



Scientia Et Technica

ISSN: 0122-1701

scientia@utp.edu.co

Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Rodríguez-Aparicio, Jairo; Vergara-Buitrago, Paulina Alejandra
Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia)
Scientia Et Technica, vol. 26, núm. 3, 2021, Agosto-Octubre, pp. 398-405
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24519>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84969623015>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Environmental analysis of coal mining in the strategic ecosystem of paramo (Boyacá, Colombia)

Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia)

J. A. Rodríguez-Aparicio  ; P. A. Vergara-Buitrago 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24519>

Artículo de revisión

Abstract— Mining is established as one of the development activities in Colombia, due to the mineral wealth present in the national territory. However, this activity has caused environmental impacts on the biotic, abiotic and socioeconomic components of high mountain and paramo ecosystems. Therefore, this article presents a diagnosis of the mining activity with examples focused on the strategic ecosystem of the paramo, which was carried out from the bibliographic review of studies that describe and analyze the problem of environmental pollution associated with the development of mining company in Colombia. The search included posts on the negative impacts of mining on the paramo ecosystem. As a result of the review, social, water and atmospheric effects caused by mining were identified. This work contributes to the recognition of the paramo as a strategic ecosystem and provides an alternative solution for its environmental recovery focused on ecological restoration.

Index Terms— conservation, ecosystems, environment, mining, pollution.

Resumen— La minería se establece como una de las actividades de desarrollo en Colombia, debido a la riqueza mineral presente en el territorio nacional. Sin embargo, esta actividad ha ocasionado impactos ambientales sobre los componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos de los ecosistemas de alta montaña y páramo. Por lo anterior, en este artículo se presenta un diagnóstico de la actividad minera con ejemplos enfocados al ecosistema estratégico de páramo, el cual se realizó a partir de la revisión de bibliográfica de estudios que describen y analizan la

problemática de contaminación ambiental asociada al desarrollo de minera en Colombia. La búsqueda incluyó publicaciones sobre los impactos negativos de la minería en el ecosistema de páramo. Como resultado de la revisión se identificaron afectaciones sociales, hídricas y atmosféricas ocasionadas por la minería. Este trabajo contribuye al reconocimiento del páramo como ecosistema estratégico y brinda una alternativa de solución para su recuperación ambiental enfocada en la restauración ecológica.

Palabras claves— ambiente, contaminación, conservación, ecosistemas, minería.

I. INTRODUCCIÓN

LA minería representa uno de las actividades más importantes en el crecimiento económico en Colombia, debido a la riqueza mineral del país. De acuerdo al último censo minero [1], en Colombia se identifican 14.357 unidades de producción minera (UPM), el 18.5% están ubicadas en Boyacá, lo cual lo sitúa junto a Antioquia, Cundinamarca y Bolívar como los departamentos que concentra más de la mitad de las unidades de producción minera del país.

Sin embargo, solo el 50% de las UPM a pequeña escala y el 17% de las UPM a mediana escala cuentan con un título minero [2]. Esto significa que las actividades desarrolladas por estas unidades mineras no cuentan con los aspectos técnicos necesarios para operar, ni contemplan medidas de manejo ambiental, lo cual trae como consecuencia la generación de impactos negativos en el entorno natural y a las comunidades cercanas.

La actividad minera ocasiona impactos ambientales sobre el ecosistema, impactos que varían según el tipo de mineral y las características de la mina. Es una actividad que presenta un ritmo de crecimiento que implica un reto de gestión para sociedad y las instituciones del Estado [3]. Por lo cual, tener claridad sobre las acciones y prácticas utilizadas por las empresas mineras, permite entablar un diálogo claro con las comunidades y la sociedad sobre los verdaderos riesgos de la extracción minera [4].

El departamento de Boyacá presenta la mayor extensión de

Este manuscrito fue enviado el 21 de octubre de 2020 y aceptado el 23 de septiembre de 2021. Artículo de investigación producto del proyecto: Análisis del impacto ambiental ocasionado por proceso productivo y drenaje minero en explotación de carbón.

J. Rodríguez-Aparicio, Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología (GISABA), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, (e-mail: jairo.rodriguez@proecogw.org)

P. A. Vergara-Buitrago, Magister en Geografía e Ingeniera Ambiental. Universidad Pedagógica y

Tecnológica de Colombia. Gestora en investigaciones de la facultad de ingenierías, Fundación Universitaria Navarra, (e-mail: pa.vergara@uninavarra.edu.co)



páramos en el país con un 18.3% del total nacional [5]. Sin embargo, los páramos de Colombia han sido afectados actividades productivas como la minería, agricultura, ganadería y explotación de hidrocarburos [6]. Por lo anterior, es necesaria una mayor protección, vigilancia y control [7], con el fin de asegurar la continuidad de sus procesos ecológicos, así como el flujo de servicios ecosistémicos para las comunidades que les habitan [8].

El presente artículo tuvo como objetivo hacer una revisión bibliográfica de las diferentes afectaciones de la actividad minera en el ecosistema de páramo. Se estableció como criterio la búsqueda investigaciones realizadas en páramos de Boyacá y la identificación de impactos ambientales. Asimismo, se presentan consideraciones finales y una mirada crítica de la actividad minera por su intervención sobre ecosistemas estratégicos, componentes bióticos y abióticos de importancia ambiental y su relación directa con la comunidad.

II. LA MINERÍA Y SUS IMPLICACIONES AMBIENTALES Y SOCIALES

La minería es la actividad económica mediante la cual se extraen de la corteza terrestre minerales empleados para la producción de materiales. La minería reúne un conjunto de actividades que relacionan el descubrimiento, exploración y explotación de yacimientos [9]. Es por ello que la actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural [10], desde las más imperceptibles hasta las que representan impactos sobre el medio natural donde se desarrollan [11].

A nivel mundial el carbón es la fuente de energía que produce mayor contaminación en todas las etapas de su producción (minería, transporte, almacenamiento, preparación y transformación) y durante su consumo [12]. Pero, ¿por qué no se toman las medidas necesarias para controlar, reducir y mitigar este problema?, si existe evidencia de los impactos derivados de la actividad de extracción minera y cada año aparecen perspectivas de abordaje de la situación [13] y [14].

La minería informal es una actividad desarrollada en Colombia, escenario reconocido por la institucionalidad minera. De acuerdo, con los resultados del Censo Minero realizado por el Ministerio de Minas y Energía (Minenergía) en 24 departamentos del país, la Contraloría General de la República (CGR) en su informe Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente [15], describe la dimensión de la no legalidad minera en el país (incluyendo el amparo de un título minero, así como la existencia de licencia o instrumento ambiental).

De la información almacenada a nivel nacional, solo el 37% de las 14.357 unidades mineras identificadas poseen título minero y el 19,6% cuenta con licencia o instrumento ambiental y título minero, razón por la cual posee legalidad plena [8]. No obstante, se presenta un conflicto conceptual en

el proceso de identificación de impactos ambientales en función del carácter no legal o legal del proceso extractivo [16], ya que la minería legal o no legal, genera efectos de forma irreversible, permanente y no completamente compensable [17].

La industrialización en el Valle de Sogamoso comenzó con el montaje de la Planta Siderúrgica de Paz del Río en 1946 [18], la cual implicaba la explotación del mineral de hierro en los municipios de Socha y Paz de Río y de la explotación de carbón, esto trajo como consecuencias la ocupación de amplias zonas de ecosistemas de alta montaña andina para la explotación de carbón y mineral de hierro y parte del valle a la orilla del río Chicamocha para el montaje de la Planta [19].

En su momento Ingeominas [20], destaca así la importancia de la Siderúrgica: “Una nueva etapa en el desarrollo del sector carbonífero, surge cuando entra en funcionamiento la Siderúrgica de Paz de Río”. Un gran avance en el desarrollo económico y social, pero que olvidaba el factor ambiental.

En Boyacá existe una oportunidad de desarrollo en el sector minero; sin embargo, para el sector de minería a gran escala, se describe que es necesario prestar atención a la dimensión ambiental de la extracción minera, tener claridad sobre las acciones y mejores prácticas utilizadas por las empresas mineras, especialmente las de gran escala [21] y [22]. Propiciando un diálogo con las comunidades sobre los verdaderos riesgos de la extracción minera, con el fin de plantear las medidas para mitigarlos.

Reconociendo los posibles impactos producto de esta actividad, los proyectos de explotación deben presentar avances en el estudio de impacto ambiental como instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren de licencia ambiental, correspondiendo en su contenido y profundidad a las características y entorno del proyecto [23].

La descripción del impacto ambiental que ocasionan las minas abandonadas o paralizadas es escasa, los denominados pasivos ambientales que genera la contaminación en el tiempo, han provocado alteraciones sobre el suelo y el recurso hídrico. Así mismo, la falta de desarrollo de programas de manejo y restauración trae como consecuencias problemáticas ambientales que resultan en una cadena de desastres para el medio natural como a las comunidades locales [24] y [25].

III. AFECTACIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO

Colombia es uno de los 10 países con mayor disponibilidad de recurso hídrico en el mundo [26]; sin embargo, el aumento de actividades económicas extractivas representa un riesgo, especialmente en regiones donde se han presentado problemas de contaminación de aguas superficiales, disminución en los caudales y deterioro de las aguas subterráneas [27].

En el trabajo de investigación en aguas en Boyacá contaminadas con residuos de minas de carbón [28], se presentan resultados del análisis a la composición química de aguas generadas en procesos mineros e industriales y de afluentes próximos a centros de extracción en el municipio de Samacá (Boyacá). La cual evidenció que las muestras no estaban dentro de los rangos establecidos por la normatividad para calidad de agua, por lo cual confirman el efecto contaminante de la actividad.

De las diferentes clases de drenajes, el drenaje ácido es el más frecuente. Ocurre cuando los sulfuros metálicos (pirita, FeS_2) permanecen expuestos a las características fisicoquímicas presentes en la superficie terrestre como el agua y el oxígeno atmosférico, facilitando lugar a un conjunto de reacciones que genera este drenaje [29]. En consecuencia, mientras no se presente una alteración que cambie la condición anaeróbica en la que se encuentra el sustrato, la pirita permanecerá en estado reducido [30].

Sin embargo, si los sulfuros son expuestos en superficie, se oxidan generando un agua ácida cargada metales pesados, metaloides y sulfatos [31]. La importancia de estudiar los impactos de este fenómeno sobre el ambiente radica en que los drenajes ácidos son efluentes mineros que contaminan fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos al caracterizarse por presentar valores como [32]:

- pH entre 1,5 y 6 unidades.
- Altas concentraciones de los cationes Ca y Mg.
- Aportan una gran cantidad de acidez debida a la formación de ácido sulfúrico.
- Elevados contenidos en diversos metales: Fe, Zn, Mn, Pb, Cu, Cd, Ni, Co, Al, Sb, As, Hg; que son solubles a valores de pH bajos.

Cuando se generan sedimentos de color rojo a naranja debido a precipitados de hierro y de sulfatos, la vegetación terrestre que está en contacto con los drenajes ácidos mineros se ve afectada, ya que la acidez y concentración de iones como sulfatos y cloruros impide su normal crecimiento [33] y [34].

Los patios de escombros principalmente de minería de carbón de no contar con cubierta y un área impermeable que evite la filtración al suelo, presentara mayor aporte de acidez en los periodos de alta lluvia respecto a los meses de verano, debido a que se produce mayor lavado y disolución de la pirita expuesta a la acción de lixiviación del agua lluvia y escorrentía [35]. Fenómeno que debe evaluarse en áreas estratégicas con grandes aportes de agua como los páramos.

En Colombia la normativa legal establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y los cuerpos de alcantarillado [36] y [37]. Esta busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua natural o artificial de agua dulce, entre otros. En el Capítulo VI, Artículo 10 de la Resolución 631, se encuentra definidos para el sector minero los valores límite máximos permisibles en vertimiento puntuales.

Las actividades mineras usan agua superficial primariamente en los hornos de coquización [38], sin embargo, en la revisión de los archivos presentes en Corpoboyacá, Corpochivor y la CAR, en las 204 actividades catalogadas e inscritas en la base de datos del Páramo de Rabanal, se indica la no existencia de peticiones ni trámites de concesión de aguas superficiales para su uso para la actividad minera [39].

Al consultar la base de datos de Corpoboyacá existían 9 permisos de concesión de aguas, en las veredas la Chorrera y Loma Redonda (Samacá). El principal uso de solicitud fue el permiso de apagado de los hornos de coquización, presentando un valor promedio de concesiones para 0,5 l/s de caudal [40]. Lo anterior, evidencia la necesidad de un mayor control administrativo por parte de las autoridades ambientales, en un contexto donde la utilización del recurso se debe basar en el consumo humano y el uso agropecuario por medio de acueductos veredales [8].

IV. AFECTACIÓN SOBRE EL RECURSO SUELO

El suelo es un recurso fundamental para la salud de las personas, especies animales y plantas que lo habitan, así como para las actividades de desarrollo social y económico de las comunidades que se favorecen de este. Aunque, la Constitución Política colombiana de 1991 reconoció el valor del suelo, la escasa introducción de este tema en la agenda pública local resultó en vacíos normativos que dificultan el control público sobre la protección y preservación de este recurso [41].

Los contaminantes producidos por la minería del carbón presentan un alto potencial para ingresar al suelo [42]. En algunas regiones de extracción de carbón se encuentran concentraciones de metales peligrosos y metaloides peligrosos, por ejemplo, As, Mn, Zn, Pb y Ti, en muestras de suelo colectadas en áreas próximas a las minas, generando un riesgo potencial, como se ha documentado, en peces, anfibios y residentes locales [43] y [44].

Otros reportes indican que estos metales son absorbidos por las personas expuestas. Niveles séricos de Cd considerados tóxicos ($>0.5 \mu\text{g/dL}$), han sido identificados en el 85% de los niños que residen en comunidades cercanas a minas de carbón, a consecuencia de la exposición directa o indirecta a suelos y ecosistemas acuáticos contaminados con productos de la minería [45].

En el 2015 una investigación realizada en el departamento de Boyacá evaluó las condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera. El muestreo en suelo se llevó a cabo en los municipios de Paz de Río, Socotá, Socha, Tasco, Samacá, Ramiriquí y Tenza. Los resultados de mercurio en suelo, registraron valores por debajo del nivel mínimo detectable por el equipo para todas las muestras y no establece entre los puntos seleccionados de muestreo [46].

Asimismo, el movimiento brusco de tierras afecta la estructura del suelo creando superficies donde se mezclan horizontes removidos y estériles, lo que cambia la textura y

granulometría e impacta la retención de agua y el crecimiento de las raíces de las plantas [47] y [48]. Los riesgos de degradación física del suelo, son relacionados a la minería subterránea de carbón, debido a la subsidencia del terreno por extracción de fluidos. Los reportes científicos describen fenómenos de subsidencia en minas subterráneas de carbón, que han producido deterioro estructural a construcciones cercanas a las instalaciones mineras [49] y [50].

En el municipio de Samacá el manejo del suelo se ha realizado a través de revegetación, con el fin de recuperar las áreas a afectadas, además de implementar planes de reforestación, compostajes de residuos orgánicos, y gestión con los proveedores de residuos peligrosos para su adecuada disposición. De esta manera se evita que los residuos peligrosos como grasas y aceites entren en contacto con el suelo y se movilicen a través de él contaminándolo y afectando aguas subterráneas [51].

En las escombreras de proyectos mineros existen problemas en los suelos relacionados con la erosión, ya que no cuentan con un diseño de construcción ni posterior restauración, provocando vertidos por caída libre de los estériles [52]. Problemas que se presentan en la minería del carbón con un progreso vegetal lento y escaso [53] y [54]. El impacto visual se relaciona con los proyectos mineros ubicados en zonas de riqueza natural como ecosistemas estratégicos, ocasionando un fuerte contraste con el paisaje circundante [55].

V. AFECTACIÓN EN LA ATMOSFERA

La contaminación atmosférica en la minería se relaciona con humos, polvo y gases nocivos [56]. La movilización de las partículas sólidas desde las escombreras es producida por el efecto del viento y la gravedad, las partículas pueden recorrer grandes trayectos en suspensión en la atmósfera en función de las características del material (granulometría, composición, textura, dureza y humedad), las propiedades de las rocas acompañantes y las condiciones atmosféricas del lugar.

La contaminación en el aire producto del polvo que genera la actividad minera, constituye una causa de enfermedades asociadas con trastornos respiratorios en personas y disminución de la actividad fotosintética en árboles y arbustos [57]. Por otro lado, la combustión del carbón genera gases y vapores tóxicos como el dióxido de azufre propiciando la aparición de lluvia ácida que puede provocar la acidificación de lagos y suelos; de igual manera emisiones de dióxido de carbono y metano contribuyen al efecto invernadero causantes del cambio climático [58] y [59].

La investigación realizada sobre el modelamiento de material particulado emitido por coquización en el municipio de Samacá, concluye que factores como la topografía y la meteorología influyen en la dispersión, así como las condiciones de confluencia del viento favorecidas por las características topográficas del Valle de Samacá y zona de los embalses de Gachaneca I y II (ubicados en el Páramo de Rabanal) implicando eventos de contaminación debido a las

emisiones derivadas de los hornos de coque situados en las veredas la Chorrera y Salamanca del municipio de Samacá que presentan concentraciones de material particulado [60].

VI. AFECTACIONES SOCIALES

Las regiones fijan metas en los ámbitos ambiental y social en busca de dar cumplimiento real a uno de los derechos constitucionales más importantes como el derecho del hombre a un ambiente sano y de calidad que le permita llevar una vida digna [61], pero con la obligación de protegerlo para las generaciones presentes y futuras [62].

La minería se posiciona con la promesa de generación de riquezas y empleo, pero trae consigo apropiación de las tierras de las comunidades locales, impactos en la salud, alteración de las relaciones sociales, destrucción de las formas de sustento y de vida de las comunidades, desintegración social, cambios radicales y abruptos en las culturas regionales, desplazamiento de otras actividades económicas locales actuales y/o futuras [63] y [64].

Uno de los problemas de la comunidad minera es la falta de conocimiento y concientización alrededor de la exposición de la población a metales [65]. Este proceso se liga a la ausencia de monitoreo permanente, inexistencia de prácticas para el manejo de desechos, y ausencia de políticas nacionales bien definidas para el control de estas sustancias [66].

Es necesario que cada entidad relacionada con la actividad minera ejerza con contundencia las competencias y funciones establecidas constitucional y legalmente, a efectos de que dicho control se materialice [67]. La informalidad y la falta de control, exacerbaban los abusos y acrecientan el perjuicio ambiental. La no intervención del Estado en esta materia, se traduce en una completa libertad que del uso pasa al abuso y a la falta de gestión [16].

VII. ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS EN PELIGRO

Uno de los mayores desafíos en los páramos es encontrar soluciones por pérdida de servicios ecosistémicos a causa del crecimiento económico y poblacional y a las falencias de los procesos de planificación territorial [68]. Los páramos se han visto impactados por la explotación minera y por prácticas de agricultura intensiva y la conversión de terrenos para la ganadería [69].

De acuerdo con los reportes de la institucionalidad minera, cerca de 3000 explotaciones en el país son ilegales. No existe información consolidada sobre la ilegalidad en páramo, por lo cual no se tiene un panorama claro sobre el daño ambiental que ha ocurriendo. Se reconoce explotación ilícita de minerales en los páramos de Guerrero, Rabanal y Santurbán, sin embargo, el problema puede estar extendido a todos los páramos colombianos [70].

La actividad minera es una fuente de empleo y riqueza para empresas nacionales e internacionales, pero a la vez constituye una gran amenaza para los ecosistemas estratégicos de un área que cada día gana mayor importancia regional como fuente de agua y vida para las regiones circundantes [71] y [72].

La normativa colombiana consagra que las zonas de páramos, subpáramos, nacimientos de agua y zonas de recarga de acuíferos deben ser objeto de protección especial, y que la biodiversidad por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, debe ser protegida y aprovechada en forma sostenible [73] y [74].

Según la evidencia numérica aquellos páramos con mayor área por fuera del Sistema de Nacionales Naturales Protegidas cuentan con mayor grado de vulnerabilidad ante su explotación económica [75]. Los distritos de páramo con mayor área por fuera de Parques Nacionales Naturales son los que presentan mayores casos de intervención minera [76].

La sala plena de la Corte Constitucional de Colombia presentó la Sentencia C-035/16, donde expone la decisión de prohibición de actividades de exploración y explotación de recursos naturales no renovables en áreas delimitadas como páramo, reconociendo que prevalece el derecho a un ambiente sano sobre el derecho adquirido por una licencia ambiental [77]. Esta sentencia tiene implicaciones desde el punto de vista social, pero ampara el ecosistema de páramo en su totalidad.

En el caso del páramo de Rabanal, con posterioridad al Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales - PMAR [78], la actividad minera de carbón ha tenido un auge y sus efectos en la configuración de los paisajes locales son evidentes. Cambios en los mercados internacionales del carbón han hecho que la extracción y transformación del mineral se multipliquen, que nuevos frentes de exploración y explotación surjan y que exista creciente interés en la asignación/adquisición de títulos mineros.

Lo anterior propone reunir esfuerzos para la formulación e implementación de proyectos de investigación científica, social y económica de capacitación y análisis de política, tendientes a la incorporación de consideraciones de biodiversidad en el sector minero y de la industria del coque, como aporte a la conservación y uso sostenible de la diversidad biológica en el páramo y al desarrollo sostenible del sector [39].

La alteración en las aéreas de subpáramos da origen a la confusión en los límites del ecosistema. En muchas áreas no se puede distinguir claramente el ecotono (zonas de contacto entre comunidades vegetales diferentes) entre un bosque montano y el páramo abierto. A veces por causas naturales, otras por la quema de pastizales para ampliar la frontera agrícola, se transforma esa transición gradual en un límite de bosque abrupto [79].

La identificación del límite inferior de los ecosistemas paramunos y el límite superior de los bosques andinos, no

sigue un modelo general que pueda ser aplicado como regla única a lo largo del país. Las condiciones climáticas, de humedad, exposición a vientos, radiación solar, suelos y geoformas, historia biogeográfica, así como las múltiples trayectorias de uso de los ecosistemas de alta montaña en los diferentes sistemas cordilleranos colombianos, hacen que la tarea de identificación de estos posibles límites requiera una visión multidisciplinaria [80].

Es significativo que se reconozcan y estudien los impactos que los proyectos mineros producen en los ecosistemas de páramo, además de contemplar acciones que prevengan o mitiguen los impactos [81], de esa forma se garantiza la sostenibilidad de los proyectos tanto ambiental como productivamente [82].

VIII. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA UNA SOLUCIÓN ESTRATÉGICA

La restauración ecológica, ha sido definida por la Sociedad Internacional de Restauración Ecológica como el proceso de favorecer el restablecimiento de un ecosistema que ha sido dañado, degradado o destruido [83]. Un ecosistema se ha restablecido, cuando en él existen recursos bióticos y abióticos que le permiten mantenerse sin necesidad de futuras intervenciones, demuestran ser resilientes a los rangos normales de estrés ambiental e interactúan con los ecosistemas contiguos en términos de flujos bióticos y abióticos.

La conservación es necesaria pero no es suficiente, siendo indispensable mejorar, rehabilitar y recuperar aquellos ecosistemas o paisajes degradados por las actividades mineras ya abandonadas [84]. La recuperación ambiental de los predios impactados por la actividad minera, por medio de usos alternativos es una de las acciones que pueden ayudar a la presencia de nuevos escenarios [52].

El proceso de restauración trata de recuperar la biodiversidad, la integridad y salud ecológica, para lo cual, la identificación de los problemas específicos que impiden la regeneración natural del ecosistema es fundamental [85]. Para este fin, es de vital importancia realizar un estudio del lugar de explotación minera, la identificación de especies, estructura y funcionamiento. Se dice que el proceso de transición es lento debido a las significativas transformaciones del área de explotación y la eliminación de la capa vegetal.

Con frecuencia se encuentran situaciones donde la revegetación no es exitosa, sobre todo a largo plazo [86]. En este caso considerar especies nativas o autóctonas es la mejor elección, si el área intervenida es un ecosistema estratégico de importancia natural, las especies nativas representan ventajas ambientales, en cuanto a su integración en el paisaje, mantenimiento y resistencia a plagas y enfermedades por tanto el aislamiento como estrategia de restauración pasiva para evitar intervención antrópica permitirá la regeneración natural del área obteniendo resultados exitosos [87] y [88].

La decisión de conservar y preservar los páramos no puede basarse, exclusivamente, en análisis de costos y beneficios económicos, porque existen impactos ambientales que no se presentan a corto plazo y pueden generar efectos

definitivos en los ecosistemas. La realización de planes de restauración, recuperación y conservación debe incluir el acompañamiento de un diálogo abierto y la participación de todos los actores implicados [89].

Asimismo, los microorganismos intervienen en la remediación y restauración ecológica de áreas afectadas por la minería o acciones antrópicas. Los microorganismos realizan un papel importante en la fitoestabilización por su interacción indirectamente al promover el crecimiento de las plantas o directamente a través de la movilización o inmovilización de metales y metaloides en el suelo [90].

IX. CONSIDERACIONES FINALES

Los problemas asociados a la minería están relacionados a factores como la falta de educación, insuficiente tecnología y escasa asesoría técnica por parte de las entidades del Estado, lo cual genera impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas. Razón por la cual, es necesario adelantar actividades de control y vigilancia.

Las fuentes hídricas en Boyacá son afectadas por el desarrollo de actividades mineras relacionadas con la extracción de carbón, las cuales generan lixiviados y vertimientos con metales pesados y condiciones fisicoquímicas alteradas, que afectan fuentes abastecedoras de agua potable e impiden el reúso del agua para otras actividades productivas.

En Boyacá la actividad minera se ha desarrollado en ecosistemas estratégicos como los páramos debido a la falta de control estatal y medidas efectivas de protección, lo cual genera problemas ambientales que afectan a las comunidades que se benefician de los servicios ecosistémicos; así como a los titulares mineros, quienes amparados por el licenciamiento minero y ambiental otorgado por el Estado han realizado inversiones económicas sin tener en cuenta las implicaciones sociales de esta actividad.

La restauración ecológica representa una alternativa para el control de impactos ambientales generados de la explotación de carbón, la cual contribuye a mejorar las condiciones de paisaje minimizando pasivos ambientales, cuando se desarrolla de acuerdo a las condiciones naturales de la zona intervenida.

AGRADECIMIENTOS

A las ingenieras Dalia Soraya Useche de Vega y María del Pilar Triviño Restrepo del Grupo de Investigación Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología - UPTC.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente, *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana*, 1ª ed., Bogotá D.C., 2012.
- [2] Ministerio de Minas y Energía, *Política Nacional para la Formalización de la Minería en Colombia*, Bogotá D.C., 2014.
- [3] Sentencia T-445 de 2016, Corte Constitucional, Bogotá D.C., 2016.
- [4] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energético y Universidad de Córdoba, *Incendencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación sectorial*, Bogotá D.C., 2015.
- [5] Ministerio de Ambiente, *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana*, Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2002.
- [6] Procuraduría General de la Nación e Instituto de Estudios del Ministerio Público, *Evaluación normativa, social y ambiental de los páramos*, Bogotá D.C., 2018.
- [7] C. Montes, "Los páramos como ecosistemas estratégicos", en *La conservación de la naturaleza su régimen jurídico en Colombia y España*, M. García y A. Embid, eds. Bogotá D.C.: Editorial Universidad Externado de Colombia, 2018, pp. 219-258.
- [8] P. Vergara, "Estrategias implementadas por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia para conservar los páramos", *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 54, n.º 1, pp. 167-176, 2020, DOI: 10.15359/rca.54-1.9
- [9] Unidad Administrativa Especial de Gestión de Tierras Despojadas y Agencia Nacional de Minería, *Cartilla Minera*, Bogotá D.C., 2015.
- [10] Contraloría General de la República, *Minería en Colombia: Institucionalidad y Territorio, Paradojas y Conflictos*, Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2013.
- [11] R. Oyarzun, P. Higuera y J. Lillo, *Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación*, Madrid: Ediciones GEMM, 2011.
- [12] D. Mamurekli, "Environmental impacts of coal mining and coal utilization in the UK", *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 15, n.º 2, pp. 134-144, 2010, [Online]. Disponible: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?DOI=10.1.1.187.1227&rep=rep1&type=pdf>
- [13] M. Mittal, "Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety", *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 26, n.º 6, pp. 1106-1112, 2013, DOI: 10.1016/j.jlp.2013.04.012
- [14] J. d' Angelo y F. Sempere, "Extracción minera y derechos humanos: Impactos adversos y caminos hacia un desarrollo sostenible", *Revista Internacional De Cooperación Y Desarrollo*, vol. 5, n.º 1, pp. 105-123, 2018. [Online]. DOI: 10.21500/23825014.3598
- [15] Ministerio de Minas y Energía, *Censo minero departamental 2010-2011*, Bogotá D.C., 2012.
- [16] M. Pérez y A. Betancur, "Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia", *Sociedad y Ambiente*, vol. 10, pp. 95-112, 2016, DOI: 10.31840/sya.v0i10.1654
- [17] M. Cabrera y J. Fierro, "Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista", en *Minería en Colombia. Derechos, políticas públicas y gobernanza*; L. Garay, M. Cebrera, J. Espitia, J. Fierro, R. Negrete y L. Pardo. Bogotá D.C.: Contraloría General de la República, 2013, pp. 89-124.
- [18] O. Gómez, *La ciudad industrial en la planeación de Sogamoso*, tesis de Maestría, Facultad de Artes, Escuela de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2016.
- [19] J. Avellaneda, "Aproximación a la historia ambiental de la minería en Boyacá", *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha*, vol. 3, n.º 1, pp. 208-224, 2013, [Online]. Disponible: <https://www.las2orillas.co/wp-content/uploads/2013/07/informeMINERIA/luisjorgegaray.pdf#page=82>
- [20] INGEOMINAS, *El carbón colombiano. Recursos, reservas y calidad*, Bogotá D.C.: INGEOMINAS, 2004.
- [21] FEDESARROLLO, *Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Informe para el Sector de Minería a Gran Escala*, Bogotá D.C., 2012.
- [22] G. Rudas, D. Hawkins y Cinep/Programa por la Paz, *La minería de carbón a gran escala en Colombia: impactos económicos, sociales, laborales, ambientales y territoriales*. Bogotá D.C.: Friedrich-Ebert-Stiftung (FES), 2014.

- [23] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, *Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales*, Bogotá D.C., 2018.
- [24] Ministerio de Ambiente, Vivienda Desarrollo Territorial, “Decreto 2820 de 2010”, Bogotá D.C., 2010.
- [25] I. Bohórquez, *Normatividad para empresas de explotación de carbón en Colombia, sus efectos sociales y ambientales*, trabajo de especialización, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., 2014.
- [26] D. Arévalo, J. Sabogal, J. Lozano, G y J. Martínez, *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. Cali: WWF, 2012.
- [27] IDEAM, *Estudio nacional del agua*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: Bogotá D.C., 2010.
- [28] S. Pardo, *Aguas en Boyacá contaminadas por residuos de minas de carbón*, trabajo de grado, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2011.
- [29] A. Paktunc, “Characterization of Mine Wastes for Prediction on Acid Mine Drainage”, en *Environmental Impacts of Mining Activities*; J. Azcue. Berlin: Springer, 1999, pp. 19-40.
- [30] N. Gray, “Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem”, *Environmental Geology*, vol 30 n.º 1-2, pp. 62-71, 1997, DOI: 10.1007/s002540050133
- [31] B. Lottermoser, *Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental impacts*. Berlin: Springer, 2007.
- [32] O. Aduvire, *Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento*, Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, 2006.
- [33] Reclamation Research Group, *Acide Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review*, Alaska: Anchorage, 2008.
- [34] M. Aramburo y Y. Olaya, “Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia”, *Gestión y ambiente*, vol. 15, n.º 3, pp. 125-133, 2012, [Online]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286>
- [35] *Acuerdo específico de colaboración entre el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la Restauración Ambiental de la Región del Bierzo*, Madrid, 2006.
- [36] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Resolución 631 de 2015”, Bogotá D.C., 2015.
- [37] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Decreto 1076 de 2015”, Bogotá D.C., 2019.
- [38] C. Rosas, *Diseño preliminar para la implementación del sistema de gestión ambiental para el departamento de producción de CI Milpa SA.*, trabajo de especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá D.C., 2011.
- [39] D. Flórez, “Desarrollo y articulación de los instrumentos de planificación intersectorial regional y local, para prevenir y mitigar el impacto causado por el desarrollo de actividades mineras u obras de infraestructura vial sobre la biodiversidad en el páramo de Rabanal”, Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D.C., 2008.
- [40] L. Mesa, “Herramientas para la consolidación del desarrollo y articulación de los instrumentos de planificación dirigidos a prevenir y mitigar el impacto causado por el desarrollo de actividades mineras sobre la biodiversidad del Páramo de Rabanal”, Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D.C., 2010.
- [41] O. Bravo y M. Sánchez, *Gestión integral de riesgos*. Bogotá D.C. : ICONTEC, 2012.
- [42] S. Costa y J. Zocche, “Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina”, *Revista Árvore*, vol 33, n.º 4, pp. 665-674, 2009, DOI: 10.1590/S0100-67622009000400009
- [43] M. Bhuiyan, L. Parvez, M. Islam, S. Dampare y S. Suzuki, “Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh”, *Journal of hazardous materials*, vol 173, n.º 1-3, pp. 384-392, 2010, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.085
- [44] M. Guerrero y V. Pineda, “Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgáta Bajo (Tausa). Modelo conceptual”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol 26, n.º 1, pp. 57-74, 2016, DOI: 0.18359/rcin.1664
- [45] G. Yapici, G. Can, A. Kiziler, B. Aydemir, İ. Timur y A. Kaypmaz, “Lead and cadmium exposure in children living around a coal-mining area in Yatağan, Turkey”, *Toxicology and industrial health*, vol 22, n.º 8, pp. 357-362, 2006, DOI: 10.1177/0748233706071740
- [46] C. Agudelo, L. Quiroz, J. García, R. Robledo y C. García, “Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia”, *Revista de Salud Pública*, vol 18, pp. 50-60, 2016, DOI: 10.15446/rsap.v18n1.55384
- [47] J. Arranz, *Propiedades, clasificación y evaluación de suelos mineros. Implicaciones sobre la ordenación y gestión de terrenos alterados por minería*, tesis Ph. D., Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.
- [48] C. Lobo, “Procesos de degradación del suelo”, en *Contaminación de Suelos. Tecnologías para su recuperación*, R. Millán y M Lobo, Madrid: Editorial CIEMAT, 2007, pp. 27-36.
- [49] M. Giraldo y W. Blas, “Minería actual del carbón en el norte del Perú”, *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, vol 10, n.º 20, pp. 76-81, 2007, DOI: 10.15381/iigeo.v10i20.497
- [50] M. Useda y V. Acevedo, “Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgáta Bajo (Tausa). Modelo conceptual”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 26, n.º 1, pp. 57-74, 2016, [Online]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/911/91145342005.pdf>
- [51] Bautista, A, “Técnica en Minería”, en: *Impactos ambientales de la minería de carbón y su relación con los problemas de salud de la población del municipio de Samacá (Boyacá)*, D. Acosta, trabajo de especialización, Universidad Distrital, Bogotá D.C., 2016.
- [52] A. García y L. Riego, “Perspectivas de la restauración en la situación económica actual”, en: *Plan Director para la Restauración Edafopaisajística y Recuperación Ambiental de los espacios degradados por la minería de carbón en la comarca de El Bierzo*; E. Alberruche, F. Cantó y A. García, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: Madrid, 2010.
- [53] M. Mejuto, R. Millán, A. García, T. Schmid y P. Martínez, “Caracterización y estudio de escenarios edafopaisajísticos en zonas afectadas por las actividades mineras en la comarca de El Bierzo”, Departamento de Medio Ambiente, Madrid, CIEMAT, n.º 1142, 2008.
- [54] E. Moreno, *Evaluación económica de los impactos ambientales generados en el proyecto de explotación de carbón mineral en la vereda agua blanca del municipio de Tuta, departamento de Boyacá*, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, Universidad de Manizales, 2017.
- [55] J. Loredo, “Alteración de las características geoquímicas y mineralógicas en la cuenca carbonífera de El Bierzo, derivada de las actividades mineras”, en: *Plan Director para la Restauración Edafopaisajística y Recuperación Ambiental de los espacios degradados por la minería de carbón en la comarca de El Bierzo*; E. Alberruche, F. Cantó y A. García, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: Madrid, 2010.
- [56] D. Evans, P. Piermarini y K. Choe, “The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste”, *Physiological reviews*, vol. 85, n.º 1, pp. 97-177, 2005, DOI: 10.1152/physrev.00050.2003
- [57] Y. Álvarez y M. Castro, “Las enfermedades del desarrollo: la explotación carbonífera a gran escala en Colombia”, *Revista de la Universidad de La Salle*, vol. 70, pp. 173-202, 2016, [Online]. Disponible: <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1494&context=ruls>
- [58] H. Benavides y G. León, “Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático”, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C., 008, 2007.
- [59] M. Suarez y A. Benítez, “Reflexiones sobre la actividad minera y sus consecuencias ambientales en el departamento de Boyacá”, *Revista Nacional de Ingeniería*, vol. 1, n.º 1, pp. 22-35, 2018, [Online]. Disponible: <http://agenf.org/ojs/index.php/RNI/article/view/274/269>
- [60] A. Ramos y D. Benítez, “Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samacá, Boyacá”, *Revista Logos, Ciencia y Tecnología*, vol 8, n.º 2, pp. 159-169, 2017, [Online]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/5177/517754056014.pdf>
- [61] O. Burgos, “Una descripción aproximada de la estructura del derecho al ambiente sano en el ordenamiento jurídico colombiano”, *Academia & Derecho*, vol. 20, pp. 1-30, 2020, [Online]. Disponible: <http://www.unilibrecucuta.edu.co/ojs/index.php/derecho/article/view/44/0/413>
- [62] Organización de Naciones Unidas, *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano*, Estocolmo, 1972.
- [63] Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales, *Minería, Impactos sociales y ambientales*. Montevideo: Rosgal S.A., 2004.

- [64] C. Toro, J. Morales, S. Delgado y T. Avendaño, *Minería, territorio y conflicto en Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional Colombia, 2012.
- [65] L. Muñoz, M. Pérez y A. Betancur, "Despojo, conflictos socioambientales y violación de derechos humanos. Implicaciones de la gran minería en América Latina", *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, vol. 23, n.º 1, pp. 1-10, 2020, DOI: 10.31910/rudca.v23.n1.2020.988
- [66] E. Charles, D. Thomas, D. Dewey, M. Davey, S. Ngallaba y E. Konje, "A cross-sectional survey on knowledge and perceptions of health risks associated with arsenic and mercury contamination from artisanal gold mining in Tanzania", *BMC public health*, vol. 13, n.º 1, pp. 13-74, 2013, DOI: 10.1186/1471-2458-13-74
- [67] Procuraduría General de la Nación; "Minería ilegal en Colombia. Informe preventivo", Bogotá D.C., boletín 883, 2011.
- [68] M. Cabrera y W. Ramírez, *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2014.
- [69] L. Garavito Rincón, "Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo", *Ingeniare*, n.º 19, pp. 127-136, 2015, DOI: 10.18041/1909-2458/ingeniare.19.530
- [70] J. Fierro, Z. Lozano y M. Ordoñez, "Consultoría para realizar la búsqueda, compilación y análisis de información disponible sobre las actividades mineras adelantadas en las zonas de páramo de Colombia", Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D.C., 2011.
- [71] T. Rubio, C. Tapia y M. Urdaneta, "Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo de Rabanal. Convenio interadministrativo", Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, la Corporación Autónoma Regional de Boyacá y la Corporación Autónoma de Chivor, Bogotá D.C., No. 07-06-263-048 (000404), 2008.
- [72] L. Vallejo, "Algunas reflexiones normativas sobre los páramos en Colombia", *Ambiente Jurídico*, vol. 23, pp. 83-98, 2018, [Online]. Disponible: <http://revistasum.umanizales.edu.co/ojs/index.php/Ambientejuridico/article/view/3186>
- [73] Congreso de Colombia, "Ley 99 de 1993", Ley del medio ambiente, Bogotá D.C., 1993.
- [74] A. García y Y. Espear, "Análisis a la protección del Estado a los ecosistemas de páramo", *Justicia*, vol. 24, n.º 35, pp. 166-180, 2019. 10.17081/just.24.35.3400
- [75] M. Morales et al., *Atlas de páramos de Colombia*, Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2007.
- [76] G. Andrade, "¿El fin de la frontera? Reflexiones desde el caso colombiano para una nueva construcción social de la naturaleza protegida", *Revista de estudios sociales*, vol. 32, pp. 48-59, 2009, DOI: 10.7440/res32.2009.03
- [77] Corte Constitucional Colombiana, "Sentencia C-035/16", Normas sobre creación y ampliación de áreas de reservas estratégicas mineras, Bogotá, D. C., 2016.
- [78] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Departamento Nacional de Planeación, *Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia*, Bogotá, D. C., 2004.
- [79] Greenpeace, *Páramos en peligro*, El caso de la minería de carbón en Pisba. Colombia. Bogotá, D. C., 2013.
- [80] J. Cortés y C. Sarmiento, *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana. Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: Bogotá D.C., 2013.
- [81] A. Romero, *Revisión de la afectación de la actividad minera en ecosistemas de páramo a nivel ecológico*, trabajo de especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., 2017.
- [82] C. Sarmiento, A. Osejo, P. Ungar y J. Zapata, "Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia", *Biodiversidad en la Práctica*, vol. 2, n.º 1, pp. 122-145, 2017, [Online]. Disponible: <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/480>
- [83] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Plan Nacional De Restauración Ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*, Bogotá D.C. 2015
- [44] J. Aronson, D. Renison, J. Rangel-Ch, S. Levy-Tacher, C. Ovalle y A. Del Pozo, "Restauración del Capital Natural: sin reservas no hay bienes ni servicios", *Revista Ecosistemas*, vol. 16, n.º 3, pp. 15-24, 2007, DOI: 10.7818/re.2014.16-3.00
- [85] A. Dobson, A. Bradshaw y A. Baker, "Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology", *Science*, vol. 277, n.º 5325, pp. 515-522, 1997, DOI: 10.1126/science.277.5325.515
- [86] C. D'antonio y L. Meyerson, "Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: a synthesis", *Restoration Ecology*, vol. 10, n.º 4, pp. 703-713, 2002, DOI: 10.1046/j.1526-100X.2002.01051.x
- [87] D. Gómez, *Recuperación de espacios degradados*. Madrid: Grupo Mundi-Prensa, 2004.
- [88] J. Vargas, "Restauración ecológica: biodiversidad y conservación", *Acta Biológica Colombiana*, vol. 16, n.º 2, pp. 221-246, 2011, [Online]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280/28009>
- [89] J. Buitrago, "Minería, comercio internacional e impactos ambientales en el páramo El Rabanal de Samacá, Boyacá", *Intropica*, vol. 15, n.º 1, pp. 42-54, 2020, DOI: 10.21676/23897864.3426
- [90] O. Bruneel, N. Mghazli, L. Sbabou M. Héry, C. Casiot y A. Filali, "Role of microorganisms in rehabilitation of mining sites, focus on Sub Saharan African countries", *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 205, 2019, DOI: /10.1016/j.gexplo.2019.06.009



Jairo Rodríguez-Aparicio. Ingeniero Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, especialista en Evaluación Integral de Impactos Ambientales de la Universidad de Caldas. Semillero del Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología (GISABA). Ex-voluntario de la Red Nacional Jóvenes de Ambiente, se desempeña como Voluntario de la Fundación Proeco Green World.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2107-4901>



Ingeniera Ambiental, Especialista en Gestión Ambiental y Magíster en Geografía de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Investigadora Junior de Minciencias con experiencia investigativa nacional e internacional, capacitada para formular, ejecutar y evaluar proyectos e investigaciones en gestión ambiental, geografía, responsabilidad social empresarial, así como la gestión de información de investigaciones, sometimiento y publicación de resultados.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3071-777X>