

Artículo de investigación

Cómo citar: E. Casadiego, W. Gómez; E. Monroy, J. Sánchez “La minería de oro sostenible: implicaciones del uso de los residuos como agregado para hormigón”, Revista Inventum, Vol. 16, No. 31, pp. 71-77. Julio - diciembre. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.71-77

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520 (Impreso)
eISSN: 2590-8219 (En línea)

Fecha de recibido: 30 de mayo de 2021
Fecha de aprobado: 20 de junio de 2021
Fecha de publicación: 15 de julio de 2021

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

La minería de oro sostenible: implicaciones del uso de los residuos como agregado para hormigón¹

Sustainable gold mining: implications of the use of waste as an aggregate for concrete

Mineração de ouro sustentável: implicações do uso de resíduos como agregado para concreto

Resumen

Es necesario extraer una gran cantidad de roca para obtener una cantidad mínima de oro, debido a que el oro se encuentra diseminado en parte por miles en el yacimiento. Debido al triturado del material, el proceso de extracción genera cantidades significativas de productos de desechos sólidos, cuyo tamaño varía desde bloque hasta la granulometría arenosa y fina. La mayoría de los residuos terminan como depósitos en la superficie o en taludes que generan peligro de deslizamientos o daños en el suelo, otra gran parte del material del suelo termina siendo vertido en ríos y arroyos, con lo cual aumenta la tasa de sedimentación y la deposición de metales pesados. Las áreas que se dedican a la explotación de oro en Colombia se encuentran sobre la cordillera de los Andes, cerca de nacimientos de agua y, como consecuencia de ello numerosas fuentes de agua se ven afectadas. Además, en algunos casos, las minas se encuentran cerca a los páramos, como el de Santurbán, una importante fuente de agua en el norte de Colombia. Las minas generan entre 5 y 8 toneladas diarias de residuo, lo que hace inmanejable la ubicación del material por su alto.

En este estudio, por medio de la petrografía y la difracción de rayos X se encontró un contenido importante de sílice proveniente de cuarzo, plagioclasas y micas. El contenido moderado a alto de cuarzo y la selección granulométrica influyen en los buenos resultados de la resistencia a la compresión para utilizar el agregado como base o subbase o para concreto.

Palabras clave: residuos, hormigón agregado, sostenibilidad, minería, oro.

Efraín Casadiego-Quintero

Fundación Universitaria Agraria de Colombia,
Bogotá, Colombia, casadiego.efrain@uniagraria.
edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-2546-8975>

Wilmar Gómez-Ríos

Fundación Universitaria Agraria de Colombia,
Bogotá, Colombia, gomez.wilmar@uniagraria.
edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-5384-5857>

Edgar R. Monroy

Fundación Universitaria Agraria de Colombia,
Bogotá, Colombia, monroy.edgar@uniagraria.
edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-9433-4631>

Jeniffer L. Sanchez-Londoño

Fundación Universitaria Agraria de Colombia,
Bogotá, Colombia, sánchez.jeniffer@uniagraria.
edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-2556-2953>



¹ Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. Grupo de Investigación de Ingeniería Civil y Fenómenos Ambientales (GIICFA), semilleros de Investigación de Ingeniería Civil y Fenómenos Ambientales (SEMIICFA), Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Abstract

It is necessary to extract a large amount of rock to obtain a minimum amount of gold, because the gold is scattered in part by the thousands in the deposit. The extraction process significantly generates solid waste product due to the crushing of the material, which generates waste from block size to sandy and fine granulometry. Most of the waste ends up as deposits on the surface or on slopes that generate the danger of landslides or damage to the soil, another large part of the soil material ends up being dumped into rivers and streams, which increases the rate of sedimentation and the deposition of heavy metals. The areas that are dedicated to the exploitation of gold in Colombia are located on the Andes Mountains, near water sources, which generates that a significant amount of water sources is affected, in addition, the mines are in some cases close to páramos such as the Santurban páramo, an important source of water in northern Colombia. The mines generate between 5 and 8 tons of waste per day, which makes the location of the material unmanageable.

In this studio, by means of petrography and X-ray diffraction, an important content of silica from quartz, plagioclase and micas was found. Moderate to high quartz content and grain size selection influence good compressive strength results for using the aggregate as a base or sub-base or for concrete.

Keywords: waste, aggregate concrete, sustainability, mining, gold.

Resumo

É necessário extrair uma grande quantidade de rocha para obter uma quantidade mínima de ouro, por quê o ouro está espalhado em papel aos milhares no armazém. O processo de extração gera resíduos sólidos de forma significativa devido ao esmagamento do material, que gera resíduos desde o tamanho do bloco até a granulometria arenosa e fina. A maior parte dos resíduos acaba como depósitos na superfície ou em encostas que geram perigo de deslizamentos ou danos ao solo, outra grande parte do material do solo acaba sendo despejado em rios e córregos, o que aumenta o índice de sedimentação e a deposição de metais pesados. As áreas que se dedicam à exploração de ouro na Colômbia estão localizadas na Cordilheira dos Andes, perto de fontes de água, o que faz com que uma quantidade significativa de fontes de água seja afetada, além disso, as minas estão em alguns casos perto de páramos como o Santurban páramo, uma importante fonte de água no norte da Colômbia. As minas geram entre 5 e 8 toneladas de resíduos por dia, o que torna impossível a localização do material.

Neste estúdio, por meio de petrografia e difração de raios-X, foi encontrado um importante conteúdo de sílica de quartzo, plagioclásio e micas.

Palavras-chave: Resíduos, concreto agregado, sustentabilidade, mineração, ouro.

I. INTRODUCCIÓN

A causa del cambio climático, ha surgido la necesidad de mejorar en la forma como se explotan los recursos naturales. Esto trae consigo el desafío sin precedentes de estimular el crecimiento económico manteniendo su sostenibilidad, lo que conduce directamente a una transformación hacia tecnologías que favorezcan la eficiencia energética y recursos apoyados en un enfoque de economía circular, enfoque que es posible aplicar en las explotaciones mineras [1]. La explotación de los recursos minerales continúa siendo importante para la economía de cualquier país, ya que desempeña un papel importante en el suministro de materias primas básicas en diferentes sectores de aplicación. Los minerales metálicos como el oro, la plata y el níquel siguen siendo importantes, pues a pesar de haber experimentado un leve descenso en su producción y una caída de la demanda, todavía son utilizados como inversiones importantes en momentos de crisis económica, especialmente el oro [2].

La extracción del oro genera toneladas de residuos mineros que se depositan en la superficie, y gran cantidad de escombros son depositados sobre suelos naturales [3]. Los procesamientos de la explotación minera se consideran comúnmente como una de las fuentes clave de contaminación del suelo [4], [5], [6]. El daño ambiental puede llegar a ser irreparable si en el proceso de explotación se utilizan químicos como el cianuro y el mercurio, dejando zonas áridas y, como sucede en Colombia, extensas zonas de deforestación [7], [8].

II. METODOLOGÍA Y MATERIALES

A. Toma de muestras y difracción de rayos X

En el presente estudio, la difracción de rayos X se realizó comparando el perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 (2014) del Centro Internacional de Difracción (ICDD), ya que con estos perfiles se obtienen datos cualitativos de la muestra más fina. Para el análisis cuantitativo de las fases cristalinas, se ajustó el perfil observado y los perfiles de difracción reportados en la base de datos, utilizando para ello el método de Rietveld. Los porcentajes reportados corresponden a la relación entre las fases policristalinas cuantificadas sin considerar el porcentaje de material amorfo. Este análisis mineralógico se realizó mediante patrones de difracción de rayos X en polvo (XRPD).

En la mina de oro se producen residuos estériles de diversas granulometrías, debido al proceso de extracción del mineral. El material grueso obtenido del interior de la mina está formado por bloques angulares de gneis

mayores de 200 mm [10], [11], con bordes irregulares. El residuo estéril grueso se separa del material mineral por medio de una malla de 20 × 20 cm hecha con varillas de un cuarto de pulgada de diámetro. Este material mineral suele estar constituido por minerales de baja resistencia mecánica o dureza, friables, los cuales se fracturan en guijarros angulares menores de 150 mm. Posteriormente, se pasa por una estera especial para recolectar los finos, que serán lavados en un tanque de agua, y el oro se selecciona mediante la sartén. Luego, el material que no permanece en la estera es llevado a mesas vibratorias, donde se separa la arena fina-gruesa del limo y la arcilla. Estos dos últimos tamaños se llevan a una planta de sedimentación, donde se realiza un tratamiento final para separar parte del limo y la arcilla, y aquello que no se puede separar se vierte en la quebrada Jaimes.

B. Caracterización del agregado

Los residuos mineros que se caracterizaron para estudiar su uso como agregado provienen de una mina de oro en el municipio de Vetas, en el departamento de Santander. Se tomaron 3 muestras al suroeste del área urbana, en el kilómetro 4 de la vía que conecta Vetas con California (coordenadas X: 1132426, Y: 1300934), en la mina La Elsy, a 3280 m s. n. m. (figura 1), al norte de la falla de Suratá, en el macizo de Santander, al sur de Berlín. Las muestras se recolectaron en la quebrada Jaimes, que se encuentra en el lado derecho de la mina, aguas abajo y dentro de la mina. Este arroyo conecta con la quebrada La Plata y la quebrada Salado, que desemboca en el río Vetas. Las muestras de ambos lugares fueron recolectadas de rocas cristalinas, descritas como gneis de Bucaramanga, intrusiones plutónicas e hidrotermales [9], [10].

La norma busca que el agregado cumpla con las características de resistencia, desgaste, selección de material, contenido de materia orgánica, sulfatos, entre otros.

C. Norma de pruebas

Para establecer si los residuos estériles cumplen con las características adecuadas para su utilización como agregado de hormigón se tuvo en cuenta la Norma INVIAS 2012; específicamente los siguientes parámetros:

- I.N.V. E. 122: Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, rocas y mezclas de suelo - agregado.
- I.N.V. E. 213: Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos)
- I.N.V. E 217: Densidad aparente (peso unitario) y porcentaje de huecos en agregados en estado suelto y compactado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las rocas que afloran en el área de estudio corresponden a rocas ígneas que presentan una geometría tabular y un espesor de composición variable discontinua desde gneis hasta granodioritas; además de variaciones compositivas, hay cambios en la microestructura de las rocas. Dentro de la mina se observan lentes y parches pelíticos de 20 a 40 cm de espesor (figura 1), que son explotados por su contenido de sulfatos y otros minerales, incluido el oro. Los afloramientos presentan bloques pequeños a medianos (3 a 8 juntas/m³), formados principalmente por dos familias de juntas continuas con superficies lisas a levemente rugosas en la dirección del plano de discontinuidad NW-SE (30° a 50° claro). La familia 1 presenta una pendiente de 10 a 20 y en la familia 2 se observan pendientes entre 70 y 80. El 80 % son abiertas, el 5 % son cerradas y el 15 % están rellenas de cuarzo. Estas últimas, en su mayoría, son parte de la familia 2.

La roca presenta un bajo grado de meteorización, y se describe como roca sana a algo erosionada. La resistencia de la matriz de la roca se describe como dura a extremadamente dura, con una resistencia a la compresión simple del esclerómetro de 230-270 MPa [12],[13].

El paisaje presenta una geomorfología de pendientes pronunciadas, con suelos residuales que han generado deslizamientos de tierra, especialmente en las áreas de depósito de residuos. En el exterior y el interior de la mina (figura 1) se observan materiales formados por bloques de roca de 30 a 40 cm, compuestos por gneis de Bucaramanga, que es una roca maciza, tenaz, compacta y con bandas [14], [15].



Figura 1. Socavón de extracción de roca Gneis para su posterior trituración, en las paredes se observan tres familias de diaclasa.
Fuente: Elaboración propia.

A. Petrografía y Análisis Mineralógico

Se estudiaron varias muestras de las tres litologías principales del área de estudio, previamente seleccionadas en la descripción macroscópica, para análisis químico y composicional. Mediante microscopía óptica, se identificaron los siguientes minerales: cuarzo, plagioclasa-Na, feldespato K, biotitas, anfíboles (hornblenda con doble exfoliación), pirita y otros óxidos de hierro [16] (figura 2). Los gneis ricos en anfíboles y anfibolitas presentan textura granonematoblástica [17], con estructura gneisosa, con una variación en el tamaño de los cristales de 0,2 - 0,6 mm, hornblenda y biotitas presentan cloritización.



Figura 2. Muestra de roca intrusiva blanda con contenido de caolinita en su mayoría (fotografía de la izquierda); Acercamiento de muestra intrusiva donde se observan cristales caolinita (blanco rosado) y de pirita (blanco brillante) euhedrales (fotografía derecha inferior combinación de bandas de color).

Fuente: Elaboración propia.

Cerca del 60 % de los residuos encontrados corresponden a granodioritas presentan una textura holocristalina de manera desigual dominante (60-70 %), formada por cristales de cuarzo, plagioclasa con macla polisintética generada por la alternancia Na/Ca, con ligeras variaciones hipocristalinas (10-20 %). En los nicoles paralelos se pueden observar cristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Las muestras presentan microfisuras con recristalización y oxidación, generadas por fases secundarias de mineralización [18], [19]. La plagioclasa muestra alteración de los bordes de sericitización, y las biotitas presentan cloritización (figura 3).

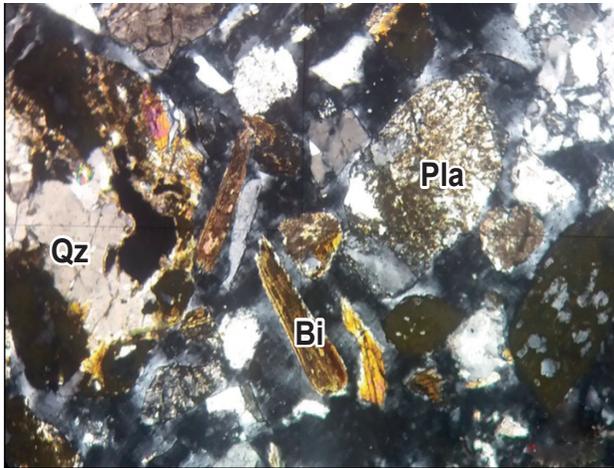


Figura 3. Gneis ricos en anfíboles, se observa cuarzo (Qz), biotita (Bi) con cloritización y plagioclasa (Pla) con sericitización.

Fuente: Elaboración propia.

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) permitió verificar la textura de las fases minerales (figura 4), definir la composición mineral y elementos químicos del relleno filoniano y del hormigón elaborado con los residuos estériles. Las imágenes por SEM de la veta muestran cristales euédricos y milimétricos de pirita, plagioclasa-Ca y cuarzo, rodeados de arcilla calcárea, producto de alteración hidrotermal. La imagen por retrodispersión de electrones (BSED, por sus siglas en inglés) y el análisis de espectro (semi)cuantitativo mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) muestran el contenido de carbono (C = 10 % en peso), oxígeno (O = 15 % en peso), (S = 32 % en peso) y (Fe = 41 % en peso) en minerales de sulfato.

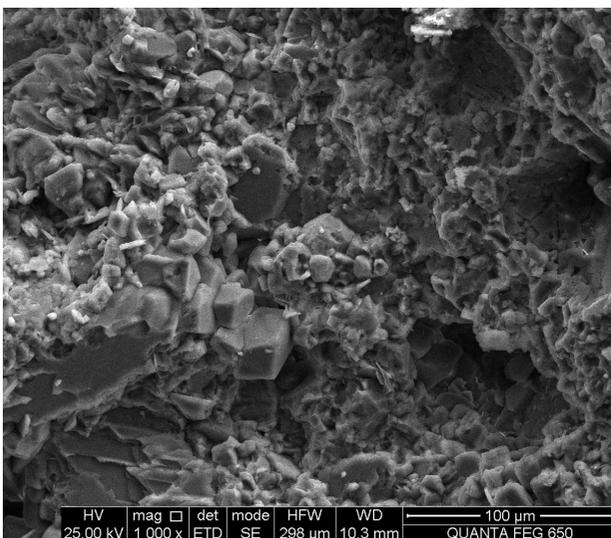


Figura 4. Imagen de SEM de intrusivo rico en calcita microcristalina y caolinita, y menos del 5 % de cristales de pirita.

Fuente: Elaboración propia.

El residuo estéril de tamaño de arena medio a grueso se probó para difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) y se obtuvo que los componentes principales son cuarzo (Qz), moscovita (Mu) y ortoclasa (Or). Estos resultados se muestran en la figura 5.

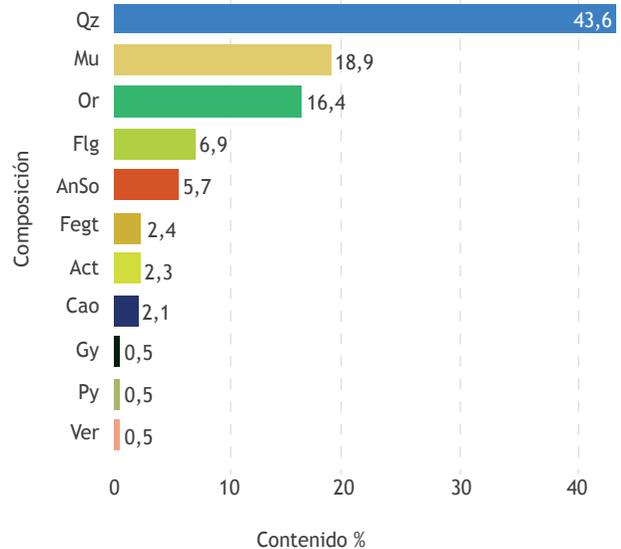


Figura 5. La difracción de rayos X muestra que el 43,6 % de la muestra corresponde a cuarzo; 18,9 a moscovita y 16,4 a ortoclasa. Estos minerales tienen una dureza mayor de 5, según la escala de Mohs.

Fuente: Elaboración propia.

Se compararon los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de cilindros de hormigón (figura 6). La resistencia a los 28 días se considera como la máxima tolerancia a la compresión que puede soportar un elemento de hormigón, aunque el hormigón sigue aumentando su resistencia a la compresión con el tiempo de fraguado, dependiendo de la evolución mineralógica del cemento portland de tipo I en el proceso de hidratación, que puede revelar la transformación de las fases minerales anhidras del cemento en fases hidratadas estables [21].

A partir de la prueba de resistencia a la compresión, se observó que a los 28 días se alcanzaba casi el 100 % de la resistencia a la compresión. El agregado utilizado de los desechos de la mina de oro estéril (MM) siguió el mismo patrón que las otras tres muestras, superando los 3000 PSI (21 MPa) de carga a los 28 días y su resistencia aumentó sin estabilizarse. La muestra C1 fue la que presentó la menor resistencia a la compresión a los 28 días. Según las pruebas de resistencia a la compresión realizadas, este hormigón se clasifica como de resistencia normal, que cumple con la norma NSR-10, título C. (C.19.3.1), la resistencia a la compresión calculada para el día 28 superó los 21 MPa, obteniendo así un concreto estructural [20], [21].

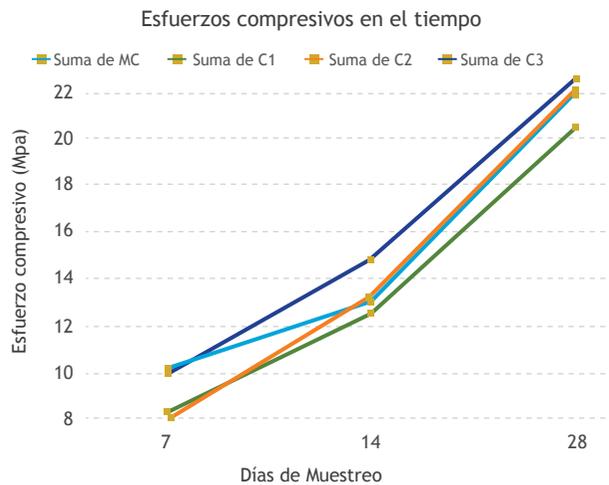


Figura 6. Resultados de la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo de cilindros de hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de la reutilización de residuos de minería de oro estériles de Vetas (Santander) como agregado para hormigón, se ha realizado utilizando arenas finas a medias con alto contenido de sílice. Los resultados obtenidos muestran que el aprovechamiento de los residuos es posible porque cumple con la Norma INVIAS 2012. Su uso podría generar ganancias económicas, desarrollo rural porque en muchos casos no existen canteras cercanas que generen material de buena calidad para concreto o caminos; además ofrece la posibilidad de reducir el vertido de estos desechos en ríos y arroyos y, por ende, de evitar la sedimentación y el aumento del contenido de metales en el agua.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se analizaron las texturas de las muestras para establecer la relación del tamaño, forma y disposición de los minerales. Las pruebas de esclerómetro describen los bloques de gneis por su resistencia a la compresión simple de 180 Mpa. Realizado el análisis composicional de los residuos estériles y sus agregados, con base en el estudio mineralógico y petrográfico, se establece que estos agregados cumplen con las características de resistencia y las especificaciones geotécnicas para el diseño de pavimentos de hormigón hidráulico y bases de hormigón hidráulico.

Respecto al material proveniente del filón, no se recomienda su uso como agregado para base o subbase, porque son rocas blandas con contenido alto de arcilla y con trazas de pirita. Este material, por tener menos dureza, es triturado y molido con mayor facilidad, y es posteriormente lavado por el sistema hidráulico de selección granulométrica y separado de los granos más pesados de arena cuarzosa.

La reutilización de residuos estériles, producto de la minería, se presenta como una alternativa a los materiales de construcción que se pueden utilizar en el desarrollo rural. Esta investigación se realizó en la mina de oro del municipio de Vetas (Santander), en la cual se producen residuos de diversas granulometrías; sin embargo, el material que no es posible separar se vierte sobre la quebrada Jaimes, provocando escasez del recurso y contaminación del agua

Se recomienda estudiar el sistema hidráulico para seleccionar el material arcillo-limoso de las arenas, con el fin de mejorar la separación y disminuir la cantidad de material fino que se vierte en la quebrada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Fundación Universitaria Agraria de Colombia y la Universidad Industrial de Santander, instituciones que aportaron conocimientos y experiencias que ayudaron a realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] K. Jagodzińska, I. Nuran-Zaini, R. Svanberg, W. Yang y Göran P. Jönsson, "Pyrolysis of excavated waste from landfill mining: Characterisation of the process products", *J Clean Prod*, vol. 279, p. 123541, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123541
- [2] F. M. Kusin et al., "Geo-ecological evaluation of mineral, major and trace elemental composition in waste rocks, soils and sediments of a gold mining area and potential associated risks CATENA", vol. 183, p. 104229, dic. 2019, doi: 10.1016/j.catena.2019.104229
- [3] P. S. Bragina y M. I. Gerasimova, "Pedogenic processes on mining dumps (a case study of southern Kemerovo oblast). *Geogr. Nat. Resour.*, vol. 35, n.º 1, pp. 35-40 ene. 2014, doi: 10.1134/S1875372814010053.
- [4] V. K. Mishra, A. R. Upadhyaya, S. K. Pandey y B. D. Tripathi, "Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes". *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n.º 5, pp. 930-936, mar. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.03.010

- [5] V. Y. Khoroshavin y T. I. Moiseenko, "Petroleum hydrocarbon runoff in rivers flowing from oil-and-gas-producing regions in Northwestern Siberia", *Water Res.*, vol. 41, n.º 5. pp. 532-542, sep. 2014, doi: 10.1134/S0097807814050030.
- [6] I. I. Beloglazov, V. Y. Bazhin, y O. V. Zyryanova, "Upgrading of the process of technological pulp separation in modern pressure filters", *Non-ferr. Met.*, vol. 1, pp. 38-40. may. 2015, doi: 10.17580/nfm.2016.01.07.
- [7] M. A. Adabaniya y M. A. Oladunjoye, "Geoenvironmental assessment of abandoned mines and quarries in South-western Nigeria", *J. Geochem. Explor.*, vol. 145. pp. 148-168, oct. 2014, doi: 10.1016/j.gexplo.2014.06.003.
- [8] D. Kossoff, W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin, y K. A. Hudson-Edwards, "Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation". *Appl. Geochem.*, vol. 51. pp. 229-245, dic. 2014, doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
- [9] R. W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas, B. Bonin, y P. Bateman, Eds., *Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, 2.ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. doi: 10.1017/CBO9780511535581.
- [10] E. Casadiego-Quintero, A. G. Gutiérrez-Bayona, M. Á. Herrera-López y M. L. Páez-Rojas, "Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia". *Rev. Inv. Agr. Ambient.*, vol. 8, n.º 2, pp. 107-118, jul.-dic. 2017, doi: 10.22490/21456453.2035
- [11] M. E. Tucker, . *Sedimentary Rocks in the Field: A Practical Guide*, John Wiley & Sons, 2011.
- [12] S. Mindess, 6-Resistance of Concrete to Destructive Agencies, en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. P. C. Hewlett y M. Liska, Eds. Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 251-283 doi: 10.1016/B978-0-08-100773-0.00006-X.
- [13] T. Schmidt, A. Leemann, E. Gallucci, y K. Scrivener "Physical and microstructural aspects of iron sulfide degradation in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n.º 3, pp. 263-269, mar. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.011.
- [14] C. A. García Ramírez y E. Uribe Portilla, "Caracterización geológica y mineralógica del yacimiento la toska (Vetas, Santander, Colombia): implicaciones para el procesamiento mineral de las menas auroargentíferas". *Bol. Geol.*, vol. 28, n.º 2, pp. 63-76, jul.-dic. 2006.
- [15] E. Casadiego-Quintero y M. Flórez, "Desarrollo rural, educación y posconflicto por medio del aprendizaje basado en proyectos", en *Reflexiones Pedagógicas y didácticas a partir de la enseñanza de la ingeniería*, C. E. Obando Gamboa, Monroy Vargas, E. Casadiego Quintero, H. Bustos Castañeda, J. Salamanca López, M. Flórez Gutiérrez y S. Charry Ocampo, Eds., pp. 64-79. Bogota, Colombia: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- [16] N. Har, A. Lăzărean, M. Iliescu, N. Ciont y I. F. Abrudan, "Degradation processes of iron-sulfides and calcite containing aggregates from asphaltic mixtures", *Constr. Build. Mater.*, vol. 212. pp. 745-754, jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.018
- [17] W. S. Mackenzie, C. Guilford y B. W. Yardley, *Atlas de rocas metamórficas y sus texturas*. Madrid, España: Masson. pp. 59-81.
- [18] C. A. Zuluaga, S. Amaya, C. Urueña y M. Bernet, "Migmatization and low-pressure overprinting metamorphism as record of two pre-Cretaceous tectonic episodes in the Santander Massif of the Andean basement in northern Colombia (NW South America)", *Lithos*, vols. 274-275, mar. 2017, pp. 123-146. doi: 10.1016/j.lithos.2016.12.036
- [19] C. G. Ramos et al. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. *J. Clean. Prod.* vol. 142. pp. 2700-2706, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.006
- [20] J. Li, Z. Chen, B. Shen, Z. Xu, y Y. Zhang, "The extraction of valuable metals and phase transformation and formation mechanism in roasting-water leaching process of laterite with ammonium sulfate", *J. Clean Prod.*, vol. 140, pp. 1148-1155, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.050
- [21] A. González Ruiz, E. A. Villa Plazas, C. A. Ríos Reyes, Assessment of Amphibolite and Pegmatite Aggregates for the Manufacture of Concrete. *Rev. Colomb. Mater.*, n.º 14, pp. 17-39.