Darvell, L. I., Jones, J. M., Ma, L., Pourkashanian, M. y Williams, A. (2016). Experimental and theoretical methods for evaluating ash properties of pine and El Cerrejon coal used in co-firing. *Fuel*, 183, 39-54. doi:/10.1016/j.fuel.2016.06.036
- Yanagi, Y., Assunção, J. V. d. y Barrozo, L. V. (2012). The impact of atmospheric particulate matter on cancer incidence and mortality in the city of São Paulo, Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, 28, 1737-1748. doi: 10.1590/S0102-311X2012000900012
- Yu, M.-H., Tsunoda, H. y Tsunoda, M. (2011). *Environmental Toxicology: Biological and Health Effects of Pollutants* (1st ed.). Bellingham: Lewis Publishers.
- Zakrzewski, S. F. (2002). *Environmental Toxicology*. (3rd ed.). Cambridge: Oxford University Press.
- Zhan-Yi, W., Jia, H., Jian-Ying, G., Cheng-Jie, W. y Ming-Jiu, W. (2008). Coal Dust Reduce the Rate of Root Growth and Photosynthesis of Five Plant Species in Inner Mongolian Grassland. *International Journal of Coal Geology*, 13, 62-73. doi: 10.12783/issn.1544-8053/13/2/S11
- Zhao, Y., Zhang, J., Chou, C.-L., Li, Y., Wang, Z., Ge, Y. y Zheng, C. (2008). Trace element emissions from spontaneous combustion of gob piles in coal mines, Shanxi, China. *International Journal of Coal Geology*, 73(1), 52-62. doi:10.1016/j.coal.2007.07.007

Capítulo 3

Karina Pastor-Sierra
Claudia Galeano-Páez
Lyda Espitia-Pérez

Pedro Juan Espitia-Pérez
Shirley Salcedo-Arteaga
Luisa Jiménez-Vidal



Minería de níquel: producción de ferroníquel, salud ambiental y salud pública



▣ Introducción

Los organismos en la naturaleza no están expuestos a un único compuesto, sino a una mezcla de varias sustancias. La mayoría de los diferentes tipos de cáncer existentes han sido de una u otra manera ligados con la exposición a una variedad de mezclas complejas (Espitia-Pérez *et al.*, 2018a). La explotación minera a cielo abierto libera a la atmósfera material particulado, que con la ayuda de variables ambientales genera mezclas complejas, las cuales comprenden decenas, cientos o miles de químicos cuya composición cuantitativa no es completamente conocida (Grotten, Feron y Soehne, 2001), pero que posee la capacidad de entrar en contacto con organismos vivos y generar efectos tóxicos.

Esta situación puede ser considerada como un grave problema de salud pública, si tenemos en cuenta los procesos mineros para obtención de un producto comercial, estas actividades ponen en riesgo por exposición a trabajadores y personas que habitan el corredor minero cerca a los yacimientos, poniendo en peligro sus condiciones de salud y propiciando

el surgimiento a largo plazo de patologías serias. Sin embargo, no todos los individuos expuestos desarrollan los mismos problemas de salud, por no ser igualmente susceptibles a estas enfermedades (León-Mejía *et al.*, 2011).

Este capítulo busca develar elementos que aporten a la discusión de este tema, en cuanto a la relación existente con la investigación científica y la finalidad de la ciencia en general, que es la de lograr explicar el impacto de la explotación de níquel sobre la salud y el medio ambiente.

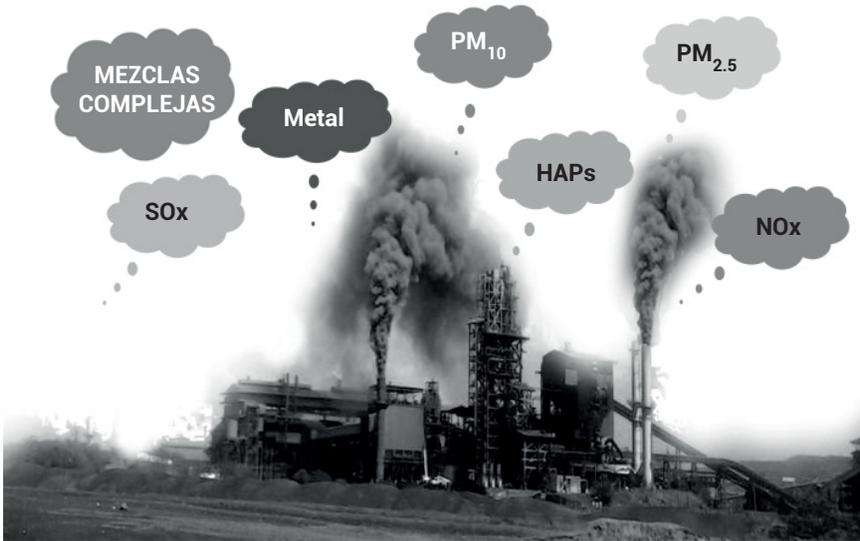
Material particulado

El material particulado atmosférico proviene de una variedad de fuentes de emisión, incluyendo las naturales y antropogénicas. Además, puede ser emitido directamente a la atmósfera (partículas primarias) o formada en ella a partir de precursores gaseosos (partículas secundarias) (Pey, Querol y Alastuey, 2010). Entre las fuentes de emisión, las áreas de extracción y transformación de materia prima en las industrias se consideran una de las mayores fuentes antropogénicas de metales traza (Zheng, Liu, Wang y Liang, 2010; Zhou *et al.*, 2005). Las partículas emitidas por el proceso de combustión pueden formarse mediante la transferencia de materia mineral inherente a material particulado con cambios de fase menores en su mayoría partículas gruesas, en el intervalo de 1 a 10 μm (PM_{1-10}) (figura 9).

Las partículas atmosféricas son uno de los contaminantes más importantes y sufren una alta variabilidad en cuanto a niveles y composición (Nazir, Shaheen, y Shah, 2011). Los diferentes componentes del material particulado pueden tener diversos impactos en la salud y, aunque el aumento de la concentración de partículas está asociado con el incremento de la mortalidad y la morbilidad, todavía no está claro qué componentes específicos deben ser atenuados para disminuir los efectos sobre la salud de aerosoles ambientales (World Health Organization (WHO), 2013).

Figura 9.

Emisión de material particulado por la producción de ferroníquel



Fuente: elaboración propia.

Las partículas tienen diferentes diámetros aerodinámicos que generan afectaciones en la salud humana por su categorización tóxica (Kauppinen y Pakkanen, 1990; Lin *et al.*, 2005; Cheng *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2012). Los estudios que identifican elementos traza que describen la contribución de las fuentes de emisión específicas a las partículas, basadas en los perfiles de fuentes de receptores y en datos de calidad del aire son relativamente escasos, debido a que uno, es difícil establecer un vínculo directo entre marcadores y fuentes de emisión para algunos elementos; y dos, los trazadores no son generalmente únicos y los perfiles de fuente pueden cambiar con el tiempo (Querol *et al.*, 2007). Algunos de estos estudios se centran en las emisiones del tráfico vial, mientras que otros presentan trazadores de fuentes industriales, principalmente de procesos de combustión, fundiciones y otros procesos a alta temperatura. Sin embargo, hay pocos datos disponibles sobre elementos trazadores específicos para procesos industriales específicos.

Caracterización de elementos químicos en material particulado atmosférico e identificación de fuentes

Junto con el muestreo de partículas y una caracterización química, los modelos matemáticos tienen buena aplicación para la interpretación y la distribución geográfica, la evolución temporal y el origen de los contaminantes. De estos, la factorización de matriz positiva (PMF) según Sanderson, Delgado-Saborit y Harrison (2014) es un método avanzado para evaluar las contribuciones de fuentes de partículas y se aplica con éxito en muchos lugares al mundo (Helble, 2000; Buonanno *et al.*, 2011). De esta forma, la comprensión de la composición química y las fuentes de las partículas finas es vital. Sin embargo, son pocos los estudios que se han enfocado en la caracterización química de partículas finas, destacándose las investigaciones de Paatero (1997); Chueinta, Hopk y Paatero (2000) y Kim y Hopke (2003).

Por otro lado, las investigaciones destacadas sobre la identificación de fuentes se atribuye a Viana, Kuhlbusch, Querol, Alastuey, Harrison, Hopke y Hueglin (2008) y Richard, Gianini, Mohr, Furger, Bukowiecki, Minguillón y Heringa (2011), estos estudios son importantes para ayudar a identificar las principales fuentes de contaminación que afectan el material particulado del ambiente y las concentraciones del número de partículas. El modelado del receptor es una de las herramientas más comunes, usadas para identificar y cuantificar la contribución de las fuentes de emisión individuales a los niveles ambientales de materia particulado atmosférico. Ofrece una manera de lograr esto midiendo la concentración de contaminantes en un sitio de muestreo (Richard *et al.*, 2011).

Un tipo de modelo de receptor es el modelo multivariado, que recientemente ha mejorado significativamente debido a un nuevo enfoque denominado factorización de matriz positiva (PMF) desarrollado por Paatero (1997), utilizando un enfoque de mínimos cuadrados. PMF es

un método avanzado de reparto de fuentes para evaluar con éxito las contribuciones de fuentes de partículas, aplicadas en muchos lugares alrededor del mundo (Pey, Querol y Alastuey, 2010).

Minería de níquel y producción de ferroníquel en Colombia

Colombia es el décimo tercer país productor de níquel a nivel mundial y el cuarto en Latinoamérica después de Brasil, Guatemala y Cuba (Bolaños, González y Reyes, 2017; Rodríguez, 2009). Por las características de los yacimientos presentes en el país, el 93% del níquel y carbón colombiano son producidos en sistemas de minería a cielo abierto (ANM, 2018; Bolaños, González y Reyes, 2017; Rendón, 2016; UPME, 2009; UPME, 2007). Con yacimientos de naturaleza laterítica que contienen el níquel en aleación con el hierro (FeNi), América Latina ha experimentado un crecimiento en los últimos años en la producción de esta aleación (Cunha, 2000), la cual depende de la demanda o condiciones del mercado actual. Con base al Plan de Ordenamiento Minero (PNOM) adoptado mediante Resolución 0256 de 2014 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2009), Colombia registra seis yacimientos de níquel, de los cuales tres se encuentran ubicados en la región Caribe, de estos el principal yacimiento en reservas y en explotación del país se localiza en el departamento de Córdoba.

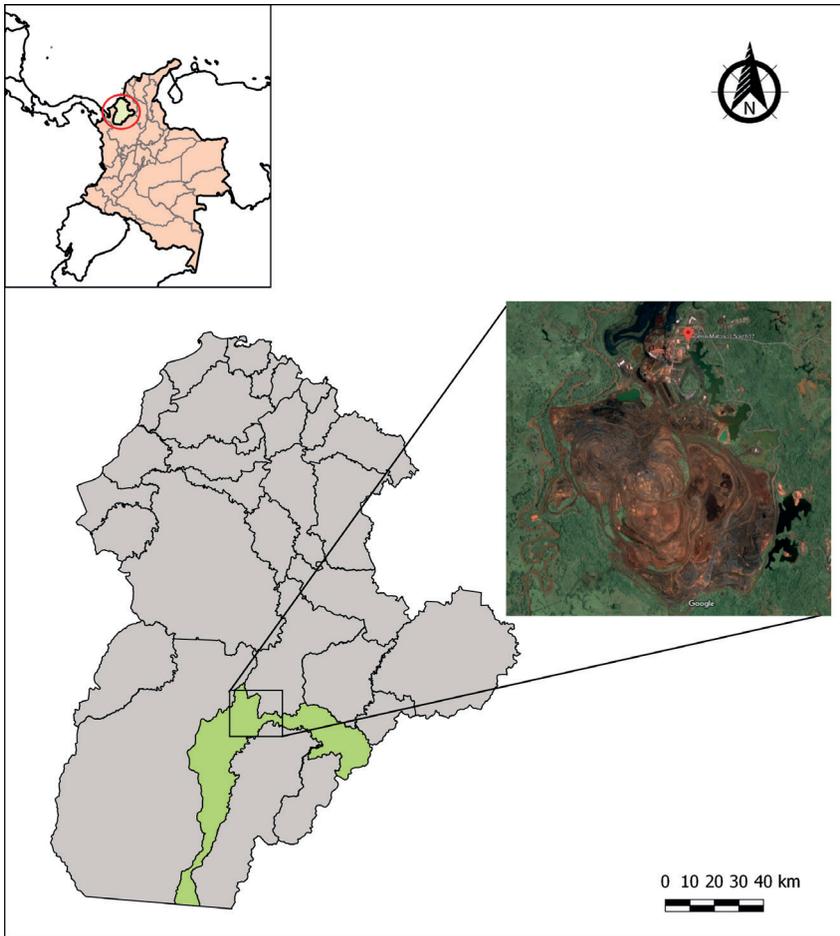
En la explotación de yacimientos lateríticos y la producción de la aleación de FeNi se utiliza un proceso de minería a cielo abierto, donde se utilizan hornos de tipo ARC para fundir a altas temperaturas el material y conseguir el mayor porcentaje de Ni posible (Arango, 2018; Lis y Nowacki, 2012).

La zona de explotación de Ni en Colombia se localiza al norte del país y comprende la mina de Ni más grande de Latinoamérica (Cruz *et al.*, 2006). La mina de Cerro Matoso (CMSA) es la segunda mina de FeNi del mundo (PINE – Córdoba, 2018; Cruz, *et al.*, 2006). Se encuentra

localizada en la ciudad de Montelíbano-Córdoba, Colombia (figura 10) y contribuye con el 10% de la producción colombiana y con el 3% de la producción mundial de níquel, con una producción aproximada de 49 320 toneladas anualmente (UPME, 2007).

Figura 10.

Ubicación geográfica mina de Cerro Matoso (CMSA), Montelíbano-Córdoba, Colombia



Fuente: elaboración propia.

La producción de FeNi se da por el procesamiento de minerales lateríticos, mediante un proceso de fusión (calcinación-reducción) en un horno rotatorio a temperaturas aproximadas a los 1100 °C; el producto de este primer paso es llevado a un horno eléctrico de arco, a temperaturas de aproximadamente 1600 °C, obteniendo como residuos la ferroaleación (metal) y la escoria (óxidos). (Bello, Pinilla, y López, 2019) Durante este proceso se emiten a la atmósfera grandes cantidades de material particulado, los cuales van a generar mezclas complejas, desencadenando problemas en el medio ambiente y en la salud humana.

Figura 11.

Problemáticas asociadas a la exposición ocupacional y ambiental a residuos de minería de Ferro-níquel en el departamento de Córdoba- Colombia



Fuente: elaboración propia.

Bajo esta premisa, las emisiones de mezclas complejas en esta zona podrían incluir un importante contenido de metales pesados, gases, polvo de carbón y minerales arcillosos, entre otros a las que podrían estar expuestas las poblaciones del corredor minero del yacimiento y las poblaciones de trabajadores con exposición ocupacional (figura 11).

La problemática con la explotación de ferroníquel en la zona es muy sentida por la comunidad, reflejada en un conflicto socioambiental que ha tomado mucha visualización a nivel nacional en los últimos años (Zuluaga, 2013), culminando en un proceso judicial vigente entre las comunidades asentadas alrededor de la explotación minera y la empresa minera (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2016).

Esta problemática se incrementa cuando se analiza la particularidad que presenta el corredor minero del sur de Córdoba, comprendido entre los municipios de Montelíbano, San José de Uré y Puerto Libertador, en este convergen explotaciones a cielo abierto de carbón y ferroníquel y una termoeléctrica a carbón, lo que aumenta los efectos negativos sobre las poblaciones, ya que estas se ven expuestas a un mayor número de posibles contaminantes (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2016).

En este distrito minero del Sur de Córdoba, donde confluyen proyectos de gran minería de carbón y ferroníquel, estas consideraciones cobran particular importancia teniendo en cuenta los más de 3000 habitantes que se asientan en poblaciones aledañas a las operaciones mineras y donde recientes hallazgos del Instituto Nacional de Medicina Legal (2016) demostraron la presencia de una estrecha relación entre la proximidad de las minas y la aparición de síntomas dermatológicos y respiratorios en pobladores con exposición ambiental.

Actividad minera del níquel y sus efectos en la salud

La explotación de níquel (Ni) representa una de las actividades económicas más importantes y con mayor crecimiento a nivel mundial, motivado principalmente por su uso en la producción de baterías, computadores,

cámaras y teléfonos celulares entre otras aplicaciones del mineral. Durante las actividades de explotación y fundición de FeNi se liberan a la atmósfera considerables cantidades de material particulado, metales pesados como el cobre, plomo, cadmio, vanadio, zinc, azufre (Cempel y Nikel, 2006), níquel metálico, polvo de carbón, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) (Oller, Costa y Oberdörster, 1997) y una variedad de óxidos complejos, dependiendo de la constitución de cada yacimiento.

Estos contaminantes pueden ser detectados dentro del material particulado de tipo PM_{10} y $PM_{2,5}$. (Klumpp y Ro-Poulsen, 2011). Todos estos compuestos han sido clasificados como carcinógenos para humanos, la International Agency for Cancer Research (IARC) (Das, Das y Dhundasi, 2008) consideró al óxido de níquel, cloruro de níquel, subsulfuro de níquel, etc., como *carcinogénicos para humanos* (Grupo 1), mientras que el níquel metálico y las ferroaleaciones de níquel como el FeNi como *posibles carcinogénicos para humanos* (Grupo 2B), y tienen el potencial de producir una amplia variedad de efectos patológicos (Kasprzak, Sunderman y Salnikow, 2003).

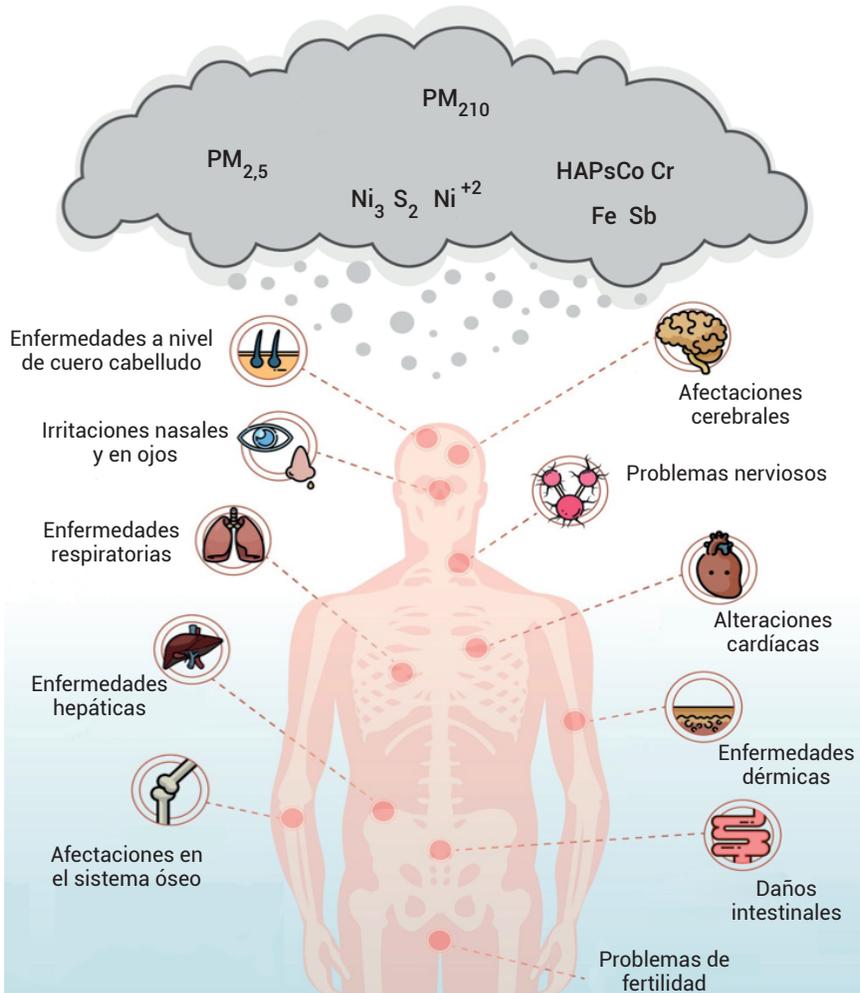
Algunas investigaciones en individuos con exposición ocupacional evidenciaron un aumento en la prevalencia de cáncer de pulmón (Merian, Anke, Ihnat y Stoeppler, 2004), tumores (Lumb y Sunderman, 1994), asma (Cruz, Costa, Marquilles, Morell y Muñoz, 2006), enfermedades de la piel (Corte Constitucional de Colombia, 2016; Hughson, Galea y Heim, 2010; Novak *et al.*, 2008) abortos espontáneos (Corte Constitucional de Colombia, 2016; Grimsrud, Berge, Resmann, Norseth y Andersen, 2000), problemas de fertilidad (Corte Constitucional de Colombia, 2016; Das *et al.*, 2008), y elevados niveles de daño oxidativo en el ADN (Corte Constitucional de Colombia, 2016; Das *et al.*, 2008). Además de lo anterior, estudios *in vitro*, demostraron que algunos subproductos del níquel pueden transformar células de mamíferos en linajes celulares (Denkhaus y Salnikow, 2002).

La evaluación de los efectos genotóxicos y mutagénicos en linajes celulares también demostraron que subproductos del níquel como el Ni_3S_2 , o Ni^{+2} pueden generar daño cromosómico (Arrouijal *et al.*, 1990; Sen y Costa, 1986) ligaciones cruzadas DNA-proteína (Patierno, Sugiyama, Basilion y Costa, 1985) y daño oxidativo (Costa *et al.*, 2002; Denkhaus y Salnikow, 2002). La mayoría de estas informaciones se encuentra basada en resultados obtenidos en ambientes con exposición ocupacional, así como en la evaluación de las actividades de las sustancias aisladas utilizando modelos *in vitro* (Corte Constitucional de Colombia, 2016). Consecuentemente, son escasas las informaciones sobre el posible riesgo de cáncer y otras enfermedades en la población general y en las que viven en regiones o áreas próximas a los sistemas de explotación (Kasprzak, Sunderman y Salnikow, 2003; Alimonti *et al.*, 2000; Smith-Sivertsen *et al.*, 1998).

El material particulado, una vez liberado en la atmósfera genera mezclas complejas, las cuales recorren grandes distancias, esto debido a la actividad del viento hasta su depósito en lugares habitados. Sin embargo, los efectos generados en las poblaciones con exposición ambiental y que viven en proximidades de sistemas de explotación son poco conocidos (Kasprzak, Sunderman y Salnikow, 2003; Alimonti *et al.*, 2000; Smith-Sivertsen *et al.*, 1998), al igual que los efectos de estas mezclas complejas *in vitro*. En Colombia, la producción de FeNi representa un problema ambiental que involucra la contaminación de fuentes de agua, suelo, aire, influyendo en el aumento de enfermedades o alteraciones biológicas como abortos, dermatitis, asma y cáncer (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2016), en poblaciones con exposición ambiental (figura 12).

Figura 12.

Efectos en la salud por exposición a residuos de minería de níquel



Fuente: elaboración propia.

En América Latina existen pocos estudios poblacionales con exposición a residuos de minería de Ni. Autores como Iglesias, Burgos, Marchetti, Silva y Pino (2008) describen los valores de níquel detectados en la

orina de niños que vivían cerca de refinerías de petróleo. Otras fuentes de exposición al níquel, como la que se identifica a través de la dieta por la ingestión de vegetales, también son poco conocidas. Stegen (2002) determinó la presencia de contaminación por níquel en campos de cultivo de batata, cebolla y alfalfa en Chile, mientras Sarabia, Cisneros, Aceves, Durán, y Castro (2011), encontraron altos niveles en hortalizas como cilantro, apio y pepino en zonas rurales de México.

En el caso particular de la minería a cielo abierto, una gran variedad de sustancias asociadas a problemas de toxicidad y generados durante las actividades de extracción y producción del FeNi, pueden ser liberadas a la atmósfera donde forman mezclas complejas, uno de los mayores riesgos para la salud y seguridad de las poblaciones expuestas si tenemos en cuenta que la exposición a una combinación de compuestos puede considerarse como más peligrosa por los efectos sinérgicos, aditivos y potenciadores de la mezcla resultante (UPME 2007). La exposición a MP ha sido continuamente relacionada con el desarrollo de cáncer de pulmón, bronquitis crónica y enfisema pulmonar (Conesa, 2010).

El riesgo de desarrollar problemas de salud es individual y dependiente de una compleja interacción multifactorial entre un gran número de factores genéticos y adquiridos (factores ambientales y estilos de vida). Esta interacción “gen-ambiente” dependiente de su constitución genética y de los factores de riesgo adquiridos durante su tiempo de vida, como la exposición ocupacional crónica, la edad de cada individuo y el tiempo de exposición, determina un riesgo único de desarrollar problemas de salud (Espitia-Pérez *et al.*, 2018b; León-Mejía *et al.*, 2011).

Colombia carece de información al respecto de la naturaleza y concentración de las emisiones generadas por las actividades de la explotación y producción de FeNi. La poca que existe es aportada directamente por las mismas empresas mineras, y en pocas ocasiones los datos superan los niveles mínimos establecidos por las leyes colombianas, cabe resaltar que no incluyen una identificación química de las sustancias, limitándose a estimar los niveles de material particulado en suspensión (PM_{10})

(ANM, 2018); a nivel nacional los esfuerzos realizados a la fecha son insuficientes para suplir las necesidades sobre la problemática; dentro de ellos se cuentan la vigilancia de agentes químicos del Ministerio de Salud, el inventario de sustancias carcinogénicas del Ministerio del Trabajo y la definición como tales mediante actos legislativos (Corte Constitucional de Colombia, 2016).

Dentro de las investigaciones realizadas en Colombia, cabe resaltar los trabajos realizados por Bello, Pinilla y López (2019), quienes caracterizaron física y químicamente escorias de ferroníquel obtenidas a partir de minerales lateríticos de bajo tenor y sus posibles usos industriales para mitigar los efectos negativos en el medio ambiente, así mismo otras investigaciones (Muller, Niethammer y Bruchelt, 1998; ATSDR, 2006; Sram *et al.*, 2006; León-Mejía *et al.*, 2011) proponen el uso de la escoria producida como agregado para concreto, adición en el cemento; además se creó la necesidad de eliminar ese tipo de residuos que generan gastos en su transporte, transformación, almacenaje, disposición final y un alto costo ambiental a largo plazo.

Recientes evidencias han demostrado la presencia de serios problemas de contaminación en el área de influencia de la fundidora, relacionados con un aumento en la frecuencia de enfermedades respiratorias, problemas en la piel y abortos en las poblaciones indígenas que viven cerca del yacimiento (Instituto de Medicina Legal, 2016; Gossain, 2013; Zuluaga, 2013). El Instituto de Medicina Legal (2016) registró la presencia de níquel y otros metales en muestras biológicas como sangre y orina en los residentes de la zona minera en el Departamento de Córdoba.

▣ Conclusiones

Son pocos los estudios que han profundizado en los efectos de la minería de níquel sobre la salud humana, esto basado en revisiones bibliográficas que permiten la comparación con minería de oro y carbón, los cuales presentan mayores investigaciones a nivel mundial.

Teniendo en cuenta que el proceso de producción de ferroníquel es una actividad que emite material particulado a la atmósfera, se presentan emisiones con altas concentraciones de partículas fugitivas cuando ocurre la apertura de las puertas del horno durante el cargado de material y remoción de escoria.

Todo lo antes mencionado genera la necesidad de implementar iniciativas investigativas enfocadas a conocer la situación ambiental, socioeconómica, cultural y de salud de las poblaciones con exposición a residuos de níquel en Colombia.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2018). *Colombia: Un país privilegiado - Minería en Colombia*. Recuperado de: <http://mineriaencolombia.anm.gov.co/index.php/es/colombia-un-pais-privilegiado>
- Aldabe, J., Elustondo, D., Santamaría, C., Lasheras, E., Pandolfi, M., Alastuey, A. y Santamaría, J. M. (2011). Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain). *Atmospheric Research*, 102(1-2), 191-205. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.07.003
- Alimonti, A., Petrucci, F., Krachler, M., Bocca, B. y Caroli, S. (2000). Reference values for chromium, nickel and vanadium in urine of youngsters from the urban area of Rome. *Journal of Environmental Monitoring*, 2(4), 351-354. doi:10.1039 / B001616K
- Almeida, S. M., Pio, C. A., Freitas, M. C., Reis, M. A. y Trancoso, M. A. (2006). Approaching PM_{2.5} and PM_{2.5-10} source apportionment by mass balance analysis, principal component analysis and particle size distribution. *Science of The Total Environment*, 368, 663-674. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.03.031
- Arango Paternina, H. J. (2018). Análisis de la resistividad eléctrica de la escoria y su efecto en la operación de un horno de arco eléctrico (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/62406/>
- Arrouijal, F. Z., Hildebrand, H. F., Vopfi, H., y Marzin, D. (1990). Genotoxic activity of nickel subsulphide α -Ni 3S₂. *Mutagenesis*, 5(6), 583-589. doi: 10.1093/mutage/5.6.583
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2006). *Toxicological profile for: Lead, Cadmium, Nickel, Vanadium and Zinc*. 1993. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts15.html

- Bello, S. C., Pinilla, A. H. y López, E. (2019). Caracterización física y química de escorias de ferroníquel obtenidas a partir de minerales lateríticos de bajo tenor y sus posibles usos industriales. *Prospectiva*, 17(1), 42-50.
- Bolaños Maje, D. F., González Sánchez, P. A. y Reyes Barahona, M. F. (2017). *Análisis de las causas del impacto socioeconómico y ambiental de la minería a cielo abierto en la región del Alto San Jorge-Córdoba Colombia. Caso Cerro Matoso*. Recuperado de: <https://ciencia.lasalle.edu.co/economia/323>
- Buonanno, G., Stabile, L., Avino, P y Belluso, E. (2011). Chemical, dimensional and morphological ultrafine particle characterization from a waste-to-energy plant. *Waste Management*, 31(11), 2253-2262. doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.017
- Cempel, M. y Nikel, G. (2006). A Review of Its Sources and Environmental Toxicology, in *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(3), 375-382. Recuperado de: <http://www.pjoes.com/Nickel-A-Review-of-Its-Sources-and-Environmental-Toxicology,87881,0,2.html>
- Chashschin, V. P., Artunina, G. P y Norseth, T. (1994). Congenital defects, abortion and other health effects in nickel refinery workers. *Science of the total environment*, 148(2-3), 287-291. doi: 10.1016/0048-9697(94)90405-7
- Cheng, H., Gong, W., Wang, Z., Zhang, F., Wang, X., Lv, X. y Zhang, G. (2014). Ionic composition of submicron particles (PM_{1.0}) during the long-lasting haze period in January 2013 in Wuhan, central China. *Journal of Environmental Sciences*, 26(4), 810-817. doi: 10.1016/S1001-0742(13)60503-3
- Chueinta, W., Hopke, P.K. y Paatero, P. (2000). Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization, in *Atmospheric Environment*, (34) 20, 3319-3329. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00433-1

- Conesa. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Barcelona, España: Mundi-Prensa.
- Costa, M., Salnikow, K., Sutherland, J. E., Broday, L., Peng, W., Zhang, Q. y Kluz, T. (2002). The role of oxidative stress in nickel and chromate genotoxicity. En Vallyathan, V, Xianglin, S., y Castranova, V. (Eds.). *Oxygen/Nitrogen Radicals: Cell Injury and Disease* (pp.265-275). Boston: Springer. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015909127833>
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (2016) Sentencia T445/16. Recuperado de: <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-445-16.htm>
- Cruz, M. J., Costa, R., Marquilles, E., Morell, F y Muñoz, X. (2006). Occupational asthma caused by chromium and nickel. *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*, 42(6), 302-306. doi: 10.1016/S1579-2129(06)60147-X
- Das, K. K., Das, S. N. y Dhundasi, S. A. (2008). Nickel, its adverse health effects & oxidative stress. *Indian Journal of Medical Research*, 128(4), 412-425. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19106437>
- Denkhaus, E., y Salnikow, K. (2002). Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 42(1), 35-56. doi: 10.1016/S1040-8428(01)00214-1
- Espitia-Pérez, L., Arteaga-Pertuz, M., Soto, J. S., Espitia-Pérez, P, Salcedo-Arteaga, S., Pastor-Sierra, K., ... y Henriques, J. A. (2018). Geospatial analysis of residential proximity to open-pit coal mining areas in relation to micronuclei frequency, particulate matter concentration, and elemental enrichment factors. *Chemosphere*, 206, 203-216. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.049

- Espitia-Pérez, L., da Silva, J., Brango, H., Espitia-Pérez, P., Pastor-Sierra, K., Salcedo-Arteaga, S., ... y Salcedo-Restrepo, D. (2018a). Genetic damage in environmentally exposed populations to open-pit coal mining residues: Analysis of buccal micronucleus cytome (BMN-cyt) assay and alkaline, Endo III and FPG high-throughput comet assay. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 836, 24-35.
- Gossain, J. (2013). Minería del níquel en Córdoba: entre el oro y la miseria. 132, p. 1. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12643944>
- Grimsrud, T. K., Berge, S.R., Resmann, E, Norseth, T. y Andersen, A. (2000). Assessment of historical exposures in a nickel refinery in Norway. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 26(4), 338-345.
- Groten, J.P, Feron, V.J. y Soehnel, J.R. (2001). Toxicology of simple and complex mixtures. *Trends. Pharmacological Sciences*, 22(6), 316-322. doi: 10.1016/S0165-6147(00)01720-X
- Helble, J.J. (2000). A model for the air emissions of trace metallic elements from coal combustors equipped with electrostatic precipitators. *Fuel Processing Technology*, 63(2), 125-147. doi: 10.1016/S0378-3820(99)00093-4
- Hughson, G., Galea, K. y Heim, K. (2010). *Characterization and assessment of dermal and inhalable nickel exposures in nickel production and primary user industries. Annals of occupational hygiene*, 54(1), 8-22. doi: 10.1093/annhyg/mep068
- Iglesias, V, Burgos, S., Marchetti, N., Silva, C. y Pino, P. (2008). Nivel de níquel urinario en niños residentes en ciudades cercanas a megafuentes. *Revista Médica de Chile*, 136(8), 1039-1046. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rmc/v136n8/art13.pdf>

- Kasprzak, K.S., Sunderman Jr., F.W. y Salnikow, K. (2003). Nickel carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1-2), 67-97. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2003.08.021
- Kauppinen, E.I. y Pakkanen, T.A. (1990). Coal combustion aerosols: a field study. *Environmental Science & Technology*, 24(12) 1811-1818. doi: 10.1021/es00082a004
- Kim, E. y Hopke, P. K. (2005). Identification of fine particle sources in mid-Atlantic US area. *Water, Air, and Soil Pollution*, 168(1-4), 391-421. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-005-1894-1>
- Klumpp, A. y Ro-Poulsen, H. (2011). Biomonitoring of Toxic Compounds of Airborne Particulate Matter in Urban and Industrial Areas. En: F. Zereini y C. Wiseman (Eds.) *Urban Airborne Particulate Matter. Environmental Science and Engineering (Environmental Engineering)* (467-481) Alemania: Springer, Berlin, Heidelberg. Recuperado de: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-12278-1>
- Instituto Nacional de Medicina Legal. (2016). *Estudio pericial de exposición a níquel en las comunidades indígenas y afrocolombianas de los municipios de Montelíbano, San José de Uré y Puerto Libertador departamento de Córdoba, Colombia*. Bogotá, Colombia: Editorial Legis.
- León-Mejía, G., Espitia-Pérez, L., Hoyos-Giraldo, L.S., Da Silva, J., Hartmann, A., Henriques, J.A.P. y Quintana, M. (2011). Assessment of DNA damage in coal open-cast mining workers using the cytokinesis-blocked micronucleus test and the comet assay. *Science of The Total Environment*, 409(4), 686-691. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.10.049
- Lin, C.C., Chen, S.J., Huang, K.L., Hwang, W.I., Chang-Chien, G.P. y Lin, W.Y. (2005). Characteristics of Metals in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Particles Collected Beside a Heavily Trafficked Road. *Environmental Science & Technology*, 39(21), 8113-8122. doi: 10.1021/es048182a

- Lis, T. y Nowacki, K. (2012). Determination of Physical and Chemical Properties of Electric Arc Furnace Dusts for the Purposes of Their Utilization. *Steel Research International* 83(9), 842-851. doi: 10.1002/srin.201200056
- Lough, G. C., Schauer, J. J., Park, J. S., Shafer, M. M., DeMinter, J. T. y Weinstein, J. P. (2005). Emissions of metals associated with motor vehicle roadways. *Environmental science & technology*, 39(3), 826-836. doi: 10.1021/es048715f
- Merian, E., Anke, M., Ihnat, M. y Stoeppler, M. (2004). *Metals and Their Compounds in the Environment: Occurrence, Analysis, and Biological Relevance* (2nd ed.). Virginia: John Wiley & Sons, Inc.
- Muller, I., Niethammer, D. y Bruchelt, G. (1998) Anthracycline-derived chemotherapeutics in apoptosis and free radical cytotoxicity (Review). *International Journal or Molecular Medicine*, 1(2), 491-495. Recuperado de: <https://www.spandidos-publications.com/ijmm/1/2/491>
- Nazir, R., Shaheen, N.,y Shah, M.H. (2011). Indoor/outdoor relationship of trace metals in theatmospheric particulate. *Atmospheric Research*, 101(3), 765-772. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.05.003
- Ninomiya, Y., Zhang, L., Sato, A. y Dong, Z. (2004). Influence of coal particle size on particulate matter emission and its chemical species produced during coal combustión. *Fuel Processing Technology*, 85(8-10), 1065-1088. doi: 10.1016/j.fuproc.2003.10.012
- Novak, N., Baurecht, H., Schäfer, T., Rodriguez, E., Wagenpfeil, S., Klopp, N. y Illig, T. (2008). Loss-of-function mutations in the filaggrin gene and allergic contact sensitization to nickel. *Journal of Investigative Dermatology*, 128(6), 1430-1435. doi:10.1038/sj.jid.5701190
- Oller, A.R., Costa, M. y Oberdörster, G. (1997). Carcinogenicity Assessment of Selected Nickel Compounds. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 143(1), 152-166. doi: 10.1006/taap.1996.8075

- Paatero, P. (1997). Least squares formulation of robust non-negative factor analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 37(1), 23-35. doi: 10.1016/S0169-7439(96)00044-5
- Patierno, S.R., Sugiyama, M., Basilion, J.P. y Costa, M. (1985). Entrecruzamiento preferencial de ADN-proteína por NiCl₂ en regiones insolubles en magnesio de cromatina fraccionada de células de ovario de hámster chino. *Cancer research*, 45, 5787-5794. Recuperado de: https://cancerres.aacrjournals.org/content/45/11_Part_2/5787.full-text.pdf.
- Pey, J., Querol, X. y Alastuey, A. (2010). Discriminating the regional and urban contributions in the North-Western Mediterranean: PM levels and composition. *Atmospheric Environment*, 44(13), 1587-1596. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.005
- Putaud, J. P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J. y Harrison, R. M. (2010). A European aerosol phenomenology-3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment*, 44(10), 1308-1320. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.12.011
- Querol, X., Viana, M., Alastuey, A., Amato, F., Moreno, T., Castillo, S. y Salvador, P. (2007). Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain. *Atmospheric Environment*, 41(34), 7219-7231. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.05.022
- Rendón, M. (2016). *Desarrollo de Montelíbano y Unión Matoso, a partir de la explotación de Cerromatoso (2005-2015)*. Recuperado de: <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/11912/RendonArango-MariaAlejandra-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Richard, A., Gianini, M.F.D., Mohr, C., Furger, M., Bukowiecki, N., Minguillón, MC y Heringa, M.F. (2011). Source apportionment of size and time resolved trace elements and organic aerosols from an urban courtyard site in Switzerland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 8945-8963. doi: 10.5194/acp-11-8945-2011
- Saarnio, K., Frey, A., Niemi, J.V., Timonen, H., Rönkkö, T., Karjalainen, P. y Keskinen, J. (2014). Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization. *Journal of Aerosol Science*, 73, 14-26. doi: 10.1016/j.jaerosci.2014.03.004
- Sanderson, P., Delgado-Saborit, J.M. y Harrison R.M. (2014). A review of chemical and physical characterisation of atmospheric metallic nanoparticles. *Atmospheric Environment*, 94, 353-365. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.023
- Sarabia Meléndez, I. F., Cisneros Almazán, R., Aceves De Alba, J., Durán García, H. M. y Castro Larragoitia, J. (2011). Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 103-113. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n2/v27n2a2.pdf>.
- Smith-Sivertsen, T., Tchachtchine, V., Lund, E., Bykov, V., Thomassen, Y. y Norseth, T. (1998). Urinary nickel excretion in populations living in the proximity of two russian nickel refineries: a Norwegian-Russian population-based study. *Environmental Health Perspectives*, 106(8), 503-511. doi: 10.1289/ehp.98106503
- Tao, J., Shen, Z., Zhu, C., Yue, J., Cao, J., Liu, S. y Zhang, R. (2012). Seasonal variations and chemical characteristics of sub-micrometer particles (PM₁) in Guangzhou, China. *Atmospheric Research*, 118, 222-231. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.06.025

- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2007). *Mercado nacional e internacional del carbón colombiano*. Recuperado de: <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/nal-carbon-metalurgico.aspx>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2009). *El níquel en Colombia. Bogotá: Dígitos y Diseños*. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/docs/niquel_colombia.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). *Indicadores de la Minería en Colombia*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energías.
- Viana, M., Kuhlbusch, T.A.J, Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R.M., Hopke, P.K. y Hueglin, C. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of aerosol science*, 39(10), 827-849. doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.05.007
- Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Chen, S. y Zheng, A. (2005). The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment*, 39(21), 3771-3784. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.03.013
- World Health Organization (WHO). (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Technical Report*. Copenhagen, Dinamarca: WHO Regional Office for Europe.
- Yin, J., y Harrison, R. M. (2008). Pragmatic mass closure study for PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ at roadside, urban background and rural sites. *Atmospheric Environment*, (42) 5, 980-988. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.005
- Yoo, J. I., Seo, Y. C. y Shinagawa, T. (2005). Particle-size distributions and heavy metal partitioning in emission gas from different coal-fired power plants. *Environmental Engineering Science*, 22(2), 272-279. doi: 10.1089/ees.2005.22.272

- Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., y Liang, Z. (2010). Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Science of the Total Environment*, 408(4), 726-733. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.075
- Zhou, S., Yuan, Q., Li, W., Lu, Y., Zhang, Y. y Wang, W. (2014). Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications. *Journal of Environmental Sciences*, 26(1), 205-213. doi: 10.1016/S1001-0742(13)60399-X
- Zuluaga, C. (2013). Cerro Matoso nos está matando. *El Espectador*, recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/cerro-matoso-nos-esta-matando-articulo-409715>

Capítulo 4

Camilo José González-Martínez
Daniel Augusto Acosta-Leal



Minería de oro en Colombia y el mercurio como residuo



De aquí a 50 años estaremos totalmente en la miseria (...) Con esa clase de minería a tajo abierto y con retroexcavadora, en diez años estamos como está Barbacoas; Barbacoas está totalmente en la miseria, como unos municipios de Chocó y otros municipios de Antioquia, totalmente en la miseria. Porque no les queda sino la piedra lavada donde no pueden sembrar, ni dedicarse a la agricultura, ni a la minería, porque ya se sabe que el oro no se reproduce

BERNARDO GARCÍA¹

▣ Introducción

Dentro del reglón de minas y canteras, en términos de producción de oro, Colombia es el país número 17 en el *ranking* de producción aurífera, alcanzando en el año 2016 un total de 51,8 toneladas (Pedraza, 2017). Así mismo, en el año 2012 Colombia alcanzó una importación de 101,3 toneladas de mercurio (Díaz-Arriaga, 2014), generando aproximadamente un total de 75 toneladas de mercurio como residuo de minería aurífera (Olivero-Verbel, 2011).

¹ Seudónimo, minero de subsistencia.

La actividad minera del oro en Colombia presenta cuatro escalas de minería de acuerdo al volumen de explotación: microminería, minería a pequeña escala, minería de mediana escala y minería a gran escala o grandes proyectos mineros (Casallas y Martínez, 2015; Güiza, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2015).

El Ministerio de Minas y Energía (2015) establece cinco tipos de minería: minería de subsistencia, minería formal, minería informal, minería legal y minería ilegal. Sin embargo, la Defensoría del Pueblo (2015) define un sexto tipo de minería, la minería mecanizada itinerante o minería criminal, la cual es realizada por actores armados al margen de la ley, esta es muy diferente a la minería ilegal que se caracteriza por operar tecnicamente sin un título minero o un reconocimiento por el Estado colombiano.

En cuanto a la tecnología de explotación se presentan dos modalidades, la minería artesanal y la minería tecnificada, así mismo existen dos procesos químicos involucrados en la minería aurífera en Colombia, la cianuración y la amalgamación, procesos de relación directa con el recurso hídrico al vincular el uso agua superficial para su operación (Casallas y Martínez, 2015; IDEAM, 2017; Ministerio de Minas y Energía, 2015).

De acuerdo con la Defensoría del Pueblo (2015), Güiza, (2013), y el Ministerio de Minas y Energía, (2016, 2017a) la minería de oro en Colombia es predominantemente de escala de microminería y de pequeña minería, de tipo de subsistencia, informal e ilegal; de igual forma se presenta minería criminal, en la cual no existe ningún tipo de control, corresponde predominantemente a la modalidad de minería artesanal y se desarrolla el proceso de amalgamación sin ningún tipo de intervención ambiental que garantice la adecuada gestión de los residuos de mercurio derivados de la amalgama (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

En el contexto geográfico y en términos auríferos, los departamentos de mayor producción de oro en Colombia son: Antioquia, Chocó, Bolívar, Caldas, Nariño, Cauca, Córdoba, Tolima, Huila, Risaralda, Valle del Cauca, Santander, La Guajira y Guainía (Castellanos *et al.*, 2016; Ministerio de Minas y Energía, 2018). Así mismo, los departamentos colombianos que presentan mayor actividad de minería ilegal son: Chocó, Guajira, Magdalena, Córdoba, Bolívar, Atlántico, Risaralda, Cauca y Antioquia (Contraloría General de la Nación, 2013; Güiza, 2013).

De acuerdo con Castellanos *et al.* (2016), los departamentos de mayor afectación por malaria son Antioquia, Córdoba, Bolívar, Chocó, Nariño, Cauca y Valle del Cauca; el 89,3 % de su incidencia para el periodo comprendido entre el año 2010-2013, corresponde a los departamentos de mayor producción aurífera, lo que sugiere una relación entre producción de oro y casos reportados de esta enfermedad en Colombia. Esta relación entre malaria y producción de oro, de acuerdo con Castellanos *et al.* (2016), es de 36% de exposición al vector en las principales zonas auríferas, siendo a su vez zonas endémicas para el mosquito *Anopheles* sp. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Ministerio del Interior, Unidad de Parques Nacionales de Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y Contraloría General de la Nación, 2019; Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

Considerando que el mercurio presenta riesgos por exposiciones ocupacionales, y posteriormente de su liberación comienza una dinámica ambiental, se da origen a la afectación en la salud humana desde la exposición directa, la precipitación, la presencia en el agua y los alimentos contaminados, como los principales medios de interacción con las poblaciones afectadas (Abbas, Sakakibara, Sera y Arma, 2017; Díaz-Arriaga, 2014; Gibb y O'Leary, 2014; Kocman *et al.*, 2017; Olivero-Verbel *et al.*, 2004; OMS, 2013, 2017).

Colombia es un país con un gran potencial hídrico que debe preservarse, por tal razón se deben desarrollar las actividades productivas propendiendo a mantener la calidad del mismo; considerando que los ríos representan el principal medio natural para la dinámica ambiental de la producción de oro y los residuos asociados. Para este estudio se considerará el agua como el componente ambiental de interés, siendo el recurso hídrico el principal foco de la producción de oro abarcando las principales cuencas y ríos nacionales (Betancur-Corredor, Loaiza-Usuga, Denich y Borgemeister, 2018; Castro, 2011; Díaz-Arriaga, 2014; González-Martínez, Acosta, Guzmán y Rodríguez, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, 2017; OMS, 2013)

Minería de oro

De acuerdo con Pedraza (2017), Colombia se encuentra entre los primeros 20 países productores de oro, donde China encabeza esta actividad con una explotación de 463,7 toneladas en el 2016 y Colombia ocupa el lugar número 17 con 51,8 toneladas en mismo periodo.

El Ministerio de Minas y Energía (2017) reporta que para el año 2016 se logró una exportación calculada en US\$ 649,52 millones, permitiendo establecer en términos económicos que la exportación de oro es el segundo renglón en magnitud respecto al carbón cuya exportación para el mismo periodo de tiempo es de US\$ 1.321, 96 millones.

El procesamiento del material geológico para obtención del oro en Colombia se fundamenta en dos procesos químicos: cianuración y amalgamamiento con mercurio (Casallas y Martínez, 2015; Ministerio de Minas y Energía, 2014).

Proceso de cianuración

El proceso de cianuración es un mecanismo para extraer oro o plata a través de un material geológico triturado o molido, mediante una disolución de cianuro de potasio o de sodio (Ministerio de Minas y

Energía, 2015). Compañías mineras de oro, como Yanacocha (2017), plantean que este método es una alternativa muy eficiente para obtención de oro, especialmente en minería a cielo abierto.

La técnica de cianuración presenta eficiencias mayores al 90% para obtención de oro (Ministerio de Minas y Energía, 2018; Thenepalli *et al.*, 2019), la cianuración consiste fundamentalmente en agregar una solución de cianuro concentrado, o en mezclas, las cuales se ponen en contacto con el material geológico triturado, dejando de lado el material no deseado a través del proceso de precipitación química, permitiendo que el oro pueda pasar a una etapa de refinamiento y la solución acuosa de cianuro pueda ser tratada en sistemas de tratamiento ambiental (Casallas y Martínez, 2015; Yanacocha, 2017).

Proceso de amalgamación con mercurio

El proceso de amalgamación con mercurio aprovecha las propiedades químicas del oro (Ministerio de Minas y Energía, 2016), mezclando el material geológico previamente depurado hasta arenas finas mezclándose con el mercurio; este permite que el mercurio “atrape” el metal precioso en una masa denominada amalgama, básicamente una aleación de mercurio con algún metal; el Ministerio de Minas y Energía (2015) describe la amalgamación como un procedimiento en el cual se separan los metales nativos de los minerales no metálicos mediante el contacto con mercurio.

Esta amalgama se debe someter a presión para retirar el exceso de mercurio y finalmente calentarla hasta el punto de ebullición del mercurio, 357 grados centígrados, para evaporar los excesos de este metal presentes en el producto final (Casallas y Martínez, 2015; Ministerio de Minas y Energía, 2005, 2016).

Minería de oro tecnificada bajo el proceso químico de cianuración

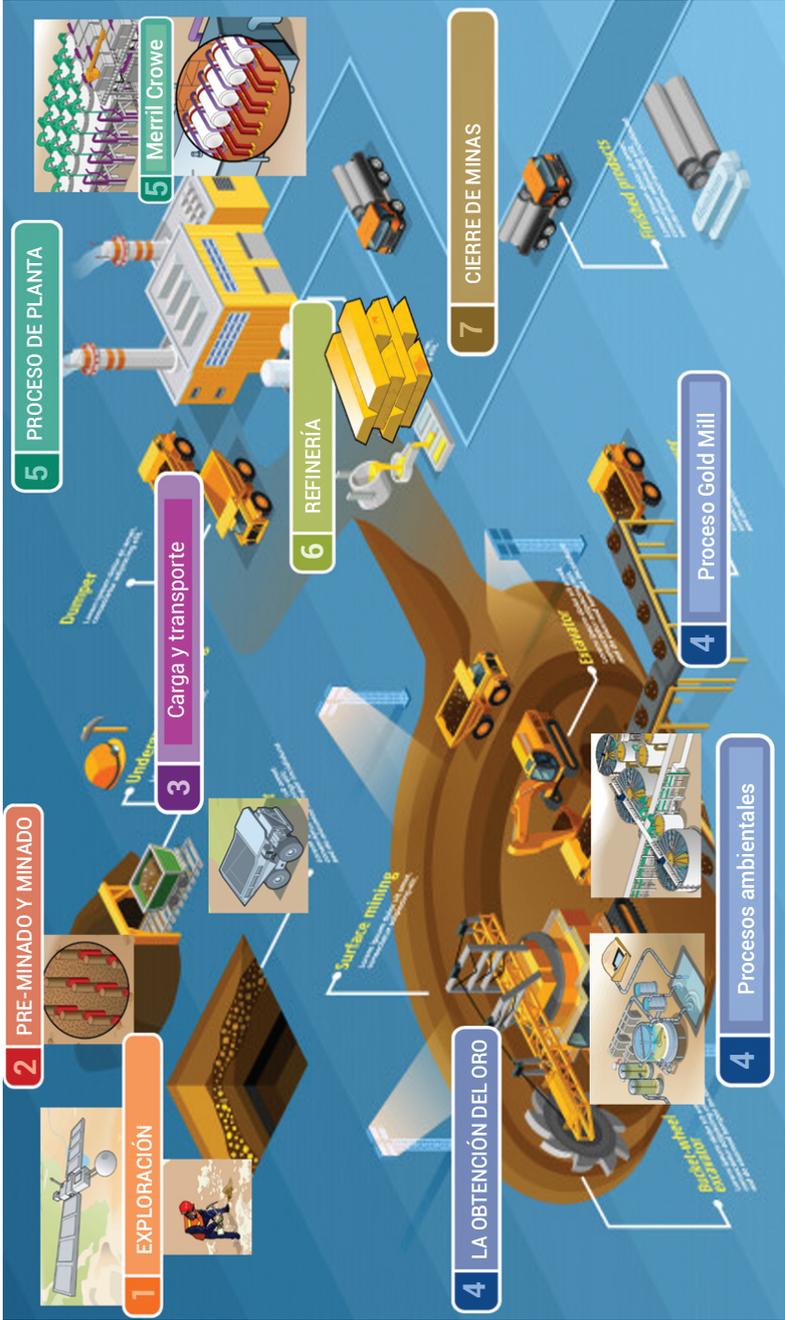
La minería de oro puede desarrollarse técnicamente desde cualquier tipo de minería, modalidad de extracción y por el proceso químico técnico de cianuración en circuito de control de la solución –considerando la eliminación completa del uso de mercurio–, siempre y cuando el proyecto se encuentre acorde a la viabilidad técnica, legal, territorial y de control ambiental.

El modelo de producción de oro de compañías mineras como Yanacocha, compañía peruana para producción de oro a cielo abierto, presenta un ejemplo de producción en minería de mediana y gran escala, con un sistema productivo químico de cianuración enfocado en el proceso de minería aurífera de bajo impacto ambiental, el cual tiene un modelo de minería que puede ser una guía para la minería aurífera en Colombia.

De acuerdo a lo anterior y en congruencia con el Plan Único Nacional de Mercurio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2014) y el plan estratégico sectorial para la eliminación del uso de mercurio del Ministerio de Minas y Energía (2016), la minería de oro tecnificada, sin importar la escala y el tipo de minería, debería responder a un esquema general de producción de oro fundamentado en 7 pasos (ver figura 13): exploración; preminado y minado; carga y transporte; obtención de oro, proceso Gold Mill y procesos ambientales; procesos de planta y Merrill Crowe; refinería; cierre de minas (Casallas y Martínez, 2015; Thenepalli *et al.*, 2019; Yanacocha, 2017).

Figura 13.

Proceso de producción tecnificada de oro por el proceso químico de cianuración, en el marco de la eliminación del uso de mercurio para Colombia



Fuente: elaboración propia.

Los procesos productivos relacionados con la minería del oro en la micro, pequeña y mediana minería en Colombia, así como la minería criminal, se desarrollan bajo el proceso químico de amalgamación, siendo el que utiliza y libera mercurio residual al medio ambiente; la proporción entre producción de oro respecto al uso de mercurio es de 1 a 5, es decir, producir un gramo de oro requiere de 5 gramos de mercurio (Díaz-Arriaga, 2014; Ministerio de Minas y Energía, 2014, 2016; Ministerio de Salud y Protección Social, 2015; Olivero-Verbel, 2010).

Mercurio

El mercurio (Hg) es un elemento metálico, de color plateado que permanece en estado líquido a temperatura ambiente. Su número atómico es de 80 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico. Es uno de los metales pesados más tóxicos encontrados en el ambiente en la litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera, generando una gran facilidad natural para ser transportado en el aire y en el agua (Núñez, 2017; Poulin y Gibb, 2008; Si y Ariya, 2018).

Se encuentra de forma natural en diferentes formas: metálica, en estado de vapor o gas, compuestos orgánicos y los procesos naturales donde intervienen microorganismos generando una transformación de mercurio inorgánico a mercurio orgánico (Aronson, 2016; Kocman *et al.*, 2017; Núñez, 2017). El Hg se libera a la atmósfera en forma de vapor en fenómenos naturales como la actividad volcánica, incendios forestales, movimiento de masas de agua, erosión de rocas y procesos biológicos (Poulin y Gibb, 2008).

La toxicidad del mercurio depende en gran parte de la forma química y de la concentración del mismo, siendo el resultado de la metilación del mercurio la forma con más alta toxicidad (Horvat, Sakamoto, Chan, y Faganeli, 2013; Si y Ariya, 2018)

Mercurio inorgánico

Las formas naturales predominantes en la atmósfera y en el medio acuático son el mercurio elemental (Hg°) y los iones (HgII). En el suelo la forma más común es el sulfuro de mercurio presente en suelos mineralizados y especialmente en sedimentos anaeróbicos (D'Itri, 1992).

En ambientes aeróbicos se considera el potencial redox suficiente para oxidar el Hg° a HgII , en cambio en ambientes anaeróbicos el HgII es reducido a Hg° , en especial con presencia de ácido húmico y a la metabolización microbiana. Es de considerar que el Hg° al presentar una baja solubilidad se deposita directamente en sedimentos mientras que los iones HgII se mezclan con materia orgánica y partículas, en términos de acumulación del mercurio en sedimento, D'Itri (1992) argumenta que más del 90% del mercurio presente en sistemas lacustres se encuentra allí (Kocman *et al.*, 2017; Si y Ariya, 2018).

Según D'Itri (1992), en condiciones anaeróbicas el mercurio que no se encuentre en forma de sulfuro de mercurio (HgS) se encuentra unido a la materia orgánica, siendo formas muy estables y las probabilidades de liberación de HgII a la fase acuosa son muy bajas. Así mismo, este autor indica que en condiciones aeróbicas, el HgS se puede reducir a sulfato otorgando solubilidad, de manera que el HgII se encuentra disponible para iniciar el proceso de ser metilado por microorganismos.

Mercurio orgánico

Para describir el mercurio orgánico es necesario describir el proceso de metilación entendido como el paso fundamental en el ciclo biogeoquímico del mercurio (LeDuc y Terry, 2005). La metilación es el proceso por el cual los microorganismos pueden destoxificar sus células porque el proceso altera la solubilidad, volatilidad y toxicidad del elemento en cuestión (D'Itri, 1992).

Así mismo D'Itri (1992), describe que la metilación biológica se presenta bajo la fórmula química de acuerdo a la reacción química 1, donde se puede considerar la unión química entre un metal y un ion metil:



La metilación del mercurio se presenta por dos vías, la biológica, donde intervienen microorganismos, forma natural, y la vía química, que se logra en laboratorio dando como resultado al final de la reacción, metilmercurio $CH_3 Hg^+$.

Núñez (2017) describe el ciclo biogeoquímico del mercurio en seis etapas fundamentalmente:

Desgasificación del mercurio de las rocas, del suelo, de la superficie de las aguas, o de las emisiones de los volcanes y las actividades antropogénicas, movimiento de las especies gaseosas en la atmósfera, deposición del mercurio en los suelos y en la superficie del agua, conversión del elemento en sulfuros insolubles, precipitación o bioconversión en formas más volátiles o más solubles como el metilmercurio y re-emisión a la atmósfera o bioacumulación. (p.38).

En su ciclo ambiental, el mercurio se deposita en las masas de agua, donde microorganismos acuáticos lo biotransforman en metilmercurio, también existen otras formas químicas orgánicas de mercurio como son el etilmercurio y el fenilmercurio (Poulin y Gibb, 2008).

La metilación que ocurre en los sedimentos se presenta en una superficie de 1 a 2 m, zona de gran presencia de microorganismos; en profundidades mayores es poco probable encontrar presencia de mercurio en forma orgánica, $CH_3 Hg^+$. Este proceso no está restringido a bacterias aerobias y anaeróbicas, el hongo *Neurospora crassa* tiene el potencial de sintetizar de forma aerobia el $CH_3 Hg^+$ a partir del ion HgII por la ruta de biosíntesis de la metionina, así mismo se asocian mohos, bacterias fotosintéticas e

inclusive la *Escherichia coli*, como posibles microorganismos agentes de la metilación del mercurio en el medio natural (D'Itri, 1992; Kocman *et al.*, 2017; Núñez, 2017).

Medio ambiente, ecología y mercurio

La presencia del mercurio por residuos de minería de oro en los procesos de amalgamación generan alteraciones en la dinámica ambiental, induciendo a cambios en el funcionamiento natural y generando modificaciones ecológicas en los procesos biogeoquímicos, esto altera las condiciones normales de funcionamiento de la química ambiental, la calidad de los componentes ambientales y sus relaciones con los seres vivos. Esto modifica el equilibrio ecológico generando consecuencias en la salud de los seres vivos expuestos a esta sustancia química (Gouvernement of Canada, 2009; Malakoff, 2013; Núñez, 2017; OMS, 2013, 2017; Si y Ariya, 2018). La dinámica del mercurio involucra el movimiento ambiental del metal hasta llegar a los seres vivos a través de los procesos biológicos de metilación (Byrns y Penning, 2012).

El mercurio como residuo asociado a la minería aurífera tiene dos vías de transporte al medio natural, la forma gaseosa es llevada a la atmósfera por medio directa de generación y disposición atmosférica directa de Hg⁰, asociado a HgII para ser depositado por precipitación al medio acuático y suelos (Byrns y Penning, 2012; Langeland, Hardin y Neitzel, 2017; Núñez, 2017).

La minería del oro descarga el mercurio principalmente por vía acuática a través de escorrentía, infiltración por suelos permeables, descarga directa en ríos, sistemas lacustres y finalmente llegando a los ríos de las principales cuencas, lagos y al océano. Dando paso al proceso de metilación y vinculando la biogeoquímica del mercurio en la cadena trófica (Abbas *et al.*, 2017; Byrns y Penning, 2012; D'Itri, 1992; Gibb y O'Leary, 2014; Kocman *et al.*, 2017; Langeland *et al.*, 2017; Martínez, 2014; Núñez, 2017).

Ecología del mercurio: bioacumulación y biomagnificación del mercurio

Los flujos de energía basados en el mercurio se fundamentan en el comportamiento dinámico del mercurio inorgánico y orgánico, asumiendo la presencia natural, las descargas del mercurio como residuo del proceso de amalgamación en la minería aurífera y estableciendo las vías de transporte por medio acuático, logrando la metilación del mercurio, y escalando así a la cadena alimenticia, hasta llegar finalmente al ser humano junto con las implicaciones en términos de la salud por exposición directa e ingesta de agua y peces contaminados.

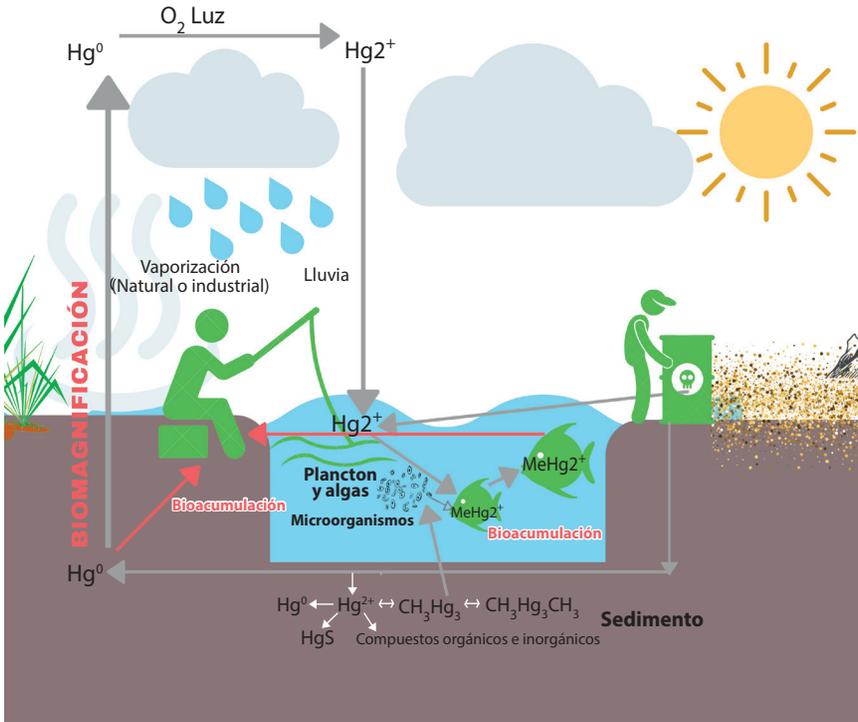
Los primeros escalones de la biogeoquímica del mercurio es la presencia de los iones Hg^{II} presentes en el medio ambiente de forma natural y como resultado de los procesos de amalgamación en minería aurífera, este ion es metabolizado por los microorganismos descrito en el mercurio orgánico, desarrollando el proceso de metilación del mercurio, tanto en el sedimento como en medio acuoso (D'Itri, 1992; Kocman *et al.*, 2017; Si y Ariya, 2018).

Posterior a este proceso, inicia la fase de bioamplificación o biomagnificación donde el plancton y las algas asimilan el metilmercurio, CH_3Hg^+ y parte del mercurio inorgánico del agua por un fenómeno de absorción pasiva; este plancton tiene el potencial de absorber mercurio en un estimado aproximado de 1000 veces en magnitud (D'Itri, 1992; Si y Ariya, 2018; Su, Han, Shiyab y Monts, 2007).

Los organismos que se encuentran en un nivel más alto de la cadena trófica, como los peces desarrollan el fenómeno de bioacumulación por ingesta de plancton (Byrns y Penning, 2012; D'Itri, 1992; Núñez, 2017) y se comienza un análisis del mercurio en su forma química de metilmercurio CH_3Hg^+ como lo plantea D'Itri (1992) (ver figura 14). Es necesario considerar que el fenómeno de bioacumulación es producto de la capacidad liposoluble presentada por el metilmercurio (Byrns y Penning, 2012; Núñez, 2017; Si y Ariya, 2018)

Figura 14.

Ciclo biogeoquímico del mercurio residual de minería aurífera



Fuente: elaboración propia.

Los organismos que se encuentran a mayor nivel en la cadena alimenticia presentan valores más altos de metilmercurio, expresándose como biomagnificación de manera predominante a través de la cadena trófica, a mayor nivel trófico del organismo, en el caso del pez, mayor probabilidad de biomagnificación (D'Itri, 1992; Núñez, 2017). Según D'Itri (1992), al final de la cadena alimenticia, antes de llegar al ser humano, se ha estimado la biomagnificación en un rango de 5000 y 100.000 veces los niveles de mercurio en comparación con el agua que los rodea.

Contaminación por mercurio en Colombia

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012) reporta acumulaciones de mercurio en el medio ambiente especialmente en la Ciénaga Grande de Santa Marta, la bahía de Cartagena, el río Cauca y el río Magdalena, siendo los dos últimos los principales afluentes de Colombia.

El departamento con mayor explotación de oro en Colombia es Antioquia, produciendo el 43% de totalidad del oro colombiano, con mayor número de municipios que desarrollan esta actividad, así mismo, es el departamento con mayor contaminación con mercurio; los municipios de Segovia y Remedios son la tercera zona más contaminada del mundo por mercurio (De Miguel, Clavijo, Ortega y Gómez, 2014; Díaz-Arriaga, 2014; Instituto Nacional de Salud, 2014; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012; Olivero-Verbel, 2010, 2011).

De acuerdo con el análisis del mercurio orgánico y los procesos de bioacumulación-biomagnificación, la tabla 3 agrupa los departamentos y las concentraciones de mercurio presente en peces, los cuales son parte del proceso de cadena trófica, destacando a Antioquia como el departamento con mayor promedio de peces con altas concentraciones de mercurio.

Tabla 3.

Niveles promedio de mercurio en peces en departamentos de Colombia

Departamentos con máximo nivel de mercurio en peces	Promedio de concentraciones de Hg en peces (mg/g)- Max.
Antioquia	3,3
Bolívar	2,9
Córdoba	2,8
Santander	1,7
Tolima	1,7
Chocó	1,3
Nariño	0,8

Departamentos con máximo nivel de mercurio en peces	Promedio de concentraciones de Hg en peces (mg/g)- Max.
Caldas	0,8
Cauca	0,5
Quindío	0,5
Guainía	0,4
Vaupés	0,4

Fuente: Adaptada de De Miguel et al. (2014).

Especies de peces contaminadas con mercurio en Colombia

Para Colombia, en especial para los departamentos asociados a explotación aurífera, se reportan las principales especies de peces de consumo humano, las cuales forman parte de la dieta de los habitantes de los departamentos en mención, como lo presenta la tabla 4.

Tabla 4.

Especies de peces de consumo de los principales departamentos auríferos de Colombia

Departamento	Principales especies de peces
Antioquia	Bocachico (<i>Prochilodus magdalenae</i>), Doncella (<i>Ageneiosus pardalis</i>), carachaza (<i>Pseudorinelepis genibarbis</i>), Mojarrita (<i>Hemigrammus ocellifer</i>), Tilapia (<i>Oreochromis sp.</i>), Nicuro (<i>Pimelodus blochiiclarias</i>)
Bolívar	Doncella (<i>Ageneiosus pardalis</i>), Bocachico (<i>Prochilodus magdalenae</i>), Vizcaína (<i>Curimatus mivartii</i>), Arenca (<i>Triporthus magdalenae</i>), Acara azul (<i>Aequidens pulcher</i>), Mojarra amarilla (<i>Caquetaia kraussii</i>), Corvina (<i>Argyrosomus regius</i>), Picuda (<i>Salminus affinis</i>)
Córdoba	Bocachico (<i>Prochilodus magdalenae</i>), Doncella (<i>Ageneiosus pardalis</i>), Mojarra (<i>Petenia krauussii</i>), Corvina (<i>Argyrosomus regius</i>), Capaz (<i>Pimelodus groszkopffii</i>), Moncholo (<i>Hoplias malabaricus</i>)

Fuente: Adaptada de De Miguel et al. (2014) y Díaz, Muñoz y Palman (2015).

La región de La Mojana está comprendida por los departamentos de Bolívar, Córdoba, Sucre y Antioquia, entre los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, una amplia zona de explotación aurífera que abarca los principales productores de oro en Colombia. Existen estudios que reportan las concentraciones de mercurio y metilmercurio en peces que son parte de la dieta de las comunidades mineras y comunidades aledañas (ver tabla 5).

Tabla 5.

Concentraciones de mercurio ($\mu\text{g g}^{-1}$) en peces de la Mojana, Colombia

Nombre común	Nombre científico	Mercurio Total	Metilmercurio
Doncella	<i>Ageneiosus pardalis</i>	0,512	0,497
Mojarra amarilla	<i>Caquetaia kraussii</i>	0,39	0,335
Arenca	<i>Triportheus magdalenae</i>	0,341	0,314
Moncholo	<i>Hoplias malabaricus</i>	0,278	0,274
Vizcaína	<i>Curimatus mivartii</i>	0,186	0,165
Bocachico	<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,106	0,095

Fuente: Adaptada de Díaz et al. (2015); Marrugo-Negrete, Olivero-Verbel, Lans y Benítez (2007); Olivero-Verbel (2011); Olivero-Verbel et al. (2004) y Olivero-Verbel, Solano y Acosta (1998).

Las especies de peces más consumidas en Antioquia y en Bolívar son doncella (*Ageneiosus pardalis*) y bocachico (*Prochilodus magdalenae*), las cuales presentan unas concentraciones de metilmercurio de 0,497 y 0,095 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. Coincidiendo con especies reportadas por Díaz et al. (2015) en el informe de vigilancia epidemiológica y evaluación del impacto en salud por exposición ocupacional y ambiental a mercurio en los departamentos de la zona de La Mojana.

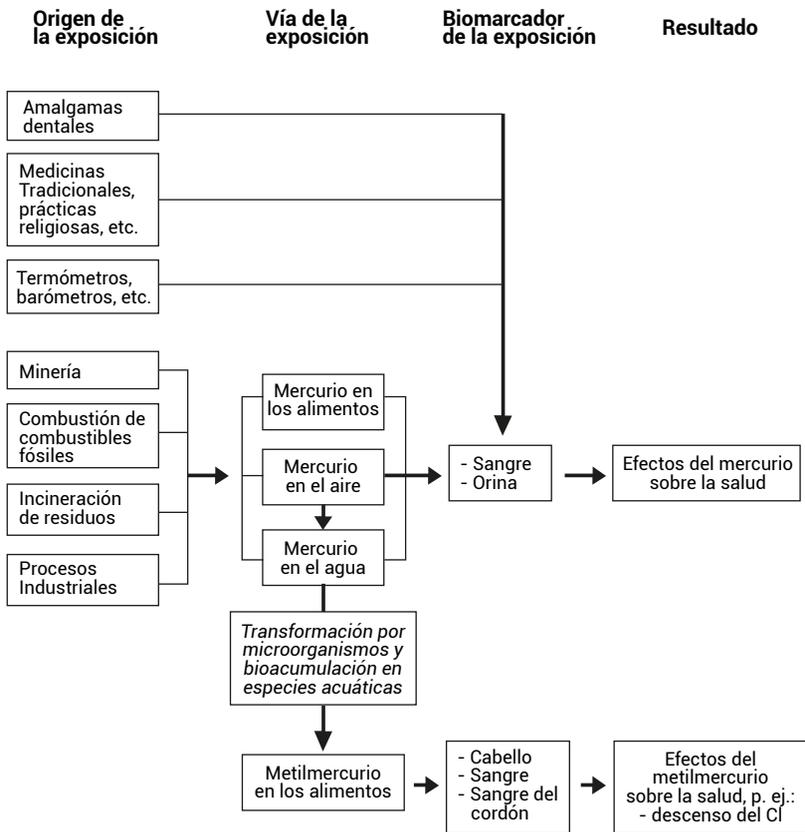
El mercurio en la salud humana

Los metales pesados son una de las categorías más relevantes de tóxicos ambientales considerados contaminantes que tienen una amplia distribución en el planeta y provienen de fuentes naturales y antropogénicas.

Los tres principales metales de consideración toxicología alta son el arsénico, el plomo y el mercurio, se encuentran en consideración por Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act –CERCLA y estos en algunas formas químicas en el entorno son cancerígenos (Byrns y Penning, 2012; Gibb *et al.*, 2014; Kao y Rusyniak, 2016).

Figura 15.

Marco de la exposición al mercurio, OMS



Fuente: Poulin y Gibb (2008).

La relación entre el mercurio, sus formas químicas y la salud humana lo resume la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo al marco de la exposición al mercurio, presentando el origen o fuente del mercurio, las vías de exposición, el biomarcador y el resultado indicando las rutas de afectación al ser humano (ver figura 15).

Según la Organización Internacional para la Investigación en Cáncer, con siglas en inglés, IARC (2018), el mercurio y los compuestos de mercurio inorgánico se clasifican en el grupo 3, no clasificado como carcinogénico en humanos, mientras que el metilmercurio se clasifica como grupo 2B, posible carcinogénico en humanos.

Toxicidad por mercurio

Las tres formas químicas de mercurio asociadas a alteraciones en la salud humana son: elemental, inorgánico y orgánico (Byrns y Penning, 2012).

El mercurio elemental está presente en amalgamas dentales, bombillos fluorescentes, termómetros, baterías, pinturas y de forma natural. Existen actividades relacionadas a las exposiciones ocupacionales como las actividades odontológicas, pintura, minería del oro, bronceadores, procesos metalúrgicos y galvanizados, actividades de la industria del papel, trabajos de cerámica, industria cloro-alcalinas y refinerías del metal propiamente dicho. La toxicidad de la forma elemental del mercurio se presenta la vía de exposición por la inhalación del vapor volatilizado (Beauchamp, Kusin, y Elinder, 2017; Byrns y Penning, 2012; Kao y Rusyniak, 2016; Poulin y Gibb, 2008; Syversen y Kaur, 2012).

El mercurio inorgánico tiene antecedentes como medicamento, cosmético y antiséptico tópico, en la fabricación de fuegos artificiales, en procesamiento de pigmentos, remedios populares. La vía de exposición es la ingestión –absorción gastrointestinal–, inhalación y absorción dérmica (Byrns y Penning, 2012; Gibb *et al.*, 2014; Kao y Rusyniak, 2016; Poulin y Gibb, 2008; Syversen y Kaur, 2012).

La forma orgánica del mercurio es el metilmercurio, asociado a algunas epidemias de intoxicación humana a gran escala, como por ejemplo en Minamata, Japón (Kao y Rusyniak, 2016). La principal vía de exposición es la ingesta, en especial asociada al consumo de pescado contaminado, siendo la vía de mayor exposición al mercurio orgánico en la población mundial (Beauchamp *et al.*, 2017; Byrns y Penning, 2012; Gibb *et al.*, 2014; Kao y Rusyniak, 2016; Poulin y Gibb, 2008; Syversen y Kaur, 2012).

Según Olivero-Verbel (2010) la forma elemental del mercurio, fuente de la exposición directa, es menos tóxica que el metilmercurio, sin embargo estas son las formas que afectan a las poblaciones que practican la minería del oro en Colombia. Adicional a esto, la forma química metilada del mercurio tiene una vida media-larga en el medio ambiente y en los organismos biológicos por su liposolubilidad y es inevitable que se biomagnifique a tal punto de afectar la salud del ser humano y cruce barreras como son la sangre, cerebro y la placenta (D'Itri, 1992; Oken *et al.*, 2016; Sakamoto, Itai y Murata, 2017; Syversen y Kaur, 2012).

En Colombia la vía de exposición por ingesta es debido al consumo de pescado, de acuerdo con De Miguel *et al.* (2014) en Antioquia se consume un promedio de pescado de 0,05 kilogramos por día, en Bolívar el consumo alcanza el promedio de 0,30 kilogramos de pescado por día, lo cual es un alto contenido respecto al consumo referido por los niveles de referencia planteados por la ONU (2010), en el numeral 14 del documento de orientación para identificar poblaciones en situación de riesgo de exposición al mercurio y con referencia establecida por la agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente (USEPA), con un límite de ingesta de metilmercurio de 0,1 µg/kg de peso corporal por día.

Al realizar el cálculo de ingesta de mercurio por consumo de pescado en los departamentos de Antioquia y Bolívar, la mayor ingesta de mercurio metílico la presenta el departamento de Bolívar en un rango entre 149,1

$\mu\text{g g}^{-1}$ MeHg por día por día y $28 \mu\text{g g}^{-1}$ MeHg por día por día y Antioquia presenta un rango entre $24,5 \mu\text{g g}^{-1}$ MeHg por día y $4 \mu\text{g g}^{-1}$ MeHg por día. Al comparar con el valor de referencia ONU-USEPA de $0,1 \mu\text{g/kg}$ de peso corporal por día, la ingesta con los niveles máximos de consumo de pescado excede los límites del valor de referencia.

Olivero-Verbel *et al.* (1995) desarrollaron un estudio con diferentes grupos ocupacionales asociados a minería aurífera al sur de Bolívar, siendo grupos de pescadores, mineros, otras actividades y un grupo control, encontrando niveles de: $5,23 \mu\text{g g}^{-1}$ en pescadores, $2,83 \mu\text{g g}^{-1}$ en mineros, $2,40 \mu\text{g g}^{-1}$ para otras actividades y $1,33 \mu\text{g g}^{-1}$ para el grupo control.

Otro reporte es presentado por Olivero-Verbel, Johnson-Restrepo y Arguello (2002), donde se reportan niveles de mercurio de $4,91 \mu\text{g g}^{-1}$ para la población de Caimito, Sucre. La Universidad del Valle (2017) reporta que la población de la ribera norte del río Guainía presenta niveles entre 20 y $50 \mu\text{g g}^{-1}$, en habitantes riverenos niveles hasta $93 \mu\text{g g}^{-1}$ y en el Atabapo un alarmante valor de $109 \mu\text{g g}^{-1}$. Al comparar estos reportes con los valores de referencia de la USEPA, $1 \mu\text{g g}^{-1}$, no solo se encuentran por encima del estándar –o que esta entidad asimila con alteraciones neurológicas y otros síntomas los niveles de mercurio en Colombia son alarmantes.

Sintomatología por intoxicación con mercurio

La sintomatología asociada al mercurio por minería aurífera se presenta de acuerdo a la exposición del mercurio elemental, el cual es absorbido a través de los pulmones y de allí distribuido a otros órganos del cuerpo, así mismo al inhalarse los vapores puede llegar directo al cerebro a través de las células nerviosas del sistema olfativo. Los principales órganos donde el mercurio es acumulado son el cerebro y el riñón (Beauchamp *et al.*, 2017; Byrns y Penning, 2012; Kao y Rusyniak, 2016; Olivero-Verbel, 2010).

La exposición aguda al mercurio elemental genera efectos tóxicos en el sistema nervioso central, neumonitis intersticial y al deterioro grave de la función respiratoria, temblores, labilidad emocional, insomnio, pérdida de memoria, atrofia muscular, taquicardia, gingivitis, afectaciones en el riñón generando insuficiencia renal, trastornos neuropsiquiátricos, muerte por inhalación, todo ese conjunto se intensifica y se vuelve irreversible si continúa la exposición a este metal (Beauchamp *et al.*, 2017; Byrns y Penning, 2012; Gibb *et al.*, 2014; Kao y Rusyniak, 2016; Kosnett, 2013; OMS, 2013, 2017; Ropper, Samuels y Klein, 2016; Vearrier y Greenberg, 2011).

Los síntomas del mercurio orgánico, metilmercurio, se manifiestan principalmente en el sistema nervioso central generando parestesias, ataxia, disartria, temblor y constricción de los campos visuales, los síntomas normalmente son progresivos y a veces mortales, los niños expuestos en el útero sufren retraso mental, deformidades en las extremidades, corea, convulsiones y microcefalia. En la toxicidad por mercurio orgánico, los síntomas suelen retrasarse de semanas, meses y años (Beeles, 2017; Bell y IPEN, 2017; Byrns y Penning, 2012; Kao y Rusyniak, 2016; Kosnett, 2013; Oken *et al.*, 2016; Razzaghi, Tinker y Crider, 2014; Ropper, Samuels y Klein., 2016; Sakamoto *et al.*, 2017)

El mercurio, la salud ambiental y la salud pública

El mercurio en sus relaciones con el medio ambiente modifica las condiciones naturales generando procesos de contaminación y modificando las interacciones dentro del ecosistema, lo que conlleva alteraciones en la salud de los seres vivos presentes en el ecosistema como tal y dando como resultado afectaciones en la salud humana.

En el año 2014, en Colombia se reportaron 32 814 casos de intoxicación por sustancias químicas, de los cuales el principal evento se genera por intoxicación con medicamentos, reportando 10 021 casos

correspondiente al 30,54%, seguido de intoxicación por plaguicidas, con 9214 casos, 28,08% y presentando el séptimo renglón de reportes está la intoxicación por metales pesados con 839 casos que corresponden al 2,56% del total reportado en el informe. Para la intoxicación por sustancias químicas el número de muertes en Colombia es de 297 en el año 2014, para intoxicación por metales no hay fatalidad como lo reporta el Instituto Nacional de Salud (2014).

De los 839 casos de intoxicaciones por metales, se reporta que el 66,38% (558 casos) fueron hombres y el 33,41% (280 casos) fueron mujeres. Los grupos de edad con mayor número de casos fueron de 40 a 44 años 10,92% (91 casos), seguido por 35 a 39 años 10,80% (10,80%) y 20 a 24 años 10,44% (87 casos) respectivamente (Instituto Nacional de Salud, 2014). Se debe considerar que la mayor producción de residuos de mercurio son Antioquia y Chocó, produciendo el 80% de oro de Colombia (Díaz-Arriaga, 2014), esto representa que para 32 departamentos la intoxicación por metales pesados se debe analizar desde lo local, lo regional y finalmente a nivel nacional, pues los 839 casos se deben entender desde estas escalas para analizar su relación a la salud pública.

Se reportan para Colombia 682 casos por mercurio, lo que corresponde al 92,03% de los casos de intoxicación por metales pesados, teniendo que el 51,68% son casos accidentales y 44,66% ocupacionales, o que involucra la contaminación ambiental por este residuo de minería aurífera, se puede evidenciar que el mercurio elemental y el mercurio metálico (biomagnificación en la cadena alimenticia y en ciclos ecosistémicos) están considerados dentro de los reportes generando interés en el proceso de vigilancia y análisis del riesgo en salud pública.

Links (2006), investigador de Johns Hopkins University, define la salud ambiental “como los factores en el ambiente que tienen el potencial de afectar la salud humana” (p.13), describiendo el tipo de factor como una sustancia presente en un componente ambiental (agua, aire, suelo

o alimentos), los cuales se transfieren al ser humano por inhalación, ingestión o absorción produciendo efectos adversos en la salud de los seres humanos, así como los factores biológicos como vectores presentes en el medio ambiente.

Así mismo el Departamento Nacional de Planeación (2008) establece que la salud ambiental es “el área de las ciencias que trata la interacción y los efectos que, para la salud humana, representa el medio en el que habitan las personas” (p.3).

Existen reportes como los presentados por Gibb y O’Leary (2014), donde se logra establecer la relación directa entre los niveles de concentraciones de mercurio en biomarcadores como orina y niveles de exposición directa de mercurio a nivel ocupacional en minería artesanal de oro y sus residuos, así mismo, reportan que existe relación entre los niveles de concentración de mercurio en niños que habitan en zonas de minería a pequeña escala con la presencia de esta sustancia contaminante y el biomarcador como es el cabello.

Así mismo, el estudio desarrollado por De Miguel *et al.* (2014) expone los cuatro principales departamentos con contaminación por mercurio que presentan la mayor probabilidad de tener consecuencias asociadas a la ingesta de pescado contaminado con metilmercurio, estos son Bolívar, Córdoba, Chocó y Antioquia por orden de factor de riesgo calculado. De igual manera, los principales municipios que presentan altos valores de riesgos por intoxicación por mercurio vía inhalación son Remedios, Segovia y el Bagre, municipios antioqueños.

En el informe de vigilancia epidemiológica y evaluación del impacto en salud por exposición ocupacional y ambiental a mercurio en los departamentos de la zona de La Mojana se reporta un promedio de tiempo de exposición de 149,6 meses, teniendo exposición de seis horas diarias promedio con una cantidad de 2708,6 gramos de mercurio para los cuatro departamentos de Bolívar, Córdoba, Sucre y Antioquia, lo que

indica una larga exposición al mercurio ocupacional en minería aurífera a pequeña escala, sumado al riesgo calculado por consumo y exposición, implicando posibles intoxicaciones crónicas futuras (De Miguel *et al.*, 2014; Díaz *et al.*, 2015).

Los departamentos de Colombia que presentan la mayor producción de oro son igualmente los que se reportan por generar la mayor cantidad de mercurio como residuo de la actividad aurífera; al ser generado por minería a pequeña escala no presenta una correcta disposición final conllevando a contaminación ambiental y afectación de los ecosistemas. Lo anterior se refleja en los resultados de pruebas de análisis de mercurio en peces que forman parte de la dieta de los habitantes de estos departamentos, reportando altos niveles de mercurio en forma metélica, lo que permite inferir que la bioacumulación y biomagnificación es un hecho en las cadenas alimenticias de los ecosistemas colombianos involucrados. Por último, los análisis de los biomarcadores en humanos y la sintomatología asociada a la intoxicación por mercurio demuestran una afectación de gran magnitud de la salud humana lo cual se considera un problema de salud pública para Colombia.

▣ Conclusiones

La minería de oro en Colombia, para ser minería de pequeña escala, es muy significativa y no se detendrá. Al realizarse ilegalmente se generan un gran número de pequeños puntos de producción que hacen que la regulación sea poco eficiente y sobre todo los focos de contaminación por mercurio sean de difícil control. Económicamente, la minería aurífera en el territorio colombiano corresponde a un renglón que aporta menos del 1% del PIB, al compararlo con los daños ambientales, el deterioro ecológico y la afectación a la salud humana no justifican la pérdida de la calidad de los recursos naturales.

Los departamentos de mayor producción de oro son los que reportan los casos de intoxicaciones con mercurio y los niveles más altos de pescado contaminado con metilmercurio, excediendo alarmantemente los

estándares internacionales y conllevando a síntomas asociados a esta situación. Es de considerar que los niveles reportados en humanos exceden hasta 109 veces la concentración determinada como causante de los problemas de salud, evidenciando una bioacumulación y una biomagnificación, lo que permite establecer que el mercurio como residuo de la minería aurífera en Colombia es un problema de salud pública.

La solución de fondo al problema de contaminación con mercurio es eliminar el uso de este en los procesos de minería aurífera, ratificando el convenio de Minamata e implementando de inmediato lo establecido en este protocolo internacional, produciendo oro desde mecanismos tecnificados como es el proceso químico de cianuración en circuito cerrado; pero, mientras esto sucede, la acumulación de mercurio en el suelo y en el agua, así como en los sedimentos, seguirá contaminando por décadas a menos que se inicien procesos de investigación que conlleven a tecnologías viables para el control de la contaminación y tratamiento de los componentes ambientales en las zonas afectadas.

Referencias

- Abbas, H., Sakakibara, M., Sera, K. y Arma, L. (2017). Mercury Exposure and Health Problems in Urban Artisanal Gold Mining (UAGM) in Makassar, South Sulawesi, Indonesia. *Geosciences*, 7(3), 44. doi: 10.3390/geosciences7030044
- Aronson, J. (2016). Mercury and mercurial salts. *Meyler's Side Effects of Drugs*. Elsevier B.V. (pp- 844-852). doi: 10.1016/B978-0-444-53717-1.01047-7
- Beauchamp, G., Kusin, S. y Elinder, C.G. (2017). *Mercury Toxicity*. Recuperado de: <https://emedicine.medscape.com/article/1175560-overview>
- Beeles, B. (2017). *La Enfermedad de Minamata y la Contaminación por mercurio; Pasado, Presente y Futuro*. Recuperado de: http://www.ipen.org/sites/default/files/documents/IPEN_PR_25_Sep_2017_ES.pdf
- Bell, L. y IPEN. (2017). *Contenido de mercurio en mujeres en edad reproductiva de 25 países*. Recuperado de: http://ipen.org/sites/default/files/documents/update_18_sept_ES_mercury-women-exec-summary-v1_4-es.pdf
- Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J. C., Denich, M. y Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.142
- Byrns, M. y Penning, T. (2012). Toxicología ambiental cancerígenos y metales pesados. En Goodman y Gilman(Eds.), *Las bases farmacológicas de la terapéutica* (12th ed.). Recuperado de: <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1882§ionid=138619866>

- Casallas, M. y Martínez, J. (2015). Panorama de la minería del oro en Colombia. *Ploutos*, 5(1), 20-27. Recuperado de: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/plou/article/download/1386/1346/>
- Castellanos, A., Chaparro-Narváez, P., Morales-Plaza, C., Alzate, A., Padilla, J., Arévalo, M. y Herrera, S. (2016). Malaria in gold-mining areas in Colombia. *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz*, 111(1), 59-66. doi:10.1590/0074-02760150382
- Castro, L. (2011). *Minería de oro artesanal y a pequeña escala en Timbiquí-Cauca una aproximación histórica a sus efectos socioambientales desde la perspectiva de los actores locales*. (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12439>
- Contraloría General de la Nación. (2013). *Informe especial: Minería Ilegal*. Recuperado de: <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/198738/Separata-Mineria-Ilegal.pdf/4d3d5cbe-4bda-430a-831e-ef2f6bbf5d0d?version=1.0>
- D'Itri, F. M. (1992). El ciclo de metilmercurio y otros metales pesados en ambientes lacustres. *Ingeniería Hidráulica En México: Publicación Técnica de La Secretaría de Recursos Hidráulicos*, 7(2/3), 75-91.
- De Miguel, E., Clavijo, D., Ortega, M. F. y Gómez, A. (2014). Probabilistic meta-analysis of risk from the exposure to Hg in artisanal gold mining communities in Colombia. *Chemosphere*, 108, 183-189. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.035
- Defensoría del Pueblo. (2015). *La Minería sin control: Un enfoque desde la vulneración de los Derechos Humanos*. Bogotá D. C. Recuperado de: <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/InformedeMineria2016.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2008). *Conpes 3550 de 2008*, 53. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes_3550_2008.pdf

- Díaz-Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 947-957. doi: 10.15446/rsap.v16n6.45406
- Díaz, S., Muñoz, N. y Palman, R. (2015). *Vigilancia epidemiológica y evaluación del impacto en salud por exposición ocupacional y ambiental a mercurio en los departamentos de la zona de La Mojana, Colombia, 2014 - 2015. Informe Quincenal Epidemiológico Nacional, 2014-2015*. Recuperado de: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/IQEN/IQEN vol 21 2016 num 19.pdf>
- Gibb, H., Leary, K. G. O., Varian-ramos, C. W., Swaddle, J. P., Cristol, D. A., Straka, E., ... Information, G. (2014). Mercury and mercurial salts. *Meyler's Side Effects of Drugs*, 24(4), 92-98. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444537171010477?via%3Dihub>
- Gibb, H. y O'Leary, K. G. (2014). Mercury Exposure and Health Impacts among Individuals in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community : A Comprehensive Review. *Environmental Health Perspectives*, 122(7), 667-672. Recuperado de: <https://ehp.niehs.nih.gov/1307864/>
- González-Martínez, C., Acosta, D., Guzmán, R. y Rodríguez, D. (2019). *Reforestación agroecológica: una alternativa para la protección del recurso hídrico*. (1st ed.). Bogotá DC.: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Gouvernement of Canada. (2009). *Chemicals and Our Environment*. Recuperado de: http://www.chemicalsubstanceschimiques.gc.ca/alt_formats/pdf/fact-fait/chem-chim_envIRON-spa.pdf
- Güiza, L. (2013). La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. *Dyna*, 80(181), 109-117. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n181/v80n181a12.pdf>

- Horvat, M., Sakamoto, M., Chan, L. y Faganeli, J. (2013). Mercury in contaminated sites: Identification, characterisation, impacts, and remediation. *Environmental Research*, 125, (1). doi: 10.1016/j.envres.2013.05.003
- IARC. (2018). *List of classifications, Volumes 1-121*. Recuperado de: http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php
- IDEAM. (2017). *Zonificación hidrogeográfica de Colombia*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/zonificacion-hidrografica>
- Instituto Nacional de Salud. (2014). Informe final del evento intoxicaciones por sustancias químicas, Colombia, año 2014. *Proceso de vigilancia y análisis del riesgo en salud pública*, 1(1), 1-40. Recuperado de: [https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/Intoxicaciones2014.pdf#search=Informe final del evento intoxicaciones por sustancias químicas 2014](https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/Intoxicaciones2014.pdf#search=Informe%20final%20del%20evento%20intoxicaciones%20por%20sustancias%20qu%C3%ADmicas%202014)
- Kao, L. W., & Rusyniak, Y. D. E. (2016). Intoxicación crónica: metales y otros oligoelementos. In *Goldman-Cecil. Tratado de medicina interna* (25th Editi, pp. 92–98). New Jersey: Elsevier Inc.
- Kocman, D., Wilson, S. J., Amos, H. M., Telmer, K. H., Steenhuisen, F., Sunderland, E. M., ... y Horvat, M. (2017). Toward an assessment of the global inventory of present-day mercury releases to freshwater environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2). doi: /10.3390/ijerph14020138
- Kosnett, M. (2013). Intoxicación por metales pesados y uso de quelantes como antídotos. In *Farmacología básica y clínica* (2nd ed., p. 2888). Bilbao: Librería Médica Berri. Recuperado de: <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1499§ionid=98759805>
- Langeland, A. L., Hardin, R. D. y Neitzel, R. L. (2017). Mercury levels in human hair and farmed fish near artisanal and small-scale gold mining communities in the madre de dios River Basin, Peru. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(3). doi: 10.3390/ijerph14030302

- LeDuc, D. L. y Terry, N. (2005). Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 32(11-12), 514-520. doi: 10.1007/s10295-005-0227-0
- Links, J. (2006). *Introduction to environmental health*. Johns Hopkins University. School of Public Health. Recuperado de: <http://ocw.jhsph.edu/courses/EnvironmentalHealth/PDFs/Lecture1.pdf>
- Malakoff, D. (2013). Taming a Mercurial Element. *Science* 341, 1442-1443. doi: 10.1126/science.341.6153.1442
- Marrugo-Negrete, J., Olivero-Verbel, J. O., Lans, E. y Benitez, L. (2007). Total mercury and methylmercury concentration in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(1), 21-30. doi: 10.1007/s10653-007-9104-2
- Martínez, A. (2014). *Minería y medio ambiente en Colombia*. Centro de Investigación Económica y Social. Bogotá D.C.: FEDESARROLLO. Recuperado de: https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/335/Repor_Junio_2014_Martinez.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Diagnóstico nacional de salud ambiental*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Cambio Climático en Colombia*. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2014). *Plan único nacional de mercurio*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Recuperado de: https://rds.org.co/apc-aa-files/ba03645a7c069b5ed406f13122a61c07/plan_unico_nacional_de_mercurio.pdf

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Ministerio del Interior, Unidad de Parques Nacionales de Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, y Contraloría General de la Nación. (2019). *Documento de Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano* (Sentencia No. T 445 de Agosto de 2016). Bogotá D.C. Recuperado de: <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnostico-actividad-minera-y-explotacin-ilicita-expertos.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2005). *Distritos mineros: Exportaciones e infraestructura de transporte*. Bogotá DC. Recuperado de: https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/875/1/upme_389_Distritos_Mineros_2005.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro*. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/cadena_de_mercurio/Cadena_Mercurio_Tomo_I.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Glosario técnico minero para Colombia*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Recuperado de: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Recuperado de: [https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/0/PES+Eliminación+Mercurio+\(1\).pdf/e2774fb2-e2a3-4229-8103-2183e5a71e18](https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/0/PES+Eliminación+Mercurio+(1).pdf/e2774fb2-e2a3-4229-8103-2183e5a71e18)
- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Análisis del comportamiento del PIB minero en el tercer trimestre de 2017*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Recuperado de: https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23900781/050917_pib_ii_trim_2017.pdf/60375c5e-c46b-47ad-8225-189789dbbaf7

- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Normatividad general para el control a la explotación ilícita de minerales*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Retrieved from <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Normativa%20general%20control%20explotacion%20ilicita%20minerales.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Producción de oro en Colombia*. Recuperado de: <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *ABECÉ de la minería*. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-mineria.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2018). *La minería en la transmisión de la malaria en Colombia*. Bogotá DC. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/presentacion-mineria-malaria.pdf>
- Núñez, S. (2017). *Biocumulación, toxicidad e interacción de metilmercurio y especies de selenio*. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de: <http://eprints.ucm.es/42588/1/T38771.pdf>
- Oken, E., Rifas-Shiman, S. L., Amarasiriwardena, C., Jayawardene, I., Bellinger, D. C., Hibbeln, J. R., ... y Gillman, M. W. (2016). Maternal prenatal fish consumption and cognition in mid childhood: Mercury, fatty acids, and selenium. *Neurotoxicology and Teratology*, 57(2016), 71-78. doi: 10.1016/j.ntt.2016.07.001
- Olivero-Verbel, J. (2010). *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana*. Universidad de Cartagena. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf
- Olivero-Verbel, J. (2011). Colombia: Environmental Health Issues. *Encyclopedia of Environmental Health*, 1(1), 740-754. doi: 10.1016/B978-0-444-52272-6.00395-0

- Olivero-Verbel, J., Johnson-Restrepo, B. y Arguello, E. (2002). Human exposure to mercury in San Jorge river basin, Colombia. *The Science of the Total Environment*, 289(1-3), 41-47. doi: 10.1016/S0048-9697(01)01018-x
- Olivero-Verbel, J., Johnson-Restrepo, B., Mendoza-Marín, C., Paz-Martínez, R. y Olivero, R. (2004). Mercury in the aquatic environment of the Village of Caimito at the Mojana region, north of Colombia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 159(1), 409-420. doi: 10.1023/B:WATE.0000049162.54404.76
- Olivero-Verbel, J., Mendoza, C. y Mestre, J. (1995). Mercurio en cabello de diferentes grupos ocupacionales en una zona de minería aurífera en el norte de Colombia. *Revista de Saúde Pública*, 29(5), 1518-1527. doi:10.1590/S0034-89101995000500006
- Olivero-Verbel, J., Solano, B. y Acosta, I. (1998). Total mercury in muscle of fish from two marshes in goldfields, Colombia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 61(1), 182-187. doi: 10.1007/s001289900746
- OMS. (2013). *Efectos de la exposición al mercurio en la salud de las personas que viven en comunidades donde se practica la minería aurífera artesanal y en pequeña*. WHO. Washington DC: Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2017). *El mercurio y la salud*. Recuperado de: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- ONU. (2010). *Resumen ejecutivo del documento sobre orientación para identificar poblaciones en situación de riesgo de exposición al mercurio*. Chiba: Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/meetings/inc2/spanish/INC2_19_s.pdf
- Pedraza, J.A. (2017). *Los 20 países que más extraen oro en el Mundo*. Recuperado de: <https://www.oroinformacion.com/es/OroInformacion/60/236/Éstos-son-los-20-países-que-extraen-más-oro.htm>

- Poulin, J. y Gibb, H. (2008). Mercurio. Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. *Organización Mundial de La Salud*, 75. Recuperado de: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78130/1/9789243596570_spa.pdf
- Razzaghi, H., Tinker, S. C. y Crider, K. (2014). Blood mercury concentrations in pregnant and nonpregnant women in the United States: National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2006. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 210(4), 3-57. doi: 10.1016/j.ajog.2013.10.884
- Ropper, A., Samuels, M. y Klein, J. (2016). Trastornos del sistema nervioso por fármacos, toxinas y otros agentes químicos. En A. Ropper, M. Samuels y J. Klein (Eds.). *Adams y Victor. Principios de neurología* (10th ed.). Ciudad de México: Mc Graw Hill. Recuperado de: <https://accessmedicina.mhmedical.com/book.aspx?bookid=1908>
- Sakamoto, M., Itai, T. y Murata, K. (2017). Effects of Prenatal Methylmercury Exposure: From Minamata Disease to Environmental Health Studies. *Nihon Eiseigaku Zasshi. Japanese Journal of Hygiene*, 72(3), 140-148. doi: 10.1265/jjh.72.140
- Si, L. y Ariya, P. A. (2018). Recent advances in atmospheric chemistry of mercury. *Atmosphere*, 9(2), 1-20. doi:10.3390/atmos9020076
- Syversen, T. y Kaur, P. (2012). The toxicology of mercury and its compounds. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 26(4), 215-226. doi: 10.1016/j.jtemb.2012.02.004
- Su, Y., Han, F., Shiyab, S. y Monts, D. L. (2007). Phytoextraction and Accumulation of Mercury in Selected Plant Species Grown in Soil Contaminated with Different Mercury Compounds. *WM'07 Conference*, (3), 13. Recuperado de: <http://www.wmsym.org/archives/2007/pdfs/7174.pdf>

- Thenepalli, T., Chilakala, R., Habte, L., Tuan, L. Q. y Kim, C. S. (2019). A Brief Note on the Heap Leaching Technologies for the Recovery of Valuable Metals. *Sustainability*, 11(12), 3347. doi: 10.3390/su11123347
- Universidad del Valle. (2017). *En Guainía, la gente tiene 60 veces más mercurio que el permitido*. Recuperado de: <http://uvsalud.univalle.edu.co/comunicandosalud/wp-content/uploads/2017/09/12.09.17-En-Guainía-la-gente-tiene-60-veces-más-mercurio-que-el-permitido.pdf>
- Vearrier, D. y Greenberg, M. (2011). Care of Patients Who Are Worried about Mercury Poisoning from Dental Fillings. *The Journal of the American Board of Family Medicine*, 24(4), 476-476. doi:10.3122/jabfm.2011.04.110023
- Yanacocha. (2017). *El proceso del oro de principio a fin*. Recuperado de: <http://www.yanacocha.com/wp-content/uploads/Proceso-de-producción-del-Oro-Yan>

Capítulo 5

Adriana Lucía Acevedo-Supelano
Camilo José González-Martínez

Karina Susana Pastor-Sierra
Luis Alejandro Gómez-Barrera



Legislación minera y políticas públicas en Colombia



▣ Introducción

Este capítulo analiza la normatividad minera en Colombia en aspectos relacionados con la actividad y la explotación de minerales, con un especial énfasis en los efectos en la salud humana por las actividades mineras y las políticas públicas de la minería en el marco de la sentencia T 445 de 2016 de la Corte Constitucional, por la cual se ordenó al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio del Interior, Unidad de Parques Naturales, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y a la Contraloría General de la República realizar mesas de trabajo interinstitucionales para una investigación sobre los impactos de las actividad minera en el territorio colombiano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

La minera es una industria creciente en Colombia, especialmente por factores externos como el incremento de los precios internacionales y factores internos proporcionados por la política impulsada por los gobiernos de turno en la búsqueda de inversionistas externos (Martínez, Peña, Calle y Velásquez, 2013).

Desde la década de los noventa se ha favorecido la seguridad jurídica a la inversión extranjera, con incentivos y pactos tributarios de largo plazo en favor del capital privado, estrategia que tuvo su mayor auge en los dos periodos de Álvaro Uribe Vélez; y durante el gobierno de Santos se declaró que el sector minero energético junto con la infraestructura de transporte, vivienda, agropecuaria e innovación eran las cinco locomotoras del desarrollo y prosperidad nacional (Martínez, *et al.*, 2013).

Este tema sigue presente en la actual agenda de gobierno, en el año 2018 el Ministerio de Minas y Energía avanzó en el camino hacia una transición energética, adaptación del sector minero-energético al cambio climático y la reactivación de la industria de los hidrocarburos y la minería; este sector genera más de 350 000 empleos directos y más de un millón de empleos indirectos (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2010).

El sector minero se ha caracterizado por la producción de carbón, níquel, esmeraldas, oro y materiales de construcción. Ha representado en promedio el 2,2% del PIB entre los años 2010 al 2015 aportando el 19,6 % de las exportaciones y el 16 % de la inversión extranjera directa (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

Todas estas razones hacen necesaria imprimir una seguridad jurídica al sector en cuanto a la transparencia, la formalización de este, la reacción contra la minería ilegal, políticas públicas y de género en el sector (Presidencia de la República, 2018), instrumentos que permiten disminuir las brechas existentes y hacen pertinentes y relevantes este tipo de estudios como el desarrollado en el presente libro.

El sector minero en Colombia

Colombia detenta una abundancia de recursos naturales que de acuerdo con la Corte Constitucional en la sentencia C-221 de 1997, cuyo Magistrado ponente fue Alejandro Martínez Caballero, se estableció

una definición a los recursos naturales como aquellos “elementos de la naturaleza y del medio ambiente, esto es, no producidos directamente por los seres humanos, que son utilizados en distintos procesos productivos”. (1997)

La misma sentencia realiza la distinción entre recursos naturales renovables y no renovables, siendo los primeros aquellos que la naturaleza repone periódicamente mediante procesos biológicos o de otro tipo, es decir se renuevan por sí mismos. En contrario *sensu* los recursos no renovables existen en cantidades limitadas y no se renuevan periódicamente por procesos naturales (Corte Constitucional, 1997).

En términos mundiales se considera que Colombia no es un país minero, es pequeño en explotación minera, pero podría llegar a convertirse en un jugador importante en la industria, pero, para lograr tal objetivo, deberán existir algunas condiciones que se consideran primordiales tales como la seguridad y estabilidad jurídica para un desarrollo integral de los proyectos (Mineros S.A., 2011).

Seguridad materializada entendida según el artículo de *La Nación* “Seguridad jurídica para todos” como la seguridad física de las personas y la vigencia de un sistema legal coherente y compacto unido a un sistema de justicia transparente con una estabilidad completa en su estructura general y con énfasis especial en el rol del orden institucional tanto en el ámbito público como privado (2004).

Evolución histórica normativa

Existe información de presencia de actividad minera en Colombia desde finales del siglo XVI, rastros que demuestran la presencia de rasgos de ilegalidad. En Antioquia aproximadamente en los años 1500 era una actividad de la colonia española, que se caracterizó por ser una institución esclavista, sin ningún desarrollo tecnológico y, por supuesto, sin protección al medio ambiente, ya que esta actividad estaba encaminada a recoger riquezas como oro, plata y perlas para ser llevadas a Europa (Vargas, 2016).

A finales del siglo XVII la actividad minera alcanza su mayor expansión en el territorio nacional, auge que se fortalece por ser la principal actividad económica y la fuente de ingreso más importante del virreinato, para la cual los indígenas fueron sustituidos por esclavos africanos (Vargas, 2016).

En cuanto a normatividad de la época existían algunos antecedentes tal como el quinto real a la producción minera, instaurado por la corona española en el año 1504 y que consistía en un impuesto a las casas de fundición como mecanismo de control sobre la producción y circulación del oro (Sánchez, 2015).

En la Nueva Granada, el Congreso en el año 1824 expide una norma para lograr control sobre la producción minera llamada, la Ley sobre la exportación de frutos y producciones, el objetivo de esta era fortalecer la debilidad institucional y el control de la evasión de los impuestos (Botero, 2007).

Legado español a la legislación colombiana

De las primeras leyes en minería de las que se tenga noticia dentro de la legislación española está la Doctrina de la accesión, con antecedentes en el derecho romano y vinculada en el siglo XVIII al derecho natural (Ossa, 1999).

Por medio de esta doctrina se atribuía al dueño del predio superficial el dominio originario de las minas que se encontraran en la superficie o en las profundidades y por lo tanto se le reconocía el derecho a explotarlas, “las minas que estaban en propiedad o en tierras del rey son del rey; las minas que estaban en tierras del señorío son del señor y así sucesivamente” (González, 2014, p.7).

Este es el origen del aforismo usado en el derecho quien es dueño del suelo, es dueño del cielo y del infierno² que con el pronunciamiento conocido como Fuero Viejo de Castilla del año 1228, es por el que se

² Aforismo latino: «*Quia dominus est soll dominus est coelli et infernum*».

legaliza la entrega del dominio de los predios al Rey para explotar la minera sin licencia. Posteriormente se promulgan Las siete partidas, El ordenamiento de Alcalá de 1340, las ordenanzas de Felipe II (1559 y 1567), la recopilación de las Leyes de los Reinos Unidos y la Novísima Recopilación en 1804 (González, 2014).

Legislación minera colombiana 1823-1909

Los aspectos más relevantes en las leyes mineras en Colombia desde 1823 y que son la base del actual cuerpo normativo (González, 2014) son:

Figura 16.

Aspectos más relevantes en las leyes mineras en Colombia desde 1823 y que son la base del actual cuerpo normativo

- 

• Primera ley colombiana sobre minas para dar el arrendamiento de las minas del Estado excepto las de platino.
- 

• Ley sobre oficina de registro de instrumentos públicos y privados para la formalidad de la inscripción de los documentos de propiedad incluyendo a las minas.
- 

• Reglamento sobre minas: es la primera ley minera autónoma, sancionada por Simón Bolívar.
- 

• Ley de administración de justicia: radicando la jurisdicción y competencia de los litigios mineros en la justicia ordinaria.
- 

• Se incorporan los derechos fiscales a las rentas provinciales que cancelaran los nuevos propietarios de minas.
- 

• Ley 19 que establece el término para registro de títulos mineros y los derechos que otorga el registro.

-
- 1844** • Ley orgánica de registro.
 - 1846** • Ley 66 con disposiciones sobre las minas de Mamato y Supía.
 - 1847** • Ley de arrendamiento y elaboración de minas de esmeraldas.
• Establece la reserva en favor del estado.
 - 1860** • Ley 27 referente a terrenos baldíos con minas.
• Cesión para explotación.
 - 1876** • Ley 102 adjudicación de la administración de las minas por el ejecutivo.
 - 1907** • Ley 21 autorizó al gobierno para vender al exterior platino y minerales radioactivo junto con la adjudicación del cobre.
 - 1909** • Ley 19 declara libre de derechos de exportación los metales extraídos de las minas.
• Ley 120 modifica las tarifas de aduanas para la importación de maquinaria y materias primas destinadas a la explotación minera.

Fuente: elaboración propia a partir de González (2014).

Constitución Política de 1886

La consagración en materia minera realizada por la carta política de 1886 fue escasa y es descrita en palabras de Vivian Cock y citada por González (2014):

Adolecía de una relativa precariedad normativa en la materia, ya que solamente los artículos 4 y 202 consagraban la propiedad exclusiva de la nación sobre el territorio con los bienes públicos y sobre los baldíos, minas y salinas; así como sobre las minas de oro, plata, platino y piedras preciosas. (p. 79).

Posteriormente se expide la Ley 38 de 1887 por la cual se adopta por parte de la Nación el Código del extinguido Estado Soberano de Antioquia, el cual reglamentaba en su artículo 202, todo lo concerniente a propiedad, explotación y beneficio de las minas en armonía con la Constitución Política (González, 2014).

Constitución Política de Colombia de 1991

En 1990, Colombia estaba sumergida en un estancamiento de la producción y competitividad, lo que llevó a que se adoptara el programa de apertura e internacionalización de la economía. Se formularon políticas relacionadas con la capacidad productiva, fortalecimiento del sistema financiero, estímulo a la inversión productiva, mejoramiento de la gestión pública, la readecuación de la infraestructura de servicio y racionalización del comercio exterior (Negrete, 2013).

Por experiencias significativas como la llevada a cabo con la British Petroleum Co. se hizo prioridad dar piso constitucional a las normas concernientes a la propiedad del Estado sobre el subsuelo y la explotación de los recursos naturales no renovables. Es así como en el capítulo 3 artículo 80 de la Constitución Política de Colombia se establece que:

El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas. (Constitución Política, 1991).

Este artículo se desarrolla en concordancia con el artículo 79 del mismo cuerpo normativo en el que se contempla que:

Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.

Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. (Constitución Política, 1991).

Aquí es evidente la evolución normativa del concepto de propiedad desde las etapas de la colonia hasta la carta magna actual que muestra la orientación que se ha dado a la legislación minera y al Estado, que desde épocas históricas ha ostentado el dominio público y la potestad de concesión a terceros para adelantar explotaciones y desarrollos mineros para el aprovechamiento de los recursos naturales (González, 2014).

Esta afirmación tiene su consagración en el artículo 332 de la Constitución Política (1991), “El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes” (p. 92).

Este mandato constitucional unido al Código de Minas en su artículo 13, es lo que da el sustrato legislativo para la declaratoria de utilidad pública e intereses social de la industria minera, lo que permite al Estado, por medio de entidades como la Agencia Nacional de Minería y gobernaciones delegadas, autorizar a particulares la explotación de los minerales con el otorgamiento de títulos mineros (Negrete, 2013).

Esto ha llevado a múltiples violaciones y transgresiones al derecho de propiedad de los predios de los habitantes de las zonas, con nefastos resultados para los lugareños como el desplazamiento de personas, el cambio de uso de suelo y consecuencias ambientales; todo esto por el privilegio que les otorga la declaratoria de actividades mineras sobre las que ostentan este carácter.

Esta declaratoria de utilidad pública riñe con el artículo 1 del Decreto Ley 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, el cual dispone

que “el ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. La preservación y manejo de los recursos naturales renovables también son de utilidad pública e interés social” (Congreso de la República, 1974, p. 1).

Los derechos fundamentales frente a la explotación minera

Desde la promulgación de la Constitución Política en 1991, el Estado ha implementado el modelo extractivista de los recursos naturales no renovables trayendo como consecuencia actividades productivas que se privilegian aun por encima de los derechos fundamentales y colectivos de los colombianos, derivando en conflictos sociales, ambientales, económicos y hasta culturales en las diversas regiones del país (Negrete, 2013).

El Estado colombiano, según lo previsto por la Ley 99 de 1993 en su artículo 3, busca armonizar el desarrollo económico, la elevación de la calidad de vida, el bienestar social, la preservación del medio ambiente, sin agotar la base de los recursos naturales renovables, en condiciones que permitan vivir a las generaciones futuras. Se debe armonizar entonces con el mandato constitucional de garantizar los derechos de los habitantes del territorio colombiano como parte de sus fines –artículo 2 de la Constitución Política– para asegurar el respeto a los derechos, el desarrollo económico y social, pero con la supremacía del interés general sobre el particular.

Por estas razones es que toma relevancia la clasificación constitucional de los derechos en primera, segunda, tercera y hoy hasta cuarta generación o derechos a la información. Pero, para efectos del presente desarrollo conceptual se hace especial énfasis en los de tercera generación, considerados como el conjunto de derechos producto de acuerdos por parte de la comunidad internacional, como lo es un medio ambiente sano y al desarrollo que permita una vida digna, el derecho

a la autodeterminación, a la identidad nacional y cultura, a la paz, a la coexistencia pacífica, solución de problemas alimentarios, demográficos, educativos y ecológicos (Negrete, 2013).

En este orden de ideas la Corte Constitucional empieza a realizar una serie de pronunciamientos y a construir jurisprudencia relacionada con el derecho a un ambiente sano, casos como la sentencia de la acción de tutela T-415 de 1992 en la que refiere que:

El derecho al medio ambiente y en general, los derechos de la llamada tercera generación, han sido concebidos como un conjunto de condiciones básicas que rodean al hombre, que circundan su vida como miembro de la comunidad y que le permiten su supervivencia biológica e individual, además de su desempeño normal y desarrollo integral en el medio ambiente. (Corte Constitucional, 1992).

En este orden de cosas, surge entonces la protección colectiva a la cual se hace alusión en la Sentencia T- 517 de 2011, en la que la Corte Constitucional vía acción de tutela se refiere a la protección de los derechos colectivos

Reiteración jurisprudencial. Diferenciación entre la vulneración de un derecho fundamental y un derecho colectivo. Procedencia de la acción de tutela para aquellos eventos en que la afectación de un interés colectivo conlleve también a la vulneración o amenaza de un derecho fundamental.

De acuerdo con lo establecido en la Constitución Política, existen dos mecanismos diferentes para que, a través de ellos, se pretenda obtener, por un lado, la protección de los derechos fundamentales y, por el otro, la de los derechos colectivos. Así, en sus artículos 86 y 88 se consagró para el primer caso la acción de tutela y, para el segundo, las acciones populares y las de grupo.

Por regla general, la acción de tutela no procede para la protección de los derechos colectivos, pues la misma ha sido concebida como mecanismo idóneo para la protección de los derechos netamente fundamentales,

mientras que el ordenamiento jurídico contempló a las acciones populares como el instrumento judicial especial de protección para amparar derechos o intereses de carácter colectivos.

[...]

No obstante, es de indicar que la jurisprudencia constitucional ha establecido que en algunos casos los juzgadores podrán admitir la acción de tutela cuando se constate que existe conexidad entre la vulneración de derechos colectivos y la afectación de derechos fundamentales, es decir, que de la violación de los intereses colectivos se derive la amenaza de prerrogativas individuales (...), la jurisprudencia constitucional ha reconocido la procedencia de la acción de tutela cuando se cumplan los siguientes requisitos:

- (I) Que exista conexidad entre la vulneración de un derecho colectivo y la violación o amenaza a un derecho fundamental, de tal suerte que el daño o la amenaza del último sea consecuencia inmediata y directa de la perturbación del derecho colectivo.
- (II) El peticionario debe ser la persona directa o realmente afectada en su derecho fundamental, pues la acción de tutela es de naturaleza subjetiva.
- (III) La vulneración o la amenaza del derecho fundamental no pueden ser hipotéticas, sino que deben aparecer expresamente probadas en el expediente.
- (IV) Finalmente, la orden judicial debe buscar el restablecimiento del derecho fundamental afectado, y no del derecho colectivo en sí mismo considerado, pese a que con su decisión resulte protegido, igualmente, un derecho de esta naturaleza. (Corte Constitucional, 2011).

Es también importante resaltar la Sentencia C-595/10 de la Corte Constitucional (2010) que determinó:

El interés superior del ambiente sano para la subsistencia de la humanidad. Los deberes constitucionales y los principios que lo fundamentan.

La persona y el entorno ecológico. Colombia es un Estado personalista fundado en el respeto de la dignidad humana (artículo 1° superior). La Constitución reconoce la primacía de los derechos inalienables del ser humano (artículo 5° superior). Se ha de proteger, entonces, el derecho a la vida, esto es, que la persona exista, además de garantizar cierta calidad de subsistencia (dignidad humana, artículo 1° superior). [...]

La Constitución muestra igualmente la relevancia que toma el medio ambiente como bien a proteger por sí mismo y su relación estrecha con los seres que habitan la tierra.

La conservación y la perpetuidad de la humanidad dependen del respeto incondicional al entorno ecológico, de la defensa a ultranza del medio ambiente sano, en tanto factor insustituible que le permite existir y garantizar una existencia y vida plena. Desconocer la importancia que tiene el medio ambiente sano para la humanidad es renunciar a la vida misma, a la supervivencia presente y futura de las generaciones.

En el mundo contemporáneo, la preocupación ambientalista viene a tomar influencia decisiva solamente cuando resulta incuestionable que el desarrollo incontrolado y la explotación sin límites de los recursos naturales logran suponer su esquilmarían definitiva.

La Constitución ecológica. El Constituyente de 1991 instituyó nuevos parámetros en la relación persona y naturaleza. Concedió una importancia cardinal al medio ambiente que ha llevado a catalogarla como una “Constitución ecológica” o “Constitución verde”.

Así lo sostuvo la Corte en la sentencia C-126 de 1998: “La Constitución de 1991 modificó profundamente la relación normativa de la sociedad colombiana con la naturaleza. Por ello esta Corporación ha señalado [...] que la protección del medio ambiente ocupa un lugar tan trascendental en el ordenamiento jurídico que la Carta contiene una verdadera “Constitución ecológica”, conformada por todas aquellas disposiciones que regulan la relación de la sociedad con la naturaleza y que buscan proteger el medio ambiente”.

El bien jurídico constitucional del medio ambiente y los deberes correlativos. La Constitución ecológica lleva implícita el reconocimiento al medio ambiente de una triple dimensión: “de un lado, es un principio que irradia todo el orden jurídico puesto que es obligación del Estado proteger las riquezas naturales de la Nación. De otro lado, aparece como el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano, derecho constitucional que es exigible por diversas vías judiciales. Y, finalmente, de la Constitución ecológica derivan un conjunto de obligaciones impuestas a las autoridades y a los particulares. Es más, en varias oportunidades este Tribunal ha insistido en que la importancia del medio ambiente en la Constitución es de tal magnitud que implica para el Estado “unos deberes calificados de protección”.

La defensa del medio ambiente constituye un objetivo de principio dentro de la forma organizativa de Estado social de derecho acogida en Colombia. Ha dicho la Corte que constitucionalmente: “involucra aspectos relacionados con el manejo, uso, aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, el equilibrio de los ecosistemas, la protección de la diversidad biológica y cultural, el desarrollo sostenible, y la calidad de vida del hombre, entendido como parte integrante de ese mundo natural, temas, que, entre otros, han sido reconocidos ampliamente por nuestra Constitución Política en muchas normas que establecen claros mecanismos para proteger este derecho y exhortan a las autoridades a diseñar estrategias para su garantía y su desarrollo.

En efecto, la protección del medio ambiente ha adquirido en nuestra Constitución un carácter de objetivo social, que, al estar relacionado adicionalmente con la prestación eficiente de los servicios públicos, la salubridad y los recursos naturales como garantía de la supervivencia de las generaciones presentes y futuras, ha sido entendido como una prioridad dentro de los fines del Estado y como un reconocimiento al deber de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Dados los factores perturbadores y el riesgo que enfrenta el medio ambiente que le ocasionan daños irreparables e inciden nefastamente en la existencia de la humanidad, la Corte ha sostenido el carácter de

derecho fundamental por conexidad, al resultar ligado indefectiblemente con los derechos individuales a la vida y a la salud de las personas. Su reconocimiento general en el ordenamiento constitucional es como derecho colectivo, cuya vía judicial de protección son las acciones populares (art. 88 superior).

El ambiente sano también tiene el carácter de servicio público erigiéndose junto con la salud, la educación y el agua potable, en un objetivo social cuya realización material encuentra pleno fundamento en el fin esencial de propender por el mejoramiento de la calidad de vida de la población del país (artículos 2, 49, 365 y 366 superiores). (Corte Constitucional, 2010).

Por tanto, es al Estado a quien le corresponde garantizar los derechos fundamentales, los derechos colectivos y el servicio público que significa el derecho al ambiente sano. Razón por la cual, ante el incumplimiento y transgresión de los deberes del Estado de garantizar la protección de los derechos citados, situación que se está presentando en varias zonas del país, en virtud del desarrollo de las actividades mineras, la acción de tutela y las acciones populares se constituyen en mecanismos idóneos se ha de buscar dicha protección por parte de los particulares (Negrete, 2013).

En este punto es importante reiterar la consagración legal del Decreto Ley 2811 de 1974 mencionado anteriormente, unida a los artículos 1 y 48 de la Constitución Política, adicionando además la jurisprudencia hasta ahora citada y en los que se ordena privilegiar el interés general, en todos los casos la conservación ambiental, la preservación de los ecosistemas, planificar el uso de los recursos naturales y un alcance real y efectivo a los procesos de licenciamiento ambiental y así tener un verdadero control de las actividades mineras, que se desarrolle solo en las zonas en las que su impacto ambiental pudiera ser efectivamente prevenido, mitigado, corregido y compensando, teniendo siempre como norte que el subsuelo también es fuente de procesos vitales que ocurren

en la superficie, que es el hábitat de organismos vivos y que igualmente es el medio conductor de aguas subterráneas siendo primordial su protección y manejo especial (Negrete, 2013).

Pese a las sanciones administrativas contempladas por la Ley 1333 de 2009 por las cuales se establece el procedimiento sancionatorio ambiental. Estas pueden resultar insuficientes y hasta inocua cuando de materia de compensaciones, daño ambiental se trata y más aún de responsabilidades por parte de infractores.

Son ejemplos de la poca importancia que se da en el ámbito minero a las sanciones y en muchas ocasiones la violación sistemática pese a existir una especial protección al medio ambiente. El artículo 4 de la Ley 1333 de 2009 establece que:

Las sanciones administrativas en materia ambiental tienen una función preventiva, correctiva y compensatoria, para garantizar la efectividad de los principios y fines previstos en la Constitución, los Tratados Internacionales, la Ley y el Reglamento. Las medidas preventivas, por su parte, tienen como función prevenir, impedir o evitar la continuación de la ocurrencia de un hecho, la realización de una actividad o la existencia de una situación que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana. (Congreso de la República, 2009).

Relaciones con el ámbito penal

El Código Penal colombiano se expidió por medio de la Ley 599 de 2000 y en el artículo 338 consagra como tipo penal, la explotación ilícita de yacimiento minero y otros materiales, así: “el que sin permiso de autoridad competente o con incumplimiento de la normatividad existente explote, explore o extraiga yacimiento minero, o explote arena, material pétreo o de arreste de los cauces y orillas de los ríos por medios capaces de causar graves daños a los recursos naturales o al medio ambiente incurrirá en prisión de dos a ocho años y multas de cien a cincuenta mil salarios mínimos legales mensuales vigentes”. (Congreso de la República, 2000)

Razón que expresa la importancia de la problemática respecto a la violación de la seguridad y preservación del medio ambiente en concordancia con el artículo 331 del mismo cuerpo legislativo que fue modificado por el artículo 33 de la Ley 1453 de 2011 que reformó el Código Penal, el de Procedimiento Penal, el Código de Infancia y Adolescencia, las reglas sobre extinción de dominio y otras disposiciones en materia de seguridad que consagra:

Daños en los recursos naturales: el que con incumplimiento de la normatividad existente destruya, inutilice, haga desaparecer o de cualquier otro modo dañe los recursos naturales a que se refiere este título, o a los que estén asociados con estos, incurrirá en prisión de cuarenta y ocho a ciento ocho meses y multas de ciento treinta y tres puntos treinta y tres a quince mil salarios mínimos mensuales vigentes. La pena se aumentará en una tercera parte cuando se afecten ecosistemas naturales, calificados como estratégicos que hagan parte del sistema nacional, regional y local de las áreas especialmente protegidas. Cuando el daño sea consecuencia de la acción u omisión de quienes ejercen funciones de control. (Congreso de la República, 2011).

Junto con estas regulaciones se debe adicionar el Artículo 332 del Código Penal también modificado por la Ley 1453 de 2011 en su artículo 34, así:

El que con incumplimiento de la normatividad existente, provoque, contamine o realice directa o indirectamente emisiones, vertidos, radiaciones, ruidos, depósitos o disposiciones al aire, la atmósfera o demás componentes del espacio aéreo, el suelo, el subsuelo, las aguas terrestres, marítimas o subterráneas o demás recursos naturales, en tal forma que ponga en peligro la salud humana o los recursos fáunicos, forestales, florísticos o hidrobiológicos, incurrirá, sin perjuicio de las sanciones administrativas a que hubiere lugar, en prisión de cincuenta y cinco (55) a ciento doce (112) meses y multa de ciento cuarenta (140) a cincuenta mil (50.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

La pena se aumentará de una tercera parte a la mitad cuando en la comisión de cualquiera de los hechos descritos en el artículo anterior sin perjuicio de las que puedan corresponder con arreglo a otros preceptos de este Código concorra alguna de las circunstancias siguientes:

1. Cuando la conducta se realice con fines terroristas sin que la multa supere el equivalente a cincuenta mil (50.000) salarios mínimos mensuales legales vigentes.
2. Cuando la emisión o el vertimiento supere el doble de lo permitido por la normatividad existente o haya infringido más de dos parámetros.
3. Cuando la contaminación, descarga, disposición o vertimiento se realice en zona protegida o de importancia ecológica.
4. Cuando la industria o actividad realice clandestina o engañosamente los vertimientos o emisiones.
5. Que se hayan desobedecido las órdenes expresas de la autoridad administrativa de corrección o suspensión de las actividades tipificadas en el artículo anterior.
6. Que se haya ocultado o aportado información engañosa o falsaria sobre los aspectos ambientales de la misma. (Congreso de la República, 2011).

Todas estas normas deberán estar en concordancia con los artículos 337 y 338 del código penal y ser relacionados con los artículos 159, 160, 161, 162, 163 y 164 del estatuto minero que se concentran en el aprovechamiento ilícito de recursos mineros, lleva a un planteamiento en el que la minería ilegal se vería inmersa en diferentes escenarios de responsabilidad no excluyentes los unos de los otros (Sánchez, 2015).

En primer lugar, el que presenta la vía administrativa por el proceso sancionatorio de la mencionada Ley 1333 de 2009 para sancionar los impactos negativos sobre el medio ambiente y los recursos naturales.

Un segundo escenario sería el que otorga la vía policiva y cuya jurisdicción es la alcaldía de la municipalidad en la que se ubique la actividad legal, con los instrumentos, procesos y discrecionalidad que establece el Código de Minas.

El tercer y último escenario es aquel en que el ámbito de la ley penal tipifica la actividad minera ilícita como un delito.

El Código Minero en Colombia

Como antecedentes a la legislación minera, en la década de los cincuenta en Colombia solo había una legislación minera e hidrocarburos, posteriormente en los setenta el Estado se encargó de definir la política del sector con base a la exploración y explotación de recursos naturales no renovables que estarían lideradas por empresas estatales, estas empresas realizarían tales actividades directamente o por terceros y se deberán realizar a través de contratos de asociación y de aporte minero (Sánchez, 2015).

Posteriormente se expide la Ley 57 de 1987 que le dio facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Minas, por medio del Decreto 26555 de 1988.

Código de Minas: Decreto 2655 de 1988

Tenía como objetivo fomentar la explotación técnica de los recursos mineros de propiedad estatal y privada, estimulando estas actividades en orden de satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y que su aprovechamiento se realice de forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país (Congreso de la República, 1988).

Se resaltan en esta regulación, entre otras, la estipulación que los recursos naturales no renovables del subsuelo y el suelo pertenecían a la Nación; declaratoria del sector minero como de utilidad pública e interés

social, la facultad al Ministerio de Minas y Energía para declarar áreas potenciales mineras como reservas especiales con fines de investigación geológica. También señaló zonas prohibidas para la minera, definió características particulares para la explotación de algunos minerales. Reconoció como títulos mineros diversas modalidades de contratación y la prohibición de la actividad minera sin título (Martínez, *et al.*, 2013).

Código de Minas: Ley 685 de 2001

Introdujo aspectos que en opinión de expertos y tratadistas constitucionales es contrario en sentido amplio al espíritu de constituyente en tres aspectos. El primer factor al desestimar la noción de Estado social de derecho, al eliminar las empresas mineras nacionales públicas o mixtas y entregar la actividad económica al sector privado dejando en segundo plano la protección ambiental, social y cultural (Martínez, *et al.*, 2013).

En segundo lugar, mantiene al sector con el carácter de utilidad pública e interés social con todos los inconvenientes antes mencionados conservando la facultad del estado de expropiar bienes para el ejercicio y desarrollo de la minería; por último, el código define sus propias reglas ambientales para la actividad minera e introduce claras excepciones de modo que la conservación del ambiente no se convierta en obstáculo al desarrollo minero (Martínez, *et al.*, 2013).

Ley 1382 de 2010

Esta ley reformó treinta artículos y derogó diez del Código de 2001, pero esta modificación se quedó corta ya que no implicó la implantación de un modelo de minería que supeditara la actividad a las condiciones ambientales, sociales y culturales del entorno (Martínez, *et al.*, 2013). Dentro de su contenido está la formalización de la actividad de los pequeños mineros tradicionales, mejorar la fiscalización técnica y ambiental de las operaciones mineras y restablecer el derecho del Estado a reservar ciertas áreas.

La Corte Constitucional declaró inexecutable esta ley por medio de la sentencia C-366 cuya razón fue no haber consultado previamente a las comunidades indígenas y negras sobre una ley que las afectaba directamente, razón por la cual el Gobierno de turno debía realizar la consulta en término de dos años, plazo que no se cumplió y con uso de medidas de emergencia, se expidieron cuatro decretos con fuerza de Ley: 933, 934, 935 y 943 de 2013 (Poveda, 2013).

Estos decretos regularon la formalización de la minería tradicional, la presentación de las propuestas de concesión y la competencia para excluir zonas de la actividad minera entre otras materias importantes.

La explotación minera y sus efectos sobre la salud en Colombia

El Plan Nacional de Desarrollo que finalizó el año anterior, con vigencia 2014-2018 hizo un especial énfasis en el sector minero energético como uno de los motores de desarrollo del país, pero los impactos sobre ecosistemas y poblaciones humanas generados por las actividades extractivas en Colombia son poco conocidos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

En este sentido se expidió la Resolución 0931 de Mayo de 2017 por la cual las entidades que se relacionaban en la sentencia de tutela T-445 de 2016 por la que la Corte Constitucional contempló que “el desarrollo de la política minera en Colombia requiere de un conjunto de estudios técnicos, sociológicos y científicos que permitan evaluar los impactos que genera dicha actividad sobre los territorios” (Corte Constitucional, 2016), debían conformar mesas de trabajo interinstitucional para el estudio y análisis de la actividad minera en Colombia.

Uno de los estudios realizado es el Documento de investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano, el cual se construye para dar cumplimiento al requerimiento de la sentencia T-445 de 2016.

En este estudio se describen los efectos en la salud asociados a la minería de oro, los autores de este capítulo hacen referencia a que se identificaron 19 estudios publicados entre los años 2000 y 2018, relacionados con los efectos en la salud asociados a la exposición a contaminantes generados por la minería del oro (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Para los resultados expuestos en el estudio se deberá entender la exposición durante las actividades de extracción minera como la concentración de los contaminantes de interés a los cuales se encuentra expuesta la población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

De los 19 estudios identificados no se relaciona que exista evidencia de evaluaciones de efectos sobre la salud humana antes del año 2000 y muy poco en la década comprendida del año 2000 al 2010. Los autores también hacen especial énfasis en la escasa información disponible de estudios provenientes de actividades mineras en el sur del país, y los estudios analíticos están concentrados en los departamentos de Córdoba, Bolívar, Santander y Antioquia, concluyendo la ausencia total de estudios analíticos de cobertura nacional, con evaluación integrada de afectación por sistemas orgánicos por niveles de exposición a mercurio y otros metales en el contexto de la minería del oro (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Es llamativo el estudio realizado conjuntamente por el Ministerio de Salud y Protección Social, el Instituto Nacional de Salud y la Universidad de Córdoba sobre los efectos de la exposición ocupacional y ambiental a mercurio, en el contexto de la minería del oro en los departamentos de Chocó, Nariño y Vaupés; el estudio describe las características sociales, demográficas de exposición al mercurio y los síntomas en la salud especialmente los neurológicos y cognitivos en una muestra de 1795 personas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

En este orden de ideas, como resultado de la revisión de estudios en el país se concluye una ausencia total de las evaluaciones sobre los impactos de la minera del oro sobre la salud humana en cuanto salud mental, salud sexual y reproductiva, promoción de salud, calidad de vida, indicadores sociales de bienestar y desarrollo derivados de la extracción minera sea legal o ilegal (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

En cuanto a la exposición asociada a la minera de carbón se describe en el documento que se encontraron siete artículos relacionados con la materia en cuestión; los reportes sobre los potenciales efectos en la salud se concentran en las áreas de mayor producción de carbón en el país: Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Uno de los hallazgos fue la neumoconiosis del minero del carbón, una enfermedad laboral descrita en el Decreto 1443 de 2014, denominada como directa por ser considerada de origen laboral desde el momento de su diagnóstico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Otras afectaciones a la salud fueron las patologías auditivas como la hipoacusia neurosensorial inducida por ruido de origen industrial, desórdenes músculo-esqueléticos, sistema circulatorio, respiratorio y urinario (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

En relación con la exposición asociada a la minería de níquel solo se encontraron dos estudios con temas relacionados siendo de importancia, puesto que la única zona de explotación de este en Colombia se localiza al norte del país en la mina de Cerro matoso S.A. (CMSA), ubicada en el municipio de Monte Líbano, en el departamento de Córdoba; es la cuarta mina a cielo abierto en América Latina y la segunda mina de ferroníquel en el mundo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Los efectos en la salud han sido poco estudiados, la poca evidencia científica que existe son los problemas de salud asociados con la exposición ocupacional. Los compuestos de níquel son considerados carcinogénicos para los humanos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

En las zonas aledañas a CMSA, la población, vía acción de tutela, logró que el Instituto de Medicina Legal realizara el primer estudio en la zona para la determinación de los efectos en la salud de los habitantes como producto de la explotación minera de níquel, relacionados con la exposición, contaminación de fuentes de agua y la pérdida de diversidad alrededor de los complejos mineros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

Normatividad en seguridad y salud minera en Colombia

Desde la adopción del convenio No. 31 de 1931 se inician en el sector minero considerables esfuerzos para mejorar el trabajo y la vida de los trabajadores. Luego, en 1995, se adoptó el convenio 176 sobre seguridad y salud en las minas, instrumento basado en la consideración de los peligros y riesgos que afrontan los mineros (Cárdenas, Arcos y Echavarría, 2017).

Este convenio dispuso que las naciones firmantes, de las cuales Colombia no hacía parte, debían formular y aplicar una política coherente de seguridad y salud en el sector minero; el marco legal vigente en el país que se ocupa de esta materia está integrado por cerca de una decena de leyes y decretos la mayoría promulgados en los últimos quince años (Cárdenas, *et al.*, 2017).

El riesgo para la salud de los trabajadores mineros, asociado a la exposición laboral, ha caracterizado un conjunto de investigaciones que han permitido comprender las características físicas, químicas y biológicas de los factores de riesgo, describir la distribución en las

matrices ambientales, la forma en que ingresa al organismo humano, el mecanismo de acción patogénico y la evolución de las enfermedades (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

La actividad minera es considerada de alto riesgo en atención a la alta probabilidad de accidentalidad y enfermedades laborales corroborado por las cifras reportadas por las administradoras de riesgos laborales: 23 315 accidentes de trabajo que es el 3,82% del total de accidentes calificados en el sistema de riesgos laborales; 93 muertes y 303 enfermedades calificadas como laborales que corresponden al 3,18% del total calificado en el sistema. El Ministerio de Minas y Energía realizó un censo en las unidades mineras de las cuales el 72% manifestó no efectuar ningún tipo de acción en materia de seguridad, higiene y salud ocupacional (Cárdenas, *et al.*, 2017).

El artículo 4 de la Ley 1562 de 2012 define la enfermedad laboral como la que es “contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral o del medio en el que el trabajador se ve obligado a trabajar”. (Congreso de la República, 2012)

La primera norma que reguló la seguridad, salud e higiene minera en el país es de 1987 que fue el Decreto 1335 llamado Reglamento de seguridad e higiene minera bajo tierra. Esta norma estuvo vigente hasta el año 1993 con la expedición del Decreto 2222 que reglamentó la seguridad e higiene en la minería a cielo abierto (Cárdenas, *et al.*, 2017).

Se expide con posterioridad el Decreto 035 de 1994, que se encargaba de disponer requisitos en materia de seguridad minera, medidas y procedimientos de aplicación, luego se expide el Decreto 2090 de 2003 cuyo objeto fue el régimen pensional especial para actividades de alto riesgo como la minería subterránea, junto con el Decreto 2655 de 2014 que establece el plazo extendido para la aplicación del mencionado régimen pensional.

El Decreto 1744 de 2014 permite concluir que los factores de riesgo asociados con la actividad económica de la minera son de diversa naturaleza, pueden ser ergonómicos, químicos, físicos y estrés (Ministerio del Trabajo, 2014).

Finalmente, el Decreto 1886 de 2015 que consagra la prohibición expresa de menores de edad en la actividad minera (Cárdenas, *et al.*, 2017).

Políticas públicas en el sector minero en Colombia

El documento CONPES 2898 del 15 de enero de 1997 permite establecer la política pública minera denominada, Estrategias para el fortalecimiento del sector minero colombiano, sus elementos fundamentales fueron el desarrollo limitado de proyectos de gran minera, la proliferación de la pequeña minería caracterizada por explotaciones antitécnicas y la problemática ambiental asociada a la minería informal (Departamento Nacional de Planeación, 1997).

Pero solo fue hasta el año 2016 que se formula la política minera de Colombia, por medio de la Resolución 40391 de 2016, la cual considera grandes retos como los altos niveles de ilegalidad e informalidad, la inseguridad jurídicas, la falta de coordinación institucional, el ordenamiento territorial con respecto al uso del suelo, determinantes ambientales, trámites mineros y ambientales atrasados, la deficiencia en el sistema de información, infraestructura deficiente, conflictividad social, caída de precios, baja inversión y poca competitividad (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

Se basa esta política en seis pilares fundamentales: seguridad jurídica, condiciones competitivas, confianza legítima, infraestructura, información e institucionalidad minera fortalecida y eficiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia *et al.*, 2019).

▣ Conclusiones

Se han emprendido diversas iniciativas en materia minera que han estado en la agenda de la política pública con enfoques y aproximaciones para lograr un desarrollo dinámico y buscando una adaptación a los nuevos modelos de gestión y desarrollo sostenible; sin embargo, el desarrollo de la industria minera no ha seguido los criterios de desarrollo sostenible esperados, por tanto, se han generado impactos en el entorno y en la comunidad.

El llamado es a construir un cuerpo legislativo robusto que genere una seguridad jurídica, pero respetando el medio ambiente como un derecho fundamental y la construcción de planes que armonicen la protección de los trabajadores del sector minero, en constante exposición a factores de riesgo de gran envergadura y hasta ahora sin la información necesaria para la creación de una política pública acorde a las necesidades del sector.

▣ Referencias

- Botero, M. (2007). *La ruta del oro: una economía primaria exportadora, Antioquia, 1850-1890*. Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit. Recuperado de: <https://bit.ly/2ME1gHy>
- Cárdenas, J., Arcos, A. y Echavarría, E. (2017). *Seguridad y salud en la pequeña minería colombiana: estudios de caso en oro y carbón*. Recuperado de: <https://bit.ly/33vnaDt>
- Congreso de la República. (1974). Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, por el que se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Recuperado de: <https://bit.ly/2G63GgN>
- Congreso de la República (1988). Decreto 2655 de 23 de diciembre de 1988. Por el que se expide el Código de Minas. Recuperado de: <https://bit.ly/2Bc3CYY>
- Congreso de la República. (2000). Ley 599 de 2000. Por la cual se establece el Código Penal. Recuperado de: <https://bit.ly/2A2cO4j>
- Congreso de la República. (2001). Ley 685 de 2001. Por la que cual expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: <https://bit.ly/303YRuE>
- Congreso de la República. (2009). Ley 1333 de 2009. Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: <https://bit.ly/1Hqu4u9>
- Congreso de la República. (2011). Ley 1453 de 2009. Por medio de la cual se reforma el Código Penal, el Código de Procedimiento Penal, el Código de Infancia y Adolescencia, las reglas sobre extinción de dominio y otras disposiciones en materia de seguridad. Recuperado de: <https://bit.ly/2EMrB36>

- Congreso de la República. (2012). Ley 1562 de 2012. Por la cual se modifica el Sistema de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones en materia de Salud Ocupacional. Recuperado de: <https://bit.ly/2PKbcj0>
- Constitución Política de Colombia. (1991). Asamblea Nacional Constituyente, Bogotá, Colombia, 6 de julio de 1991. Recuperado de: <https://bit.ly/2xPdYKx>
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (1992) Sentencia No.T-415/92. Recuperado de: <https://bit.ly/2pmiIrP>
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (1997) Sentencia No. C-221/97. Recuperado de: <https://bit.ly/35w6r4K>
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (2010) Sentencia No. C-595/10. Recuperado de: http://legal.legis.com.co/document/Index?obra=jurcol&document=jurcol_963798d9f2faa-0bee0430a010151a0be
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (2011) Sentencia No. T-517/11. Recuperado de: <https://corte-constitucional.vlex.com.co/vid/-328294283>
- Corte Constitucional de la República de Colombia. (2016) Sentencia No. T-445/16. Recuperado de: <https://bit.ly/2OMkGfT>
- Departamento Nacional de Planeación. (1997). *Estrategias para el fortalecimiento del sector minero colombiano*. Recuperado de: <https://bit.ly/2BdlXog>
- Martínez, M., Peña, J., Calle, M., y Velásquez, F. (2013). La Normativa Minera en Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/2UimJbG>
- Mineros S.A. (2011). *Notas de oro*. Recuperado de: <https://issuu.com/mineros/docs/notas-oro-123>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (16 de mayo de 2017). Resolución No. 0931 del 2017. Por la cual se crea la Mesa de Trabajo Interinstitucional para la investigación sobre los impactos de la actividad minera en el territorio colombiano en virtud de la Sentencia T-445 de 2016 de la Corte Constitucional Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mineria_sentencia_/2_Res_0931_de_16_de_mayo_de_2017_MTI.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Ministerio del Interior, Unidad de Parques Nacionales de Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y Contraloría General de la Nación. (2019). Documento de Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano (Sentencia No. T 445 de Agosto de 2016). Bogotá D.C. Recuperado de: <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnostico-actividad-minera-y-explotacin-ilicita-expertos.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (20 de abril de 2016). Resolución No. 0391 del 2016. Por la cual se adopta la Política Minera Nacional. Recuperado de <https://bit.ly/1QxE3Pt>

Ministerio de Trabajo (5 de agosto de 2014). Decreto 1477 de 2014. Por el cual se expide la Tabla de Enfermedades Laborales. Recuperado de: <https://bit.ly/2IOLbeP>

Negrete, R. (2013). *Minería en Colombia. Derechos, políticas y gobernanza*. Bogotá: Contraloría General de la Nación. Recuperado de: <https://bit.ly/2IOvCpB>

Ossa, J. (1999). *Derecho de minería. (Tercera edición actualizada)*. Santiago de Chile: Editorial Jurídica de Chile. Recuperado de: <https://bit.ly/2IO8RSH>

- Poveda, E. (2013). *La normativa minera tras la caída de la Ley 1382: más dudas que certezas*. Recuperado de: <https://www.ambitojuridico.com/noticias/general/administrativo-y-contratacion/la-normativa-minera-tras-la-caida-de-la-ley-1382-mas>
- Presidencia de la República. (2018). *El Gobierno del Presidente Duque logró la aprobación del presupuesto de regalías más alto de los últimos años en el sector minero-energético*. Recuperado de: <https://bit.ly/31bKGnt>
- Sánchez, C. (2015). *Marco normativo para la minería ilegal como actividad no regulada en Colombia y caso Chocó*. (Trabajo de Grado de Especialización). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/33pMavZ>
- Seguridad jurídica para todos. (9 de octubre de 2004). *La Nación*. Recuperado de: <https://bit.ly/2ou7RMN>
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2010). *Indicadores de la Minería en Colombia*. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Indicadores_de_la_mineria_en_Colombia_2010.pdf
- Vargas, J. (2016). *Determinación de la mejor práctica industrial en el tratamiento de aguas cianuradas y propuesta de optimización*. (tesis de maestría). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/35ykwyy>

Capítulo 6

Alexandra Porras-Ramírez
Alejandro Rico-Mendoza



Estudios ecológicos: una herramienta epidemiológica



Un caso famoso de epidemiología alerta acción es el de John Snow y la epidemia de cólera en Londres a mediados del siglo XIX. Snow utilizó un mapa de casos de cólera y señaló una fuente de agua contaminada (Friis y Sellers, 2004). Se considera que este contiene los ingredientes necesarios de la epidemiología moderna, a saber, la organización de observaciones, un experimento natural y un enfoque cuantitativo (Friis y Sellers, 2004; Lilienfeld y Lilienfeld, 1980). Desde el anterior punto de vista, el método de Snow esencialmente tenía un diseño de estudio ecológico, ya que estos también organizan observaciones, utilizan la experimentación natural (al comparar grupos expuestos *versus* no expuestos) y cuantifican los datos. Es dudoso que Snow conociera algún nivel de exposición específico para un individuo determinado, pero su importante observación ecológica en este caso ayudó a identificar una fuente de problemas. Curiosamente, las observaciones ecológicas de Snow no se conocen como un estudio de este tipo, al menos en un texto estándar sobre epidemiología (Friis y Sellers, 2004). Freedman (2005) es un ejemplo de un autor que indica que el estudio de Snow tenía un diseño ecológico.

Los estudios ecológicos se caracterizan por estar basados en datos agrupados, y los grupos a menudo corresponden a áreas geográficas. Estas investigaciones tienen una larga historia en muchas disciplinas, incluidas las ciencias políticas (Kaplan *et al.*, 1996), la geografía (Best, Cockings, Bennett, Wakefield y Elliott, 2001), la sociología (Robinson, 1950) y la epidemiología y la salud pública (Morgenstern, 1995). Los estudios ecológicos son populares por muchas razones, la obvia es la amplia y creciente disponibilidad de datos agregados de salud y población; la información de exposición generalmente está menos disponible. Si la exposición es un contaminante ambiental, entonces la información de concentración rara vez será de naturaleza agregada. Sin embargo, todavía nos referimos a resúmenes no individuales como ecológicos.

La facilidad de análisis mejorada también contribuye al uso generalizado de datos ecológicos. Por ejemplo, los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el almacenamiento efectivo y la combinación de conjuntos de datos de diferentes fuentes y con diferentes geografías (Cromley, 2003; Croner, 2003; McLafferty, 2003; Ricketts, 2003; Rushton, 2003), y los avances recientes en la metodología estadística permiten un análisis más refinado de la ecología (Elliott, Wakefield, Best y Briggs, 2000; Waller y Gotway, 2004).

Una variable ecológica se refiere más comúnmente a una variable agregada. Medidas como el ingreso medio de un grupo, tienen un paralelo a nivel individual, es decir, el ingreso de un individuo (Etzioni, Lazarfeld y Menzel, 1961). Las variables agregadas se usan más comúnmente en epidemiología para inferir la asociación de la variable paralela de nivel individual –por ejemplo, ingreso individual– con algún estado de salud individual –salud auto-informada–. Tal inferencia ecológica –o inferencia de nivel cruzado– es percibida por algunos como la única razón para realizar investigación ecológica.

En el otro extremo del espectro de las variables agregadas se encuentran las variables globales, que no pueden medirse a nivel individual, y como tales son variables exclusivamente ecológicas. Entre las variables

agregadas y globales se encuentran las que Rothman, Greenland y Lash (1998) denomina variables ambientales. Estas variables son las propiedades físicas del entorno, como las horas de luz solar, que se pueden medir a nivel ecológico o individual, pero generalmente se miden solo a nivel ecológico por razones prácticas, ganando eficiencia, pero sacrificando una determinación de la variación real dentro del grupo en la exposición o dosis, como sucede con la exposición individual a la luz solar. Otra categoría es la variable estructural, definida por Etzioni, Lazarfeld y Menzel (1961) como las relaciones e interacciones entre individuos dentro de un grupo. Si bien estos autores definieron la variable estructural como distinta de la variable global, la mayoría de las circunstancias variables estructurales podrían asignarse como variables globales.

Otra variable usada comúnmente es la variable de contagio la cual puede definirse como el agregado de los resultados a nivel individual. Es particularmente aplicable a la epidemiología de enfermedades infecciosas donde, por ejemplo, el número de personas infectadas afecta el riesgo de infección para otros individuos no inmunes en la misma población (Halloran y Struchiner, 1991). Wilson y Daly (1997) han propuesto un acontecimiento dependiente similar relacionado con los factores socioeconómicos y la salud. En un estudio de vecindarios de Chicago concluyeron que sus resultados eran consistentes con la expectativa de vida, en sí misma, como un factor determinante de la toma de riesgos. Las personas que viven en un vecindario con una baja esperanza de vida pueden ser más propensas a disfrutar de comportamientos de alto riesgo, ya que hay menos que perder.

¿Cómo se ve un efecto ecológico?

El modelo de dos niveles utilizado en este documento incluye tres tipos de variables: exposición (s) ecológica (s), (X); el nivel individual de exposición (x); y el resultado a nivel individual, (y). Hay tres formas en que (X) puede tener un efecto de nivel cruzado en (y): al afectar directamente a (y) –efecto de nivel cruzado directo–; modificando la relación entre (x) e (y) –modificación de efecto de nivel cruzado–; y al afectar a (x), que

a su vez afecta a (*y*)-efecto indirecto de nivel cruzado-. La modificación del efecto también puede ocurrir entre variables ecológicas, ya que es un paso alejado del impacto de una exposición ecológica en un resultado de salud; sin embargo, es importante cuando se consideran dos o más exposiciones ecológicas simultáneamente.

En un sentido reduccionista, las variables ecológicas no pueden afectar directamente a los individuos; en cambio, su efecto debe estar mediado por variables intermedias a nivel individual (Susser, 1973). Por ejemplo, los posibles mecanismos que vinculan la distribución del ingreso con la salud incluyen: variaciones en el acceso del individuo a oportunidades de vida y recursos materiales, como la atención médica y la educación; cohesión social, mediante la cual el apoyo mutuo y la cooperación aseguran mejores resultados de salud; y posibles procesos psicosociales directos relacionados con las percepciones relativas de la posición en la jerarquía socioeconómica (Kawachi y Kennedy, 1999).

Tomando nuevamente el último mecanismo de la jerarquía socioeconómica a un nivel inferior, los modelos animales han encontrado que la manipulación experimental del estado social en los monos afecta el desarrollo de la aterosclerosis (Shivley y Clarkson, 1994). Del mismo modo, la clasificación social de los monos se ha asociado con perfiles de adrenocorticoides (Sapolsky, Alberts y Altmann, 1997). Por lo tanto, se puede argumentar que ni el efecto de nivel cruzado directo ni la modificación del efecto de nivel cruzado son cadenas causales completas, sino que requieren una reducción a los efectos de nivel cruzado indirectos. Sin embargo, hacerlo requeriría información perfecta sobre todas las variables posibles.

Tal reduccionismo es útil para comprender etiológicamente cómo las exposiciones ecológicas afectan la salud, pero a menudo es innecesario, e incluso puede ser contraproducente, para la identificación de puntos de intervención para la política y la acción de salud pública (Duncan, Jones y Moon, 1996; Mackenbach, 1995; Pearce, 1996; Rose, 1992). La elección del nivel de causalidad, y por lo tanto las variables que

intervienen para incluir o excluir, pueden ser pragmáticas. Como resumió Helman (1984), “la idea de causa no tiene sentido más que como una designación conveniente para el punto en la cadena de secuencias de eventos en el que la intervención es más práctica”. (p.12)

Garantizar la variación de la exposición ecológica

Es una condición *sine qua non* de la epidemiología que para detectar cualquier efecto debe haber variación en la exposición y el resultado en estudio. Este requisito previo esencial puede ser problemático para las exposiciones ecológicas. A menudo, las exposiciones socioeconómicas a nivel macro, por ejemplo, la desigualdad de ingresos, no varían dentro de la población de estudio elegible, estado o país, o más pragmáticamente el conjunto de datos disponible, en un momento determinado. La identificación de pequeños efectos ecológicos en un estudio puede, por lo tanto, ser solo la punta del iceberg y no debe descartarse como intrascendente. Cuando hay una variación insuficiente en la exposición ecológica en la población elegible en un momento dado, la extensión del diseño del estudio a través del tiempo o las poblaciones puede proporcionar la variación necesaria.

En primer lugar, se pueden agregar al análisis poblaciones adicionales con diferentes niveles de exposición ecológica, por ejemplo, estudios transnacionales. Sin embargo, un inconveniente probable es la falta de comparabilidad de las covariables no medidas entre poblaciones/conjuntos de datos. Este es el caso de la cultura que puede variar entre países y estar independientemente asociada con la salud. En segundo lugar, un estudio de series de tiempo de una población puede capturar variaciones en la exposición ecológica, pero es difícil controlar las tendencias seculares. En tercer lugar, los datos para múltiples poblaciones /conjuntos de datos y diferentes períodos de tiempo pueden combinarse en un diseño de estudio mixto (Morgenstern, 1995), combinando así los dos diseños de estudios anteriores.

Este diseño de estudio mixto permite un análisis simultáneo de los cambios dentro del grupo a lo largo del tiempo en la exposición ecológica y el resultado, y entre la variación del grupo en la exposición ecológica y el resultado. Desafortunadamente, es probable que los conjuntos de datos de esta riqueza poco comunes.

Análisis en los estudios ecológicos

La interpretación de una asociación como un efecto causal debe depender de algún tipo de supuesto de no confusión o ignorancia, que en la metodología estadística se operacionaliza como un supuesto de aleatorización específica de covariable (Greenland, 1990; Greenland, Robins y Pearl, 1999). Estas inferencias causales generalmente no son sólidas para las violaciones de esos supuestos, y esta falta de solidez es una fuente importante de controversia en la mayoría de las investigaciones no experimentales.

Supongamos que debemos estudiar K comunidades. La distinción entre confusión ecológica e individual puede hacerse más clara al contrastar dos niveles de intervención aleatoria para reducir las enfermedades de transmisión sexual (ETS):

Ensayo C: se proporciona un programa de salud comunitaria –por ejemplo, establecimiento de clínicas gratuitas de ETS– al azar a la mitad de las comunidades. Se supone que K es par.

Ensayo W: dentro de la comunidad K , un tratamiento –por ejemplo, una serie de visitas gratuitas a clínicas de ETS– se brinda de manera aleatoria a una proporción de personas, y esta varía de una comunidad a otra.

El ensayo C es un diseño aleatorio por conglomerados. En este ensayo, los datos ecológicos comprenderían un indicador de estado de tratamiento comunitario más las medidas de resultado –tasas de enfermedades posteriores–. Estos datos apoyarían inferencias basadas

en la aleatorización acerca de cuál sería el efecto causal promedio del programa para las comunidades K . Las comunidades serían las unidades de análisis y el tamaño de la muestra para las inferencias sería K .

No obstante, analizar los datos de nivel individual del ensayo C como un estudio de estrato K con margen de tratamiento fijo –el análisis de nivel individual habitual– no respaldaría ninguna inferencia sobre los efectos del tratamiento porque cada estrato o comunidad tendría un margen cero. Dicho de otra manera, los efectos comunitarios y de tratamiento se confundirían por completo dentro del modelo estándar de nivel individual. El análisis de los datos a nivel individual requeriría, en cambio, el uso de métodos para ensayos aleatorios grupales.

En el ensayo W, los datos ecológicos comprenderían la proporción tratada (pk) en cada comunidad, junto con las medidas de resultado. A menos que el pk se haya asignado aleatoriamente entre comunidades –como en el ensayo C, en el que $pk = 0$ o 1 –, los datos ecológicos no apoyarían inferencias basadas en la aleatorización sobre los efectos del tratamiento: si el pk fuera constante, no habría información de datos para tal análisis; si el pk variara, la comunidad y los efectos del tratamiento se confundirían por completo. Esta observación es esencialmente una versión contrapositiva de la condición de identificación de Goodman para la regresión ecológica, traducida al entorno causal actual. Sin embargo, los datos a nivel individual de cualquiera o de todas las comunidades con $0 < pk < 1$ apoyarían la aleatorización habitual basadas en inferencias –por ejemplo, pruebas exactas estratificadas en la comunidad–. Tomar X como el indicador de tratamiento $yk = A, B$, los paneles 1 y 2 se pueden usar como un ejemplo del ensayo W con $pA = 0.6$ y $pB = 0.4$; luego exhibe confusión total en los datos ecológicos y no confusión de los datos a nivel individual dentro de la comunidad.

Otro aspecto para tener en cuenta es que el número de, por ejemplo, grupos ecológicos involucrados no nos dice nada acerca de la validez de una suposición de que la distribución de la exposición – pk en los ensayos de tratamiento binario anteriores– fue aleatoria en todos los

grupos. El beneficio de un gran número de grupos se deriva y depende de la suposición de que esas distribuciones fueron aleatorizadas, como en el ensayo C. Los desequilibrios sistemáticos entre los grupos son, por definición, violaciones de esa suposición. A pesar de estos hechos, la defensa de los estudios ecológicos ha aparecido con base en el argumento circular de que un gran número de áreas reduciría la posibilidad de confusión ecológica; esta circularidad surge porque el efecto de gran número supone la aleatorización entre áreas, lo cual es precisamente el supuesto en duda.

Para lograr cierta plausibilidad en las inferencias causales de los datos de observación, los investigadores intentan controlar las covariables que afectan el resultado, pero no se ven afectadas por la exposición, los posibles factores de confusión. En estudios a nivel individual, el medio tradicional de control es estratificar los datos sobre estas covariables, porque dentro de dichos estratos las unidades expuestas y no expuestas no pueden tener ningún desequilibrio en las covariables más allá de los límites del estrato, por ejemplo, dentro de un estrato de edad de 65 a 74 años, los expuestos y los no expuestos no pueden tener más de 10 años de diferencia. Las inferencias causales luego proceden asumiendo la aleatorización dentro de estos estratos; por muy inverosímil que sea, ante los desequilibrios observados, esta suposición siempre es más plausible que la suposición de la aleatorización simple –no estratificada–.

El proceso de estratificación puede aplicarse en análisis ecológicos, pero generalmente enfrenta serias limitaciones de datos. Con pocas excepciones, las exposiciones ecológicas y las covariables en las bases de datos de uso público son insuficientes en detalles y precisión para crear estratos con un equilibrio asegurado en las covariables claves. Por ejemplo, en los estudios ecológicos de los niveles de radón y las tasas de cáncer de pulmón en los condados de EE. UU., las covariables claves son las distribuciones específicas de cada condado de edad, sexo, raza y hábitos de fumar. Para calmar las preocupaciones sobre el sesgo de las posibles relaciones de estos fuertes factores de riesgo de cáncer de pulmón con la exposición al radón, habría que estratificar los datos del

condado por edad, sexo, raza y comportamiento de fumar –tenga en cuenta que el comportamiento de fumar es multidimensional, ya que incluye intensidad, duración y tipo de consumo de cigarrillos–. Luego se examinaría la relación de las distribuciones de radón con las tasas de cáncer de pulmón en los datos del condado específicos del estrato.

Este análisis estratificado requiere distribuciones conjuntas específicas del condado de edad, sexo, raza, tabaquismo y radón, y edad, sexo, raza, tabaquismo y cáncer de pulmón. Desafortunadamente, hasta la fecha no se cuenta con dichos datos. Aunque se publican datos sobre las distribuciones de cáncer de pulmón por edad, sexo y raza en los condados, no se observan sus distribuciones conjuntas con radón y tabaquismo; solo se analizan las distribuciones marginales de radón, y solo se encuentran disponibles resúmenes crudos de las ventas de cigarrillos.

Las limitaciones de los datos ecológicos pueden apreciarse mejor si se considera un problema análogo en un estudio a nivel individual del radón residencial y el cáncer de pulmón. Uno podría intentar “controlar” el fumar utilizando las ventas de cigarrillos en el condado de residencia de un sujeto como sustituto del comportamiento de fumar (Cohen, 1990). Presumiblemente, pocos epidemiólogos considerarían esta estrategia para proporcionar un control adecuado del tabaquismo, especialmente al considerar que imputaría un nivel idéntico de tabaquismo a cada sujeto en el condado, independientemente de su edad, sexo o estado de cáncer de pulmón. Las deficiencias de este control surgen precisamente porque el comportamiento de fumar varía en extremo entre las personas dentro de un condado determinado, mucho más que el comportamiento promedio de fumar varía entre los condados (Greenland y Robins, 1994).

Debido a que diferentes supuestos de aleatorización subyacen a inferencias causales de estudios ecológicos y de nivel individual, puede suceder que estos dos tipos de estudio requieran el control de conjuntos diferentes, aunque superpuestos, de covariables para inferencias válidas (Greenland y Robins, 1994; Robins, Murphy y Greenland, 2010).

Supuestos de modelos matemáticos usados en estudios ecológicos

Para sortear las limitaciones de los datos ecológicos descritos anteriormente, los investigadores del estudio ecológico han empleado modelos de análisis bajo los cuales los datos ecológicos disponibles, que comprenden resúmenes marginales simples de exposición cruda y medidas covariables, son suficientes para una estimación válida del efecto. Por ejemplo, una suposición común en los análisis ecológicos es que los efectos siguen un modelo de regresión lineal múltiple. Esta suposición es a la vez natural y algo engañosa, porque un modelo lineal múltiple para efectos de nivel individual induce un modelo ecológico lineal múltiple, pero esta relación paralela entre las regresiones individuales y ecológicas falla en presencia de no aditivos o no lineales (Dobson, 1988; Greenland y Robins, 1994; Lasserre, Guihenneuc-Jouyaux y Richardson, 2000; Prentice y Sheppard, 1995; Richardson, Stücker y Hémon, 1987; Vaupe, Manton y Stallard, 1979).

Ni siquiera la forma funcional de los efectos a nivel individual, que puede confundir las asociaciones ecológicas, se identifica por los datos marginales en los estudios ecológicos. Por ejemplo, supongamos que el riesgo individual R depende estructuralmente del vector covariable X , que puede contener variables contextuales, a través de $R = f(X)$, y A indexa los contextos, como las áreas geográficas. Las observaciones ecológicas identifican solo las relaciones de los riesgos promedio $EA(R)$ con los niveles covariables promedio $EA(X)$ en todos los contextos. Estas relaciones ecológicas generalmente no seguirán la misma forma funcional que las relaciones individuales porque $EA(R) = EA[f(X)] \neq f[EA(X)]$ excepto en algunos casos muy especiales, principalmente aquellos en los que f es aditivo y lineal en todos los componentes X .

La mayoría de los análisis de estudios epidemiológicos a nivel individual asumen un modelo multiplicativo (loglineal) para la regresión del resultado en las covariables de exposición y análisis, en el que $f(X) = \exp(X\beta)$. Tales no linealidades en las regresiones individuales prácticamente garantizan que los modelos ecológicos simples serán mal especificados,

y por lo tanto disminuyen aún más la efectividad del control ecológico de los factores de confusión, aunque el problema puede mitigarse algo expandiendo el modelo ecológico para incluir resúmenes covariables más detallados si esos son disponibles (Greenland y Robins, 1994; Guthrie y Sheppard, 2001), e incluyendo términos covariables de orden superior (Lasserre, Guihenneuc-Jouyaux y Richardson, 2000; Richardson y Hémon, 1990; Richardson, Stücker y Hémon, 1987).

Desafortunadamente, algunos autores han intentado negar el problema de especificación errónea alegando que una regresión lineal está justificada por el teorema de Taylor (Cohen, 1990). Esta justificación es circular porque la linealidad aproximada de $f(X)$ sobre el rango de X dentro del contexto, específico del área, es requerido para que una aproximación de Taylor de primer orden de $f(X)$ sea precisa (Dobson, 1988; Greenland y Robins, 1994). Además, en la mayoría de las aplicaciones se sabe que este requisito es violado; por ejemplo, la dependencia del riesgo con la edad es altamente no lineal para casi todos los cánceres. Uno puede intentar eludir este último problema utilizando resultados específicos de la edad, pero luego se enfrentará al problema de que carece de medidas específicas del contexto de edad de posibles factores de confusión como el tabaquismo. El uso de tasas estandarizadas por edad tampoco resuelve el problema, ya que requiere un uso de las medidas estandarizadas por edad de las covariables en el modelo de regresión (ver capítulo “Discusión”) y esas medidas rara vez están disponibles.

Métodos multinivel

Las estadísticas vitales y los datos de registro utilizados en los estudios ecológicos se recopilan a un gran costo, por lo que parece imprescindible explotarlos por completo. Además, estos datos a menudo describen resultados en un espectro de exposiciones mucho más amplio que el encontrado en la mayoría de los estudios a nivel individual, lo que sugiere que se podría lograr un mayor poder para detectar efectos si se controlara la confusión. Por ejemplo, los estudios dietéticos a nivel individual generalmente se realizan en poblaciones restringidas con

poca variación en la dieta en relación con la variación internacional, lo que limita su poder y sugiere que se podría aprender mucho de las comparaciones internacionales. Sin embargo, un problema importante de las comparaciones ecológicas internacionales es la presencia de numerosas diferencias entre países que podrían confundir los resultados.

Para abordar este problema de confusión ecológica, uno puede aplicar modelos de riesgo a nivel individual a los datos de la encuesta dentro de la región y agregar las estimaciones de riesgos individuales resultantes para compararlas con las tasas ecológicas observadas. Supongamos que tenemos un vector covariable X medido en Nk encuestó a individuos en la región k , un modelo de tasa $r(x; \beta)$ con una estimación de $\hat{\beta}$ de estudios a nivel individual –por ejemplo, un modelo de riesgos proporcionales derivado de datos de estudios de cohortes– y la tasa observada \tilde{r}_k en la región k . Entonces podemos comparar \tilde{r}_k con la tasa de área predicha del modelo aplicado a los datos de la encuesta, $\sum_i r(x_i; \hat{\beta}) / Nk$, donde la suma está sobre los individuos encuestados $i = 1, Nk$ y x_i es el valor de X para encuesta individual i . Este enfoque es un análogo de regresión del ajuste indirecto: $\hat{\beta}$ es la información externa y, por lo tanto, corresponde a las tasas de referencia utilizadas para construir expectativas en SMR.

Desafortunadamente, los modelos ajustables generalizables a las regiones de interés rara vez están disponibles. Por lo tanto, a partir del modelo de nivel individual $r_k(x; \beta) = r_0 k \exp(x\beta)$, Prentice y Sheppard (1995) propusieron estimar los parámetros individuales β mediante la regresión directa de \tilde{r}_k en los datos de la encuesta utilizando el modelo agregado inducido $r_k = r_0 k E_k[\exp(x\beta)]$, donde $E_k[\exp(x\beta)]$ es el promedio de $\exp(x\beta)$ sobre los individuos en la región k . Prentice y Sheppard (1995) muestran cómo las tasas observadas \tilde{r}_k y los datos de la encuesta (x_i) pueden usarse para ajustarse a este modelo. Al igual que los autores anteriores, estiman los promedios específicos de la región por los promedios de la muestra, pero en ausencia de datos externos sobre β , imponen restricciones de identificación sobre las tasas de referencia específicas de la región $r_0 k$, por ejemplo, tratándolos como efectos aleatorios (Cleave, Brown y Payne, 1995; Wakefield, 2003).

Prentice y Sheppard (1995), llaman a su método un estudio de datos agregados; sin embargo, gran parte de la literatura de ciencias sociales ha usado este término durante mucho tiempo como sinónimo de estudio ecológico (Borgatta y Jackson, 1980; Firebaugh, 1978), y por lo tanto, lo llamaría un estudio multinivel incompleto, porque, a diferencia de los análisis multinivel estándar (Goldstein, 1995), individuos—los resultados a nivel no se obtienen. Prentice y Sheppard (1995) concibieron su enfoque en el contexto de la investigación del cáncer, en el que pocos casos se encontrarían en muestras de encuestas de tamaño modesto. Para los estudios de resultados agudos comunes, Navidi, Thomas, Stram, y Peters, (1994) proponen una estrategia multinivel completa en la que las encuestas dentro de la región obtienen resultados y datos covariables sobre los individuos, lo que evita la necesidad de identificar restricciones.

Los estudios multinivel pueden combinar las ventajas de los estudios ecológicos y de nivel individual, incluido el control de confusión que se puede lograr en los estudios a nivel individual y la variación de la exposición y la conducta rápida que se puede lograr en los estudios ecológicos (Guthrie, 2001). Estas ventajas están sujetas a una serie de supuestos que deben ser cuidadosamente evaluados (Prentice y Sheppard, 1995), varios de los cuales comparten con estudios ecológicos.

Por ejemplo, los estudios multinivel basados en encuestas individuales recientes deben asumir la estabilidad de la exposición y las distribuciones covariables a lo largo del tiempo para garantizar que las distribuciones de la encuesta sean representativas de las distribuciones que determinaron las tasas ecológicas observadas; esta suposición será sospechosa cuando hubo tendencias de comportamiento individuales o grados importantes de migración después del período de exposición relevante a las tasas observadas (Polissar, 1980; Stavraký, 1976).

También pueden sufrir el problema mencionado anteriormente, de que los datos de nivel agregado (ecológicos) usualmente conciernen a unidades administrativas o políticas arbitrarias, por lo que pueden ser

malas medidas contextuales. Además, los estudios multinivel enfrentan una limitación práctica importante al requerir datos de muestras representativas de individuos dentro de unidades ecológicas, que pueden ser órdenes de magnitud más caros de obtener que los datos recopilados de forma rutinaria en los que se basan la mayoría de los estudios ecológicos.

En ausencia de datos válidos a nivel individual, el análisis multinivel aún puede aplicarse a los datos ecológicos disponibles a través de una regresión de coeficiente aleatorio no identificada. Al igual que en las aplicaciones para estudios a nivel individual (Greenland, 2000), este enfoque comienza con la especificación de una distribución jerárquica previa para parámetros no identificados por los datos disponibles. La distribución del efecto de exposición de interés se actualiza luego condicionando los datos disponibles. Este enfoque es una extensión multinivel de la regresión ecológica de efectos aleatorios para permitir restricciones en β (incluida una distribución para β) en el modelo agregado, además de restricciones en el rOk . Es esencial reconocer que estas restricciones son las que identifican los efectos de la exposición en los datos ecológicos; por lo tanto, como con todos los resultados ecológicos, una estimación precisa siempre debe rastrearse a las restricciones que produjeron la precisión.

Limitaciones y sesgos

El principal sesgo de estos estudios es la falacia ecológica, la cual sucede cuando se intenta aplicar los resultados de un estudio ecológico a las conclusiones de los individuos, dado que los resultados son extraídos de datos a nivel de grupo (DeAngelis, 1990). Sin embargo, si la aplicación se mantiene en el grupo y no en el individuo, por definición (DeAngelis, 1990), la condición de falacia ecológica no existiría, aunque se utilizara el diseño ecológico. Sin embargo, hay métodos disponibles para ayudar a minimizar lo que se conoce como falacia ecológica (Wakefield y Shaddick, 2006).

Una vasta literatura describe fuentes de falacia ecológica Greenland (1992), Greenland y Morgenstern (1989), Greenland y Robins, (1994), Künzli y Tagger (1997), Morgenstern (1995), Piantadosi, Byar y Green (1988), Richardson y Monfort (2000), Richardson, Stücker y Hémon, (1987), Steel y Holt (1996), Wakefield (2003), Wakefield (2004) y Wakefield (2007).

El problema fundamental con la inferencia ecológica es que el proceso de agregación reduce la información, y esta pérdida de información generalmente impide la identificación de asociaciones de interés en el modelo de nivel individual subyacente. Cuando se trata de comprender el concepto, es importante especificar un modelo y agregado a nivel individual para determinar las consecuencias (Sheppard, 2003; Wakefield, 2004; Wakefield y Salway, 2001).

Si no hay variabilidad dentro del área en exposiciones y factores de confusión, entonces no habrá falacia ecológica; por lo tanto, este sesgo se produce debido a la variabilidad dentro del área en exposiciones y factores de confusión, aunque se producen varias consecuencias distintas como resultado de esta variabilidad. La falacia ecológica también se conoce como sesgo agregado o de nivel cruzado, este último enfatiza los diferentes niveles de datos e inferencia.

Un sesgo importante para tener en cuenta es el sesgo de especificación puro (Greenland, 1992), también denominado sesgo de especificación del modelo (Sheppard, 2003). Este surge porque un modelo de riesgo no lineal cambia su forma bajo la agregación. Inicialmente asumimos una exposición única x y el modelo de nivel individual:

$$\text{Riesgo individual} = e^{a+\beta x}$$

A menudo se usa para una enfermedad rara; ea es el riesgo asociado con $x = 0$ (riesgo basal) y $e\beta$ es el riesgo relativo correspondiente a un aumento en x de una unidad. Desafortunadamente, el modelo logístico,

que a menudo se usa para resultados no raros, no es susceptible de estudio analítico, por lo que los efectos de la agregación son difíciles de discernir (Salway y Wakefield, 2005).

Consideramos un área genérica que contiene n individuos con exposiciones x_i , $i = 1, \dots, n$. Agregación de rendimientos del modelo 2

$$\text{Riesgo ecológico} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{\alpha + \beta x_i}$$

para que el riesgo ecológico sea el promedio de los riesgos de los individuos constituyentes. Dejamos representar la proporción de individuos expuestos, es decir, un modelo ecológico supondría

$$\text{Riesgo ecológico} = e^{\alpha e + \beta e \bar{x}}$$

donde los parámetros ecológicos αe y βe se han escrito con “ e ” para distinguirlos de los parámetros de nivel individual en el modelo 2. El modelo 4 es un modelo de efectos contextuales porque el riesgo depende de la proporción de individuos expuestos en el área. Interpretar βe como una asociación individual correspondería a que la exposición promedio es causal y que la exposición individual es irrelevante, o que la diferencia entre las exposiciones agregadas e individuales es insignificante, de modo que la variabilidad dentro del área de exposición es pequeña.

La diferencia entre los modelos 3 y 4 es clara: mientras que el primero promedia los riesgos en todas las exposiciones, el segundo es el riesgo correspondiente a la exposición promedio. Tenemos $e\beta = \beta e$ solo cuando no hay variabilidad dentro del área de exposición, de modo que para todos $i = 1, \dots, n$ individuos. Por lo tanto, el sesgo de especificación puro se reduce en tamaño a medida que aumenta la homogeneidad de las exposiciones dentro de las áreas, de modo que las áreas pequeñas son ventajosas. Lamentablemente, la agregación de datos generalmente se realiza de acuerdo con los grupos de administración y no para obtener áreas con exposición constante.

Para una exposición binaria, se puede escribir el modelo 2:

$$e^{\alpha + \beta x} = (1 - x)e^{\alpha} + x e^{\alpha + \beta}$$

lo que muestra que con un modelo de riesgo lineal no existe un sesgo de especificación puro. Si el modelo 4 se ajusta utilizando una proporción binaria, no habrá correspondencia entre e^{β} y $e^{\beta e}$ porque están asociados con comparaciones completamente diferentes. La extensión a las exposiciones categóricas generales es directa, y los parámetros del modelo de enfermedad son identificables siempre que tengamos las proporciones agregadas en cada categoría.

Para la exposición continua, el sesgo de especificación puro está dominado por la relación entre la media dentro del área y la varianza de la exposición y será pequeño si la variabilidad dentro del área no está relacionada con la media; si la varianza aumenta con la media, que a menudo será el caso de las exposiciones ambientales, se sobreestimarán una exposición perjudicial ($\beta > 0$) (Wakefield, 2003). Desafortunadamente, esta condición es imposible de evaluar sin datos a nivel individual sobre la exposición. Si β es cercano a cero, también es probable que el sesgo de especificación puro sea pequeño, porque entonces el modelo exponencial será aproximadamente lineal para el que no hay sesgo, aunque en este caso es probable que la confusión sea una preocupación seria.

Se producirá un sesgo de especificación puro a menos que tengamos una variable categórica y sepamos las proporciones dentro del área en cada categoría, excepto cuando la exposición sea constante dentro de las áreas o el modelo de riesgo sea lineal. Si la exposición es heterogénea dentro de las áreas, necesitamos información sobre la variabilidad dentro de cada área para controlar el sesgo. Dicha información puede provenir de una muestra de individuos dentro de cada área; cómo usar estos datos a nivel individual es el tema de la sección Combinación de datos ecológicos e individuales.

Durante este estudio examinamos datos sobre el síndrome de muerte súbita infantil y la raza. Estos están disponibles a nivel individual, lo que permite examinar las implicaciones de la agregación. Los datos de mortalidad y nacimiento se obtuvieron del sitio web del Centro de Estadísticas de Salud del Estado de Carolina del Norte. Los casos de muerte súbita, junto con el número de nacimientos vivos, se extrajeron por raza para cada uno de los 100 condados de Carolina del Norte durante los años 2001-2004. Hubo un total de 386 casos, con una distribución del riesgo en las 100 áreas. La raza se clasificó como blanca/no blanca con 220 muertes en la raza blanca. Hubo 473 484 nacimientos durante los 4 años de los cuales 343 811 de ellos eran de raza blanca. En todos los condados, la proporción de nacimientos de raza no blanca osciló entre 0.006 y 0.733 con una mediana de 0.222, por lo que en la mayoría de las áreas hay más nacimientos de niños de raza blanca que nacimientos de niños de otras razas. Las tasas de mortalidad para raza blanca y otras razas son 1.28 y 0.64 muertes por 1000 nacidos vivos, respectivamente, lo que da un riesgo relativo de 2.0 con un intervalo de confianza asintótico del 95 % (1.64, 2.45).

Ahora suponemos que solo hay datos ecológicos disponibles. Un conjunto de datos ecológicos consistiría en la proporción de niños de otras razas, junto con el número de muertes súbitas y los nacimientos totales, n , en cada área. Esta situación se representa como en la ecuación 1:

$$\text{Riesgo individual} = e^{\alpha + \beta x}$$

y el ajuste de este modelo proporciona una estimación del riesgo relativo ecológico $e\beta$ de 0.89 (0.44–1.79), de modo que la estimación del punto de riesgo disminuye a medida que aumenta la proporción de niños de otras razas, pero la incertidumbre es grande y concluiríamos que los datos ecológicos tienen poco que decir sobre la asociación. Si se supone que esta estimación puntual se aplica a nivel individual, concluiríamos que los bebés de otras razas tienen un riesgo menor que los bebés blancos, lo contrario de lo que se encuentra en el análisis a nivel individual, proporcionando así un ejemplo de la falacia ecológica.

Volviendo a este ejemplo, la discrepancia entre la estimación del riesgo relativo a nivel individual de 2.0 y la asociación ecológica de 0.89 derivada del modelo 1 se explica por un sesgo de especificación puro; ajustamos los efectos contextuales del modelo 4 y no la forma agregada de la ecuación 5. Desafortunadamente, el ajuste del último modelo produce una estimación de 0.91 para estos datos. La razón de esta discrepancia es que la ecuación 5 es muy inestable estadísticamente y produce una probabilidad que es altamente irregular. En particular, un intervalo de confianza asintótico no es apropiado aquí. Este fenómeno se ha observado en otros lugares (30), lo que sugiere que se debe tener mucho cuidado al ajustar la ecuación 5.

Confusión

Si asumimos una sola exposición x , un único factor de confusión z , y el modelo de nivel individual, la ecuación que representaría esta situación sería:

$$\text{Riesgo individual} = e^{\alpha + \beta x + \gamma z}$$

Al igual que con el sesgo de especificación puro, la clave para comprender las fuentes y la minimización de la falacia ecológica es agregar el modelo a nivel individual para representar:

$$\text{Riesgo ecológico} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{\alpha + \beta x_i + \gamma z_i}$$

Para comprender por qué el control de la confusión es generalmente imposible con datos ecológicos, consideramos el caso más simple de una exposición binaria y un factor de confusión binario, que para facilitar la explicación será sexo. La tabla 6 muestra la distribución de la exposición y el factor de confusión dentro de un área genérica.

Tabla 6.

Exposición y distribución de sexo en un área genérica: es la proporción expuesta y es la proporción masculina; p_{00} , p_{01} , p_{10} y p_{11} son las frecuencias de clasificación cruzada dentro del área

	Mujer	Hombre	
No expuesto	p_{00}	p_{01}	$1 - \bar{x}$
Expuesto	p_{10}	p_{11}	\bar{x}
	$1 - \bar{z}$	\bar{z}	1.0

Fuente: elaboración propia.

La distribución completa dentro del área de exposición y confusión puede describirse mediante tres frecuencias, pero los datos ecológicos generalmente consisten solo en la proporción de expuestos y la proporción de hombres. Para la ecuación 7, la forma agrugada es:

$$\begin{aligned} \text{Riesgo ecológico} &= p_{00}e^{\alpha} + p_{10}e^{\alpha+\beta} + p_{01}e^{\alpha+\gamma} + p_{11}e^{\alpha+\beta+\gamma} \\ &= (1 - \bar{x} - \bar{z} + p_{11}) e^{\alpha} \\ &\quad + (\bar{x} - p_{11})e^{\alpha+\beta} + (\bar{z} - p_{11})e^{\alpha+\gamma} \\ &\quad + p_{11}e^{\alpha+\beta+\gamma} \end{aligned}$$

Se muestra así que las prevalencias marginales por sí solas no son suficientes para caracterizar la distribución conjunta a menos que x y z sean independientes, en cuyo caso z no es un factor de confusión dentro del área. Si falta la proporción de varones expuestos, se debe estimar por las prevalencias marginales; sin embargo, no podemos determinar la precisión de esta aproximación sin datos de nivel individual. Este es un tema recurrente en el análisis de datos ecológicos. El sesgo se puede reducir según los supuestos del modelo, pero la estimación depende de manera crucial de la idoneidad de estos supuestos, que no se pueden verificar sin datos a nivel individual.

Efectos contextuales

Una variable contextual representa una característica de los individuos en un vecindario compartido. Por ejemplo, el ingreso promedio en un área, además del ingreso individual, ha sido hipotetizado como predictivo de la salud (Judge, Mulligan, y Benzeval, 1998). Consideramos el modelo lineal simple de nivel individual

$$E[Y_i|x_i, \bar{x}] = \alpha + \beta_w(x_i - \bar{x}) + \beta_B \bar{x}$$

donde β_B es el efecto entre áreas (contextual) y β_w es el efecto individual dentro del área. Lo que muestra que los efectos individuales y contextuales no pueden estimarse simultáneamente sin datos a nivel individual. En un modelo no lineal, ambos efectos pueden ser estimables con datos ecológicos, pero la cantidad de información sobre β_w es pequeña (Sheppard, 2003). Más importante aún, la derivación para el modelo lineal revela que la estimación depende de manera crucial de la forma del modelo no lineal, y no podemos verificar la forma del modelo solo a partir de los datos ecológicos. Por lo tanto, aunque se pueden realizar análisis de sensibilidad para identificar ambos parámetros, la inferencia es poco confiable con solo datos ecológicos. Los investigadores (Greenland, 2001) también han señalado que cuando los efectos contextuales son de interés, son susceptibles a sesgos de nivel cruzado cuando se estiman a partir de datos ecológicos.

Algunos han argumentado, en contextos dietéticos y ambientales, que la exposición contextual puede ser una mejor estimación de la exposición para un individuo x_i cuando el error de medición a nivel individual es grande. Por ejemplo, Navidi, Thomas, Stram y Peters, (1994) proponen un diseño que combina la regresión a nivel individual con comparaciones ecológicas para combinar los mejores aspectos de cada fuente de datos. Los análisis a nivel individual están libres de falacia ecológica, pero pueden tener poca potencia y errores de medición en las exposiciones, cada uno de los cuales puede rectificarse en los datos ecológicos.

En general, los modelos multinivel han proporcionado un marco popular para analizar asociaciones a diferentes escalas geográficas, como por ejemplo, para estimar los efectos de vecindad, pero estos modelos no pueden controlar la confusión debido a variables no medidas, y la interpretación de los parámetros no siempre es sencilla. La interpretación habitual de un parámetro asociado con una variable particular se revela al aumentar la variable en una unidad, mientras se mantienen fijas todas las demás variables.

Combinando datos ecológicos e individuales

La única solución al problema de inferencia ecológica que no requiere suposiciones no verificables es la suplementación de nivel ecológico con datos de nivel individual. Hacemos hincapié en que los datos ecológicos también pueden complementar los datos individuales ya disponibles para mejorar la potencia. El enfoque obvio es recolectar una muestra aleatoria de individuos dentro de áreas. Para un resultado continuo, Raghunathan, Diehr y Cheadle, (2003) muestran que las estimaciones de momento y probabilidad máxima de un coeficiente de correlación común dentro del grupo mejorarán cuando los datos agregados se combinen con datos individuales dentro de los grupos, y Glynn, Wakefield, Handcock y Richardson, (2008) derivan estrategias de diseño óptimas para la recopilación de datos a nivel individual cuando el modelo es lineal. Con un resultado binario no excepcional, los beneficios también se han ilustrado (Steel, Beh y Chambers, 2004; Wakefield, 2004).

Para una enfermedad poco común, pocos casos estarán presentes en los individuos dentro de la muestra, por lo que solo se obtendrá información sobre la distribución de exposiciones y factores de confusión a través de una estrategia de muestreo aleatorio, que, por lo tanto, es equivalente a usar solo una muestra de encuesta de covariables. Esto provocó la derivación del llamado método de datos agregados de Prentice y Sheppard (1995) y Sheppard y Prentice (1995). La inferencia procede mediante la construcción de un modelo basado en la muestra de $m \leq n$ individuos en cada área y estima la media, que proporciona el modelo 3 para el

caso de una sola exposición, en función de los promedios empíricos. Este es un diseño extremadamente poderoso porque la estimación no se basa en suposiciones con respecto a la distribución dentro del área de exposiciones y factores de confusión; aunque esta distribución puede no estar bien caracterizada para muestras pequeñas (Salway y Wakefield, 2008). La falacia ecológica se reduce en mayor medida que en el estudio semiecológico porque se reconoce la variabilidad dentro del área en exposiciones y factores de confusión.

Un enfoque alternativo es asumir una distribución paramétrica para la distribución dentro del área de exposiciones y factores de confusión (Richardson, Stücker y Hémon, 1987; Wakefield, 2003), aunque esto supone implícitamente que hay disponible una muestra de estos (Jackson, Best y Richardson, 2006; Jackson, Best y Richardson, 2008). Como ejemplo, si suponemos que las exposiciones en un área normalmente se distribuyen con media y varianza, entonces el riesgo ecológico implícito es, y este modelo puede ajustarse a los datos ecológicos si la varianza está disponible en cada área (Best, Cockings, Bennett, Wakefield y Elliott, 2001). Más recientemente, los investigadores han sugerido un enfoque que toma la media como una combinación de estos dos enfoques, dominando el enfoque paramétrico para muestras pequeñas, para las cuales el método de datos agregados puede proporcionar inferencia inestable (Salway y Wakefield, 2008).

Un enfoque diferente en el contexto de una enfermedad rara es el muestreo dependiente del resultado, que evita el problema de cero casos encontrados en el muestreo aleatorio. Se han desarrollado enfoques inferenciales para cuando los datos ecológicos se complementan con información individual de casos y controles reunida dentro de las áreas constituyentes (Haneuse y Wakefield, 2007; Haneuse y Wakefield, 2008; Haneuse y Wakefield, 2008a). Los datos de casos y controles eliminan el sesgo ecológico, mientras que los datos ecológicos proporcionan una mayor potencia y restricciones en la distribución de muestreo de los datos de casos y controles, lo que mejora la precisión de las estimaciones.

Los métodos de dos fases tienen una larga historia en estadística y epidemiología (Breslow y Cain, 1988; Breslow y Chatterjee, 1999; Walker, 1982; White, 1982) y se basan en una clasificación cruzada inicial por resultado, factores de confusión y exposiciones. Esta clasificación proporciona un marco de muestreo dentro del cual se pueden reunir covariables adicionales a través del muestreo de individuos. Tal diseño puede usarse en un entorno ecológico, donde la clasificación inicial se basa en una o más áreas, estratos de confusión y posiblemente medidas de exposición propensas a errores.

En todos estos enfoques, es claramente vital evitar el sesgo de respuesta en las muestras de la encuesta o el sesgo de selección en el muestreo dependiente del resultado, y es esencial establecer un marco de muestreo relevante.

Discusión

El uso de datos ecológicos es ubicuo. Un escéptico podría concluir de la letanía de posibles sesgos descritos en la sección de sesgos ecológicos, más arriba, que la inferencia ecológica nunca debe intentarse, pero esta sería una visión demasiado pesimista. Un punto de partida útil para todos los análisis ecológicos es escribir un modelo a nivel individual para la asociación de interés resultado-exposición, incluidos los factores de confusión conocidos.

El sesgo ecológico puede ser pequeño cuando la variabilidad dentro del área de las exposiciones y los factores de confusión conocidos son pequeños, y para estudios de áreas pequeñas en particular, esto puede ser aproximadamente cierto. Una fuente grave de sesgo es la causada por la confusión porque los datos ecológicos sobre la exposición rara vez se estratifican por estratos de confusión dentro de las áreas. Si se realizó un estudio de área pequeña con un modelo de nivel individual agregado correctamente, entonces las estimaciones de los parámetros se pueden interpretar con cautela a nivel individual y se pueden comparar con otros estudios a nivel individual y, por lo tanto, agregar a la totalidad de la evidencia para una hipótesis.

Al comparar las estimaciones ecológicas y semiecológicas con las estimaciones a nivel individual, es claramente crucial tener una medida de efecto común, por ejemplo, un riesgo relativo o una razón de riesgo. Entonces, será difícil comparar un coeficiente de correlación ecológica, que es una medida informada a menudo, con una estimación del efecto de un estudio a nivel individual.

Los estudios ecológicos bien diseñados pueden sugerir hipótesis para investigar si se observan fuertes asociaciones ecológicas. Una alternativa a la visión pesimista que a menudo se aplica a los análisis ecológicos es que cuando se observa una asociación ecológica fuerte, se debe intentar explicar cómo podría haber surgido una relación de este tipo si no se debe a la ecología.

Se debe tener cuidado al determinar los efectos del error de medición en un estudio ecológico porque las direcciones de sesgo pueden no ser predecibles. Por ejemplo, en ausencia de especificación pura y sesgo de confusión para los modelos lineales y log-lineales, si hay un error de medición no diferencial en una exposición binaria, habrá una sobreestimación del parámetro del efecto, en contraste con los estudios a nivel individual (Brenner H. , Savitz, Jockel y Greenland, 1992).

Los estudios que investigan los efectos agudos de la contaminación del aire son otra situación común en la que se utilizan exposiciones ecológicas. Los recuentos diarios de enfermedades en una ciudad, por ejemplo, a menudo retroceden frente a mediciones de concentración diarias y/o rezagadas tomadas de un monitor o el promedio de una colección de monitores para estimar los efectos agudos de la contaminación del aire. Si la variabilidad de la exposición diaria es mayor que la variabilidad dentro de la ciudad, entonces esperaríamos que el sesgo ecológico sea relativamente pequeño.

Con respecto a la disponibilidad de datos, la información de exposición generalmente no es de naturaleza agregada –a menos que la exposición sea una variable demográfica o socioeconómica–, y en un entorno epidemiológico ambiental, el modelado de superficies de concentración

de contaminantes sin duda crecerá en popularidad. Sin embargo, una idea importante es que, en un contexto de modelado de exposición a la salud, puede ser mejor usar mediciones del monitor más cercano, en lugar de modelar la superficie de concentración, porque este último enfoque puede ser susceptible a grandes sesgos (Wakefield y Shaddick, 2006). Un desafío pendiente es diagnosticar cuando los datos disponibles son de suficiente abundancia y calidad para respaldar el uso de modelos complejos.

La restricción y la estandarización de las variables siguen siendo comunes en los análisis ecológicos, a pesar del hecho de que puede conducir a un sesgo considerable (Rosenbaum y Rubin, 1984). Los ejemplos típicos implican tasas estandarizadas –variables ecológicas crudas–, como las tasas de mortalidad estandarizadas por edad, por raza y sexo o variables contextuales –niveles de contaminación del aire– y resúmenes no estandarizados sin restricciones –ventas de cigarrillos per cápita–.

Los efectos de los errores de medición en los análisis ecológicos e individuales pueden ser bastante diferentes. Brenner H., Savitz, Jöckel y Greenland (1992) encontraron que la clasificación errónea no diferencial independiente de una exposición binaria podría producir un sesgo que alejaría las estimaciones del valor nulo e incluso podría mostrar en un análisis de regresión ecológica lineal o log-lineal estándar resultados inversos. Carroll (1997) obtuvo resultados análogos para la regresión probit ecológica con una exposición continua. Los resultados en Brenner H., Savitz, Jockel, y Greenland (1992) también indican que las estimaciones de regresión ecológica pueden ser extraordinariamente sensibles a los errores en la medición de la exposición. Por otro lado Brenner *et al.* (1992), encontraron que la clasificación errónea no diferencial independiente de un único factor de confusión binario no produjo un aumento en el sesgo en una regresión lineal ecológica. Del mismo modo, Prentice y Sheppard (1995) y Sheppard y Prentice (1995) han encontrado la solidez de su análisis multinivel incompleto a errores de medición puramente aleatorios.

Además de asumir modelos muy simples para errores a nivel individual, los resultados anteriores también suponen que las covariables ecológicas en el análisis son resúmenes directos de las medidas individuales. Sin embargo, a menudo, las covariables ecológicas están sujetas a errores más allá de un error aleatorio de la encuesta o errores de medición a nivel individual, como por ejemplo cuando los datos de ventas per cápita se usan como un *proxy* para el consumo individual promedio. Se han realizado algunos trabajos para examinar el impacto de dicho error de medición ecológica en las inferencias entre niveles bajo modelos de error simples (Navidi, Thomas, Stram, y Peters, 1994; Wakefield y Salway, 2001), pero se necesita más investigación, especialmente para la situación en la que la variable de agrupación es una unidad administrativa arbitraria que sirve como proxy para una variable contextual.

Pese a la posibilidad de sesgos expuestos vale la pena examinar los datos ecológicos, como lo demuestran los cuidadosos análisis ecológicos (Prentice y Sheppard, 1989; Richardson, Stücker y Hémon, 1987) y los métodos que combinan datos individuales y ecológicos (Duncan, Jones y Moon, 1998; Navidi, Thomas, Stram, y Peters, 1994; Prentice y Sheppard, 1995; Sheppard y Prentice, 1995). Además, es importante recordar que la posibilidad de sesgo no demuestra la presencia de este, y que un conflicto entre las estimaciones ecológicas e individuales no demuestra por sí solo que las estimaciones ecológicas sean las más sesgadas (Greenland y Morgenstern, 1989; Greenland y Robins, 1994; Morgenstern, 1995; Schwartz, 1994).

Esto se debe a que, uno, los dos tipos de estimaciones están sujetos a conjuntos de sesgos superpuestos pero distintos, y puede suceder que las estimaciones a nivel individual sean las más sesgadas; y dos, los efectos medidos por los dos tipos de estimaciones se superponen pero son distintos, ya que las estimaciones ecológicas incorporan un componente contextual que a menudo está ausente de las estimaciones individuales debido a restricciones contextuales –de la población– en los estudios a nivel individual. De hecho, el componente contextual puede verse como

una fortaleza de los estudios ecológicos, ya que a menudo es de gran importancia sustantiva, incluso cuando es especialmente vulnerable a la confusión.

Mensajes clave

- ▶ Los estudios ecológicos se caracterizan por estar basados en datos agrupados, y los grupos a menudo corresponden a áreas geográficas. Estos estudios tienen una larga historia en muchas disciplinas, incluidas las ciencias políticas.
- ▶ Aunque se reconoce comúnmente que los estudios ecológicos pueden sufrir sesgos especiales al estimar los efectos individuales, rara vez se reconoce que los mismos sesgos afectan las estimaciones ecológicas de los efectos contextuales. Para ello se requieren datos a nivel individual para abordar estos problemas sin recurrir a supuestos controvertidos.

▣ Referencias

- Best, N., Cockings, S., Bennett, J., Wakefield, J. y Elliott, P. (2001). Ecological regression analysis of environmental benzene exposure and childhood leukaemia: sensitivity to data inaccuracies, geographical scale and ecological bias. *Journal of the Royal Statistical Society Series A*, 164(1),155-174.
- Borgatta, E. y Jackson, D. (1980). *Aggregate Data: Analysis and Interpretation*. Beverly Hills: Sage.
- Brenner, H., Savitz, D., Jockel, K. y Greenland, S. (1992). Effects of nondifferential exposure misclassification in ecologic studies. *American Journal of Epidemiology*, 135,85-95.
- Breslow, N. y Cain, K. (1988). Logistic regression for two-stage case-control data. *Biometrika*, 75(1),11-20.
- Breslow, N. y Chatterjee, N. (1999). Design and analysis of two-phase studies with binary outcome applied to Wilms tumour prognosis. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* 48(4), 457-468.
- Carroll, R.J. (1997). Some surprising effects of measurement error in an aggregate data estimator. *Biometrika*, 84, 231-234.
- Cleave N., Brown, P. J y Payne, C.D. (1995). Evaluation of methods for ecological inference. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*,158(1), 55-72.
- Cohen, B.L. (1990). Ecological versus case-control studies for testing a linear-no-threshold dose-response relationship. *International Journal of Epidemiology* , 19(3), 680-684.
- Cromley, E.K. (2003). GIS and disease. *Annual Review of Public Health*, 24, 7-24.

- Croner, C.M. (2003). Public health, GIS, and the internet. *Annual Review of Public Health*, 24, 57-82.
- DeAngelis, C.D. (1990). *An introduction to clinical research*. Nueva York: Oxford University Press.
- Dobson, A.J. (1988). Proportional hazards models for average data for groups. *Statistics in Medicine* 7(5), 613-618.
- Duncan C., Jones. K., y Moon, G. (1996). Health-related behaviour in context: A multilevel modelling approach. *Social Science & Medicine*, 42(6), 817-830.
- Duncan C., Jones. K. y Moon, G. (1998). Context, composition and heterogeneity: Using multilevel models in health research. *Social Science & Medicine*, 46(1), 97-117.
- Elliott, P., Wakefield, J., Best, N. y Briggs, D. (2000). *Spatial Epidemiology: Methods and Applications*. Oxford: Oxford University Press.
- Etzioni, A., Lazarfeld, P y Menzel, H. (1961). *On the relation between individual and collective properties. in Complex organization*. Nueva York: Ed Etzioni A
- Firebaugh, G. (1978). A rule for inferring individual-level relationships from aggregate data. *American Sociological Review*, 43(4), 557-572.
- Freedman, D.A. (2005). *Statistical models: Theory and practice*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Friis, R. y Sellers, T. (2004). *Epidemiology for public health practice*. Boston: Jones and Bartlett.
- Glynn, A., Wakefield, J., Handcock, M., y Richardson, T. (2008.). Alleviating linear ecological bias and optimal design with subsample data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A* 171(1), 179-202.

- Goldstein, H. (1995). *Multilevel Statistical Models*. Nueva York: Edward Arnold.
- Greenland, S. y Morgenstern, H. (1989). Ecological bias, confounding and effect modification. *International Journal of Epidemiology*, 18(1),269-274.
- Greenland, S. (1990). Randomization, statistics, and causal inference. *Epidemiology*, 1 (6),421-429.
- Greenland, S. (1992). Divergent biases in ecologic and individual level studies. *Statistics in Medicine*, 11(9),1209-1223.
- Greenland S. y Robins, J. (1994). Ecological studies: biases, misconceptions and counterexamples. *American Journal of Epidemiology*, 139(8),747-760.
- Greenland, S. y Robins, J. (1994a). Accepting the limits of ecologic studies. *American Journal of Epidemiology*, 139, 769-771.
- Greenland, S., Robins, J. y Pearl, J. (1999). Confounding and collapsibility in causal inference. *Statistical Science*, 14(1), 29-46.
- Greenland, S. (2000). When should epidemiologic regressions use random coefficients? *Biometrics*, 56, 915-921.
- Greenland, S. (2001). Ecologic vs individual-level sources of bias in ecologic estimates of contextual health effects. *International Journal of Epidemiology*, 30(6),1343-1350.
- Guthrie, K. y Sheppard, L. (2001). Overcoming biases and misconceptions in ecologic studies. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*, 164(1),141-154.
- Halloran, M. y Struchiner, C. (1991). Study designs for dependent happenings. *Epidemiology*, 2 (5),331-338.

- Haneuse, S. y Wakefield, J. (2007). Hierarchical models for combining ecological and case-control data. *Biometrics*, 63(1),128-136.
- Haneuse, S. J. y Wakefield, J. C. (2008). The Combination of Ecological and Case-Control Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*,. *Statistical methodology*, 70(1), 73-93.
- Haneuse, S. y Wakefield, J. (2008a). Geographic-based ecological correlation studies using supplemental case-control data. *Statistics in Medicine*, 27(6),864-887.
- Helman, C. (1984). *Culture, health and illness*. Bristol:Wright.
- Jackson, C., Best, N. y Richardson, S. (2006). Improving ecological inference using individual-level data. *Statistics in Medicine*, 25, 2136-2159.
- Jackson, C., Best, N. y Richardson, S. (2008.). Hierarchical related regression for combining aggregate and individual data in studies of socio-economic disease risk factors. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A* 171(1),159-178.
- Judge, K., Mulligan, J.A. y Benzeval, M. (1998). Income inequality and population health. *Social. Science and Medicine*, 46(4-5),56-579.
- Kaplan G., Pamuk, E., Lynch, J., Cohen, R. y Balfour, J. (1996). Inequality in income and mortality in the United States: analysis of mortality and potential pathways. *BMJ*, 312, 999-1003.
- Kawachi, I. y Kennedy, B. (1999). Income inequality and health: pathways and mechanisms. *Health Services Research*, 34, 215-217.
- Künzli, N., y Tagger, I. (1997). The semi-individual study in air pollution epidemiology: a valid design as compared to ecologic studies. *Environ Health Perspect*, 105(10), 1078-1083.
- Lasserre, V., Guihenneuc-Jouyaux, C. y Richardson, S. (2000). Biases in ecological studies: utility of including within-area distribution of confounders. *Statistics in Medicine*, 19 (1), 45-59.

- Lilienfeld, A. y Lilienfeld, D. (1980). *Foundations of epidemiology*. Nueva York: Oxford University Press.
- Mackenbach., J. (1995). Public health epidemiology. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 49 (4), 333-334.
- McLafferty, S. (2003). GIS and health care. *Annual Review of Public Health*, 24(1),25-42.
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Guía de atención integral basada en la evidencia para hombro doloroso (GATI- HD) relacionado con factores de riesgo en el rrabajo* (1st ed.). Bogotá DC.: Ministerio de la Protección Social de Colombia. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/Documentos y Publicaciones/GATISO PARA HOMBRO DOLOROSO.pdf>
- Ministerio del Trabajo de Colombia. (2015). *II encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el sistema general de riesgos laborales de Colombia* (1st ed.). Bogotá D.C.: Ministerio del Trabajo. Recuperado de: <https://www.casanare.gov.co/?idcategoria=50581#>
- Morgenstern, H. (1995). Ecologic studies in epidemiology: concepts, principles, and methods. *Annual Review of Public Health*, 16, 61-81.
- Navidi, W., Thomas, D., Stram, D. y Peters, J. (1994). Design and analysis of multilevel analytic studies with applications to a study of air pollution. *Environ Health Perspect*, 102 (8), 25-32.
- Pearce, N. (1996). Traditional epidemiology, modern epidemiology, and public health. *American Journal of Public Health*, 86(5),678-683.
- Piantadosi,S., Byar, D. y Green, S. (1988). The ecological fallacy. *American Journal of Epidemiology*, 127(5),893-904.
- Polissar, L. (1980). The effect of migration on comparison of disease rates in geographic studies in the United States. *American Journal of Epidemiology*, 111, 175-182.

- Prentice, R. y Sheppard, L. (1989). Validity of international, time trend, and migrant studies of dietary factors and disease risk. *Preventive Medicine*, 18(2),167-179.
- Prentice, R. y Sheppard, L. (1995). Aggregate data studies of disease risk factors. *Biometrika*, 82, 113-125.
- Raghunathan, T., Diehr, P. y Cheadle, A. (2003). Combining aggregate and individual level data to estimate an individual level correlation coefficient. *Journal of Educacional and Behavioral Statistics*, 28(1),1-19.
- Richardson, S., Stücker, I. y Hémon, D. (1987). Comparison of relative risks obtained in ecological and individual studies: some methodological considerations. *International Journal of Epidemiology*, 16 (1),111-120.
- Richardson, S., y Hémon, D. (1990). Ecological bias and confounding (letter). *International Journal of Epidemiology*, 19,764-766.
- Richardson, S., y Monfort, C. (2000). Ecological correlation studies. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198515326.003.0011
- Ricketts, T.C. (2003). Geographic information systems and public health. *Annual Review of Public Health*, 24, 1-6.
- Robins, J., Murphy, S., y Greenland, S. (2010). Towards a formal theory of causation in ecologic and multilevel studies. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*, 30(6), 1343-1350.
- Robinson, W.S. (1950). Ecological correlations and the behavior of individuals. *American Sociological Review*, 38(2), 337-341.
- Rose, G. (1992). *The strategy of preventive medicine*. Oxford: Oxford University Press.
- Rosenbaum, P. y Rubin, D. (1984). Difficulties with regression analyses of age-adjusted rates. *Biometrics*, 40, 437-443.

- Rothman K, Greenland, S. y Lash, T(1998). Ecologic studies. En K.Rothman, S. Greenland (Eds.), *Modern epidemiology*. Filadelfia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Rushton, G. (2003). Public health, GIS, and spatial analytic tools. *Annual Review Public Health*, 24,43-56.
- Salway R. y Wakefield, J. (2005.). Sources of bias in ecological studies of nonrare events. . *Environmental and Ecologic Statistics*, 12(83), 321-347.
- Salway, R. y Wakefield, J. (2008). A hybrid model for reducing ecological bias. *Biostatistics*, 9(1),1-17.
- Sapolsky, R., Alberts, S. y Altmann, J. (1997). Hyperchortisolism associated with social subordination or social isolation among wild baboons. *Arch Gen Psychiatry*, 54, 1137-1143.
- Schwartz, S. (1994). The fallacy of the ecological fallacy: the potential misuse of a concept and the consequences. *American Journal of Public Health*, 84, 819-824.
- Sheppard, L. (2003). Insights on bias and information in group-level studies. *Biostatistics*, 4, 265-278.
- Sheppard, L. y Prentice, R. (1995). On the reliability and precision of within- and between-population estimates of relative rate parameters. *Biometrics*, 51, 853-863.
- Sheppard, L., Prentice, R. y Rossing, M. (1996). Design considerations for estimation of exposure effects on disease risk, using aggregate data studies. *Statistics in Medicine*, 15,1849-1858.
- Shivley, C.A. y Clarkson, T.b. (1994). Social status and coronary artery atherosclerosis in female monkeys. *Arterioscler Thromb*, 14(5), 721-726.

- Stavraky, K. (1976). The role of ecologic analysis in studies of the etiology of disease: a discussion with reference to large bowel cancer. *Journal of Chronic Disease*, 29(7), 435-444.
- Steel, D.G. y Holt, D. (1996). Analysing and adjusting aggregation effects: the ecological fallacy revisited. *International Statistics Review*, 64, 39-60.
- Steel, D., Beh, E. y Chambers, R. (2004). The Information in Aggregate Data. En G.King, E. Rosen y M.Tanner (Eds.) *Ecological Inference: New Methodological Strategies*. (pp.51-68). Inglaterra: Cambridge University Press.
- Susser, M. (1973). *Causal thinking in the health sciences: concepts and strategies in the health sciences*. Nueva York: Oxford University Press.
- Vaupe, J., Manton, K. y Stallard, E. (1979). The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality. *Demography*, 16, 439-454.
- Wakefield, J. (2003). Sensitivity analyses for ecological regression. *Biometrics*, 59, 9-17.
- Wakefield, J. (2004). Ecological inference for 2×2 tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*, 167(3), 385-445.
- Wakefield, J. (2007). Disease mapping and spatial regression with count data. *Biostatistics*, 8,158-183.
- Wakefield, J. y Salway, R. (2001). A statistical framework for ecological and aggregate studies. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*, 164,119-137.
- Wakefield, J. y Shaddick, G. (2006). Health-exposure modeling and the ecological fallacy. *Biostatistics*, 7(3), 438-455.

- Walker, A. (1982). Anamorphic analysis: sampling and estimation for covariate effects when both exposure and disease are known. *Biometrics*, 38,1025-1032.
- Waller, L. y Gotway, C. (2004). *Applied Spatial Statistics for Pubic Health Data*. Nueva York: Wiley.
- White, E. (1982). A two stage design for the study of the relationship between a rare exposure and a rare disease. *American Journal of Epidemiology*, 115(1),119-128.
- Wilson. M. y Daly, M. (1997). Life expectancy, economic inequality, homicide, and reproductive timing in Chicago neighbourhoods. *BMJ* , 314,1271-1274.

Equipo de trabajo

Camilo José González-Martínez

Candidato a doctor en Salud Pública, énfasis en Salud Ambiental, ingeniero ambiental de la Universidad El Bosque, con Maestría en Gestión Ambiental, especialista en Biotecnología Agraria. Profesor e investigador de la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, líder del semillero de investigación Environment, Ecology and Natural Science – ENS. La investigación científica es la ruta para la conservación de ecosistemas estratégicos y una solución para múltiples causas de los problemas actuales inherentes a la sostenibilidad de los recursos naturales y la salud ambiental.

Grupos de investigación:

Desarrollo Regional MD.

Correo electrónico:

camilo.gonzalez@uniminuto.edu; camilojgm@yahoo.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-147X>

Karina Susana Pastor-Sierra

Candidata a doctor en Salud Pública de la Universidad El Bosque. Docente investigador de la Universidad del Sinú, Sede Montería. Experiencia en el manejo de técnicas básicas de Biología Molecular en evaluación citotóxica y genotóxica, manejo de la técnica de PCR, PCR en tiempo real, electroforesis de ADN enfocados en estudios epidemiológicos poblacionales y salud ambiental. Práctica en el manejo de bases de datos y software para análisis epidemiológicos. Experiencia investigativa en las áreas de minería de carbón, mercurio y ferroníquel, experiencia docente en instituciones universitarias públicas y privadas.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

karinapastor@unisinu.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6129-3666>

Adriana Acevedo-Supelano

Abogada de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín e instrumentadora quirúrgica de la Universidad de Antioquia. Candidata a doctor en Salud Pública, énfasis en políticas. Especialista en Derecho Procesal de la Universidad Libre de Bogotá. Profesora e investigadora del Programa de Instrumentación Quirúrgica de la Facultad Escuela Colombina de Medicina Universidad El Bosque, Bogotá D.C.

Grupo de investigación:

Complejidad y Salud Pública.

Correo electrónico:

aacevedosu@unbosque.edu.co

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0119-8472>

Daniel Augusto Acosta-Leal

Ingeniero agrónomo, máster en Ciencias Agrarias con énfasis en Desarrollo Empresarial Agropecuario, candidato a doctor en Educación. Profesor universitario de la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Líder del semillero de investigación de Manejo Agroecológico de Cultivos (MAEC). Ha formulado y ejecutado proyectos agroecológicos de producción y conservación pues adopta la visión de la ingeniera Oholeguy, presidente de FUCREA, quien dice que “no heredamos la Tierra de nuestros antepasados; solo la tomamos prestada de nuestros hijos”.

Grupo de investigación:

Desarrollo Regional MD.

Correo electrónico:

daniel.acosta@uniminuto.edu; agronomo.acosta@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-7439>

Lyda Espitia-Pérez

Bióloga, MSc; PhD en Biología Celular y Molecular. Posee experiencia en el área de toxicología ambiental y toxicología genética. Docente investigador de la Universidad del Sinú Sede Montería. Su foco principal de investigación es la genotoxicidad de residuos de minería a cielo abierto, estudio de calidad del aire, PM10 y PM 2,5 en modelos *in vitro* e *in vivo*. Ha efectuado trabajos investigativos sobre los efectos de la exposición a residuos de minería de carbón en poblaciones animales y humanas. Estos últimos estudios en poblaciones con exposición ocupacional y ambiental.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

lydaespitia@unisinu.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3332-7814>

Pedro Juan Espitia-Pérez

Químico, máster en Ciencias Biológicas: Bioquímica. Posee experiencia en el área de química, con énfasis en química analítica. Docente investigador de la Universidad del Sinú, Sede Montería. Su foco principal de investigación es el estrés oxidativo debido a la exposición a contaminantes en modelos *in vivo*. Ha efectuado trabajos sobre los efectos a nivel de mutagénesis en poblaciones expuestas a mercurio y carbón en el norte colombiano. Actualmente estudia la acción *in vitro* de antioxidantes indirectos como coadyuvantes en la terapia contra cáncer de próstata.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

pedrojespitia@unisinu.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2487-9967>

Claudia Milena Galeano-Páez

Bióloga, especialista en Gestión Energética y Ambiental. Máster en Desarrollo y Ambiente. Experiencia en estudios ambientales minero-energético. Docente investigador de la Universidad del Sinú Sede Montería. Enfoque investigativo en manejo y mitigación adecuado de impactos ambientales relacionados con salud y degradación ambiental por procesos extractivos y de aprovechamiento, mediante técnicas moleculares de diagnóstico usadas como variables determinantes para la evaluación de la degradación ambiental y sus efectos en la salud humana y el equilibrio ecosistémico, con un fuerte componente social de acompañamiento a comunidades afectadas que permiten la valoración del desarrollo y calidad de vida.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

claudiagaleano@unisinu.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6865-4439>

Claudia Patricia Gómez-Rendón

Ingeniera sanitaria, doctora en Geografía, profesora titular de la Universidad El Bosque. Miembro del grupo de investigación Agua, Salud y Ambiente de la Facultad de Ingeniería. Docente del Doctorado en Salud Pública.

Grupo de investigación:

Agua, Salud y Ambiente.

Correo electrónico:

gomezclaudiap@unbosque.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7580-7859>

Luis Alejandro Gómez-Barrera

Odontólogo de la Universidad Nacional de Colombia. Magíster en salud pública de la Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Estudios Políticos de la Universidad Externado de Colombia. Profesor Asociado Facultad de Medicina Universidad El Bosque. Director de la Maestría en Salud Pública y profesor del Doctorado en Salud Pública de la Universidad El Bosque.

Grupo de investigación:

Complejidad y Salud Pública.

Correo electrónico:

gomezluis@unbosque.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4054-9527>

Fernando Gutiérrez-Fernández

Ecólogo de la Pontificia Universidad Javeriana, especialista en Gestión Urbana y Desarrollo Territorial, especialista en Gestión Ambiental, especialista en Desarrollo Sostenible y Ecodiseño, doctor en Desarrollo Sostenible y Ecodiseño de la Universidad Politécnica de Valencia - España. Profesor titular Universidad El Bosque. Miembro de los grupos de investigación Agua, Salud y Ambiente, Producción Limpia Choc Izone de la Facultad de Ingeniería y Complejidad y Salud Pública de la Facultad de Medicina.

Grupo de investigación:

Agua, Salud y Ambiente.

Correo electrónico:

gutierrezluisf@unbosque.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-919X>

Luisa Fernanda Jiménez-Vidal

Ingeniera biológica de la Universidad de Nacional (2013). Investigadora en el área de toxicología ambiental adjunta al grupo de investigaciones en ciencias biomédicas y biología molecular de la Universidad del Sinú (Montería, Córdoba). Amplia experiencia en laboratorios de docencia, investigación y análisis químico, microbiológico, ambiental y de aguas. Actualmente participa como investigadora y coinvestigadora en el área de mutagénesis y carcinogénesis para el estudio in vivo e in vitro de sistemas biológicos expuestos a agentes citotóxicos y genotóxicos.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

luisajimenezv@unisinu.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0193-7028>

Alexandra Porras-Ramírez

Bacterióloga, maestría en epidemiología de la Universidad del Valle y PhD en Salud Pública de la Universidad Nacional de Colombia. Directora de la Maestría en Epidemiología de la Universidad El Bosque desde 2014, contratista del Ministerio de Salud y Protección Social 2015-2019, Docente del Doctorado en Salud Pública en la Universidad El Bosque (2018-2019). Jefe de la Subdirección de Estudios Clínicos de la Fundación Santa Fe de Bogotá 2015-2016. Investigadora de ASIESALUD. Ha sido consultora de la Organización Panamericana de la Salud y contratista en el Instituto Nacional de Salud y la Secretaría Distrital de Salud. Ha realizado y dirigido investigaciones y proyectos nacionales e internacionales y tiene publicaciones en revistas de circulación nacional e internacional.

Grupo de investigación:

Medicina Comunitaria y Salud Colectiva

Correo electrónico:

rporrasalexandra@unbosque.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0800-1388>

Alejandro Rico-Mendoza

Zootecnista de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, especializado en Epidemiología en la Universidad Escuela de Medicina Juan N Corpas, magíster en Salud Pública de la Universidad Nacional de Colombia, con más de 15 años de experiencia en investigaciones en el campo de la salud, epidemiología de campo, estudios ecológicos. Con el grupo de investigación GREESP de la Universidad Nacional realizó estudios para la introducción de vacunas y nuevos biológicos al esquema actual de vacunación colombiano.

Se ha desempeñado como profesional especializado con el centro internacional para control y erradicación de cultivos ilícitos CICAD de la OEA, Ministerio de Salud, Instituto Nacional de Salud,

Organización Mundial de la Salud, Secretaría Distrital de Salud. Ha trabajado con importantes universidades públicas y privadas como la Universidad de Antioquia, Universidad de Boyacá, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Popular del Cesar, Universidad de La Guajira, actualmente es el coordinador de la Maestría en Epidemiología y profesor asociado de la Universidad El Bosque. Su pasión es formar los mejores profesionales en epidemiología que necesita el país.

Grupo de investigación:

Medicina Comunitaria y Salud Colectiva

Correo electrónico:

ricoalejandro@unbosque.edu.co

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4291-6135>

Shirley Salcedo-Arteaga

Bióloga de la Universidad de Córdoba 2010. Magíster en Biología, de la Universidad del Atlántico, 2017. Estudiante de doctorado, de la Universidade Federal Río Grande su Sul, Brasil. Docente investigadora de la Universidad del Sinú EBZ y Sede Montería. Adjunta al grupo de investigaciones Biomédica y Biología Molecular. Con experiencia en cultivos celulares, técnicas citogenéticas y de biología molecular; experiencia en trabajos con poblaciones residencial y ocupacionalmente expuestas a genotóxicos. Experiencia en redacción de proyectos de investigación financiados por COLCIENCIAS. Actualmente desarrolla investigaciones en las líneas de investigación en genética toxicología y teratogénesis por explosión in útero a pesticidas.

Grupo de investigación:

Biomédica y Biología Molecular

Correo electrónico:

shirleysalcedo@unisinu.edu.co

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4536-7098>



UNIMINUTO
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Educación de calidad al alcance de todos

Sede Cundinamarca

Colombia es un país que cuenta con una riqueza natural exuberante que se expresa en su alta biodiversidad, hermosos paisajes, gran variedad de ecosistemas, riqueza cultural y riqueza geológica, otorgándole un gran potencial minero de interés económico.

En el contexto colombiano, la minería es un renglón económico importante debido a la diversidad minera comprendida desde metales como hierro y níquel; metales preciosos como oro y platino; recursos no metálicos como carbón, sal y roca fosfórica; y piedras preciosas, como son las esmeraldas. Así mismo para algunas comunidades colombianas, la minería es la única fuente de ingresos, por lo tanto la minería también es un asunto de subsistencia.

La cuestión fundamental que aborda este libro, se enmarca en la salud pública y las ciencias ambientales, relacionando las implicaciones de los principales procesos mineros de Colombia, extracción y/o procesamiento de Carbón, Níquel y Oro, con lo más valioso y preciado: la salud de las personas y su expresión a nivel poblacional.

ISBN: 978-958-763-392-4



9 789587 633924

