

# Decision-making methodology for a groundwater drainage system using the simplified Analytical Hierarchical Process (AHP) in surface mining

Fabrizio Bolaños-Contreras, BSc<sup>1</sup>, Yaneth Vasquez-Olivera, MSc<sup>1</sup>, Carlos Raymundo, PhD<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u20146235@upc.edu.pe, pcgmyvas@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

*Abstract– The objective of this research is to propose the use of a methodology in long-term operational planning, so that it can be applied in the selection of a short-term drainage system through the Hierarchical Analytical Process (AHP). Currently, model information crosses are used to determine the volume or flow that will enter the pit. This methodology focuses on the selection of technical, economic and safety and environmental parameters so that the result is viable for all the dimensions that a mine encompasses. The research was carried out with the help of an expert in drainage systems and hydrogeology from a mine in the north of the country, who in turn was part of the research, since subjective evaluations are used for the development of matrices that will give priorities to the criteria and sub criteria proposed and accepted by it. These matrices will be related between each parameter, sub parameter and alternative, so that the priority vectors can be found. Some thirteen matrices were built based on the Saaty scale, which serves to transform subjective into objective assessments. It was possible to perform a basic matrix calculation in Excel with the SUMPRODUCT formula and a positive result was obtained, considering the drainage system currently used in the selected mine. An additional sub-criterion was added within the technical criteria so that the result is the most consistent with reality and the rugged geography of our Peru. It was possible to conclude with the application of the Hierarchical Analytical Process that the best drainage system to be used was that of pumping wells within the pit together with pumping stations and precisely the one that the mine currently uses. This indicates that the application of this methodology is reliable, viable and capable of deciding.*

*Keywords– Selection method, Drainage systems, Hierarchical Analytical Process, Groundwater, Surface mining.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.585>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# Metodología de toma de decisión de un sistema de drenaje de aguas subterráneas utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) simplificado en minería superficial

Fabrizio Bolaños-Contreras, BSc<sup>1</sup>, Yaneth Vasquez-Olivera, MSc<sup>1</sup>, Carlos Raymundo, PhD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u20146235@upc.edu.pe, pcgmyvas@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

*Abstract– El objetivo de esta investigación es la de proponer el uso de una metodología en la planificación operacional a largo plazo, para que pueda ser aplicada en la selección de un sistema de drenaje a corto plazo a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Actualmente, se utilizan cruces de información de modelos para poder determinar el volumen o caudal que entrará al tajo. Esta metodología se enfoca en la selección de parámetros técnicos, económicos y de seguridad y ambiente para que el resultado sea viable por todas las dimensiones que abarca una mina. La investigación se realizó con la ayuda de un experto en sistemas de drenaje e hidrogeólogo de una mina al norte del país, quien a su vez fue parte de la investigación, ya que se utilizan valoraciones subjetivas para el desarrollo de matrices que otorgarán prioridades a los criterios y sub criterios propuestos y aceptados por este. Estas matrices serán relacionadas entre cada parámetro, sub parámetro y alternativa, de manera que se puedan encontrar los vectores de prioridades. Se construyeron unas trece matrices en base a la escala de Saaty, la cual sirve para transformar valoraciones subjetivas en objetivas. Se pudo realizar un cálculo básico de matrices en Excel con la fórmula de SUMAPRODUCTO y se obtuvo un resultado positivo, considerando el sistema de drenaje que actualmente se utiliza en la mina seleccionada. Se le añadió un sub criterio adicional dentro de los criterios técnicos para que el resultado sea el más acorde a la realidad y a la geografía accidentada de nuestro Perú. Se pudo concluir con la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico que el mejor sistema de drenaje a ser utilizado era el de pozos de bombeo dentro del pit junto con estaciones de bombeo y justamente el que la mina utiliza actualmente. Esto nos indica que la aplicación de esta metodología es confiable, viable y capaz de decidir.*

*Keywords-- Método de selección, Sistemas de drenaje, Proceso Analítico Jerárquico, Aguas subterráneas, Minería superficial.*

## I. INTRODUCCIÓN

El sistema de drenaje de una mina superficial puede representar hasta un 5% del total de la energía usada para las operaciones [1]. El sistema de drenaje puede recuperar dos tipos de aguas, aguas de escorrentía o superficiales, que provienen de las precipitaciones, o también lluvias, y aguas subterráneas, que son las aguas que provienen de acuíferos cercanos al yacimiento y además, suelen estar lavadas con minerales, lo que las vuelve aguas ácidas. Todas estas aguas deben ser drenadas para mantener el nivel freático debajo del fondo de las operaciones.

El sistema de drenaje de aguas subterráneas tiene una gran importancia al momento de que el proyecto minero se

encuentre en la etapa de explotación, porque mantiene las condiciones casi secas para la perforación y voladura, la seguridad, en la despresurización de los taludes y a su vez la estabilidad de estos, y evita que las operaciones se paralicen por inundaciones. La implementación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es considerada una de las mejores técnicas para la toma de decisiones respecto a temas logísticos a largo plazo. Sin embargo, la implementación de esta técnica permitirá ayudar en un corto plazo a decidir u optar por un sistema de drenaje de aguas subterráneas sin la necesidad de arriesgarse a solo un cruce de información, causando así muchos inconvenientes al momento de ejecutar el sistema de drenaje.

Esta investigación propone utilizar una metodología que normalmente se usa en planificación operacional en minería para que sea utilizada en elección de sistemas de drenaje, un tema que no tiene hasta ahora una metodología adecuada para su selección. Se requerirá de un experto en el tema de sistemas de drenaje en minería superficial, ya que será él quien nos brinde, con la información geológica, hidrológica e hidrogeológica, el tipo de relación que existe entre cada parámetro, sub parámetro y alternativa de drenaje. Normalizando todas las matrices utilizadas encontraremos un vector de prioridades, la cual se unirá a la matriz final de alternativas y usando un cálculo de suma producto podremos obtener la preferencia en % de cada alternativa.

El presente artículo, inicialmente, consiste en investigaciones sobre los sistemas de drenaje que existen y serán tomados en cuenta para la metodología propuesta en minería superficial; la identificación de estos se dividirán en dos tipos de drenaje, fuera del tajo e interior al tajo. También, se realiza la investigación sobre la metodología del Proceso Analítico Jerárquico simplificado para ser aplicado a sistemas de drenaje. Así como la aplicación de la técnica en un escenario donde se demuestra la funcionalidad de esta.

## II. ESTADO DEL ARTE

### A. Metodologías de toma de decisión en minería superficial

En la minería superficial, se utilizan múltiples metodologías para la toma de decisión en distintos ámbitos, ya sea logístico u operacional. La minería de datos es, sin duda, una de las mejores opciones que se tiene para la toma de

decisión, ya que su manejo, tratamiento y utilización se realiza en tiempo real [11]. El AHP en el campo logístico tiene como función seleccionar proveedores en distintos campos, ya sea en repuestos, explosivos, productos químicos, alimentos y medicina en un campamento minero. Incluso, puede llegar a seleccionar de entre varias alternativas si es que se logra identificar correctamente qué parámetros y sub parámetros son los que se requieren para que se puedan relacionar entre sí [12] [13]. Así como se permite seleccionar proveedores, el campo de aplicación del AHP es muy amplio. Además, esta metodología permite seleccionar la localización del desarrollo de un proyecto, así como la técnica Brown y Gibson. Esta metodología utiliza, para el campo de selección de proyectos, una cantidad grande de parámetros y sub parámetros, ya que existen numerosos factores por las que un proyecto minero puede ser viable o no [14]. Entonces, es necesario analizar todos estos factores y correlacionarlos al punto de que inclusive se pueda realizar cálculos de rentabilidad de proyectos de exploración minera, ya que es la etapa más riesgosa de un proyecto minero debido a sus inversiones extremadamente millonarias [15].

#### *B. Metodología de toma de decisión de sistemas de drenaje en minería superficial*

Las operaciones mineras a cielo abierto han utilizado muchos sistemas de drenaje para que el área de trabajo no se vea inundado con agua proveniente de manantiales o acuíferos circundantes a la mina. Sin embargo, muchas veces este sistema de drenaje se ha visto comprometido por deficientes estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos y surgen la interrogante sobre el cómo decidir por un sistema de drenaje que sea eficiente para las condiciones hidrogeológicas que se tiene en el yacimiento y esto dependerá mucho de los variables que se analicen para seleccionar el mejor sistema de drenaje [2] [3]. Además, mientras los años van pasando, la mina va profundizando aún más y los sistemas de drenaje deben poder ser capaces de extraer más caudal, lo que aumentan los costos de operación de estos [4] [5]. Los métodos de sistema de drenaje suelen poseer características que incluyan factores como el nivel de la capa freática, dependiendo de esto se dividen en dos grupos: las minas que trabajen por encima del nivel freático y las que trabajan por debajo. Cuando se trabaja por debajo se tienen dos sub grupos, cuando las condiciones del macizo rocoso son favorables y desfavorables. La selección del método de drenaje se realizará con el cruce de información de los modelos geológicos e hidrogeológicos [3]. Para lograr una decisión efectiva y determinante tiene que haber existido una investigación previa de la hidrogeología del yacimiento. Una mina superficial no puede permitirse utilizar métodos tan sencillos como el cruce de información, ya que a la larga el caudal que ingresa será mucho mayor [6].

#### *C. Metodología de toma de decisión de sistemas de drenaje utilizando el AHP*

Se ha utilizado el Proceso Analítico Jerárquico para la planificación operacional de minas. Esto quiere decir que para poder seleccionar un método de explotación minera se ha tenido que utilizar una metodología que englobe los parámetros más influyentes como los técnicos, económicos y de seguridad y medio ambiente. Esta metodología establece prioridades sobre las alternativas y sus sub parámetros de decisión [9] [10].

Las metodologías de tomas de decisión buscan la manera de reducir el tiempo de la planificación minera y lo hacen de manera eficiente a través de los criterios que se utilizan para este fin y el éxito de para el término de un proyecto minero es la selección de un eficiente sistema de drenaje. Se han utilizado variantes del Proceso Analítico Jerárquico, que incluyen el proceso difuso a este, convirtiéndolo en un Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP). Ambos métodos utilizan y dependen mucho de la opinión subjetiva de un experto en sistemas de drenaje y sobre todo, posea información técnica de la zona estudiada [7]. Así también, se ha utilizado de la misma manera el FAHP en una mina superficial de Irán. Donde aplicando las opiniones subjetivas y utilizando la escala verbal de Satty, se pudo obtener resultados que validaban la aplicación de esta técnica [8] [9]. Existen múltiples metodologías que solo utilizan los parámetros técnicos, otros que se basan en lo económico y otros en solo temas de seguridad y medio ambiente. El Proceso Analítico Jerárquico engloba los tres factores, volviéndolo así un método completo [8].

#### *D. Metodología de toma de decisión de sistemas de drenaje utilizando el AHP en minería superficial*

La ingeniería de drenajes requiere de mucha inversión, planificación a largo plazo y de muchos estudios. El AHP es un tema que muy poco ha sido investigado en el proceso de sistemas de drenaje. Sin embargo, los que suelen utilizarlo conocen lo eficiente que es la técnica multicriterio. En temas de drenaje, la seguridad de una labor en operación es crucial, ya que puede prevenir accidentes por inundación [16] [17] [20].

La aplicación del AHP en la selección ha sido utilizado como planeamiento a corto plazo, ya que permite conocer en específicas etapas de la explotación y para esto se requiere tener la data sobre modelos hidrogeológicos de cada una de estas. Aplicando esto puede minimizar costos y ahorrar tiempo en los análisis de los modelos técnicos, los cálculos de caudal y la generación de modelos matemáticos en 3D [18] [19].

### III. APORTE

#### *A. Fundamento*

La metodología propuesta se desarrolla en base a la determinación de la mejor técnica de drenaje de aguas subterráneas, ya que usualmente se utiliza el cruce de información hidrogeológica para llegar a la decisión final. Seleccionar el mejor sistema de drenaje abarca muchas relaciones entre parámetros, sub-parámetros, alternativas y las

certezas que existen entre estos, y valoraciones subjetivas [8]. Por esto, el Proceso Analítico Jerárquico suele tener mayor peso cuando se trata de elegir alternativas. Esta metodología consta de la selección de cuántos y cuáles serán los parámetros de decisión, los subparámetros dentro de cada parámetro y las alternativas a elegir. Por un lado, los parámetros que se utilizarán tienen que tener una relación directa con lo que se busca elegir. Por ejemplo, si se necesita escoger un proveedor de alimentos para un campamento minero, los parámetros que deberán ser relevantes para su elección deberán ser los económicos, calidad y tiempo de respuesta. Entonces, para la metodología propuesta se utilizarán tres parámetros importantes, que abarcan el área técnica, la económica y la de seguridad y medio ambiente. Además, el parámetro técnico posee cinco subcriterios, al cual se le añadirá un sexto subparámetro para que el resultado final sea el más cercano a la realidad. Las alternativas serán las siguientes: Pozos de bombeo dentro del pit (Alt. 1), galería subterránea fuera del pit (Alt. 2), Estaciones de bombeo dentro del pit (Alt. 3) y pozos profundos con bombas sumergibles fuera del pit (Alt. 4).

### B. Aporte General

En el presente estudio, se propone una metodología en base al Proceso Analítico Jerárquico y con la adición del subparámetro geológico, que tendrá como fin apoyar en las decisiones a corto plazo sobre el método de drenaje de aguas subterráneas, ya que es uno de los mejores métodos en tomas de decisión [2]. Por lo tanto, como primer paso se realizará la aceptación de los parámetros y subparámetros que se analizarán por el experto, dando así su valoración sobre la relación entre cada uno de ellos. Como segundo paso, se crearán matrices de valoraciones de los parámetros técnicos, económicos y de seguridad y medio ambiente. Seguidos de una matriz de subparámetros y finalmente trece matrices de sub parámetros relacionados con las alternativas de decisión. Como último paso, se realizará el cálculo a través del SUMAPRODUCTO de Excel, el cual se utilizará en la matriz final de subparámetros y alternativas de decisión, para hallar el porcentaje de preferencia (Fig. 1).

### C. Aporte a detalle

#### 1) Selección y aceptación de los parámetros y sub parámetros

Para la determinación de los parámetros a ser analizados por el AHP (Proceso Analítico Jerárquico), es necesario recurrir a nuestro experto en la materia de hidrogeología y diseños de sistemas de drenaje en minas superficiales. Se han considerado todos los parámetros y sub parámetros relevantes de los tres ámbitos que impactan en los drenajes [8]. Se ha añadido un parámetro adicional que será el de Geología, parámetro que es importante en la minería peruana, ya que sin un correcto estudio geológico de la zona un sistema de drenaje no tendría eficiencia. El experto verificó los parámetros que se utilizarán, los cuales son: parámetros técnicos, parámetros económicos y parámetros ambientales y de seguridad. En los parámetros técnicos estarán presentes seis sub parámetros:

tiempo de respuesta (T1), compatibilidad de condiciones hidrológicas (T2), experiencia en drenajes (T3), flexibilidad (T4), interferencia con las operaciones mineras (T5) y la geología (T6). En los parámetros económicos estarán cinco sub parámetros: disponibilidad de equipos de desagüe (E1), costos de operación (E2), costos de inversión (E3) y costos de mantenimiento (E4). Los parámetros ambientales y de seguridad serán tres: descenso de la capa freática (SE1), calidad de descarga (SE2) y la confiabilidad (SE3).

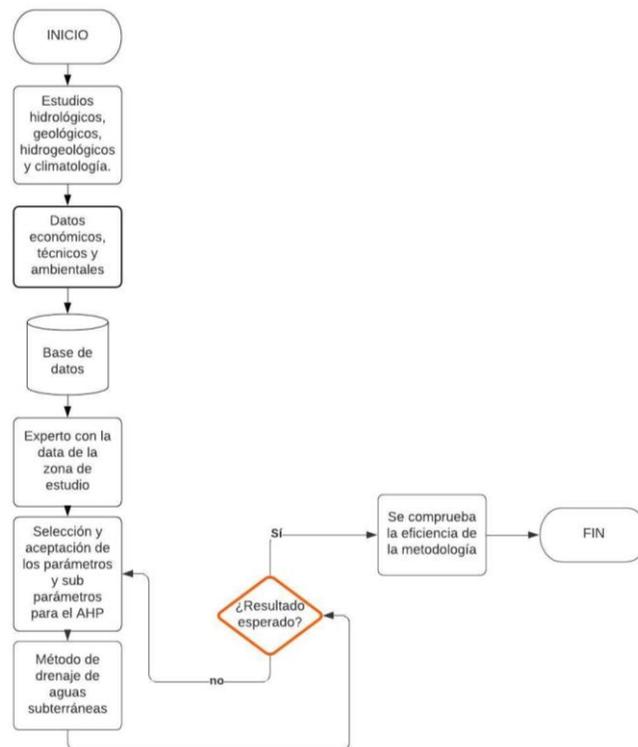


Fig. 1 Metodología general

#### 2) Creación de matrices

Se empezó empezaremos por la escala de Satty para establecer calificaciones entre los criterios, así como la calificación o el peso que tienen las alternativas de decisión en cada criterio para generar una matriz en base a los criterios de decisión que se tomará para escoger la técnica más apropiada. Después, se crearán otras matrices que relacionarán los sub parámetros de cada factor entre ellos mismos. Luego, podremos graficar nuestro árbol de decisión, siendo los criterios principales los técnicos, económicos y de seguridad y ambiente; los sub criterios Ts, los Es y los SEs; para tener como alternativas los métodos de drenaje existentes. A continuación, se aplicará la metodología AHP, la cual convertirá la matriz de criterios en una matriz normalizada. Para lograr esto, se debe sumar cada columna y dividir cada elemento entre esta suma para normalizarla. Al tener la matriz normalizada, se obtendrán los pesos de cada criterio para poder reemplazar en el árbol de decisión. Como penúltimo paso, se normalizarán las matrices de sub criterios hasta

obtener los pesos finales para ser reemplazadas en el árbol. Finalmente, se multiplicarán los pesos de cada sub criterio con el criterio para obtener los pesos finales y compararlos con las alternativas a escoger.

### 3) Cálculo del porcentaje de preferencia entre las alternativas

Se determinará el resultado final del cálculo de matrices pareadas en Excel de acuerdo al árbol de decisión y en caso se tenga una de las opciones escogidas, se comparará con el sistema de drenaje que la empresa está utilizando actualmente y se discutirán los resultados.

### D. Indicadores

A fin de conocer la estructura de los parámetros, sub parámetros y alternativas, se organizarán de la siguiente manera.

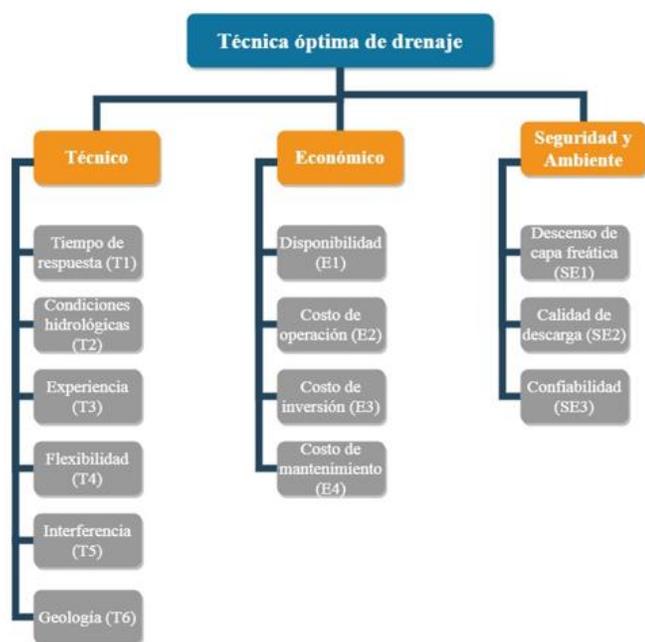


Fig. 2 Organización de los parámetros aceptados.

## IV. VALIDACIÓN

### A. Escenario de validación

La presente investigación se realizó en una mina superficial al norte del Perú, que se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca. El tajo se encuentra formado por un pórfido metalogénico de cobre y oro. Para sus sistemas de drenaje, utilizan los pozos de bombeo y los taladros de producción con bombas sumergibles. Para tal decisión, se utilizó un cruce de información de los modelos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y el caudal que ingresará al tajo en sus distintas etapas de explotación.

### B. Estudios previos

Se ha utilizado como base el estudio propuesto por Golestanifar, M., & Ahangari, K. en el 2012, el cual consiste en una metodología que aplica, además del AHP, la lógica difusa para establecer los valores subjetivos en valores más objetivos, más de lo que la escala de Saaty los realiza, para que su resultado sea el más eficiente. En este estudio, solo se utilizará el AHP por el poco conocimiento que se tiene de la lógica difusa. Además, el de agregar un sub parámetro que alterará los resultados finales y si en caso se utilizara la lógica difusa, esta metodología pudiera resultar en la mejor para toma de decisiones.

### C. Diseño de la validación

Se tomarán los parámetros y sub parámetros escogidos y primero se construirá una matriz de sub parámetros.

|     | T1     | T2     | T3   | T4     | T5     | T6    | E1     | E2     | E3    | E4    | SE1  | SE2  | SE3 |
|-----|--------|--------|------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|------|------|-----|
| T1  | 1      | 1/7    | 1/3  | 1/4    | 1/2    | 1/8   | 2      | 3      | 3     | 4     | 1/3  | 1/3  | 2   |
| T2  | 7      | 1      | 2    | 5      | 3      | 1/2   | 6      | 3      | 1/4   | 5     | 1/5  | 1/3  | 6   |
| T3  | 3      | 1/2    | 1    | 3      | 5      | 1/9   | 1/5    | 3      | 1/3   | 1/4   | 1/5  | 1/4  | 5   |
| T4  | 4      | 1/5    | 1/3  | 1      | 1/4    | 1/8   | 4      | 1/3    | 1/4   | 1/4   | 1/3  | 1/4  | 3   |
| T5  | 2      | 1/3    | 1/5  | 4      | 1      | 1/5   | 4      | 5      | 5     | 6     | 3    | 3    | 4   |
| T6  | 8      | 2      | 9    | 8      | 5      | 1     | 4      | 2      | 2     | 2     | 3    | 4    | 2   |
| E1  | 1/2    | 1/6    | 5    | 1/4    | 1/4    | 1/4   | 1      | 3      | 1/3   | 3     | 3    | 5    | 3   |
| E2  | 1/3    | 1/3    | 1/3  | 3      | 1/5    | 1/2   | 1/3    | 1      | 3     | 1/4   | 1/3  | 1/5  | 2   |
| E3  | 1/3    | 4      | 3    | 4      | 1/5    | 1/2   | 3      | 1/3    | 1     | 4     | 1/3  | 1/4  | 2   |
| E4  | 1/4    | 1/5    | 4    | 4      | 1/6    | 1/2   | 1/3    | 4      | 1/4   | 1     | 1/3  | 1/4  | 2   |
| SE1 | 3      | 5      | 5    | 3      | 1/3    | 1/3   | 1/3    | 3      | 3     | 3     | 1    | 1/3  | 3   |
| SE2 | 3      | 3      | 4    | 4      | 1/3    | 1/4   | 1/5    | 5      | 4     | 4     | 3    | 1    | 5   |
| SE3 | 1/2    | 1/6    | 1/5  | 1/3    | 1/4    | 1/2   | 1/3    | 2      | 1/2   | 1/2   | 1/3  | 1/5  | 1   |
| Σ   | 32.917 | 17.043 | 34.4 | 39.833 | 16.483 | 4.894 | 25.733 | 34.667 | 22.97 | 33.25 | 15.4 | 15.4 | 40  |

Fig. 3 Matriz de sub parámetros.

Se normalizará sumando el total de la columna, y dividiendo este total entre cada elemento. De manera que resulte de esta manera.

|     | T1    | T2    | T3    | T4    | T5    | T6    | E1    | E2    | E3    | E4    | SE1   | SE2   | SE3   | V.P.         |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| T1  | 0.030 | 0.008 | 0.010 | 0.006 | 0.030 | 0.026 | 0.078 | 0.087 | 0.131 | 0.120 | 0.022 | 0.022 | 0.050 | <b>0.048</b> |
| T2  | 0.213 | 0.059 | 0.058 | 0.126 | 0.182 | 0.102 | 0.233 | 0.087 | 0.011 | 0.150 | 0.013 | 0.022 | 0.150 | <b>0.108</b> |
| T3  | 0.091 | 0.029 | 0.029 | 0.075 | 0.303 | 0.023 | 0.008 | 0.087 | 0.015 | 0.008 | 0.013 | 0.016 | 0.125 | <b>0.063</b> |
| T4  | 0.122 | 0.012 | 0.010 | 0.025 | 0.015 | 0.026 | 0.155 | 0.010 | 0.011 | 0.008 | 0.022 | 0.016 | 0.075 | <b>0.039</b> |
| T5  | 0.061 | 0.020 | 0.006 | 0.100 | 0.061 | 0.041 | 0.155 | 0.144 | 0.218 | 0.180 | 0.195 | 0.195 | 0.100 | <b>0.114</b> |
| T6  | 0.243 | 0.117 | 0.262 | 0.201 | 0.303 | 0.204 | 0.155 | 0.058 | 0.087 | 0.060 | 0.195 | 0.260 | 0.050 | <b>0.169</b> |
| E1  | 0.015 | 0.010 | 0.145 | 0.006 | 0.015 | 0.051 | 0.039 | 0.087 | 0.015 | 0.090 | 0.195 | 0.325 | 0.075 | <b>0.082</b> |
| E2  | 0.010 | 0.020 | 0.010 | 0.075 | 0.012 | 0.102 | 0.013 | 0.029 | 0.131 | 0.008 | 0.022 | 0.013 | 0.050 | <b>0.038</b> |
| E3  | 0.010 | 0.235 | 0.087 | 0.100 | 0.012 | 0.102 | 0.117 | 0.010 | 0.044 | 0.120 | 0.022 | 0.016 | 0.050 | <b>0.071</b> |
| E4  | 0.008 | 0.012 | 0.116 | 0.100 | 0.010 | 0.102 | 0.013 | 0.115 | 0.011 | 0.030 | 0.022 | 0.016 | 0.050 | <b>0.047</b> |
| SE1 | 0.091 | 0.293 | 0.145 | 0.075 | 0.020 | 0.068 | 0.013 | 0.087 | 0.131 | 0.090 | 0.065 | 0.022 | 0.075 | <b>0.090</b> |
| SE2 | 0.091 | 0.176 | 0.116 | 0.100 | 0.020 | 0.051 | 0.008 | 0.144 | 0.175 | 0.120 | 0.195 | 0.065 | 0.125 | <b>0.107</b> |
| SE3 | 0.015 | 0.010 | 0.006 | 0.008 | 0.015 | 0.102 | 0.013 | 0.058 | 0.022 | 0.015 | 0.022 | 0.013 | 0.025 | <b>0.025</b> |
| Σ   | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | <b>1.000</b> |

Fig. 4 Matriz de sub parámetros normalizada.

Luego, se crearán trece matrices más de alternativas relacionadas por cada sub parámetro.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 5     | 2     | 3     |
| Alt.2 | 1/5   | 1     | 1/2   | 1/3   |
| Alt.3 | 1/2   | 2     | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/3   | 3     | 1/3   | 1     |

Fig. 5 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de tiempo de respuesta.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.492 | 0.455 | 0.522 | 0.409 | <b>0.469</b> |
| Alt.2 | 0.098 | 0.091 | 0.130 | 0.045 | <b>0.091</b> |
| Alt.3 | 0.246 | 0.182 | 0.261 | 0.409 | <b>0.274</b> |
| Alt.4 | 0.164 | 0.273 | 0.087 | 0.136 | <b>0.165</b> |

Fig. 6 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 4     | 3     | 2     |
| Alt.2 | 1/4   | 1     | 1/3   | 1/2   |
| Alt.3 | 1/3   | 3     | 1     | 2     |
| Alt.4 | 1/2   | 2     | 1/2   | 1     |

Fig. 7 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de condiciones hidrológicas.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.480 | 0.400 | 0.621 | 0.364 | <b>0.466</b> |
| Alt.2 | 0.120 | 0.100 | 0.069 | 0.091 | <b>0.095</b> |
| Alt.3 | 0.160 | 0.300 | 0.207 | 0.364 | <b>0.258</b> |
| Alt.4 | 0.240 | 0.200 | 0.103 | 0.182 | <b>0.181</b> |

Fig. 8 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 2     | 3     | 5     |
| Alt.2 | 1/2   | 1     | 1/4   | 1/3   |
| Alt.3 | 1/3   | 4     | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/5   | 3     | 1/3   | 1     |

Fig. 9 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de experiencia.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.492 | 0.200 | 0.655 | 0.536 | <b>0.471</b> |
| Alt.2 | 0.246 | 0.100 | 0.055 | 0.036 | <b>0.109</b> |
| Alt.3 | 0.164 | 0.400 | 0.218 | 0.321 | <b>0.276</b> |
| Alt.4 | 0.098 | 0.300 | 0.073 | 0.107 | <b>0.145</b> |

Fig. 10 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 3     | 4     | 2     |
| Alt.2 | 1/3   | 1     | 1/2   | 1/5   |
| Alt.3 | 1/4   | 2     | 1     | 4     |
| Alt.4 | 1/2   | 5     | 1/4   | 1     |

Fig. 11 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de flexibilidad.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.480 | 0.273 | 0.696 | 0.278 | <b>0.432</b> |
| Alt.2 | 0.160 | 0.091 | 0.087 | 0.028 | <b>0.091</b> |
| Alt.3 | 0.120 | 0.182 | 0.174 | 0.556 | <b>0.258</b> |
| Alt.4 | 0.240 | 0.455 | 0.043 | 0.139 | <b>0.219</b> |

Fig. 12 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 5     | 3     | 2     |
| Alt.2 | 1/5   | 1     | 2     | 1/4   |
| Alt.3 | 1/3   | 1/2   | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/2   | 4     | 1/3   | 1     |

Fig. 13 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de interferencia.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.492 | 0.476 | 0.474 | 0.320 | <b>0.440</b> |
| Alt.2 | 0.098 | 0.095 | 0.316 | 0.040 | <b>0.137</b> |
| Alt.3 | 0.164 | 0.048 | 0.158 | 0.480 | <b>0.212</b> |
| Alt.4 | 0.246 | 0.381 | 0.053 | 0.160 | <b>0.210</b> |

Fig. 14 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 6     | 4     | 4     |
| Alt.2 | 1/6   | 1     | 3     | 3     |
| Alt.3 | 1/4   | 1/3   | 1     | 5     |
| Alt.4 | 1/4   | 1/3   | 1/5   | 1     |

Fig. 15 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de geología.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.600 | 0.783 | 0.488 | 0.308 | <b>0.545</b> |
| Alt.2 | 0.100 | 0.130 | 0.366 | 0.231 | <b>0.207</b> |
| Alt.3 | 0.150 | 0.043 | 0.122 | 0.385 | <b>0.175</b> |
| Alt.4 | 0.150 | 0.043 | 0.024 | 0.077 | <b>0.074</b> |

Fig. 16 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 3     | 2     | 2     |
| Alt.2 | 1/3   | 1     | 3     | 3     |
| Alt.3 | 1/2   | 1/3   | 1     | 2     |
| Alt.4 | 1/2   | 1/3   | 1/2   | 1     |

Fig. 17 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de disponibilidad.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.429 | 0.643 | 0.308 | 0.250 | <b>0.407</b> |
| Alt.2 | 0.143 | 0.214 | 0.462 | 0.375 | <b>0.298</b> |
| Alt.3 | 0.214 | 0.071 | 0.154 | 0.250 | <b>0.172</b> |
| Alt.4 | 0.214 | 0.071 | 0.077 | 0.125 | <b>0.122</b> |

Fig. 18 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 2     | 3     | 3     |
| Alt.2 | 1/2   | 1     | 2     | 3     |
| Alt.3 | 1/3   | 1/2   | 1     | 2     |
| Alt.4 | 1/3   | 1/3   | 1/2   | 1     |

Fig. 19 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de costo de operación.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.462 | 0.522 | 0.462 | 0.300 | <b>0.436</b> |
| Alt.2 | 0.231 | 0.261 | 0.308 | 0.300 | <b>0.275</b> |
| Alt.3 | 0.154 | 0.130 | 0.154 | 0.200 | <b>0.160</b> |
| Alt.4 | 0.154 | 0.087 | 0.077 | 0.200 | <b>0.129</b> |

Fig. 20 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 4     | 3     | 5     |
| Alt.2 | 1/4   | 1     | 4     | 2     |
| Alt.3 | 1/3   | 1/4   | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/5   | 1/2   | 1/3   | 1     |

Fig. 21 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de costo de inversión.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.561 | 0.696 | 0.360 | 0.455 | <b>0.518</b> |
| Alt.2 | 0.140 | 0.174 | 0.480 | 0.182 | <b>0.244</b> |
| Alt.3 | 0.187 | 0.043 | 0.120 | 0.273 | <b>0.156</b> |
| Alt.4 | 0.112 | 0.087 | 0.040 | 0.091 | <b>0.083</b> |

Fig. 22 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 1/2   | 3     | 5     |
| Alt.2 | 2     | 1     | 4     | 2     |
| Alt.3 | 1/3   | 1/4   | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/5   | 1/2   | 1/3   | 1     |

Fig. 23 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de costo de mantenimiento.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.283 | 0.222 | 0.360 | 0.455 | <b>0.330</b> |
| Alt.2 | 0.566 | 0.444 | 0.480 | 0.182 | <b>0.418</b> |
| Alt.3 | 0.094 | 0.111 | 0.120 | 0.273 | <b>0.150</b> |
| Alt.4 | 0.057 | 0.222 | 0.040 | 0.091 | <b>0.102</b> |

Fig. 24 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 2     | 1/3   | 3     |
| Alt.2 | 1/2   | 1     | 2     | 1/3   |
| Alt.3 | 3     | 1/2   | 1     | 1/4   |
| Alt.4 | 1/3   | 3     | 4     | 1     |

Fig. 25 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de descenso de capa freática.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.207 | 0.308 | 0.045 | 0.655 | <b>0.304</b> |
| Alt.2 | 0.103 | 0.154 | 0.273 | 0.073 | <b>0.151</b> |
| Alt.3 | 0.621 | 0.077 | 0.136 | 0.055 | <b>0.222</b> |
| Alt.4 | 0.069 | 0.462 | 0.545 | 0.218 | <b>0.324</b> |

Fig. 26 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 1/2   | 2     | 1/3   |
| Alt.2 | 2     | 1     | 4     | 1/2   |
| Alt.3 | 1/2   | 1/4   | 1     | 1/2   |
| Alt.4 | 3     | 2     | 2     | 1     |

Fig. 27 Matriz de alternativas respecto al sub parámetro de calidad de descarga.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.154 | 0.133 | 0.222 | 0.143 | <b>0.163</b> |
| Alt.2 | 0.308 | 0.267 | 0.444 | 0.214 | <b>0.308</b> |
| Alt.3 | 0.077 | 0.067 | 0.111 | 0.214 | <b>0.117</b> |
| Alt.4 | 0.462 | 0.533 | 0.222 | 0.429 | <b>0.411</b> |

Fig. 28 Matriz normalizada con su VP.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 1     | 1/3   | 4     | 2     |
| Alt.2 | 3     | 1     | 2     | 1/4   |
| Alt.3 | 1/4   | 1/2   | 1     | 3     |
| Alt.4 | 1/2   | 4     | 1/3   | 1     |

Fig. 29 Matriz de alternativas respecto al sub criterio confiabilidad.

|       | Alt.1 | Alt.2 | Alt.3 | Alt.4 | V.P.         |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1 | 0.211 | 0.057 | 0.545 | 0.320 | <b>0.283</b> |
| Alt.2 | 0.632 | 0.171 | 0.273 | 0.040 | <b>0.279</b> |
| Alt.3 | 0.053 | 0.086 | 0.136 | 0.480 | <b>0.189</b> |
| Alt.4 | 0.105 | 0.686 | 0.045 | 0.160 | <b>0.249</b> |

Fig. 30 Matriz normalizada con su VP.

Una vez que se tienen los trece vectores de prioridad, se juntarán en una matriz de alternativas y sub parámetros. Las columnas serán formadas por los vectores, de la siguiente manera.

|       | T1    | T2    | T3    | T4    | T5    | T6    | E1    | E2    | E3    | E4    | SE1   | SE2   | SE3   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alt.1 | 0.469 | 0.466 | 0.471 | 0.432 | 0.44  | 0.545 | 0.407 | 0.436 | 0.518 | 0.33  | 0.304 | 0.163 | 0.283 |
| Alt.2 | 0.274 | 0.258 | 0.276 | 0.258 | 0.212 | 0.175 | 0.172 | 0.16  | 0.156 | 0.15  | 0.222 | 0.117 | 0.189 |
| Alt.3 | 0.091 | 0.095 | 0.109 | 0.091 | 0.137 | 0.207 | 0.298 | 0.275 | 0.244 | 0.418 | 0.151 | 0.308 | 0.279 |
| Alt.4 | 0.165 | 0.181 | 0.145 | 0.219 | 0.21  | 0.074 | 0.122 | 0.129 | 0.083 | 0.102 | 0.324 | 0.411 | 0.249 |

Fig. 31 Matriz de alternativas y sub parámetros.

La fila final será agregada con el nombre de ponderación para que pueda ser ingresada y calculada con "Sumaproduto" en Excel.

|             | T1    | T2    | T3    | T4    | T5    | T6    | E1    | E2    | E3    | E4    | SE1   | SE2   | SE3   | Priorización |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Alt.1       | 0.469 | 0.466 | 0.471 | 0.432 | 0.44  | 0.545 | 0.407 | 0.436 | 0.518 | 0.33  | 0.304 | 0.163 | 0.283 | <b>41.6%</b> |
| Alt.2       | 0.274 | 0.258 | 0.276 | 0.258 | 0.212 | 0.175 | 0.172 | 0.16  | 0.156 | 0.15  | 0.222 | 0.117 | 0.189 | <b>19.8%</b> |
| Alt.3       | 0.091 | 0.095 | 0.109 | 0.091 | 0.137 | 0.207 | 0.298 | 0.275 | 0.244 | 0.418 | 0.151 | 0.308 | 0.279 | <b>20.1%</b> |
| Alt.4       | 0.165 | 0.181 | 0.145 | 0.219 | 0.21  | 0.074 | 0.122 | 0.129 | 0.083 | 0.102 | 0.324 | 0.411 | 0.249 | <b>18.7%</b> |
| Ponderación | 0.048 | 0.108 | 0.063 | 0.039 | 0.114 | 0.169 | 0.082 | 0.038 | 0.071 | 0.047 | 0.090 | 0.107 | 0.025 |              |

Fig. 32 Matriz final de prioridades

Como resultado, se obtiene que los pozos de bombeo dentro del pit (alternativa uno) será la que debe ser utilizada por la empresa minera, teniendo así un 41.6% de preferencia, seguida por la de estaciones de bombeo dentro del pit

(alternativa tres) con un 20.1% de preferencia, siendo estas complementarias.

## V. DISCUSIÓN

### A. Nuevos escenarios vs resultados

Los resultados obtenidos en la selección de una técnica de drenaje usando el Proceso Analítico Jerárquico se compararán con otras investigaciones en el mismo contexto y se hallaron diferencias y similitudes durante el proceso de elección de parámetros y sub parámetros, que se detallarán en los siguientes párrafos.

La metodología utilizada para la elección de un sistema de drenaje es muy similar a la de Golestanifar y Ahangari, 2012; Antonio Freitas y Alessandra Magrini, 2013; Mohamed Elashram y Ahmed Ibrahim, 2017 y Kamali, Taheriyoun, Azimi y Nazif, 2015 y quienes encontraron que la ventaja de usar el AHP es que determina de una manera muy sencilla, mediante un sistema de múltiples matrices pareadas, determinantes y sus vectores de prioridades para la determinación del mejor sistema de drenaje de aguas subterráneas, lo cual se ha desarrollado en esta investigación.

Anteriores investigaciones como la de Osorio Juan y Orejuela Cabrera, 2008 proponen un modelo de toma de decisión en base al AHP y llegan a la conclusión de que esta herramienta es un gran apoyo para resolver problemas de selección de múltiples criterios, como la gran cantidad de datos que se maneja en la minería actual.

Se utilizó varios elementos para poder crear la matriz de decisión, ya que esta involucra muchos criterios y sub criterios de decisión. Para la selección de criterios de la investigación se utilizó un experto que aceptara los criterios iniciales (técnicos, económicos y de seguridad y ambiente). Para el desarrollo de la matriz principal de decisión, la que involucra criterios, sub criterios y alternativas de decisión se utilizó una metodología parecida a la de Sergio Berumen y Francisco Redondo, 2007. Además, esta técnica también ayuda a elegir proveedores de cualquier índole dentro de la actividad minera, así lo deja ver Bravo Gustavo, 2018 con su investigación en la unidad minera Barrick, la cual tuvo como finalidad seleccionar el mejor aprovisionamiento para el campamento minero de Barrick.

### B. Análisis de resultados

Se obtuvo un 41.6% como primera opción a ser el sistema de drenaje que se utilizará en la mina la de pozos de bombeo dentro del pit y con un 20.1% la opción de estaciones de bombeo dentro del pit. Siendo estas dos, las que se utilizan en la empresa minera donde se ha realizado el estudio.

### C. Trabajos futuros

En base a las conclusiones propuestas, se recomienda utilizar más sub parámetros de decisión para que el nivel de precisión y el de confianza aumenten y puedan empezar a ser usadas en la toma de decisión de sistemas de drenaje. También, Se recomienda que el experto que valore los

parámetros y sub parámetros requiera de mucha experiencia en hidrogeología, así como también en ingeniería de costos para que las matrices arrojen un valor lo más cercano a la realidad y con un margen de error mínimo.

## VI. CONCLUSIONES

Los resultados de la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en la elección de un sistema de drenaje de aguas subterráneas para una mina superficial, confirmaron la funcionalidad y validez de esta metodología, debido a que se identificó un porcentaje del 41,6% en la alternativa elegida, respecto a las otras tres que tuvieron un porcentaje menor al 21%. Este estudio demostró que la técnica funciona siempre y cuando se utilicen todos los parámetros necesarios, los cuales son técnicos, económicos y de seguridad y medio ambiente y estos a su vez dividiéndose en sub parámetros, importantes para el proceso de toma de decisión en cuanto a sistemas de drenaje. De igual manera, es fundamental la experiencia del experto en el área de estudio y los criterios analizados, porque sobre estos se construyen las matrices de valoración y de estas dependen los resultados finales.

Al realizar la investigación, se tomó en cuenta el caudal que ingresa a la mina y el caudal que es necesario extraer para mantener las condiciones secas y seguras. La alternativa que fue escogida por el AHP cumple con las necesidades de drenar el caudal mínimo para que las operaciones no se detengan y sean seguras. Así mismo, es importante mencionar que la primera alternativa escogida, pozos de bombeo dentro del pit y la segunda alternativa con más porcentaje de preferencia, estaciones de bombeo dentro del pit, se complementan entre ellas para formar un eficiente sistema de drenaje.

Finalmente, se pudo observar que la metodología usada es eficiente para determinar el mejor sistema de drenaje de aguas subterráneas, debido a que los resultados finales concuerdan con la técnica que se utiliza actualmente en la empresa donde se realizó el estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Romero, A., Millar, D., Carvalho, M., Maestre, J. M., & Camacho, E. F. (2015). A comparison of the economic benefits of centralized and distributed model predictive control strategies for optimal and sub-optimal mine dewatering system designs. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1172–1183. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.01.031>
- [2] Wang, S. Q., Wee, Y. P., & Ofori, G. (2002). DSSDSS: a decision support system for dewatering systems selection. *Building and Environment*, 37(6), 625–645. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00072-5)
- [3] Libicki, J. (1985). Proposal of criteria for selection of dewatering methods in surface mining. In *Proc, 2nd international mine water assoc congress*, Granada (pp. 105-112).
- [4] Straskraba, V. (2014). Some Technical Aspects Of Open Pit Mine Dewatering.
- [5] Mikhailov, A. V., Garmayev, O. Z., Garifullin, D. R., & Kazakov, Y. A. (2019, November). A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 378, No. 1, p. 012086). IOP Publishing.

- [6] Morton, K. L., & Van Mekerck, F. A. (1993). A phased approach to mine dewatering. *Mine Water and the environment*, 12(1), 27-33. <https://doi.org/10.1007/BF02914796>
- [7] Elashram, M. M. M. E., & Ibrahim, A. H. (2020). Application of Fuzzy AHP on Determining the Dewatering Main Criteria Weights in Egypt. *Bulletin of the Faculty of Engineering. Mansoura University*, 43(3), 13-20. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.98085>
- [8] Golestanifar, M., & Ahangari, K. (2012). Choosing an optimal groundwater lowering technique for open pit mines. *Mine Water and the Environment*, 31(3), 192-198. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0196-2>
- [9] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- [10] Bogdanovic, D., Nikolic, D., & Ilic, I. (2012). Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84(1), 219-233. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652012005000013>
- [11] Marcano Aular, Y. J., & Talavera Pereira, R. (2007). Minería de datos como soporte a la toma de decisiones empresariales. *Opción*, 23(52), 104-118.
- [12] Gómez, R. A., Cano, J. A., & Campo, E. A. (2016). Selección de proveedores en la minería de oro con lógica difusa. *Revista Venezolana de Gerencia*, 21(75), 530-548.
- [13] Bravo Ortiz, G. E. (2018). Aplicación de un modelo de gestión de abastecimiento para reducir costos de aprovisionamiento del campamento minero Barrick–Huaraz 2018.
- [14] Pradenas, C. M. R. L. LOCALIZACIÓN DE UN PROCESO MINERO EN UN ÁREA INDUSTRIAL CON EL USO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO AHP. La Revista Ingengerare de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, al completar su vigésimo quinta edición, se ha convertido en un núcleo de información interdisciplinaria entre los diferentes ámbitos que posee la ingeniería. Como ha sido desde su fundación, el principal objetivo de esta revista es difundir el co-nocimiento científico y tecnológico, a través de la publicación de artículos inéditos, que, 13.
- [15] Ramírez, A. M., & Calle, G. M. (2016). Herramienta financiera para el cálculo de la rentabilidad de proyectos de exploración minera.
- [16] Kasap, Y., & Subaşı, E. (2017). Risk assessment of occupational groups working in open pit mining: analytic hierarchy process. *Journal of Sustainable Mining*, 16(2), 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.07.001>
- [17] Bascetin, A. (2007). A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine. *Environmental Geology*, 52(4), 663-672. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0495-7>
- [18] Brown, K., Trott, S., & Nabi, A. (2012). An alternative approach to managing dewatering in an open pit mine. In *Proceedings of the International Mine Water Association Symposium*. Bunbury, Australia (pp. 557-567).
- [19] Chen, G. X., & Lei, W. (2010). Application 3D Numerical Simulation on Foundation Pit Dewatering Design of Nanchang International Financial Center. *Advanced Materials Research*, 108–111, 1482–1485. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.108-111.1482>
- [20] Kochanek, K., & Tynan, S. (2010). The environmental risk assessment for decision support system for water management in the vicinity of open cast mines (DS WMVOC). *Technological and Economic Development of Economy*, 16(3), 414-431.