



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA CONTROLADA
CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

ANA MARÍA RIVAS IBÁÑEZ

PROFESOR GUÍA

Dr. Manuel Reyes Jara

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Sr. Rodrigo Reyes Jara

Sr. Carlos Moraga Cruz

CURICÓ - CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures are present. The left stamp is blue and contains the text "UNIVERSIDAD DE TALCA", "DIRECCIÓN", and "SISTEMA DE BIBLIOTECAS". A signature is written over it. The right stamp is grey and contains the text "SISTEMA DE BIBLIOTECAS", "CAMPUS CURICO", and the university logo. A signature is written over it.

Curicó, 2023

RESUMEN

En cuanto avanza la minería los yacimientos superficiales se van haciendo más escasos, teniendo que pasar de minería a cielo abierto a subterránea. Este es el caso de una de las más grandes minas de Chile y el mundo, Chuquicamata. Después de casi 100 años de extracción a rajo abierto, cambió su método para seguir explotando el mineral. Es en la búsqueda de este objetivo que se requiere la implementación de equipos idóneos para el trabajo del personal y de maquinaria a gran profundidad.

La ventilación es fundamental para la vida y para el correcto funcionamiento de los equipos en labor, pero esto conlleva un gran costo energético y económico. Para ello se necesita implementar algún método que optimice el flujo de aire dentro de la mina.

En la presente entrega se abordará la problemática de la ventilación en minería subterránea. Para ello, se pretende emplear la simulación del flujo de aire en una mina subterránea con método *Panel Caving*. Se necesita previamente identificar las posibles variables o factores que influyen en ella, variando su disposición y número al igual que su estado. Cuyos equipos serán los ventiladores y compuertas.

Mediante la inteligencia artificial se busca la optimización de la ventilación. Se utilizarán algunos softwares para cumplir con ello. AutoCAD servirá para el diseño de los distintos niveles de la mina con método de explotación *Panel Caving*. VentSim, para la simulación de caudales de los distintos escenarios generados. IBM SPSS Statistics, para el método de Orthoplan que será encargado de generar los escenarios representativos que irán a la simulación VentSim. Finalmente, se empleará el lenguaje de programación en Python que entrenará las redes neuronales artificiales en Google Colaboratory, esto con el fin de desarrollar un modelo de control optimal del flujo de aire en la mina. Con lo anterior se pretende obtener un algoritmo o método para optimizar el control de la ventilación de una mina subterránea.

PALABRAS CLAVES: Ventilación - *Panel Caving* - Orthoplan - Inteligencia artificial – Red neuronal - Control optimal.

ABSTRACT

As soon as mining advances, surface deposits become scarcer, having to go from open pit to underground mining. This is the case of one of the largest mines in Chile and the world, Chuquicamata. After almost 100 years of open pit mining, he changed his method to continue exploiting the ore. It is in pursuit of this objective that the implementation of suitable equipment for the work of personnel and machinery at great depth is required.

Ventilation is essential for life and for the correct functioning of the equipment at work, but this entails a high energy and economic cost. For this, it is necessary to implement some method that optimizes the air flow inside the mine.

In this installment, the problem of ventilation in underground mining will be addressed. For this, it is intended to use the simulation of the air flow in an underground mine with the Panel Caving method. It is necessary to previously identify the possible variables or factors that influence it, varying their disposition and number as well as their state. Whose equipment will be the fans and gates.

Artificial intelligence seeks to optimize ventilation. Some software will be used to comply with it. AutoCAD will be used for the design of the different levels of the mine with the Panel Caving exploitation method. VentSim, for the flow simulation of the different generated scenarios. IBM SPSS Statistics, for the Orthoplan method that will be in charge of generating the representative scenarios that will go to the VentSim simulation. Finally, the Python programming language will be used to train artificial neural networks in Google Collaboratory, in order to develop an optimal control model of airflow in the mine. With the above, it is intended to obtain an algorithm or method to optimize the ventilation control of an underground mine.

KEY WORDS: Ventilation - Panel Caving - Orthoplan - Artificial Intelligence - Neural Network - Optimal Control.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios por ponerme en el camino esta carrera y haberme dado la oportunidad de conocer gente maravillosa que me apoyo a lo largo de mi desarrollo académico.

Agradezco a mi madre y a mi familia por el amor, el apoyo incondicional, los consejos y la paciencia en todas las decisiones tomadas, buenas y malas, sobre todo en los momentos críticos. Igualmente dar gracias por la confianza depositada para alcanzar mi sueño y convertirme en una profesional con los valores que me brindaron.

También quisiera agradecer a mi profesor guía Manuel Reyes Jara por haber compartido su conocimiento, por su paciencia y su apoyo brindado a lo largo de todo el desarrollo de esta memoria. No pude tener un mejor profesor para guiarme en el término de esta etapa.

Además, quisiera darle las gracias a mi compañero y pareja Nicolás quien dándome su cariño, comprensión y amor me ha apoyado en los últimos años de universidad compartiendo la pasión por la minería.

Finalmente agradecer a mis compañeras y amigas Danixa, Paulina, Soledad y Martina por todos los buenos momentos que compartimos. Gracias por su apoyo y su cariño a lo largo de este proceso, nunca lo olvidaré.

A la mujer más importante de mi vida,

mi madre, Myriam.

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Soluciones propuestas.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 Alcances.....	2
1.6 Metodología y herramientas utilizadas.....	2
1.7 Resultados esperados.....	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Ventilación.....	4
2.1.1 Tipos de ventilación.....	4
2.1.2 Variables de control de un sistema de ventilación.....	6
2.2 Resistencia al movimiento del aire.....	8
2.2.1 Teorema de Bernoulli.....	8
2.2.2 Ley de Kirchhoff.....	10
2.3 Aire y contaminantes.....	12
2.3.1 Aire.....	13
2.3.2 Gases contaminantes.....	13
2.4 Polvo en suspensión.....	15
2.5 Ley vigente Chile.....	16
2.6 Método sin soporte: Block Caving – Panel Caving.....	16
2.6.1 Ventilación en método Caving.....	18
2.7 Arreglos ortogonales.....	19
2.7.1 Diseño de experimentos mediante arreglo ortogonal.....	19
2.8 Análisis de regresión.....	21
2.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson.....	21

2.8.2	Coeficiente de determinación	21
2.8.3	Coeficiente de determinación ajustado	22
2.8.4	Error estándar de estimación	23
2.9	Inteligencia artificial (IA)	23
2.10	Machine Learning (ML)	24
2.10.1	Aprendizaje supervisado.....	25
2.10.2	Aprendizaje no supervisado.....	25
2.11	Deep Learning.....	25
2.11.1	Redes neuronales artificiales	25
3.	METODOLOGÍAS.....	32
3.1	Datos	32
3.2	Software	32
3.2.1	AutoCAD.....	32
3.2.2	VentSim.....	32
3.2.3	IBM SPSS Statistics	33
3.2.4	Spyder (The <i>Scientific Python Development Environment</i>)	33
3.3	Procedimiento	34
4.	DESARROLLO.....	36
4.1	Características de la Mina y Sistema de ventilación.....	36
4.1.1	Nivel de hundimiento	38
4.1.2	Subnivel de inyección.....	38
4.1.3	Subnivel de extracción.....	39
4.2	Corrección de layout de la mina	39
4.2.1	Nivel de hundimiento	40
4.2.2	Nivel de ventilación.....	41
4.3	Arreglo ortogonal.....	42
4.4	Temporalidad	44
4.5	Puntos de estudio	45
4.6	Análisis del modelo	47
4.7	Entrenamiento de redes neuronales	48
4.7.1	Análisis y resultados de entrenamiento	49

4.8	Modelo de control optimal.....	55
4.8.1	Análisis y resultado de control optimal	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	REFERENCIAS	66
	APÉNDICE A	70
	APÉNDICE B.....	76
	APÉNDICE C	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Ventilación natural (SERNAGEOMIN, 2015).	5
Figura 2.2 Sistemas de ventilación auxiliar (SERNAGEOMIN, 2015).	6
Figura 2.3 Compuerta para ventilación mineras subterránea (Nergeco, 2017).	6
Figura 2.4 Ventilador centrifugo (Zitrón, 2010).	7
Figura 2.5 Ventiladores axiales (Pentagono Servicios Generales, 2020).	7
Figura 2.6 Sistema de flujo de fluido con las relaciones energéticas (Hartman y otros, 1997).	8
Figura 2.7 Primera ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).	10
Figura 2.8 Segunda ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).	10
Figura 2.9 Esquema de circuito en serie (Hartman y otros, 1997).	11
Figura 2.10 Esquema de circuito en paralelo (Hartman y otros, 1997).	12
Figura 2.11 Infraestructura típica de una mina explotada por panel <i>Caving</i> con hundimiento convencional (Darling, 2011).	17
Figura 2.12 Sistema de ventilación en método de explotación <i>Caving</i> (McPherson, 1993 en Hernández, 2019).	18
Figura 2.13 Diagrama de relación entre inteligencia artificial, <i>Machine Learning</i> y <i>Deep Learning</i> (Medium, 2018).	24
Figura 2.14 Neurona biológica con sus principales partes (Olivera, 2019).	26
Figura 2.15 Red neuronal artificial, perceptrón multicapa (Innovation, 2019).	27
Figura 2.16 Gráfico de función sigmoide (Ponce, 2021).	28
Figura 2.17 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).	28
Figura 2.18 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).	29
Figura 3.1 Esquema de metodología (Elaboración propia).	35

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Composición del aire seco (Bolz & Tuve, 1973 en Hernández, 2019).	13
Tabla 2.2 Clasificación de los gases (SERNAGEOMIN, 2015).	13
Tabla 2.3. Matrices ortogonales estándar (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).	20
Tabla 2.4. Ejemplo de un arreglo ortogonal L_82^7 (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).	20
Tabla 4.1 Cota de los niveles de la mina.	37
Tabla 4.2 Datos de ventiladores principales disponibles.....	37
Tabla 4.3 Datos de ventiladores auxiliares disponibles.....	37
Tabla 4.4 Datos de ventiladores de inyección del nivel de hundimiento.	41
Tabla 4.5 Datos de ventiladores de extracción del nivel de hundimiento.	42
Tabla 4.6 Términos para las variables utilizadas.....	43
Tabla 4.7 Escenarios generados del arreglo ortogonal.	44
Tabla 4.8 Ejemplo de escenarios adiciones generados a partir del escenario original N°1. 45	
Tabla 4.9 Caudales simulados de escenarios adicionalmente generados a partir del escenario original N°1.	46
Tabla 4.10 Estadística de los modelos analizados.....	47
Tabla 4.11 Valores de caudales de prueba y predicción de la base de datos original.	51
Tabla 4.12 Ejemplo de escenarios adiciones generados a partir del escenario original N°1 con datos de caudales.	52
Tabla 4.13 Valores de caudales de prueba y predicción, base de datos modificada.	54
Tabla 4.14 Error cuadrático medio (MSE) de la base original y modificada del punto centro.	55
Tabla 4.15 Cálculo caudal requerido.....	58
Tabla 4.16 Escenarios inicial para inicial código principal.....	58
Tabla 4.17 Resumen de resultado del modelo de control optimal de los puntos.	61
Tabla A.1 Escenarios adiciones generados.....	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y motivación

En el ámbito de la industria minera, las operaciones unitarias son de vital importancia para el objetivo de extracción de minerales valiosos. A través de la historia, la minería ha ido abordando distintas problemáticas para llevar este propósito a cabo, una de ellas es la extracción de minerales en profundidad. Es en este contexto donde surge la necesidad de implementar equipos de ventilación que mantengan las condiciones ideales para la vida humana y el buen funcionamiento de equipos.

Con el fin que la mina cuente con una cantidad de oxígeno adecuado y se lleven a cabo las distintas labores sin que ocurran accidentes fatales, se requiere mantener con un flujo constante. Esto implica un gasto energético que podría ser equivalente al 40% del costo de operación, según Minería Chilena (2014). Para ello, se debe implementar alguna tecnología a través de software u otra para optimizar la ventilación, el cual cumpla con ingresar y extraer el aire de manera eficiente. Esto podría rebajar los costos energéticos en la minería y evitar posibles incidentes.

1.2 Descripción del problema

Desarrollar un método para controlar de manera eficiente la ventilación en minería subterránea. Para esto se tienen dos modelos de optimización a resolver:

- Modelo 1: Minimizar costos, sujeto a un cumplimiento de disponibilidad de aire.
- Modelo 2: Maximizar la disponibilidad de aire, sujeto a una restricción de costo o capacidad.

NOTA: Es importante recalcar que estos son problemas temporales. Es decir, las variables de decisión son un conjunto de criterios que se aplican en el tiempo, en relación a inyectar aire, extraerlo, cerrar o abrir compuertas, en forma dinámica. Las matemáticas usuales para tratar este problema son la optimización por cálculo variacional o control optimal. Sin embargo, aquí se utilizarán técnicas de inteligencia artificial basadas en aprendizaje de máquinas (*Machine Learning*).

1.3 Soluciones propuestas

Se desarrollará un muestreo de escenarios de ventilación diseñados por un Orthoplan, cuyas evaluaciones entrenarán una red neuronal. Con esta se podrá predecir la calidad de ventilación en cada sector, para diversas decisiones dinámicas de inyección y extracción de aire, así como apertura y cierre de compuertas. Finalmente, este permitiría resolver un problema de control optimal.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un método de control de un sistema de ventilación en minería subterránea para optimizar el control del flujo de aire, entrenando una inteligencia artificial.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar variables y factores que influyan en el flujo de aire de un sistema de ventilación.
2. Calcular escenarios del flujo de aire, en base a un diseño Orthoplan de las variables del sistema de ventilación.
3. Desarrollar un modelo de redes neuronales entrenado con los distintos escenarios dinámicos obtenidos.
4. Desarrollar un modelo de control optimal de la ventilación, utilizando las redes neuronales entrenadas.

1.5 Alcances

1. Se considerará un nivel de hundimiento sintético de una mina *Panel Caving*, similar a Diablo Regimiento o Esmeralda de El Teniente.
2. No se desarrollará una planificación económica ni diseño de mina.
3. No se desarrollará un modelo físico o fenomenológico de la ventilación, que simule el proceso, sino que se utilizará un *software* ya desarrollado.
4. Si bien se realizará una optimización vinculada a los costos de la ventilación, no se desarrollarán modelos econométricos de proyección de tales insumos.

1.6 Metodología y herramientas utilizadas

Dentro de la metodología se realizará lo siguiente:

1. Desarrollo de *layout* de mina *Caving*.
2. Identificar y decidir cantidad y posición de variables que influyen en la ventilación.
3. Simular la ventilación en *software* caracterizando las variables y factores que intervienen en esta.
4. Diseño de escenarios con método del Orthoplan.
5. Entrenar las redes neuronales, con los escenarios generados anteriormente.
6. Desarrollar un modelo de control optimal del flujo de aire en la mina.

Los softwares que serán utilizados en el desarrollo esta memoria son:

- AutoCAD
Software que permite hacer dibujos o diseños en dos y en tres dimensiones. En esta memoria se utilizará para definir técnicamente la geometría de los espacios en donde se va a trabajar.
- VentSim
VentSim es utilizado principalmente para la simulación de ventilación en minas subterráneas. Este programa ayudara a obtener el valor del flujo de los diferentes escenarios ingresados.
- IBM SPSS Statistics.
Programa estadístico que permite trabajar con bases de datos de gran volumen de manera muy sencilla. Este utilizará para diseñar los escenarios mediante el método Orthoplan.
- Spyder (*The Scientific Python Development Environment*)
Desarrollador interactivo que permite ejecutar códigos en lenguaje de programación Python. Este servirá para el entrenamiento de redes neuronales.

1.7 Resultados esperados

Un algoritmo o método para optimizar el control de la ventilación de una mina subterránea.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ventilación

“La ventilación de minas, tiene por misión principalísima el suministro de aire fresco con el objeto de lograr condiciones ambientales y termo-ambientales adecuadas para todo el personal que labore en faenas mineras subterráneas, como también para atender la operación de diversos equipos e instalaciones subterráneas” (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2015).

El objetivo principal, según lo anterior, es llevar aire fresco a la mina, pero existe otros objetivos los cuales son de gran importancia: Evitar la posible formación de gases, mantener una temperatura ideal al interior de la mina, reducir polvo en suspensión, entre otros. Con el fin de poder generar este tipo fenómeno debe existir una entrada y salida de aire natural, lo cual deberá estar ayudado de maquinaria especializada en ventilación. Esto con fin de hacer llegar más aire a la profundidad que se requiera.

2.1.1 Tipos de ventilación

2.1.1.1 Ventilación natural

En este tipo de ventilación, ingresa el flujo de aire sin necesidad de ningún tipo de maquinaria que ayude en el proceso.

Bustamante y otros (2017) indica que la ventilación natural para que logre su existencia, debe generarse una diferencia de alturas entre la entrada (bocamina) y la salida (bocaviento). También y aún más significativo, debe haber un intercambio termodinámico entre el interior de la mina con la superficie. También, Bustamante y otros (2017) señala que esta ventilación es muy variable, ya que depende de la estación del año en la que se encuentre. Debido a la temperatura del aire afecta también en la circulación de aire. La ventilación natural se puede observar en la figura 2.1.

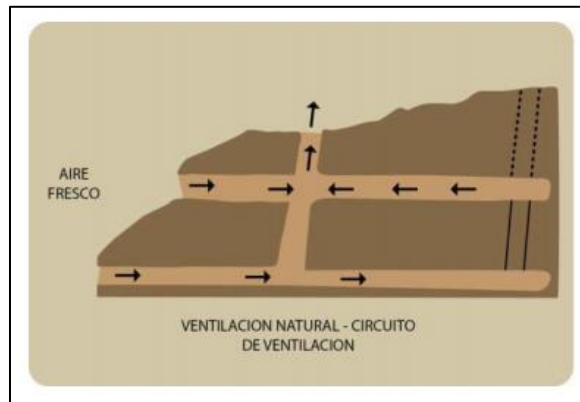


Figura 2.1 Ventilación natural (SERNAGEOMIN, 2015).

2.1.1.2 Ventilación auxiliar

Como ventilación auxiliar o secundaria, definimos aquellos sistemas que, haciendo uso de ductos y ventiladores auxiliares, ventilan áreas restringidas de las minas subterráneas, empleando para ello circuitos de alimentación de aire fresco y de evacuación del aire viciado que les proporciona el sistema de ventilación general (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2008).

Esta ventilación tiene como objetivo, llevar aire a los frentes de trabajo y las galerías que lo requieran. Como explica SERNAGEOMIN (2015), en los sectores que estén más alejados del flujo de aire se emplean ductos o ventiladores que auxilien a estos, ingresando aire fresco y extrayendo el viciado.

Los sistemas que se utilizan en ventilación auxiliar son:

- Sistema aspirante: Sistema que permite inyectar aire fresco por la galería, y se extraiga el que está cargado de contaminantes por los ductos.
- Sistema impelente: Este sistema es el contrario al anterior. El aire fresco es inyectado por el ducto, mientras el viciado tiene salida por la frente de la galería.
- Sistema combinado: El último sistema es una combinación entre los anteriores. Consiste en dos ductos, por uno entra aire renovado y por el otro sale el aire ya utilizado.

Los sistemas nombrados anteriormente se presentan en la figura 2.2.

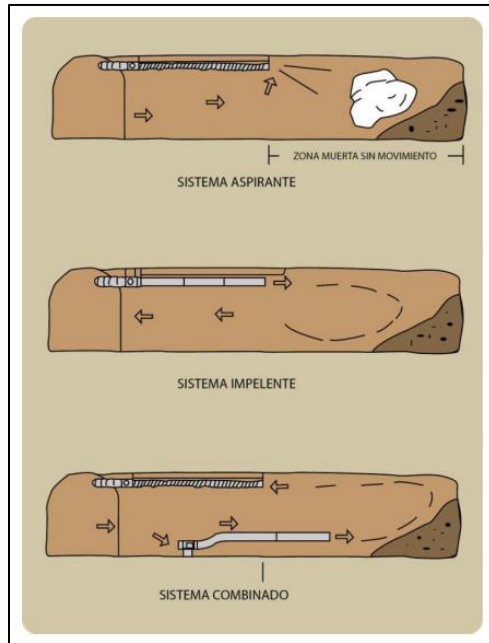


Figura 2.2 Sistemas de ventilación auxiliar (SERNAGEOMIN, 2015).

2.1.2 Variables de control de un sistema de ventilación

En una configuración de un sistema de ventilación, influyen diferentes variables y factores que controlan en la distribución del flujo de aire. Estos reguladores se dividen en pasivos y activos.

- Pasivos: Se refieren a las compuertas con paso ajustable del flujo de aire, el cual se disminuirá cuando se requiera (fig. 2.3).



Figura 2.3 Compuerta para ventilación mineras subterránea (Nergeco, 2017).

- Activos: En este grupo de encuentran los ventiladores. Tiene como objetivo hacer fluir el aire que inyecta desde la superficie, variándolo cuando se le indique.

2.1.2.1 Ventiladores

Un ventilador es un tipo de maquinaria rotatoria que expulsa aire de manera continua. Existen dos tipos de clasificación de ventiladores. Clasificación según su tipo y según su función.

Clasificación según el tipo:

- Ventilador centrífugo: El aire ingresa al rotor en un ángulo recto, y expulsa el aire en dirección de 90° grados con respecto al eje del impulsor. Este ventilador se caracteriza por tener aspas (fig. 2.4).



Figura 2.4 Ventilador centrífugo (Zitrón, 2010).

- Ventilador Axial: Ventilador con hélice, el cual la dirección de la corriente es paralela a la flecha de ventiladores. Son más baratos y producen niveles altos de ruidos (fig. 2.5).



Figura 2.5 Ventiladores axiales (Pentagono Servicios Generales, 2020).

Clasificación según su función:

- Ventilador principal: Instalados en superficie o cerca de esta. Estos ventiladores son importantes ya que por ellos circula todo el flujo de aire que entra a la mina.
- Ventilador reforzado: Ayuda al ventilador principal a circular el aire. Es instalado principalmente en las galerías principales.

- Ventilador auxiliar: Son principalmente de tipo axial y son instalados en sectores sin salida en conjunto con ductos.

2.2 Resistencia al movimiento del aire

En las galerías de las minas subterráneas se puede encontrar varios componentes que obstruyen el paso del flujo de aire, haciendo que este varíe debido a la pérdida por rozamiento. Asimismo, la diferencia de las dimensiones en las áreas causa la misma condición de pérdida por fricción, esto sin considerar la interrupción (de ningún tipo) en el flujo.

2.2.1 Teorema de Bernoulli

El teorema o principio de Bernoulli establece el principio de conservación de la energía. Como indica Ramirez & Fuentes (2019) las diferencias de energía son algo primordial en el cálculo de la cantidad y la altura de la mina. En cualquier área o sección de un flujo en movimiento la energía total es la suma de las distintas energías que están presentes como: energía interna, estática, de velocidad, potencial y térmica.

Considere la siguiente imagen (fig. 2.6) en donde un fluido real se mueve en un conducto y considere los cambios de energía que se generan entre las dos secciones.

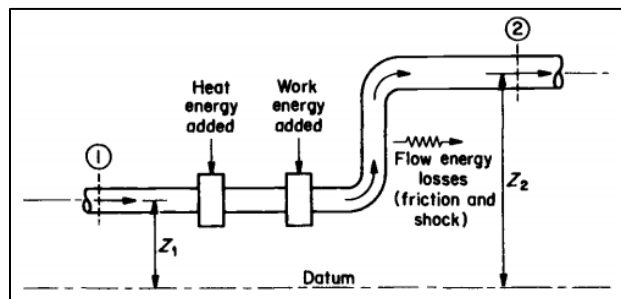


Figura 2.6 Sistema de flujo de fluido con las relaciones energéticas (Hartman y otros, 1997).

Las energías en ambas secciones (sección 1 y sección 2) son iguales, omitiendo el cambio de calor que en la mayoría de los casos es insignificante comparándolo con las demás características. La fórmula 2.1, que la representa es:

$$\text{Energía total (1)} = \text{Energía total (2)} + \text{Pérdidas de energía (1} \rightarrow \text{2)} \quad (2.1)$$

La fórmula 2.2 representa la energía general que se le aplica a un flujo de un fluido. Esto sin considerar la energía interna, se sustituyendo las expresiones de los distintos términos de energía.

$$\frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_l \quad (2.2)$$

Donde:

p_1, p_2 = Presiones estáticas (sección 1 y 2).

V_1, V_2 = Velocidad del fluido (sección 1 y 2).

Z_1, Z_2 = Altura geodésica o energía potencial (sección 1 y 2).

g = Aceleración de gravedad.

w = Densidad del aire.

H_l = Pérdida de carga o caída de presión.

$p_1/w, p_2/w$ = Energía estática (sección 1 y 2).

$V^2/2g$ = Energía cinética (sección 1 y 2).

La caída de presión ocurre debido a la fricción en la superficie del medio donde se mueve el flujo o el aire en el caso de las minas. Otra causa son los distintos obstáculos (irregularidades en paredes) que se encuentre en el camino o recorrido de una sección a otra. Para saber cuál es la energía equivalente que hay que entregar, debemos conocer la pérdida de carga.

Las dimensiones del medio donde se moverá el flujo será el responsable de las distintas presiones cinéticas que pueda tomar la fórmula 2.2. En tanto la presión geodésica varía dependiendo (en el caso minero) del yacimiento, método de explotación y su desarrollo. Por consecuencia será la presión estática la que deberá jugar un rol importante en la caída de presión, aumentando para vencerla.

Entonces, para calcular H se puede reescribir la fórmula 2.2 en una nueva (fórmula 2.3).

$$H_{t1} = H_{t2} + H_l \quad (2.3)$$

H_{t1} y H_{t2} comprende la suma de las presiones cinéticas, potencial y estática de cada uno de los sectores o puntos (1 y 2) respectivamente. Se representa en ambos la pérdida de carga para ambos sectores en la fórmula 2.4.

$$H_t = H_s + H_v + Z \quad (2.4)$$

2.2.2 Ley de Kirchhoff

Existen dos leyes fundamentales que rigen de los circuitos de electricidad, las cuales se adaptaron para ser utilizadas dentro de la ventilación:

- Primera ley de Kirchhoff: Está se representa por 4 caudales y un nodo común donde se unen (fig. 2.7). La ley indica que la misma cantidad de caudal debe entrar y salir. En otras palabras, la suma de los flujos de aire que entran y salen deben ser igual a cero (fórmula 2.5 y 2.6).

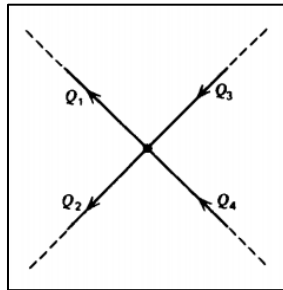


Figura 2.7 Primera ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4 = 0 \quad (2.5)$$

$$\sum Q = 0 \quad (2.6)$$

- Segunda ley de Kirchhoff: Conocida como ley de voltaje, señala que la suma de las pérdidas de presión a lo largo de un circuito cerrado debe ser igual a cero. (fig. 2.8, fórmulas 2.7 y 2.8).

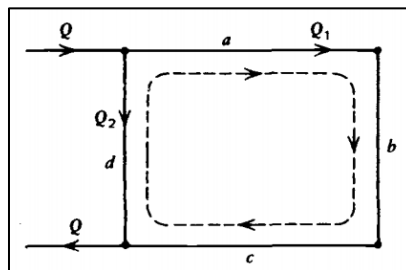


Figura 2.8 Segunda ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).

$$H_l = H_{lb} + H_{lc} + H_{ld} + H_{le} = 0 \quad (2.7)$$

$$\sum Q = 0 \quad (2.8)$$

Otra de las semejanzas que se utiliza de los sistemas de electricidad en ventilación, es la de la resistencia. Señalan Ramirez & Fuentes (2019) que en los sistemas o circuitos de ventilación en minería subterránea existen dos tipos de conexiones para las galerías, en serie y en paralelo:

- Circuitos en serie: En este tipo de sistemas el flujo de aire se mueve sin ramificaciones, las cuales se conectan una tras otra permaneciendo constante y sin fugas de ningún tipo (fig. 2.9).

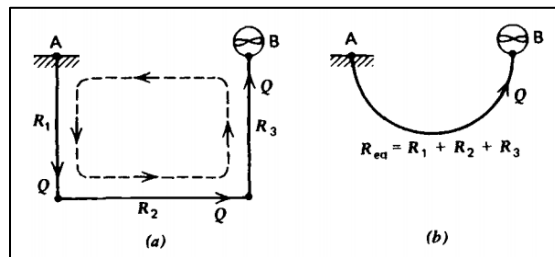


Figura 2.9 Esquema de circuito en serie (Hartman y otros, 1997).

Los caudales constantes en todo el largo de las galerías son representados en la fórmula 2.9:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n \quad (2.9)$$

En el caso de las resistencias, la suma de las resistencias parciales da la total, esta se representa en la fórmula 2.10:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.10)$$

Finalmente, en la fórmula 2.11, muestra la caída de presión que al igual que la resistencia, la suma de sus parciales da la caída de presión total:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n \quad (2.11)$$

- Circuito en paralelo: En este sistema si hay ramificaciones. Se separan en un punto (nodo) en dos o más galerías (conductos) las cuales se unen en otro nodo (fig. 2.10).

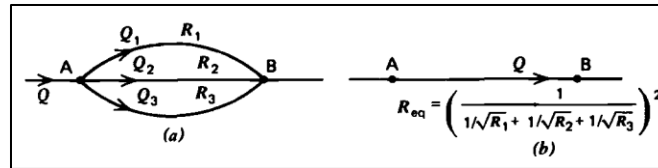


Figura 2.10 Esquema de circuito en paralelo (Hartman y otros, 1997).

Para el cálculo de los caudales se utiliza la fórmula 2.12 donde la suma de los caudales parciales da como resultado el caudal total:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (2.12)$$

La resistencia en un sistema en paralelo puede ser calculada usando la ecuación (fórmula 2.13). La suma de la raíz cuadrada del recíproco de cada una de las resistencias (parciales) del circuito, da el valor de la raíz cuadrada del recíproco de la resistencia del circuito completo. De lo anterior se puede despejar la resistencia aerodinámica del circuito como se muestra en la fórmula 2.13.

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} \rightarrow R = \frac{R_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}\right)^2} = \frac{R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\right)^2} \quad (2.131)$$

Finalmente, en uniones en paralelo, las caídas de presión son las mismas en todo el circuito. Se presenta en la fórmula 2.14.

$$H = H_1 = H_2 = H_3 = \dots = H_n \quad (2.14)$$

2.3 Aire y contaminantes

Para entender la problemática del flujo de aire en una mina subterránea, se debe conocer previamente algunos datos de los componentes involucrados. Estos son aire y los contaminantes con sus respectivas restricciones, las cuales, dependiendo las condiciones ambientales, afectan a la salud de las personas y a los equipos.

2.3.1 Aire

El aire es uno de los elementos esenciales para la vida y también para la combustión. El aire en atmosferas normales no existe en su estado seco y puro, ya que se encuentra acompañado de vapor de agua. Este se encuentra compuesto químicamente por los gases. Se presentan en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Composición del aire seco (Bolz & Tuve, 1973 en Hernández, 2019).

Gas	% En volumen	% En peso
Nitrógeno	78,09	75,53
Oxígeno	20,95	23,14
Anhidrido Carbónico	0,03	0,046
Argón y otros gases	0,93	1,284

El aire varía al ingresar a la mina principalmente disminuyendo el contenido de oxígeno, aumentando la cantidad de dióxido de carbono, vapor de agua, entre otros. También se le agregan material particulado en conjunto con gases contaminantes desprendidos de distintas labores.

2.3.2 Gases contaminantes

Como indica Córdoba & Molina (2011) “En las minas es común encontrar la presencia de gases, los cuales son producidos por diferentes fuentes, tales como explosivos, propiedades intrínsecas del material de la zona, descomposición de la madera, entre otros”.

Una de las clasificaciones de estos gases contaminantes son las que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de los gases (SERNAGEOMIN, 2015).

Irritantes asfixiantes	Sofocantes	Explosivos inflamables
Monóxido de carbono	Nitrógeno	Metano
Hidrogeno sulfurado	Anhídrido carbónico	Monóxido de carbono
Dióxido de nitrógeno (humos nitrosos)	Metano	Hidrogeno sulfurado
Anhídrido sulfuroso		

Siendo los gases asfixiantes los que producen una ausencia de oxígeno en el aire, son estos lo que ocupando el volumen de este último. Los gases o sofocantes tóxicos también producen

una disminución de oxígeno, pero este entra en el organismo causando daño en pulmones. Finalmente, los gases inflamantes o explosivos son:

- Gases explosivos: producen efectos nocivos, tales como intoxicación, envenenamiento, destrucción de los tejidos, alteración de órganos y en última instancia la muerte. Gases que mezclados con el aire producen en presencia de un iniciador (chispa), una explosión.

Las características de cada uno según SERNAGEOMIN (2015) son los siguientes:

- Monóxido de carbono (CO): Gas inodoro, incoloro, inflamable y tóxico (en gran cantidad). Este gas se obtiene mediante la combustión incompleta de materia carbonácea u orgánica, encontrándose comúnmente en los motores de combustión interna, principalmente en su tubo de escape. También se puede generar por el uso de explosivos. La concentración máxima permisible para 8 hrs. de exposición es de 40 ppm.
- Hidrogeno sulfurado (H₂S): También conocido como ácido sulfhídrico. Gas incoloro, con olor característico a azufre (olor a huevo podrido), con un gusto azucarado y soluble en agua. Se produce principalmente por la descomposición de la pirita (FeS), de sustancias orgánicas y finalmente por disparos en minerales que contienen azufre. 8 ppm es la concentración máxima para exposición de 8 hrs.
- Dióxido de nitrógeno (NO₂ o N₂O₄): Gas color pardo rojizo (a temperatura sobre 23°C), de sabor picante y algo dulce. Puede ser inflamable solo en presencia de oxígeno puro, ya que sin él no presenta riesgo de incendio. Se produce al detonar explosivos y dinamitas, durante las operaciones de soldadura y lo generan los escapes de los equipos a gasolina o diésel. La concentración en ppm máxima permisible para 8 hrs. de exposición es 2,4.
- Anhídrido sulfuroso (SO₂): Gas de sabor ácido, sin color, picante y con olor a azufre quemado. Se genera por la combustión de pirita, carbón con alto contenido de azufre y también por disparos en minerales con elevada cantidad de azufre. En estos últimos se pueden liberar H₂S y CO. La concentración máxima en un periodo de exposición de 8 hrs. es de 1,6 ppm.

- Nitrógeno (N): Este gas es inodoro, incoloro e inerte. Constituye el porcentaje más alto del aire con un 78,06% y encuentra en el aire también en como amoníaco. Se genera principalmente por los disparos en ausencia de oxígeno en el aire y en lugares con mala ventilación causa disminución de oxígeno. Con un 84% de nitrógeno en el aire es peligroso para la vida.
- Anhídrido carbónico (CO₂): Gas de sabor levemente ácido, sin color ni olor. Conformar el aire con un 0,03 a 0,06%. Se genera mediante la respiración humana o animales (en sitios confinados principalmente), por la combustión de sustancias que contiene carbón y siempre que haya una cantidad de oxígeno elevada. Puede darse por disparos y en los escapes de los equipos que utilizan motores diésel. 4.000 ppm es la concentración máxima que se permite en una exposición de un turno de 8 hrs.
- Metano (CH₄): Es principalmente el que compone el conocido gas grisú (95%). Gas insípido, sin color ni olor, el cual tiene un límite de explosividad de 5 a 15% en el aire. Se presenta principalmente en las fisuras de los mantos de carbón, en la descomposición de materias orgánicas y descomposición de maderas bajo agua. Con un 25% de metano en el aire produce asfixia por disminución de oxígeno.

2.4 Polvo en suspensión

“En el sentido corriente y general de la palabra, polvo son las minúsculas partículas sólidas que por diversas causas se pueden desprender y quedar suspendidas en la atmósfera como formando nubes” (Oficina Internacional del Trabajo, 1965).

Este material particulado tiene diferente composición química, tamaño y forma. Y este se produce principalmente por desgaste de material sólido de distinta procedencia. El polvo se puede encontrar suspendido en el aire y estar presente en las paredes, piso y techo de la mina.

Según Gastañaga & Yataco (1963) las principales causas que producen el polvo en la faena subterránea son la perforación, voladuras, remoción de material generado por los disparos carguío y descarga de material, desquinche y finalmente por enmaderado.

Se debe evitar la formación de material particulado o velar por que sea el mínimo. Si un sector se encuentra contaminado, impedir que circule personal por dicha área. Utilizar duchas

de agua en las operaciones para prevenir la formación de partículas. Y conservar el material fragmentado húmedo (5%) hasta su traslado (Ventius, 2016).

La composición general de material particulado puede contener sílice, la causa más conocida de las enfermedades de los trabajadores de la minería. De la misma forma, se pueden encontrar productos de la combustión incompleta del diésel. Estos últimos son normalmente controlados con un filtro en el escape del vehículo.

2.5 Ley vigente Chile

La ventilación en minería subterránea está regulada por el capítulo cuarto de la normativa de seguridad minera del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Según este organismo, se debe mantener el flujo de aire fresco y sacar el aire viciado. Todo esto, mediante una ventilación natural o auxiliar (SERNAGEOMIN, 2015). Asimismo, destaca la cantidad de aire por persona ($3 \text{ m}^3/\text{min}$) al interior de la mina, el rango de velocidad del caudal de aire, al igual que la concentración mínima de oxígeno (19,5%). En definitiva, indica las medidas de seguridad para resguardar la vida y equipos funcionales.

2.6 Método sin soporte: Block Caving – Panel Caving

Es el método de hundimiento de cuerpos masivos de mediana o baja ley conocido como *Block Caving* o *Panel Caving*. En este se obtiene como beneficio la reducción, mediante la eliminación en la superficie de residuos. La roca de este tipo de método tiene que ser medianamente competente y su roca de techo debe ser hundible.

Según Barboza (2019) es un método de bajo costo, pero requiere de una alta inversión en la infraestructura y desarrollo. Esto se compensa con su capacidad productiva que es la mejor de todos los métodos de extracción en minería subterránea.

Específicamente en el método *Panel Caving* como se observa en la figura 2.11 se realiza mediante un corte basal, avanzando en una dirección progresiva. Lo anterior para ir construyendo las distintas áreas y realizar la extracción del mineral a medida que ocurre el hundimiento (Barboza, 2019).

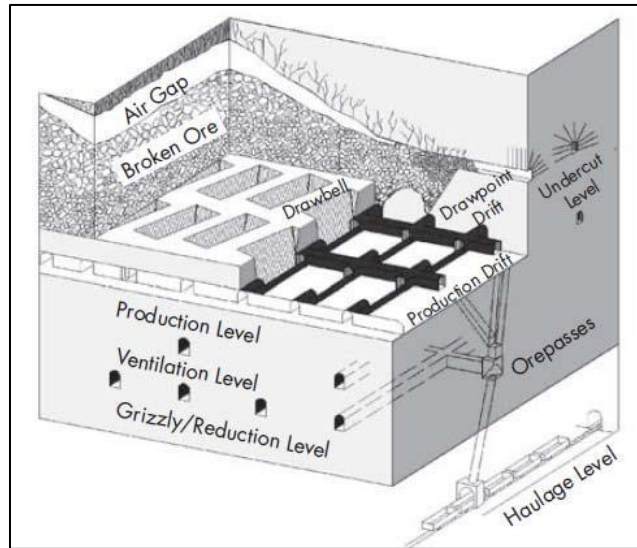


Figura 2.11 Infraestructura típica de una mina explotada por panel *Caving* con hundimiento convencional (Darling, 2011).

Hernández (2019) indica que tanto en *Block Caving* como en *Panel Caving* se encuentran los mismos niveles de explotación y que se trabajan de forma horizontal. Los niveles se mencionan a continuación:

- Nivel de hundimiento: Nivel donde se genera en primera instancia de fractura y luego fluye el mineral al nivel de extracción específicamente en los puntos de este. Lo anterior, producido por la tronadura realizada a través de las galerías paralelas. La ubicación de este nivel es por sobre el de extracción.
- Nivel de producción: Existen dos tipos de planificación en este nivel. La malla *herringbone* o más conocida como espina de pescado y la malla El Teniente. Estas mallas son de gran importancia debido a que a partir de ellas se define el sistema de extracción del mineral.
- Subnivel de ventilación: Nivel que proporciona flujo de aire para todos los demás niveles, tanto flujo de inyección como de extracción. Por esto último por lo general son dos niveles los que se planifica entre en el nivel de extracción y transporte. También se utilizan chimeneas en el nivel de extracción siempre en zonas adecuadas.
- Nivel de transporte: Finalmente, este nivel depende principalmente del método utilizado referente al transporte del mineral. Este puede ser mediante camiones, correas transportadoras, rieles o mixto (combinación de los anteriores).

2.6.1 Ventilación en método Caving

El nivel o subnivel más importantes mencionados anteriormente es el de ventilación, debido a que proporciona el caudal requerido para preservar la vida y permite el correcto funcionamiento de los equipos.

Según Darling (2011), la planificación temprana de este nivel ayuda que no haya problemas posteriores. Un ejemplo de esto son los LHD (*Load Haul Dump*) que operan en las galerías paralelas, a estas hay que proporcionar bastante aire para que trabajen dichos equipos. En varios sectores el control y la regulación del caudal de aire puede ser crítico debido a la mantención de los rangos ideales de gases y calor.

El polvo en suspensión es otro factor preocupante. Se debe tener conexiones de los piques de traspaso para disminuir las partículas que se generan. La generación de polvo cada vez que se descarga mineral, puede causar poca visibilidad, obstruir los filtros de LHD como también su aire acondicionado. Con la conexión del nivel de extracción a diferentes intersecciones, la regulación de aire se puede adaptar y así sufrir una pequeña reducción, esto retirando el polvo y sin influir en el flujo de mineral que hay del pique de traspaso. Finalmente se debe tener conexiones de escape para todas las áreas de trituración que se requieran (Darling, 2011).

En la siguiente figura 2.12 se visualiza el esquema de ventilación mediante el método *Caving*.

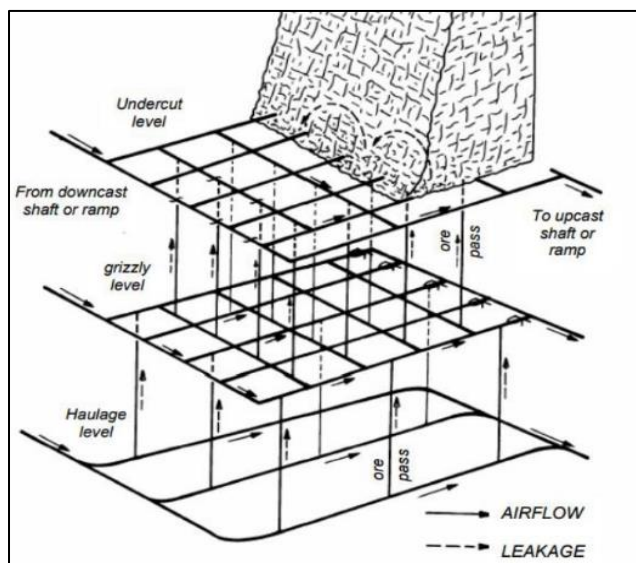


Figura 2.12 Sistema de ventilación en método de explotación *Caving* (McPherson, 1993 en Hernández, 2019).

2.7 Arreglos ortogonales

Un arreglo ortogonal es una herramienta de ingeniería que disminuye y/o elimina casos de diseño estadístico. Este método fue una invención del matemático francés Jacques Hadamard a principios de 1897 (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Los arreglos ortogonales facilitan el trabajo de experimentos más complejos donde implican varios factores, esto debido a su simplicidad y fácil adaptabilidad.

Arreglo ortogonal también es definido como un modelo de selección de una cantidad de experimentos que representan a la población. Esto procurando que cada uno de los atributos (por separado) sean evaluados mediante su resultado, en otras palabras, generando la mínima interferencia entre ellos (Soto, 1996).

A continuación, se presenta la nomenclatura de los arreglos (fórmula 2.15):

$$L_a b^c \quad (2.15)$$

Donde:

L_a = Número de corridas experimentales (número de filas).

b = Números de niveles de cada factor (número de niveles).

c = Número de columnas en el arreglo (número de columnas).

Si bien los arreglos suelen tener diversos factores, los más comunes son aquellos donde los factores tienen los niveles de dos y tres.

2.7.1 Diseño de experimentos mediante arreglo ortogonal

Como lo indica Soto (1996), los arreglos ortogonales se representan mediante una matriz de números que se distribuyen en filas y columnas. En las filas se encuentra el estado de los factores (escenarios o niveles) del experimento realizado. En tanto sus columnas representan una condición específica la cual puede cambiar de un experimento a otro. Es llamado arreglo ortogonal ya que los efectos del resultado de factores de los experimentos se pueden evaluar uno a uno.

En la tabla 2.3 se visualiza algunos de los arreglos ortogonales más utilizados. Cabe destacar que dependiendo del experimento se escoge el arreglo a utilizar.

Tabla 2.3. Matrices ortogonales estándar (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Serie de dos niveles	Serie de tres niveles	Serie de cuatro niveles	Serie de niveles mixtos
$L_4 2^3$	$L_9 3^4$	$L_{15} 4^5$	$L_{18}(2^1, 3^7)$
$L_8 2^7$	$L_{27} 3^{13}$	$L_{64} 4^{21}$	$L_{36}(2^{11}, 3^{12})$
$L_{16} 2^{15}$	$L_{81} 3^{40}$		
$L_{32} 2^{31}$			
$L_{12} 2^{11}$			

Ya definido los factores y niveles de estos, se calcula el grado de libertad para elegir el arreglo correcto (Stanziola, 2016). Para ellos se utiliza la fórmula 2.16.

$$DOF = (\text{número de niveles} - 1) \times \text{número de factores} \quad (2.16)$$

Donde:

DOF = Grados de libertad.

También se calcula la cantidad mínima de experimentos mediante la fórmula 2.17.

$$\text{Mínima cantidad de experimentos} = DOF + 1 \quad (2.17)$$

El método se puede entender mejor mediante el siguiente ejemplo. A continuación, se muestra el arreglo ortogonal de $L_8 2^7$ (tabla 2.4).

Tabla 2.4. Ejemplo de un arreglo ortogonal $L_8 2^7$ (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

N° de experimento	Columnas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Los valores 1s y 2s presentes en la matriz muestran el nivel de los factores (alto y bajo). Se distinguen 8 corridas de experimentos en total, en donde cada columna tiene la misma cantidad de 1s y 2s. Cualquier par de columnas que se escoja tiene solo cuatro combinaciones (1, 1), (1, 2), (2, 1) y (2, 2), esto muestra que el par de columnas es ortogonal. Este arreglo ortogonal se puede utilizar para hasta 7 factores. (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

2.8 Análisis de regresión

El análisis de regresión es una herramienta estadística que permite analizar la relación que existen entre variables.

2.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson

Representado por la letra “R”, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que mide el grado de relación lineal que existe entre dos variables (X e Y). Según Fallas (2012), su valoración oscila entre el 1 y -1, siendo 1 (o -1) la relación perfecta entre las variables y 0 cuando no existe alguna. A continuación, se presenta la fórmula 2.18 para calcular el coeficiente.

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{s_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s_Y} \right) \quad (2.18)$$

Donde:

$\left(\frac{X_i - \bar{X}}{s_X} \right)$ = Valores estandarizados de X.

$\left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s_Y} \right)$ = Valores estandarizados de Y.

\bar{X} = Media de X.

\bar{Y} = Media de Y.

s_X = Desviación estándar de X.

s_Y = Desviación estándar de Y.

2.8.2 Coeficiente de determinación

Este coeficiente es conocido como R-cuadrado (R^2), coeficiente de determinación o coeficiente de determinación múltiple (cuando hay múltiples regresiones). R^2 indica la proporción de la variable de respuesta (Y) respecto a la relación con las variables que la

predicen (X). A diferencia del R, el R-cuadrado varía entre 0 y 1. Mientras el valor sea más cercano a 1, mejor se ajustan el modelo a los datos (Martínez, 2005). En las fórmulas 2.19 y 2.20 se aprecia lo anterior.

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{STC} \quad (2.19)$$

Donde:

SCE = Suma de cuadrados del error.

STC = Suma de cuadrados de la desviación en torno al promedio de los datos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (2.20)$$

Donde:

Y_i = Datos de muestra.

\bar{Y}_i = Datos predichos de Y.

\hat{Y}_i = Media de los valores de Y.

2.8.3 Coeficiente de determinación ajustado

A medida que se aumentan las variables independientes, incrementa el coeficiente de determinación y no es exacto. Para esto está el coeficiente de determinación ajustado (\bar{R}^2), corrige el valor de R^2 cuando es múltiple (Martínez, 2005). La ecuación (fórmula 2.21) para obtener este valor, es la siguiente.

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{k - 1} \quad (2.21)$$

Donde:

n = Número de observaciones.

k = Número de variables independientes.

2.8.4 Error estándar de estimación

“Esta medida, llamada error estándar de la estimación, mide la dispersión de los puntos de datos en la dirección Y alrededor de la línea ajustada” (Hanke & Wichern, 2010).

Error estándar de estimación mide la diferencia entre los valores reales Y de los valores estimados \hat{Y} en el modelo. La ecuación (fórmula 2.22) de ellos se encuentra a continuación.

$$S_{YX} = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{n - 2}} \quad (2.22)$$

2.9 Inteligencia artificial (IA)

Algunos autores definen la inteligencia artificial como:

“La inteligencia artificial es la rama de la ciencia de la computación que se ocupa de la automatización de la conducta inteligente”. El termino de Inteligencia artificial como tal apareció por primera vez el año 1956 de mano John McCarthy en la Universidad de Dartmouth (Gutiérrez, 2011).

La *Encyclopedia of Artificial Intelligence* indica que: “La IA es un campo de la ciencia y la ingeniería que se ocupa de la comprensión, desde el punto de vista informático, de lo que denomina comúnmente comportamiento inteligente. También se ocupa de la creación de artefactos que exhiben este comportamiento” (Pino y otros, 2001).

“La inteligencia artificial es el estudio de las ideas que permiten ser inteligentes a los ordenadores”, H. Winston (Pino y otros, 2001).

“La inteligencia artificial es la ciencia de construir máquinas para que hagan cosas que, si las hicieran los humanos, requerirían inteligencia” Escolano y otros (2003).

En tanto, se entenderá en la presente memoria por inteligencia artificial como: aquella ciencia que se encarga de la construcción, diseño y desarrollo de métodos y/o algoritmos capaces de realizar funciones de modo inteligente como lo hace el cerebro humano. Algunos ejemplos

que vemos en nuestra vida diaria de la aplicación son: el reconocimiento de imágenes, reconocimiento de voz, el correo electrónico, teléfonos celulares, entre otros.

Dentro de la inteligencia artificial se encuentran otros conceptos como es *Machine Learning* y *Deep Learning*. En la figura 2.13 se puede visualizar un diagrama de lo anterior.

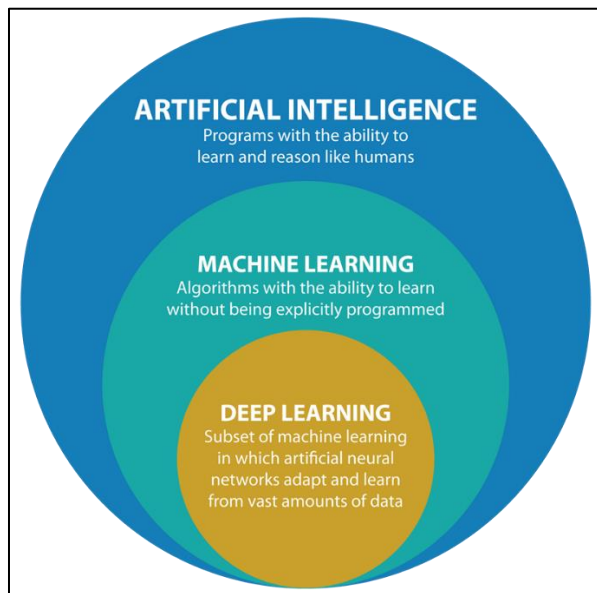


Figura 2.13 Diagrama de relación entre inteligencia artificial, *Machine Learning* y *Deep Learning* (Medium, 2018).

2.10 Machine Learning (ML)

“El campo de estudio que brinda a las computadoras la capacidad de aprender sin ser programadas explícitamente” Arthur Samuel (Balparda, 2020).

El *Machine Learning*, también conocido como aprendizaje automático, es un subconjunto de la inteligencia artificial que se entrena mediante datos existentes, en forma de ejemplos, para hacer predicciones o toma decisiones. En otras palabras, las maquinas aprender por sí mismas a partir de un conjunto de datos, esto ajustan parámetros para su efectividad.

“Se dice que un programa de computadora aprende de la experiencia E con respecto a alguna clase de tareas T y medida de desempeño P, si su desempeño en las tareas T, medido por P, mejora con la experiencia E” Tom Mitchell (Balparda, 2020).

Los tipos más utilizados del *Machine Learning* son: Aprendizaje supervisado y no supervisado.

2.10.1 Aprendizaje supervisado

En el aprendizaje supervisado, existe una relación entre el conjunto de datos que se le entrega y el valor de salida (Pineda, 2021). Una vez empleado el entrenamiento (con datos etiquetados) se pueden cambiar los datos y sin las etiquetas de la salida correcta puede predecir un resultado. Existen tipos de problemas dentro del aprendizaje supervisado: La regresión y la clasificación.

- Regresión: Método de aprendizaje que a partir predecir valores continuos. En la regresión se identifica la relación entre las entradas y la o las salidas.
- Clasificación: En este aprendizaje se entrena un algoritmo mediante la clasificación en los datos de entrada. En este caso son valores son de tipo discreto.

2.10.2 Aprendizaje no supervisado

A diferencia del anterior este aprendizaje los datos no cuentan con etiquetas para entrenamiento. Se busca una relación entre los datos de entrada y salida mediante alguna característica similar (Pineda, 2021). Los problemas que se presentan en este método son:

- Agrupamiento: En el agrupamiento (o *clustering*) se agrupan datos mediante jerarquías, distancias o similitud.
- Reducción: En este problema se intenta reducir el número de variables y proyectarlo en otro espacio multidimensional disminuyendo el costo computacional.

2.11 Deep Learning (DL)

Por otro lado, el *Deep Learning* o aprendizaje profundo, es un subcampo del *Machine Learning* y utiliza distintas estructuras de redes neuronales. Su nombre es debido a la gran cantidad de capas que utiliza el modelo. A medida que el modelo se entrena con los datos, las capas aprenden de forma automática (López, 2021).

2.11.1 Redes neuronales artificiales

Dentro de la IA, las redes neuronales artificiales (ANN) son un campo muy importante. Estas se inspiran en el cerebro humano, principalmente en el comportamiento de las redes

neuronales biológicas (fig. 2.14). Las ANN tienen varias características similares a las humanas como su capacidad de aprendizaje, funcionalidad en tiempo real, activación mediante estímulos o entradas, entre otras.

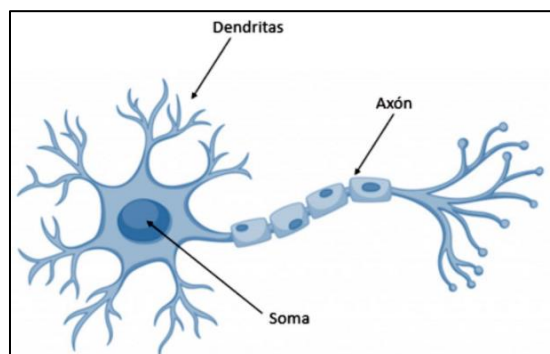


Figura 2.14 Neurona biológica con sus principales partes (Olivera, 2019).

Las redes neuronales artificiales simples contienen tres capas: una de entrada, otra oculta y una de salida. Todas ellas conectadas a través de nodos formando una red. Las capas tienen neuronas artificiales, las cuales a medida que reciben un estímulo se activan. Si hay más de una entrada, las neuronas combinan estas, dando ponderaciones a cada una de ellas generando la salida (Krishnakumar y otros, 2015)

Krishnakumar y otros (2015) destaca que, para el entrenamiento de la red neuronal, se ajusta los pesos de las entradas para que la salida se parezca lo más posible a los datos conocidos. Esto se realiza repetidas veces y se envían los datos de validación a la red para ver si es suficiente el entrenamiento dado o no.

2.11.1.1 *Perceptrón multicapa*

“La red neuronal conocida como perceptrón multicapa es un modelo neuronal con “propagación hacia adelante”, que se caracteriza por su organización en capas de celdas disjuntas, de forma que ninguna salida neuronal constituye una entrada para las neuronas de la misma capa o de capas previas (Hilera y Martínez, 1995 in Flores y Fernández, 2008).

Conocido también como MLP (*Multi Layer Perceptron*), la red está formada por conjuntos de neuronas denominados capas o niveles. La capa actual recibe las salidas de la capa anterior y la cantidad de capas son ilimitadas.

Como lo indica IBM (2021), en este tipo de red neuronal se genera un modelo predictivo de las variables de entrada a las de salida. En la figura 2.15 se presenta una red neuronal sintética con sus tres capas.

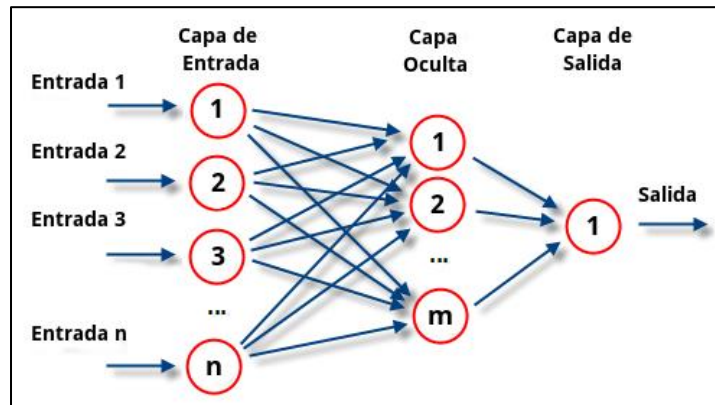


Figura 2.15 Red neuronal artificial, perceptrón multicapa (Innovation, 2019).

Como se menciona al comienzo la propagación en MLP es hacia adelante (*feedforward*). Las capas ocultas utilizan funciones de propagación

El cálculo interno que realizan las capas ocultas es una suma ponderada de los valores de entrada (X). Esta ponderación viene dada por los pesos que se le asigna a las X . Los pesos indican con qué probabilidad afectará los datos de entrada a la neurona, añadiendo también a este en cada capa, el sesgo (*bias*) correspondiente. En conclusión, el cálculo que se realiza en las neuronas es una regresión lineal.

2.11.1.2 Funciones de activación

Como indica Serrano y otros (2009), la función de activación es la función no lineal que se emplea en el valor de salida de la neurona.

Las funciones de activación ($f(x)$), de las redes neuronales, toman el resultado de las regresiones y lo modifican, esto añadiendo valores no lineales. Las variaciones añadidas dependerán de la función que se emplee. Las funciones más utilizadas se detallan a continuación.

- Función sigmoide (*Sigmoid*): Esta función transforma los valores en un intervalo $[0,1]$, interpretando 0 para los más bajos y 1 para los más altos. Tiene una lenta

convergencia, en la última capa tiene buen rendimiento, afecta al gradiente. Se presenta la función en la fórmula 2.23 y en la figura 2.16.

$$f(x) = \frac{1}{1 - e^{-x}} \quad (2.23)$$

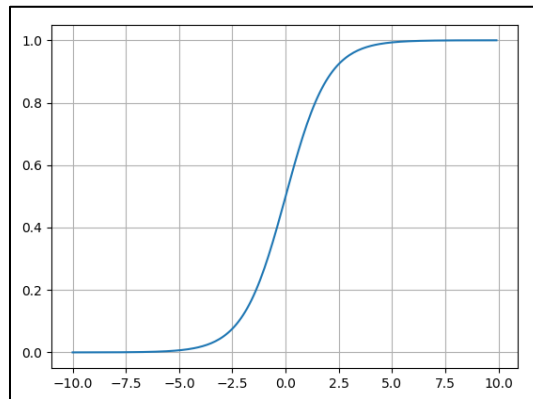


Figura 2.16 Gráfico de función sigmoide (Ponce, 2021).

- Función tangente hiperbólica (Tanh): En este caso los valores los transforma en una escala de -1 al 1. Se representa el -1, para valores bajos y 1 para los valores más altos. Mata al gradiente, no tiene de centro el 0, su rendimiento es bueno en la última capa y su convergencia es lenta. En la fórmula 2.24 se presenta la función, al igual que en el gráfico 2.17.

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (2.24)$$

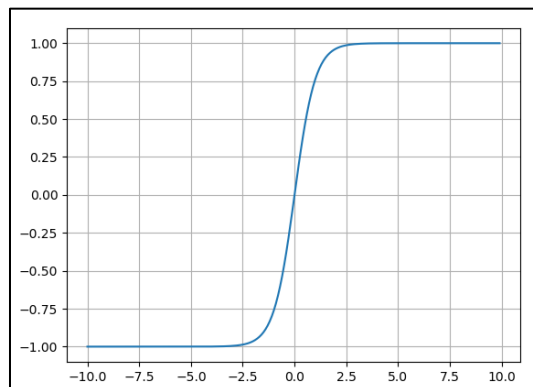


Figura 2.17 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).

- ReLU (*Rectified Lineal Unit*): La función ReLU anula los valores negativos tomando solo los positivos. Si el valor es menor a 0 la salida será 0, por otro lado, Para valores positivos su salida aumenta en conjunto con la entrada. Esta función es la más empleada por sus buenos resultados. No es acotada, tiene buen desempeño con diferentes redes, se comporta bien con imágenes, pero se pueden morir varias neuronas. La fórmula 2.25 y la figura 2.18 la representan.

$$f(x) = \max(0, x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

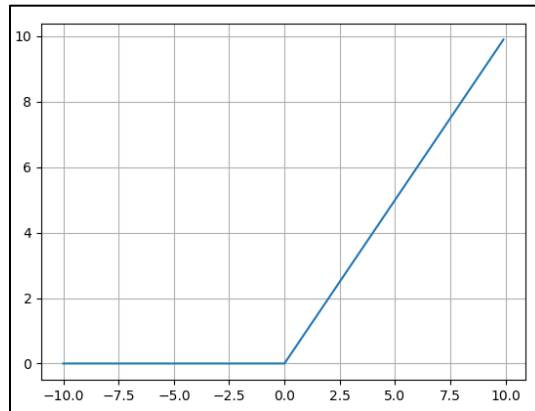


Figura 2.18 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).

2.11.1.3 Función de costo

Esta función de costo, también conocida de pérdida (*loss*) mide la diferencia entre los valores reales o los predichos por el modelo de la red (Amat, 2021). Mientras el costo sea menor, más exactas son las predicciones, 0 es exacto el valor real. Su utilización depende del tipo del problema que se tenga, clasificación o regresión. Los más conocidos son:

- Error cuadrático medio (MSE): Es el costo más utilizado en regresión, este calcula la diferencia entre los valores reales y predichos. A medida que disminuye el MSE

es mejor la precisión del modelo predictivo. A continuación, se presenta en la fórmula 2.26.

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{Y}_i - Y_i)^2}{n} \quad (2.26)$$

- Error absoluto medio (MAE): Se aplica para medir la precisión mediante la suma media de los valores absolutos. Las características principales son la penalización es alta y de fácil interpretación. En la fórmula 2.27 se aplica esta función.

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{Y}_i - Y_i|}{n} \quad (2.27)$$

- Raíz cuadrada media (RMSE): Al igual que el MSE también mide la precisión, pero con la raíz cuadrada media de la diferencia entre el valor real y el predicho. Es difícil de interpretar, penaliza los valores altos y no optimiza bien las regresiones. En la fórmula 2.28 se puede apreciar la función.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2.28)$$

2.11.1.4 Backpropagation

El *Backpropagation* es un algoritmo que permite medir la influencia que tiene los peso y sesgo o *bias* en las predicciones de la red neuronal (Amat, 2021). En otras palabras, nos indica la velocidad de cambio del costo al variar los pesos y *bias*.

El *backpropagation* calcula las derivadas parciales de la función de costo para cualquier peso (w) o *bias* (b), ese es su objetivo. Las derivadas se presentan de la siguiente forma: $\frac{\partial C}{\partial w}$, $\frac{\partial C}{\partial b}$.

Para las redes neuronales, las derivadas parciales del error indican que tanto influyen los pesos y *bias* en el error global obtenido, así es posible saber cuál debe ajustarse. Calcula los

errores de las neuronas de la última capa y se propaga hacia atrás, hacia las capas anteriores, a modo de ver cuál es la penalización o culpa de resto.

2.11.1.5 Descenso del gradiente

En el entrenamiento de las redes neuronales, el descenso del gradiente (*gradient descent*) es el algoritmo más empleado. Este, optimiza permitiendo minimizar una función actualizando los sus parámetros (pesos y *bias*) en dirección del valor negativo de su gradiente (Amat, 2021).

El objetivo, como ya se dijo anteriormente, se debe reducir el error, buscando el mínimo global.

Hay varias alternativas de optimizadores. Las variaciones dependen del número de muestras que en cada iteración se inserten:

- Descenso del gradiente estocástico (*stochastic gradient descent* - SGD): En este método en cada iteración aleatoriamente se inserta una sola muestra para que no ocurra estancamiento. La desventaja en este descenso de gradientes es que es muy lento por todas las iteraciones que se realizan.
- Descenso del gradiente en mini-lotes (*minibatch*): A diferencia del anterior, en cada iteración, se introducen las muestras en grupos haciendo más rápido el entrenamiento. Solo se debe variar la cantidad de muestras (N) para lograr un buen entrenamiento y la justa cantidad de ciclos.
- Descenso del gradiente en lotes (*batch*): Para este caso, los datos se introducen a la misma vez y sea de forma aleatoria. Al insertar de esta manera los datos puede ocurrir un estancamiento al calcular el gradiente, esto dará consecuencia mínimas variaciones.

3. METODOLOGÍAS

3.1 Datos

Se trabajó con datos reales de una mina con método de explotación *Panel Caving*. Adicionalmente se consideraron datos sintéticos de una mina artificial. Estos pudieron ser modificados o no respecto a las decisiones de las variables influyentes en el flujo de aire.

3.2 Software

Para el desarrollo de esta memoria, se utilizaron tres *softwares*. El primero, AutoCAD para diseñar el *layout* de la mina *Panel Caving*. El segundo, VentSim, se utilizó para realizar la simulación del flujo de aire en el *layout* del diseño anteriormente. También, se utilizó, IBM SPSS Statistics para realizar el método de Orthoplan (ortogonal) y finalmente, el lenguaje de programación Python para entrenar las redes neuronales.

3.2.1 AutoCAD

Software perteneciente a la compañía norteamericana Autodesk. Es utilizado principalmente por ingenieros, arquitectos, diseñadores, entre otros. Este programa sirve para la edición de planos en dos y en tres dimensiones facilitando la producción en serie.

Autodesk (2010) señala que en esta herramienta digital se puede realizar la creación, anotación y edición de geometría en 2D. Al igual que modelos con sólidos, superficies y objetos de malla en 3D. Cuenta con avanzadas características, pudiendo modificar desde colores, líneas y texturas, hasta importar archivos de otros *softwares* e importar a distintas escalas.

3.2.2 VentSim

VentSim es utilizado para ayudar a mejorar, optimizar y diseñar los sistemas de redes de ventilación en minería subterránea mediante la simulación. Ofrece varias herramientas para el usuario, por ejemplo, la entrega de registro de los caudales y presiones obtenidos de las simulaciones. También, ayuda en la planificación de costos y requerimientos para la ventilación en corto, mediano y largo plazo (VentSim, 2019).

El *software* no solo lo pueden utilizar ingenieros en minas o funcionarios que trabajan en ventilación. Las personas con vaga experiencia igualmente lo pueden ejecutar, ya que su

interfaz es amigable con el usuario y solo basta con ingresar los datos requeridos. Dentro de las simulaciones se encuentra la distribución y concentraciones de humo y polvo en caso de emergencia, entregando un análisis de calor, humedad entre otros.

VentSim facilita el trabajo ya que permite importar y exportar archivos en 2D y 3D. Siendo esta última, una de las más importantes características para visualizar la red de ventilación en los distintos niveles y ver el comportamiento del flujo.

3.2.3 IBM SPSS Statistics

Software que acepta casi cualquier tipo de archivo de datos y puede crear gráficos, informes, estadística, diagrama de distribuciones, etc. Permite trabajar con bases de datos de gran volumen de forma muy sencilla.

Como indica IBM (2011b), cuenta con un amplio conjunto de instrumentos de estadística. En este se puede trabajar con una única interfaz integrada en el cual se puede ejecutar variadas funciones como estadística descriptiva, avanzada y regresiones. Asimismo, se pueden visualizar la creación de gráficos, tablas, árboles de decisión, entrenar redes neuronales, generación de diseño ortogonal, entre otras.

SPSS Statistics posee una ventana de sintaxis de comandos que permite automatizar y guardar las tareas realizadas. Este código abierto permite utilizar algunas funciones que no están dentro de los menús o cuadros de dialogo del programa, como por ejemplo el análisis conjunto o Conjoint (IBM, 2011a).

3.2.4 Spyder (The Scientific Python Development Environment)

Spyder es un desarrollador integrado multiplataforma de código abierto (IDE) para lenguaje de programación Python, este es diseñado por y para científicos, ingenieros y analistas de datos. Los componentes básicos de un potente IDE son: editor, para escribir el código antes de evaluarlo; consola o terminal Python, para ejecutar un código; explorador de variables, se pueden ver y editar las variables generadas durante la ejecución; depurador, para realizar seguimiento de los pasos de la ejecución del código; ayuda, donde se pueden encontrar la documentación de las funciones, clases, módulos que se estén usando en la terminal; gráficos, este panel muestra las figuras creadas durante la ejecución del código; entre otras herramientas (Spyder, 2020).

Ya mencionado el desarrollador y sus características, se describe el lenguaje de programación Python. Este, se trata de un lenguaje interpretado o de script, con tipado fuerte y dinámico, multiplataforma y un sistema de programación orientado a objetos. El lenguaje de Python es de fácil uso, potente y que ofrece mucha estructura y soporte para programas grandes, al igual que mayor capacidad para comprobar errores. Y, siendo un lenguaje de muy alto nivel, tiene tipos de datos de alto nivel incorporados como listas flexibles y diccionarios (Python Software Foundation, 2021).

3.3 Procedimiento

En base a los datos entregados, se procedió a crear los *layout* de los niveles de la mina utilizando el *software* AutoCAD, cada uno con sus respectivas dimensiones y especificaciones. Finalmente, se exportó para utilizarlo en el siguiente programa.

Una vez que se obtuvo el archivo proveniente de AutoCAD, se importó desde el programa VentSim y se escogió el nivel de hundimiento para trabajar en conjunto con sus subniveles de ventilación. En él se identificaron las variables influyentes en el flujo de ventilación, en conjunto con la determinación de la cantidad y posición de estas. La cantidad de variables escogidas fueron: 5 ventiladores de inyección, 4 ventiladores de extracción y 6 compuertas. Estos representaron a los equipos de ventilación encargados de la inyección y extracción de aire, al igual que las compuertas en el nivel de hundimiento. Todo lo anterior con una previa verificación de las dimensiones de las áreas ya creadas. Tanto los ventiladores (inyección y extracción) como las compuertas, se les dio una numeración para su identificación y los estados *on/off* o abierto o cerrado.

Luego, se realizó el diseño de los escenarios posibles para sistema de ventilación mediante el arreglo ortogonal, ingresando los datos a SPSS Statistics. Trabajando con el método Orthoplan, se obtuvo una población representativa de 16 escenarios. Para darle temporalidad al modelo se diseñó un código de Python. Se realizaron variaciones cada 5 minutos (hasta 1 hora) a cada uno de los escenarios principales, lo que dio paso a una cantidad de 208 escenarios en total.

Ya con estos escenarios se escogieron 6 puntos para su evaluación. Se realizaron las simulaciones en VentSim y como resultado se consiguieron los caudales para cada uno de los puntos de los escenarios.

Se realizaron tres análisis distintos de la base de datos con los 208 escenarios: Árbol de regresión, regresión lineal y redes neuronales. Se obtuvieron sus resultados de los cuales las redes neuronales fue la mejor.

Teniendo esta información se entrenaron las redes neuronales mediante un código en lenguaje Python en Google Colaboratory, esto con el fin de poder avanzar al objetivo final. Se uso la base de datos original, con variables de forma 0 y 1, también se usó también una nueva base con los valores de los caudales de los ventiladores. Esto solo para ver la variación en el resultado al entrenar la red debido a que en el paso siguiente solo se necesita la segunda opción.

Ya con las predicciones de los flujos en los puntos, se implementó también en Google Colaboratory un modelo de control optimal minimizando costos sujeto a un cumplimiento de disponibilidad de aire. Se implemento un código principal, con las redes neuronales inserta en una función, con supuestos de aire requerido, valor por kilovoltio hora (kWh) y con un ciclo de 500 iteraciones. El resultado indica los caudales óptimos para cada ventilador, la opción de (abierta o cerrada) las compuertas con el costo más bajo encontrado.

A continuación, se presenta un esquema paso a paso de la metodología (fig. 3.1).

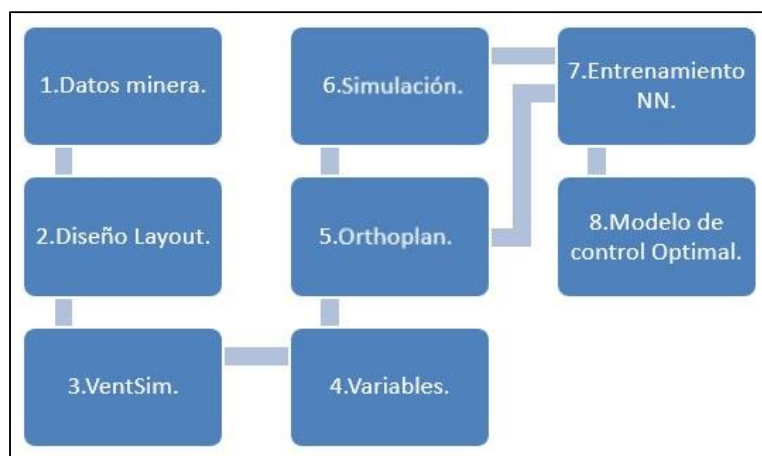


Figura 3.1 Esquema de metodología (Elaboración propia).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Características de la Mina y Sistema de ventilación

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, se trabajó con datos reales de una mina con método de explotación *Panel Caving* (con malla de extracción tipo teniente) sumado a datos sintéticos de una mina artificial. Dentro de la información entregada se encuentran datos para el diseño de dos niveles con su respectivo nivel de ventilación y cantidad de ventiladores de inyección y extracción. También el caudal, presión y eficiencia de ventiladores principales. En la siguiente figura (fig. 4.1) se presenta el *layout* completo.

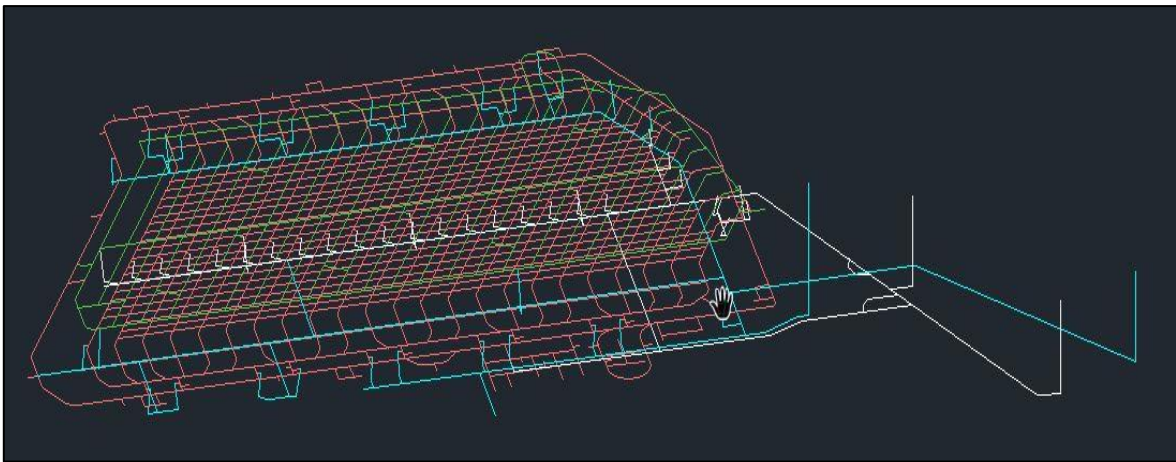


Figura 4.1 Layout completo de la mina en AutoCAD (Elaboración propia).

Para el caso de estudio, dada la complejidad de análisis al trabajar con la cantidad de variables que se generan en el *layout* completo, se vio solamente un nivel con su respectiva ventilación.

La mina se encuentra ubicada a un nivel de 1.992 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y solo se utilizó un nivel y dos subniveles: Nivel de hundimiento, subnivel de inyección y subnivel de extracción. Cabe destacar que el nivel de ventilación está formado por los subniveles indicados anteriormente. Con la información anterior se realizó un diseño aproximado de la mina. En la figura 4.2 del *software* AutoCAD se aprecia el diseño de esta.

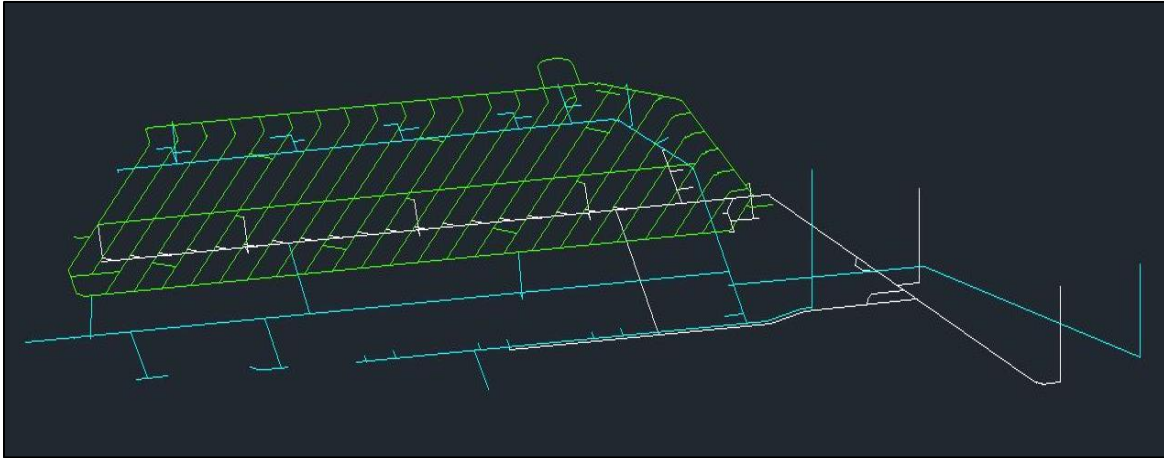


Figura 4.2 Layout del nivel de hundimiento en AutoCAD (Elaboración propia).

En la tabla 4.1 se detallan las cotas tanto del nivel como de los subniveles.

Tabla 4.1 Cota de los niveles de la mina.

Nivel	Cota (m s.n.m.)
Hundimiento	1.992
Inyección	1.954
Extracción	1.944

Los subniveles de inyección y extracción cuentan cada uno con dos chimeneas (que se detallan más adelante), lugar donde se encuentran los ventiladores principales. Los datos disponibles de los ventiladores para trabajar en esta memoria se encuentran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos de ventiladores principales disponibles.

Nivel	Caudal (m ³ /s)	Presión (Pa)	Eficiencia (%)
Inyección	179	1.415	74
Extracción	186	1.320	74

También se utilizan ventiladores auxiliares para los niveles de hundimiento. A continuación, en la tabla 4.3 se detallan las características de ellos.

Tabla 4.3 Datos de ventiladores auxiliares disponibles.

Nivel	Caudal (m ³ /s)	Presión (Pa)	Eficiencia (%)
Inyección	26	970	80
Extracción	22	405	80

4.1.1 Nivel de hundimiento

El nivel de hundimiento cuenta con una galería principal en el centro, la cual esta interceptada por veintidós galerías secundarias en un ángulo de 30° . Posee nueve puntos que se conectan con chimeneas al nivel de ventilación, cada uno cuenta con su ventilador propio. En la parte central se encuentran cinco puntos de inyección donde ingresa el aire fresco para todos los sectores. Por otro lado, el aire viciado es extraído por los cuatro puntos en los sectores extremos del *layout*. Este nivel se encuentra a una altura de 1.992 m s.n.m. En la figura 4.3 se puede visualizar una vista en planta del nivel de hundimiento realizada en el *software* VentSim.

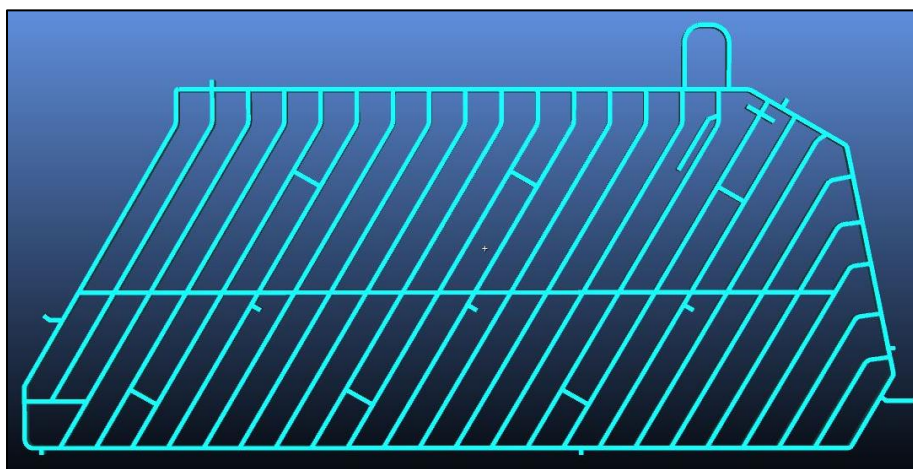


Figura 4.3 Vista en planta del nivel de hundimiento en VentSim (Elaboración propia).

4.1.2 Subnivel de inyección

El subnivel de inyección, perteneciente al nivel de ventilación, cuenta con dos chimeneas de 103 m y 105 m de largo conectadas a la superficie, las cuales tienen un diámetro de 4 m y 5 m respectivamente. Como ya se mencionó anteriormente la inyección de aire de este subnivel es principalmente a través de la galería central y se encuentra en la cota 1.954 m s.n.m. En la figura 4.4 se visualiza el subnivel anteriormente mencionado.

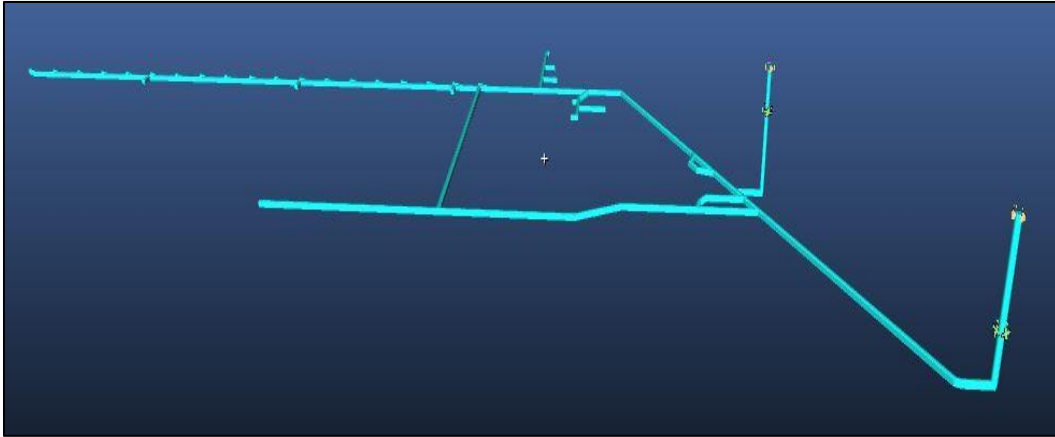


Figura 4.4 Vista en planta del subnivel de inyección en VentSim (Elaboración propia).

4.1.3 Subnivel de extracción

Al igual que el subnivel anteriormente nombrado, cuenta con dos chimeneas, una con 103 m y otra con 150 m de largo. Estas tienen un diámetro de 4 m y 5 m respectivamente. La extracción del aire viciado es por las galerías externas del subnivel. La cota en la que se encuentra es de 1.944 m s.n.m. En la figura (fig. 4.5) que se ve a continuación, se aprecia este subnivel.

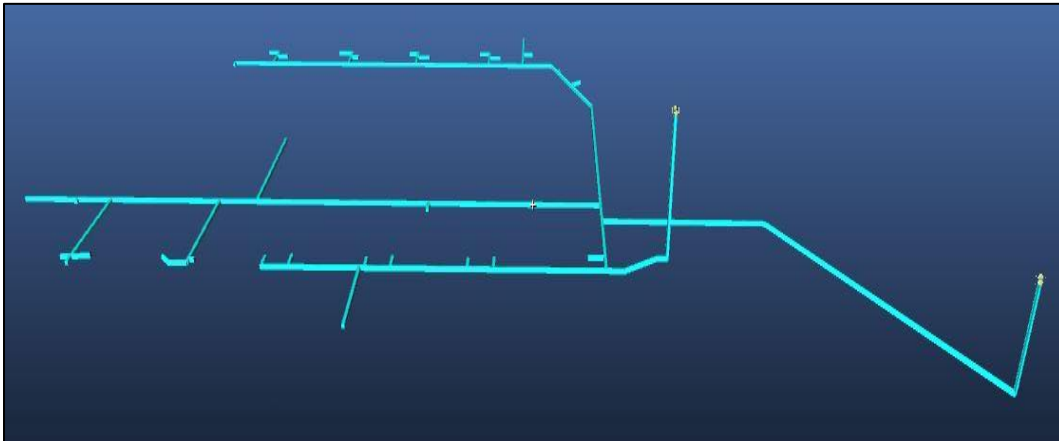


Figura 4.5 Vista en planta del subnivel de extracción en VentSim (Elaboración propia).

4.2 Corrección de layout de la mina

Dado que la información entregada no es suficiente se debieron realizar cambios y añadir variables a la configuración del nivel de hundimiento y su ventilación (inyección y extracción).

Se utilizó la base de datos de ventiladores de VentSim para obtener valores aproximados a los presentados en las tablas 4.2 y 4.3 de caudal, presión y eficiencia.

4.2.1 Nivel de hundimiento

Para redirigir el aire dentro de todas las galerías de este nivel, se insertaron seis compuertas a lo largo del *layout*. A continuación, se presenta la figura 4.6 en donde se puede apreciar el nivel de hundimiento con todas las características.

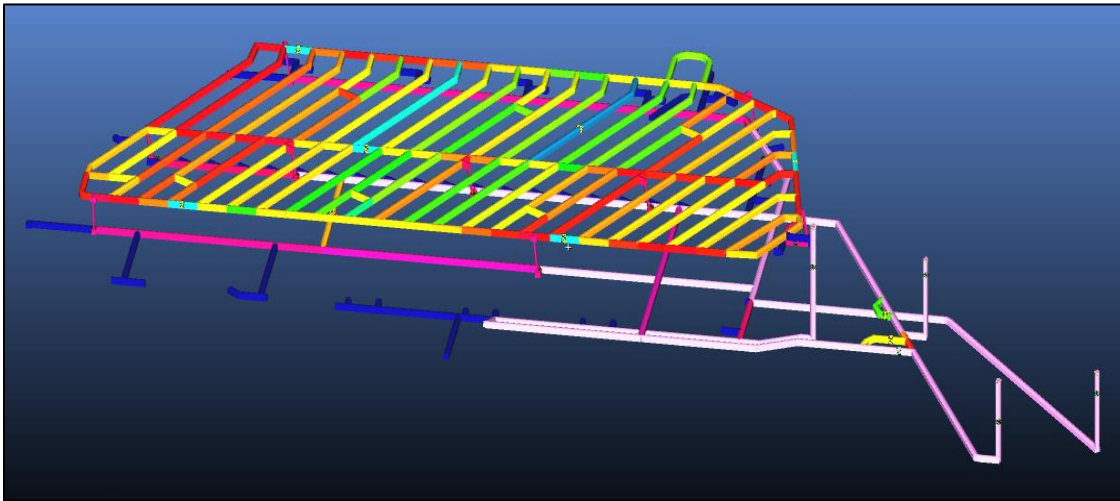


Figura 4.6 Vista en planta del nivel de hundimiento con su ventilación en VentSim (Elaboración propia).

Los ventiladores se representan por medio de ruedas que rodean el conducto. El color verde indica que el ventilador opera de forma normal. Por otro lado, las compuertas se presentan como reloj de arena y al igual que el símbolo anterior rodean los conductos. En este caso (color amarillo) indica que es una resistencia operativa normal. En la siguiente figura (fig. 4.7) se muestra lo anterior.

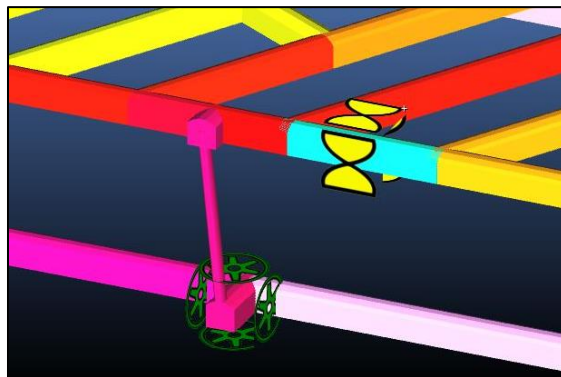


Figura 4.7 Vista ampliada de ventilador y compuerta en VentSim (Elaboración propia).

4.2.2 Nivel de ventilación.

En el subnivel de inyección del nivel de hundimiento se utilizaron los siguientes ventiladores: Howden 11200-AMF-7300 para ambas chimeneas y Howden 6000-VAX-3150 para la inyección de aire en los niveles. Se mantuvo la misma cantidad de ventiladores que en los datos originales y le incorporaron tres compuertas para redirigir los caudales. A continuación, se puede apreciar los datos de los ventiladores utilizados (tabla 4.4).

Tabla 4.4 Datos de ventiladores de inyección del nivel de hundimiento.

Tipo	Caudal (m3/s)	Presión (Pa)	Eficiencia (%)
Principal 1	229,3	1.792,4	67,5
Principal 2	234,3	1.713,7	65,3
Auxiliar	35,8	721,4	52,7

En la siguiente figura (fig. 4.8) se presenta una vista en planta del nivel de hundimiento con la posición de los 5 ventiladores de inyección.

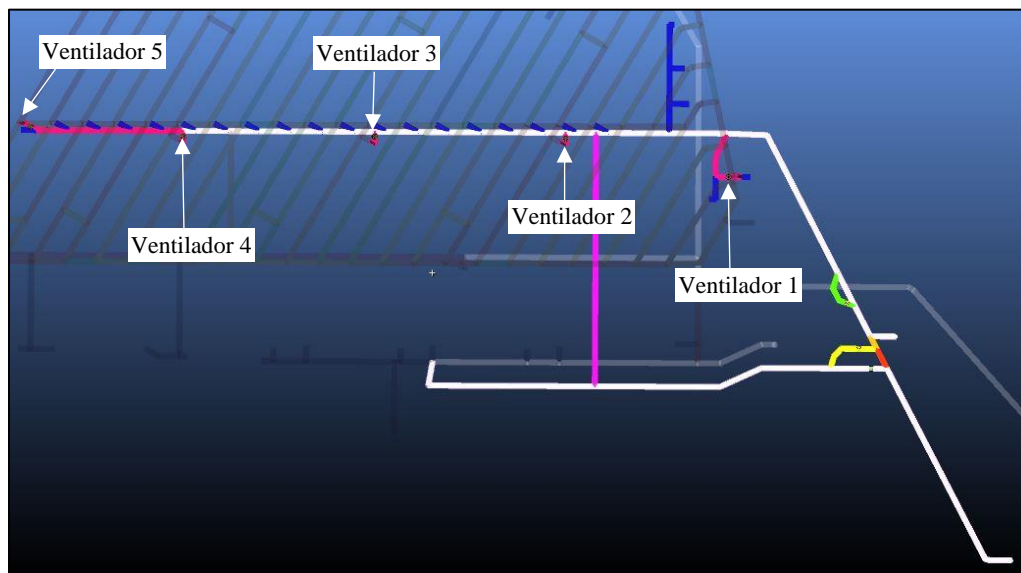


Figura 4.8 Posición de ventiladores de inyección del nivel de hundimiento en VentSim (Elaboración propia).

Al igual que en el subnivel de inyección, en el de extracción se utilizaron ventiladores principales y auxiliares, Howden 11200-AMF-7300 y Howden 6000-VAX-3150 respectivamente. También para circular la mayor cantidad de aire posible dentro de todas las galerías y entre otras, se añadió una compuerta. Al igual que el subnivel anterior se mantuvo la cantidad de ventiladores. En la tabla 4.5 se encuentra las características de estos.

Tabla 4.5 Datos de ventiladores de extracción del nivel de hundimiento.

Tipo	Caudal (m3/s)	Presión (Pa)	Eficiencia (%)
Principal 1	247,2	1.460,5	57,1
Principal 2	219,1	1.932,0	71,7
Auxiliar	42,0	1.227,5	80,0

La posición de los ventiladores de extracción, se presentan en la figura 4.9 en la vista en planta del nivel de hundimiento.

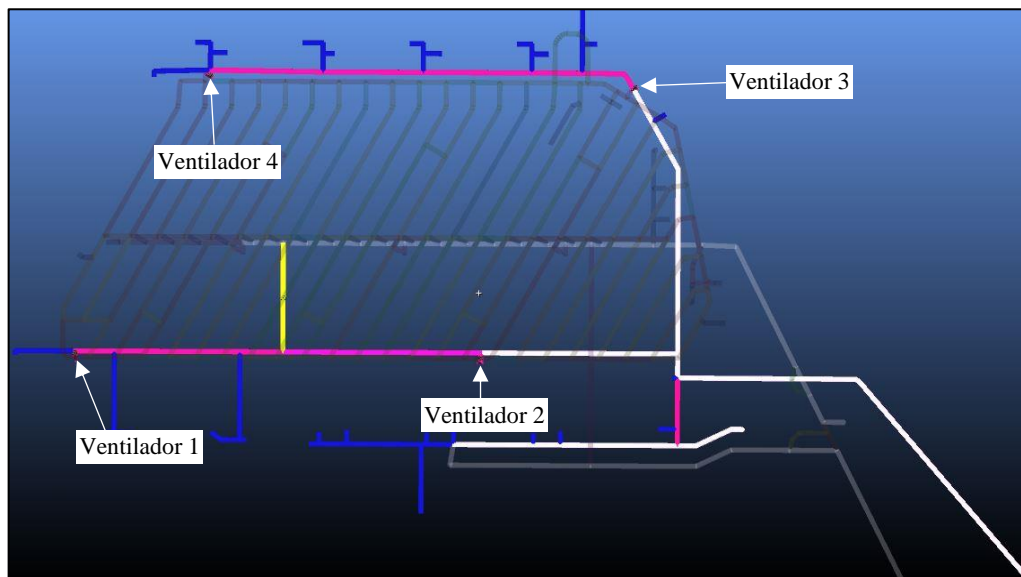


Figura 4.9 Posición de ventiladores de extracción del nivel de hundimiento en VentSim (Elaboración propia).

4.3 Arreglo ortogonal

Previo a la simulación del flujo de caudal de aire en el nivel, se debe realizar un arreglo ortogonal para disminuir la cantidad de escenarios, dependiendo de la cantidad de variables y sus estados. Las variables utilizadas son: los ventiladores de inyección y extracción con sus estados de encendido o apagado; y las compuertas con sus estados de abierto o cerrado.

Se cuenta con 5 ventiladores de inyección, 4 ventiladores de extracción y 6 compuertas. A continuación, en la fórmula 4.1, se presenta la nomenclatura representada en el capítulo 2 (fórmula 2.15).

$$(E.V.)^{c.v.} \times (E.C)^{c.c.} \quad (4.1)$$

Donde:

E.V. = Estado de Ventiladores.

C.V. = Cantidad de Ventiladores.

E.C. = Estado de Compuertas.

C.C. = Cantidad de Compuertas.

El resultado de este cálculo de los escenarios es el siguiente:

$$(2)^9 \times (2)^6 = 32.768$$

La cantidad de escenarios total es de 32.768. Ya que la cantidad es demasiada, se debió aplicar un arreglo ortogonal u Orthoplan para disminuir estos. Se utilizó el *software* SPSS Statistics el cual dio como resultado la cantidad de 16 escenarios.

Para mayor facilidad se emplearon términos para cada variable, los nombres se adjuntan en la tabla 4.6. La primera letra corresponde a ventilador o compuerta, la segunda se refiere a inyección o extracción (en caso de los ventiladores) y finalmente los números que corresponde a la cantidad de las variables presentes. El total de las variables es de 15.

Tabla 4.6 Términos para las variables utilizadas.

Variables	Sigla	Cantidad de variables	Estado
Ventilador de inyección	VI	1 – 5	0 → Apagado
Ventilador de extracción	VE	1 – 4	1 → Encendido
Compuertas	C	1 – 6	0 → Cerrado 1 → Abierto

A continuación, se presenta la tabla 4.7 con la cantidad de arreglos o escenarios dado por el programa mencionado.

Tabla 4.7 Escenarios generados del arreglo ortogonal.

ESCENARIO	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
3	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1
4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
5	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
6	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
7	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
8	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
9	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
10	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
12	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
15	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
16	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0

4.4 Temporalidad

Para que el modelo sea dinámico y dar temporalidad al modelo se realizó un código en el lenguaje de programación Python en el programa Spyder. Su función es tomar un escenario y cambiar el estado de alguna variable cada 5 minutos hasta llegar a 1 hora. Por cada escenario inicial se tendrá la variación de 12 escenarios nuevos, el total de escenarios final es de 208. En la tabla 4.8 se ejemplifica el escenario N°1 (marcado de color azul) con sus respectivas variaciones. El conjunto de datos completo está en apéndice A.

ESCENARIO	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
2	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
3	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0
6	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
7	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
8	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
9	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
10	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
11	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
12	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
13	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1

4.5 Puntos de estudio

Antes de realizar las simulaciones se definieron seis puntos dentro del nivel para controlar el caudal de aire (m^3/s). Los puntos de evaluación que se presentan en la figura 4.10 son: Punto centro, punto extremo inferior, punto extremo superior, punto esquina, punto galería, punto estocada.

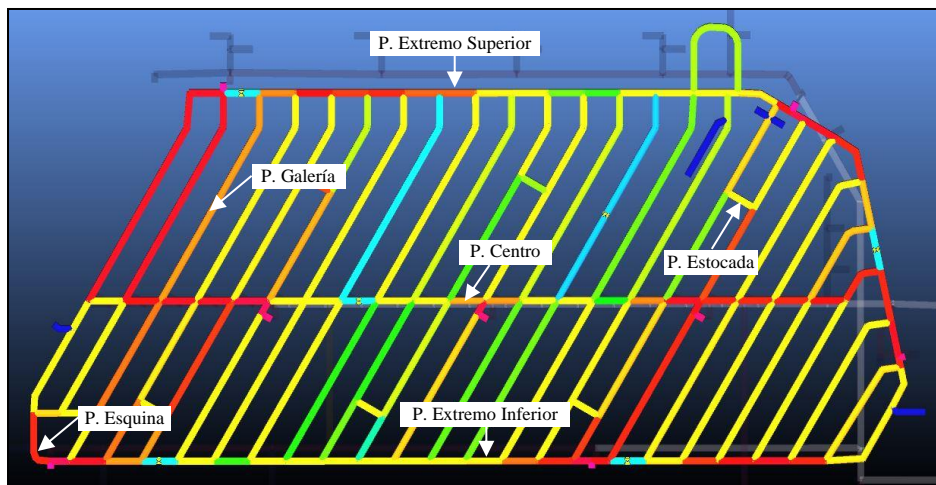


Figura 4.10 Vista en planta de nivel de hundimiento con puntos de estudio (Elaboración propia).

Con los escenarios ya definidos se dio paso a la simulación en VentSim. Se realizó la cantidad de 208 simulaciones (fig. 4.11), de los cuales se obtuvieron los flujos de aire en cada punto escogido. Se presentan en la tabla 4.9 los caudales obtenidos de ejemplo del escenario N°1 con sus variaciones, la tabla completa se presenta en el apéndice B.

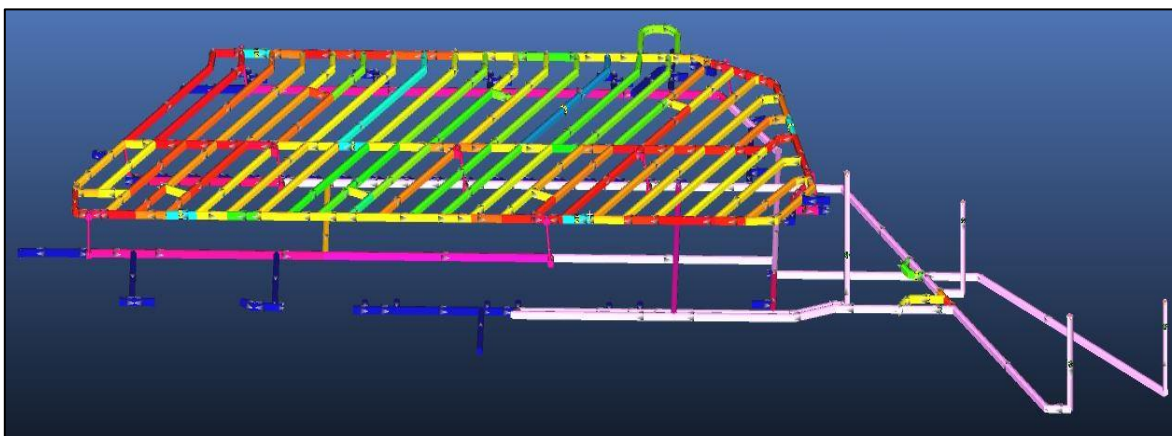


Figura 4.11 Simulación de nivel de hundimiento completo (Elaboración propia).

Tabla 4.9 Caudales simulados de escenarios adicionalmente generados a partir del escenario original N°1.

ESCENARIO	Punto centro (m³/s)	Punto extremo inferior (m³/s)	Punto extremo superior (m³/s)	Punto esquina (m³/s)	Punto galería (m³/s)	Punto estocada (m³/s)
1	11,4	6,8	8,8	18,3	8,8	4,5
2	11,5	6,6	9,1	18,0	9,2	4,6
3	11,5	6,6	9,1	18,0	9,2	4,5
4	10,7	8,3	7,0	14,8	7,6	3,8
5	10,7	8,3	7,2	15,8	4,5	3,8
6	11,5	6,6	9,3	19,0	3,5	4,5
7	11,4	6,6	12,8	19,0	3,5	4,5
8	11,4	6,6	11,2	18,4	4,3	4,5
9	11,9	5,6	13,2	18,7	4,2	5,4
10	12,0	5,6	9,0	18,7	4,2	5,4
11	11,5	6,6	7,6	18,4	4,3	4,5
12	9,4	5,6	6,5	18,2	4,4	5,0
13	7,5	6,7	4,5	18,5	4,3	4,4

4.6 Análisis del modelo

Se realizaron diferentes modelos para la predicción de caudales, y así evaluar la eficiencia de ellos: Árbol de regresión, regresión lineal y red neuronal.

En cada una de las técnicas se emplearon las mismas bases de datos, de los escenarios y caudales generados (de los puntos) y mencionados anteriormente.

SPSS Statistics fue el programa utilizado para este análisis. Se compararon los siguientes datos (tabla 4.10) de cada resultado.

Tabla 4.10 Estadística de los modelos analizados.

Modelos	Puntos	R	R²	R² ajustado	Error estándar de estimación (m³/s)
Árbol de regresión	Centro	0,663	0,440	0,396	2,288
	Extremo inferior	0,464	0,215	0,154	2,207
	Extremo superior	0,559	0,312	0,259	4,826
	Esquina	0,457	0,209	0,147	1,532
	Galería	0,064	0,004	-0,074	2,109
	Estocada	0,355	0,126	0,058	2,739
Regresión lineal	Centro	0,899	0,808	0,793	1,389
	Extremo inferior	0,772	0,521	0,484	1,786
	Extremo superior	0,919	0,845	0,833	2,370
	Esquina	0,921	0,848	0,836	1,000
	Galería	0,886	0,784	0,767	1,658
	Estocada	0,958	0,918	0,911	1,067
Red neuronal	Centro	0,947	0,897	0,889	1,022
	Extremo inferior	0,915	0,837	0,825	1,006
	Extremo superior	0,950	0,903	0,895	1,829
	Esquina	0,979	0,958	0,955	0,507
	Galería	0,983	0,966	0,964	0,629
	Estocada	0,989	0,978	0,976	0,543

Para realizar el análisis se emplearon los resultados de los escenarios de prueba, ya que es éste el que se utiliza para predecir los caudales. Se tomaron los valores entregados de los puntos en conjunto, en cada modelo para ver cuál es la mejor opción de predicción.

El coeficiente de correlación de Pearson (R) en cada una de las técnicas empleadas, tienen correlación positiva y directa, resaltando que en cada punto los valores más altos (cercano a 1,0) son en redes neuronales. Esto indica que existe mucha relación o dependencia entre las variables (dependiente e independiente) de los puntos. Por otro lado, el coeficiente de determinación R-cuadrado (R^2) también cuenta con valores más altos en red neuronal, lo cual indica que se ajusta mejor al modelo de los datos y tiene una mejor ponderación en variables independientes. El R^2 ajustado, que a diferencia de la R^2 tiene una penalización por la cantidad de variables independientes, tiene mejor ponderación (en cada punto) en la red neuronal. La variable independiente escogida logra determinar casi el 100% de la variación de estas variables dependientes. Finalmente, si se ve cada uno de los puntos, el error de estándar de estimación más bajo también recae en la red neuronal.

Con la observación de los datos anteriores la red neuronal fue la mejor opción de predicción de caudales de ventilación en este caso de estudio.

4.7 Entrenamiento de redes neuronales

Con el resultado anterior, se dio paso al entrenamiento de la red neuronal. Se diseñó mediante un código en Python, específicamente en la nube Google Colaboratory, de esta manera se pudo escoger entre más funciones de activación, función de pérdida, optimizadores, etc. Se emplearon librerías y herramientas como Numpy, Pandas, Keras, Tensorflow, entre otras.

A modo de encontrar una configuración buena del modelo para su entrenamiento solo se utilizó como ejemplo el primer punto escogido, punto centro.

Se tomó, de la base de datos, el 80% de los escenarios para entrenamiento de la red neuronal y el 20% restante se dejó para probar el modelo. Esta red neuronal cuenta con 6 capas: Una capa de entrada, 4 capas oculta y otra capa de salida. La capa de entrada se alimentó con un archivo .csv que se leyó desde Google Drive. Esta base de datos contiene los 208 escenarios con las 15 variables distintas mencionadas en la tabla 4.6 que son los que se utilizaron, así como también los caudales de los puntos. La primera capa cuenta con 15 nodos o neuronas, las cuales esperaron las 15 variables de entrada mencionadas anteriormente. Las capas ocultas tienen 12, 9, 6 y 3 nodos. Por último, la capa de salida tiene 1 neurona para predecir el caudal de ventilación del punto escogido. A mayores capas ocultas, menor error o pérdida

en las predicciones. El esquema de la red neuronal completa se encuentra en la figura del apéndice C.

Por otra parte, la función de activación en la primera capa es ReLU (Unidad lineal rectificadora o *Rectified Linear Unit*) al igual que en las otras cinco capas ocultas. Esta función es la más utilizada debido a que converge más rápido que las demás y no se satura ya que su rango de salida no está acotado, es de 0 hasta algún valor positivo.

También, se hicieron ajustes al modelo antes de entrenarlo. Para compilar la red se utilizó RMSprop (*Root Mean Square Propagation*) que considera los gradientes más recientes. También, una función de pérdida mse (error cuadrático medio) que calculó la diferencia cuadrada entre el valor esperado y las predicciones para luego promediar estos.

Cabe mencionar que para llegar a esta configuración del modelo se requirieron bastantes pruebas cambiando cantidad de capas, números de nodos, distintas funciones de activación, etc.

A continuación, se procedió a ejecutar el modelo de la red neuronal, para ello se empleó la función *fit()*. Esta función cuenta con los datos de entrenamiento (entrada y salida). Asimismo, permitió indicar la cantidad de veces que se ejecutó el código (*epochs* o épocas), para este caso 500. Igualmente se estableció el número de datos (*batch size*) que había en cada uno de los ciclos, que para este modelo son 10. En cada iteración hubo tantas ejecuciones como la cantidad de *batch size*, así se actualizaron los pesos. Al igual que la cantidad de capas ocultas, las épocas también disminuyen el error en el modelo.

Se evaluó el modelo usando la función *evaluate()* el cual se alimenta con los datos de entrada y la salida de entrenamiento. Esto da como resultado la pérdida, en conclusión, si sirve el modelo realizado.

4.7.1 Análisis y resultados de entrenamiento

La figura 4.12, a modo de ejemplo, se muestra el resumen del modelo de las redes neuronales del punto centro, donde se puede ver la cantidad de nodos y parámetros por cada capa.

```

Model: "sequential_3"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
dense_18 (Dense)            (None, 15)                  240
dense_19 (Dense)            (None, 12)                  192
dense_20 (Dense)            (None, 9)                   117
dense_21 (Dense)            (None, 6)                   60
dense_22 (Dense)            (None, 3)                   21
dense_23 (Dense)            (None, 1)                   4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0
-----

```

Figura 4.12 Resumen del modelo de redes neuronales de la base de datos original en Google Colaboratory (Elaboración propia).

Se presenta el gráfico, en la figura 4.13, una muestra de los errores de los datos de entrenamiento y prueba. A medida que se entrena se aprecia que el error disminuye, y a menor pérdida mejor es el modelo para predecir los caudales de ventilación.

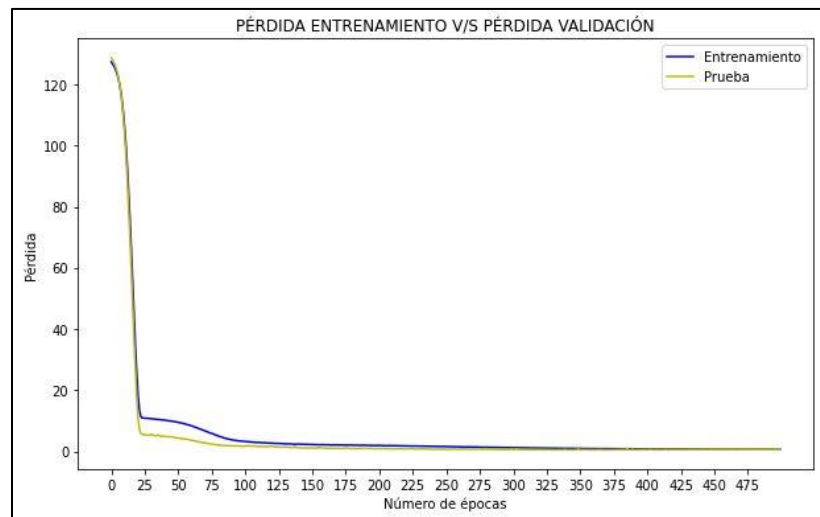


Figura 4.13 Gráfico error de datos de entrenamiento y prueba de la base de dato original en Google Colaboratory (Elaboración propia).

El 20% (42 valores) de los caudales que se utilizaron para prueba, junto con los resultados de las predicciones que son la misma cantidad que los datos de prueba, se presentan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Valores de caudales de prueba y predicción de la base de datos original.

N° de caudales	Caudal prueba	Caudal predicho	N° de caudales	Caudal prueba	Caudal predicho
1	9,4	9,1	22	8,8	9,3
2	12,2	11,7	23	10,4	10,1
3	10,2	9,2	24	4,9	5,4
4	8,3	8,9	25	9,4	9,9
5	7,2	7,2	26	13,0	12,7
6	11,4	10,9	27	10,4	10,2
7	8,8	10,0	28	6,2	6,5
8	11,5	11,4	29	11,4	11,3
9	10,6	10,6	30	10,2	10,1
10	5,5	4,7	31	8,6	8,6
11	10,4	9,9	32	21,1	21,3
12	9,5	10,0	33	10,2	9,7
13	9,2	9,5	34	8,7	9,1
14	17,7	17,5	35	11,4	11,5
15	12,5	14,7	36	15,6	15,9
16	12,7	13,6	37	17,7	16,8
17	8,4	7,2	38	12,0	11,9
18	11,4	11,2	39	9,2	9,9
19	13,0	13,2	40	11,4	11,0
20	8,6	8,5	41	13,8	13,4
21	9,1	8,8	42	10,2	10,1

Además, se muestran los mismos valores en el gráfico (fig. 4.14) siguiente.

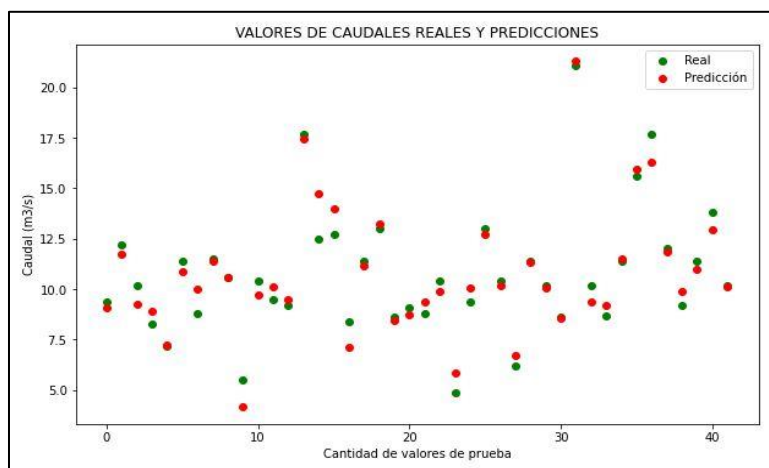


Figura 4.14 Gráfico de caudales de prueba y predicción de la base de datos original en Google Colaboratory (Elaboración propia).

Se creó una segunda base de datos que, a diferencia de la original, se cambió la opción de 0 y 1 de los ventiladores por los caudales que estos tienen. Se presenta en la tabla 4.12 el ejemplo de escenarios adiciones generados (a partir del escenario original N°1) con la modificación realizada. La tabla completa se encuentra en el apéndice C.

Tabla 4.12 Ejemplo de escenarios adiciones generados a partir del escenario original N°1 con datos de caudales.

ESCENARIO	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	39,7	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	39,5	1	1	1	1	0	0
2	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	1	1	1	1	0	0
3	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	0	0
4	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	0	1	1	1	0	0
5	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	0	1	1	1	1	0
6	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	1	0
7	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	0	1	0
8	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	0	1	1
9	39,6	38,6	38,4	0,0	38,9	0,0	0,0	39,7	39,6	0	1	1	0	1	1
10	39,6	38,6	38,4	0,0	38,9	0,0	0,0	39,7	39,6	0	1	1	1	1	1
11	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	1	1
12	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	39,5	39,5	0	1	1	1	1	1
13	39,7	0,0	0,0	38,4	38,9	0,0	0,0	39,6	39,6	0	1	1	1	1	1

Se presenta un ejemplo en la figura 4.15 del resumen de los parámetros del modelo de la red neuronal, destacando número de capas y nodos.

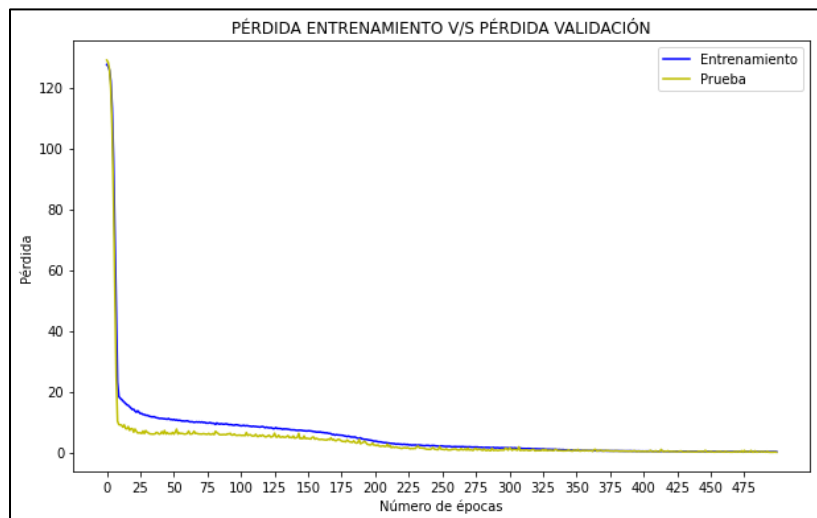
```

Model: "sequential_2"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
dense_12 (Dense)            (None, 15)                  240
dense_13 (Dense)            (None, 12)                  192
dense_14 (Dense)            (None, 9)                   117
dense_15 (Dense)            (None, 6)                   60
dense_16 (Dense)            (None, 3)                   21
dense_17 (Dense)            (None, 1)                   4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0

```

Figura 4.15 Resumen del modelo de redes neuronales de la base de datos modificada Google Colaboratory (Elaboración propia).

En la figura 4.16 se muestra el gráfico de pérdida. Al igual el gráfico de la base de datos original el error desciende.



4.16 Gráfico error de datos de entrenamiento y prueba de la base de datos modificada Google Colaboratory (Elaboración propia).

Las predicciones realizadas por la red neuronal en conjunto con los datos de prueba se muestran en la tabla 4.13. El gráfico con los valores de la tabla se ve en la figura 4.17 donde se puede apreciar mejor la diferencia entre ambos.

Tabla 4.13 Valores de caudales de prueba y predicción, base de datos modificada.

Nº de caudales	Caudal prueba	Caudal predicho	Nº de caudales	Caudal prueba	Caudal predicho
1	9,4	10,2	22	8,8	8,6
2	12,2	11,7	23	10,4	10,7
3	10,2	9,6	24	4,9	5,2
4	8,3	8,4	25	9,4	8,7
5	7,2	7,2	26	13,0	11,7
6	11,4	13,1	27	10,4	10,8
7	8,8	9,0	28	6,2	6,2
8	11,5	11,4	29	11,4	11,6
9	10,6	10,5	30	10,2	10,6
10	5,5	5,3	31	8,6	7,3
11	10,4	10,4	32	21,1	21,3
12	9,5	9,6	33	10,2	10,1
13	9,2	9,1	34	8,7	8,8
14	17,7	18,3	35	11,4	12,1
15	12,5	12,7	36	15,6	16,7
16	12,7	12,5	37	17,7	18,2
17	8,4	8,2	38	12,0	12,1
18	11,4	11,0	39	9,2	10,0
19	13,0	12,8	40	11,4	11,9
20	8,6	8,8	41	13,8	13,9
21	9,1	9,4	42	10,2	10,6

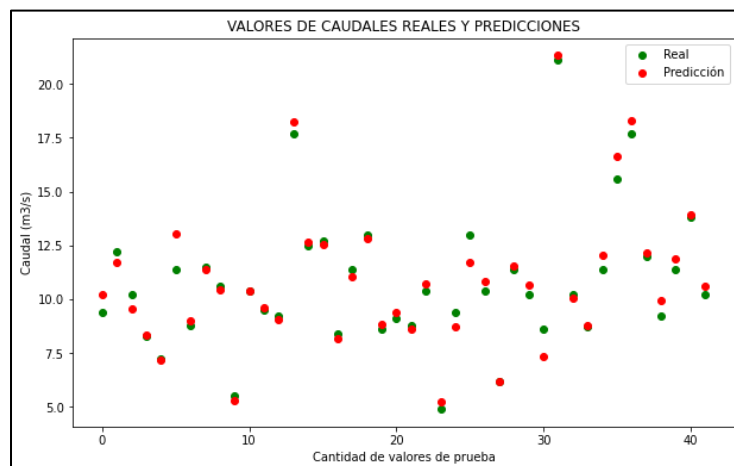


Figura 4.17 Gráfico de caudales de prueba y predicción de la base de datos modificada Google Colaboratory (Elaboración propia).

A modo de comparación se muestran los resultados de errores y exactitud de la base de datos original y la base de datos modificada. En la tabla 4.14 se observa los valores antes mencionados.

Tabla 4.14 Error cuadrático medio (MSE) de la base original y modificada del punto centro.

Base de datos original		Base de datos modificada	
Error cuadrático medio	Exactitud	Error cuadrático medio	Exactitud
0,51	0,95	0,52	0,95

Los valores de pérdida de la tabla anterior muestran que los resultados de ambas bases son casi idénticas. Por otro lado, se observó que el error del punto centro de la tabla 4.10 obtenido con el software SPSS Statistics es de 1,022 en redes neuronales. Comparándolo con los errores obtenidos de las bases de datos realizado en Google Colaboratory (del mismo punto), los últimos están por debajo de este valor siendo mejor el método.

La base modificada fue la utilizada para realizar el control optimal, ya que los datos sirvieron para calcular el costo de ventilación.

4.8 Modelo de control optimal

Ya con las redes neuronales entrenadas se hizo el diseño del modelo de control optimal. Al igual que en el código lo anterior, se utilizó el lenguaje de Python en Google Colaboratory. Previamente al modelo de control, se creó una función de las redes neuronales para luego llamarla dentro del código principal.

En primera instancia se realizaron algunos supuestos y asignaciones para el costo de ventilación:

- $C_i \rightarrow$ Costo de inyección.
- $C_e \rightarrow$ Costo de extracción.
- Se despreció el costo de compuertas (apertura y cierre).

Se muestra en la fórmula 4.2, el costo de ventilación. El término corresponde al a la suma de los costos por la sumatoria de los ventiladores de inyección (primer término) y extracción (segundo término).

$$\text{Costo de ventilación} = C_i \sum_{i=1}^5 VI_i + C_e \sum_{j=1}^4 VE_j \quad (4.2)$$

Luego se definió la función objetivo, la cual es minimizar el costo de ventilación. Lo anterior, sujeto a que el caudal disponible de aire sea igual o mayor al requerido, dependiendo el aire que requieren los equipos y los trabajadores en la mina. Además, la inyección y extracción de aire es mayor que cero, pero menor que la capacidad de ventiladores. Las variables de control dependen de los ventiladores de inyección y extracción. A continuación, se muestra el problema de optimización descrito anteriormente.

$$\text{Min} \quad C_i \sum_{i=1}^5 Q_{VIi} + C_e \sum_{j=1}^4 Q_{VEj}$$

sujeto a:

$$Q \geq Q_{req}$$

$$0 \leq Q_{VIi}/Q_{VEj} \leq C$$

$$\text{Variables de control: } Q_{VI1} + \dots + Q_{VIi} \in \mathbb{R}^+$$

$$Q_{VE1} + \dots + Q_{VEj} \in \mathbb{R}^+$$

Donde:

Q_{VIi} = Caudal (flujo) de inyección.

Q_{VEj} = Caudal (flujo) de extracción.

Q = Caudal disponible o predicho.

Q_{req} = Caudal requerido.

C = Capacidad del ventilador.

A fin de llevar a cabo la función objetivo, se definieron varios factores. El caudal requerido, a modo de ejemplo, es una sumatoria de los caudales de los equipos empleados y la cantidad

de personas que trabajan en el sector de la mina (se despreció el caudal requerido por explosivos).

En primer lugar, se calculó el caudal requerido por equipos. Para esta memoria se utilizó 1 equipo del modelo de LHD SANDVIK LH307, el cual posee una potencia de 160 kW. Este valor se debió transformar a potencia en caballos de fuerza (HP). Se empleó la fórmula 4.3.

$$HP = P \times 1.34 \quad (4.3)$$

Donde:

HP = Potencia (HP)

P = Potencia (kW)

Luego, con la fórmula 4.4, se calculó el caudal requerido por el equipo.

$$Q_e = \frac{HP \times 2.83 \text{ m}^3 \times n_e}{60 \text{ s}} \quad (4.4)$$

Donde:

Q_e = Caudal equipos (m^3/s).

n_e = Número de equipos.

Posteriormente, se procedió a calcular el caudal requerido por las personas que trabajan en el sector. Según indica el SERNAGEOMIN (2004), en el reglamento de seguridad minera, una persona requiere como mínimo un caudal de $3 \text{ m}^3/\text{min}$. Por lo tanto, el valor anterior solo se multiplicó por la cantidad de personas. En este caso, para ejemplificar, solo fueron 2 trabajadores. Se muestra la fórmula 4.5 a continuación.

$$Q_p = \frac{3 \text{ m}^3 \times n_p}{60 \text{ s}} \quad (4.5)$$

Donde:

Q_p = Caudal personas (m^3/s).

n_p = Número de personas.

Con estos dos valores se obtuvo el caudal requerido, el cual es la suma de estos. Se aprecia esto en la siguiente ecuación (fórmula 4.6).

$$Q_{req} = Q_e + Q_p \quad (4.6)$$

En la tabla 4.15 se presentan un resumen los valores obtenidos en los caudales de equipo y caudales de personas. El caudal final (10,21 m³/s) será el mínimo flujo de aire que debe existir en cada uno de los puntos escogidos.

Tabla 4.15 Cálculo caudal requerido.

Variables	Equipo	Personas
Potencia (kW)	160	-
Potencia (HP)	214,40	-
N° equipos (n_e)	1	-
N° personas (n_p)	-	2
Caudal equipos (Q_e) (m³/s)	10,11	-
Caudal personas (Q_p) (m³/s)	-	0,10
Caudal requerido (Q_{req} = Q_e+ Q_p) (m³/s)	10,21	

Al obtener el caudal requerido, se pudo aplicar la restricción del problema de optimización comparándolo con el valor del caudal predicho por la red en cada ciclo. Para obtener dicho valor, se eligió un escenario inicial cualquiera (tabla 4.16) al cual se le añadió una perturbación aleatoria a cada valor con caudal, así se le dio variabilidad a este. Cabe destacar que a las variables de compuertas se les hicieron cambios utilizando una función *random()*, pero solo se implementaron para las predicciones, no para calcular costo. Luego, se aplicó la función de la red neuronal sobre el escenario modificado y dio paso a la predicción del caudal disponible. Si el valor de la red era igual o mayor, que el caudal requerido en el punto, se continuó con el siguiente paso del algoritmo, cálculo del costo.

Tabla 4.16 Escenarios inicial para inicial código principal.

VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
35,7	33,3	32,7	32,5	33,8	42,3	42,4	42,5	42,4	1	1	1	1	0	0

Se calculó el costo de la energía utilizada por los ventiladores. Para ello, se usó el gráfico (fig. 4.18) que da por hora el ventilador Howden 6000-VAX-3150: 2 Stage, que indica la potencia v/s caudal o cantidad.

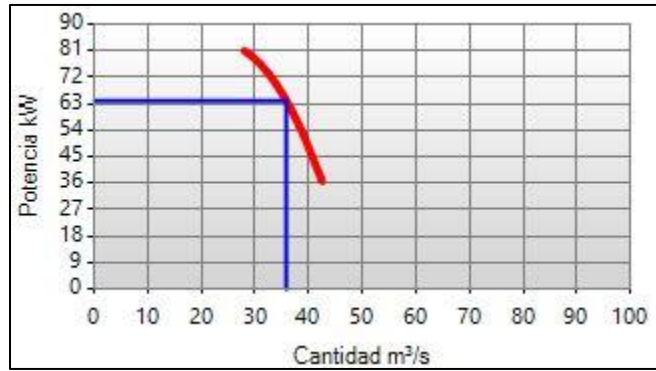


Figura 4.18 Gráfico potencia (kW) v/s cantidad (m³/s) del ventilador Howden 6000-VAX-3150: 2 Stage (Base de datos VentSim).

En primer lugar, se obtuvieron las potencias por hora (kWh) aplicando en la función (fórmula 4.7) del gráfico anterior los caudales predichos.

$$f(x) = -0.1358x^2 + 6.4833x + 6.8862 \quad (4.7)$$

Con los kilovatios hora (kWh) del gráfico anterior se calculó el caudal requerido. Esto, multiplicando el valor obtenido por el kWh de la corriente trifásica de \$56 (CLP) aplicada a los clientes libres (Minería Chilena, 2019). El costo obtenido se compara con el anterior y solo se guarda el menor.

El criterio de la repetición del algoritmo completo para calcular el costo, es de un ciclo de 200 iteraciones, esto debido a que el tiempo de ejecución es muy alto.

4.8.1 Análisis y resultado de control optimal

Para encontrar el valor del ciclo de parada adecuado dentro del código principal, se debió probar ejecutando el programa varias veces. El punto de ejemplo para ajustar el ciclo fue el punto centro. En primera instancia el criterio escogido fue una elección de ciclos de 500 iteraciones, pero la ejecución no logro llegar a este total, solo cerca del ciclo 230 empleando el tiempo límite en Google Colaboratory de 12 horas. Por ello se requirió disminuir los ciclos a 200 para todos los puntos.

La figura 4.19 indica el escenario final con los valores de caudales de cada uno de los ventiladores (inyección y extracción) y el cerrado o apertura de las compuertas. Presenta el caudal predicho de 10,47 para el punto y el costo de ventilación por hora de \$20.948,19.

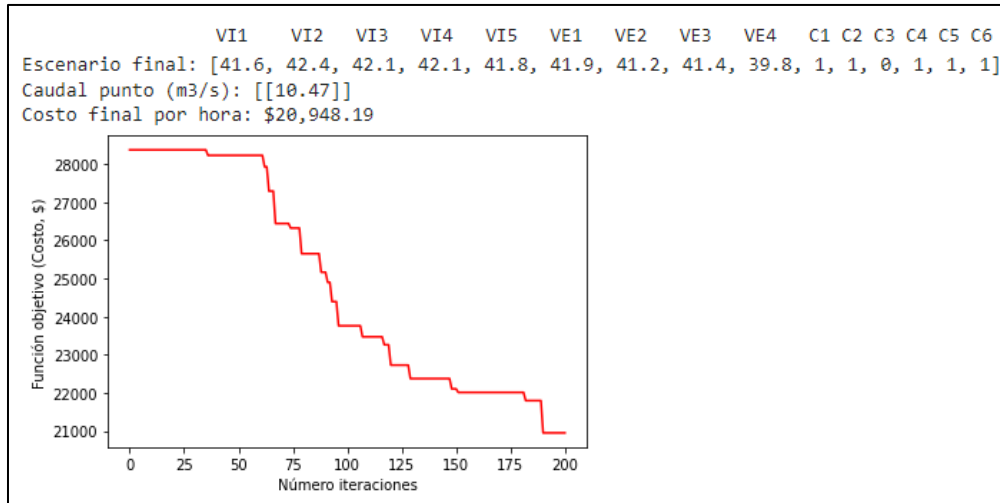


Figura 4.19 Gráfico del punto centro. Costo v/s número de iteraciones o ciclos en Google Colaboratory (Elaboración propia).

Al igual que el resultado anterior se puede visualizar en la figura 4.20 el escenario final con el flujo de las variables, caudales del punto extremo superior de 10,65 y su costo final de \$22.198,06 por hora.

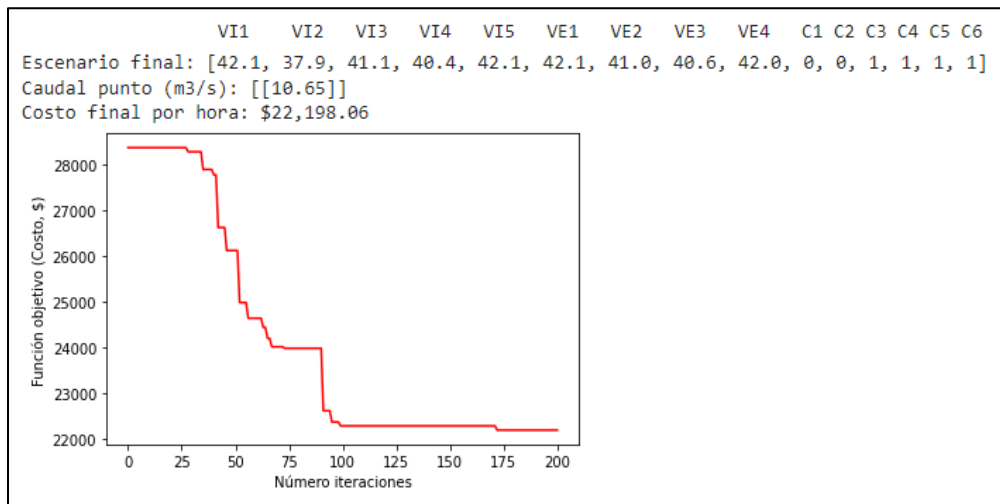


Figura 4.20 Gráfico del punto extremo superior. Costo v/s número de iteraciones o ciclos en Google Colaboratory (Elaboración propia).

En la figura que se muestra a continuación se ven los caudales de los ventiladores y compuertas, el caudal de 15,66 del punto esquina y el costo por hora de \$22.908,97. Se presentan los resultados mencionados en la figura 4.21.

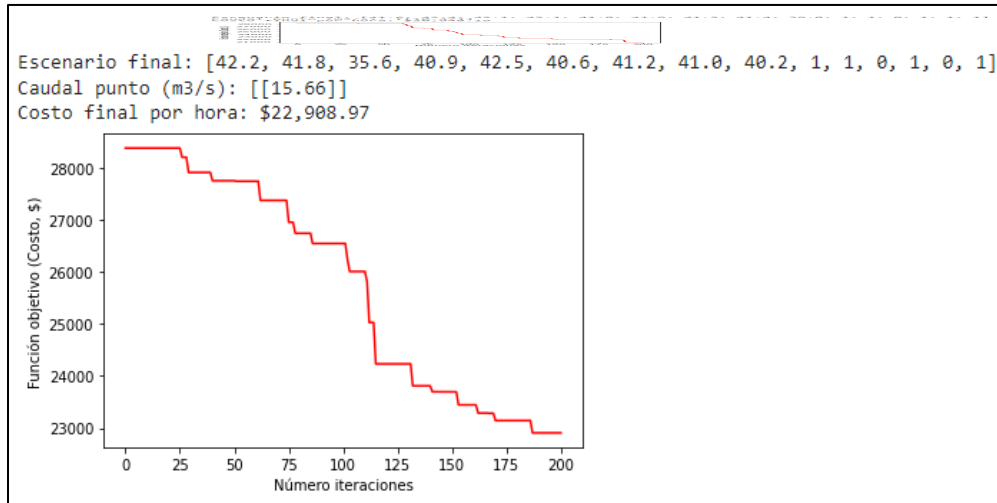


Figura 4.21 Gráfico del punto esquina. Costo v/s número de iteraciones o ciclos en Google Colaboratory (Elaboración propia).

En la tabla 4.17 se presenta el resumen de los resultados del modelo de control optimal.

Tabla 4.17 Resumen de resultado del modelo de control optimal de los puntos.

Puntos	Caudal (m3/s)	Costo por hora (\$)
Centro	10,47	\$20.948,19
Extremo inferior	-	-
Extremo superior	10,65	\$22.198,06
Esquina	15,66	\$22.908,97
Galería	-	-
Estocada	-	-

Al evaluar los puntos extremo inferior, galería y estocada no se obtuvo el resultado esperado. Ya que el mayor porcentaje (más del 80%) de caudales que tienen estos puntos están por debajo del caudal requerido mínimo (10,21 m3/s), el algoritmo intenta predecir este valor, pero no lo logra. La ejecución por código llega al límite de tiempo en Google Colaboratory sin ningún resultado del costo ni caudales óptimos. A continuación, se presentan las imágenes (fig. 4.22, 4.23 y 4.24) de lo obtenido hasta la hora 12.


```

Red Neuronal_P_Ext_Inferior.ipynb ☆
Archivo Editar Ver Insertar Entorno de ejecución Herramientas Ayuda Se han guardado todos los cambios
Código + Texto
dense_1253 (Dense) (None, 1) 4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0
-----
Caudal predicho (m3/s): [[7.04]]
No cumple norma
Mantengo escenario: [35.2, 31.9, 29.7, 29.2, 35.5, 42.4, 39.0, 42.3, 40.1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]
Escenario modificado: [31.6, 39.7, 29.2, 31.2, 28.5, 29.2, 36.3, 36.1, 33.8, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Model: "sequential_372"
-----
Layer (type) Output Shape Param #
-----
dense_1254 (Dense) (None, 15) 240
dense_1255 (Dense) (None, 12) 192
dense_1256 (Dense) (None, 9) 117
dense_1257 (Dense) (None, 6) 60
dense_1258 (Dense) (None, 3) 21
dense_1259 (Dense) (None, 1) 4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0
-----
✓ 12 h 00 min 00 s completado a las 16:44

```

Figura 4.22 Vista de la terminal al finalizar el tiempo límite del punto extremo inferior en Google Colaboratory (Elaboración propia).

En la figura anterior se aprecia un ejemplo de predicción de 7,04 m³/s que es menor al caudal requerido.

```

Red Neuronal_P_Galería.ipynb ☆
Archivo Editar Ver Insertar Entorno de ejecución Herramientas Ayuda Se han guardado todos los cambios
Código + Texto
dense_1529 (Dense) (None, 1) 4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0
-----
Caudal predicho (m3/s): [[5.1]]
No cumple norma
Mantengo escenario: [42.2, 41.8, 35.6, 40.9, 42.5, 40.6, 41.2, 41.0, 40.2, 1, 1, 0, 1, 0, 1]
Escenario modificado: [33.5, 41.3, 31.1, 38.8, 29.7, 35.4, 31.3, 33.0, 41.2, 0, 1, 1, 0, 1, 1]
Model: "sequential_632"
-----
Layer (type) Output Shape Param #
-----
dense_1524 (Dense) (None, 15) 240
dense_1525 (Dense) (None, 12) 192
dense_1526 (Dense) (None, 9) 117
dense_1527 (Dense) (None, 6) 60
dense_1528 (Dense) (None, 3) 21
dense_1529 (Dense) (None, 1) 4
-----
Total params: 634
Trainable params: 634
Non-trainable params: 0
-----
✓ 12 h 00 min 00 s completado a las 16:44

```

Figura 4.23 Vista de la terminal al finalizar el tiempo límite del punto galería en Google Colaboratory (Elaboración propia).

Al igual que la en el punto anterior el caudal predicho es menor a 10,21, es de 5,1 m³/s.

```

Red Neuronal_P_Estocada.ipynb ☆
Archivo Editar Ver Insertar Entorno de ejecución Herramientas Ayuda Se han guardado todos los cambios
Código + Texto
▶ dense_803 (Dense) (None, 1) 7
=====
Total params: 343
Trainable params: 343
Non-trainable params: 0
-----
Caudal predicho (m3/s): [[7.67]]
No cumple norma
Mantengo escenario: [35.2, 31.9, 29.7, 29.2, 35.5, 42.4, 39.0, 42.3, 40.1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]
Escenario modificado: [34.5, 33.7, 30.1, 27.9, 35.9, 39.4, 39.0, 41.3, 38.4, 1, 0, 1, 1, 1, 0]
Model: "sequential_268"
-----
Layer (type) Output Shape Param #
-----
dense_804 (Dense) (None, 15) 240
dense_805 (Dense) (None, 6) 96
dense_806 (Dense) (None, 1) 7
-----
Total params: 343
Trainable params: 343
Non-trainable params: 0
-----
Caudal predicho (m3/s): [[7.04]]
No cumple norma
Mantengo escenario: [35.2, 31.9, 29.7, 29.2, 35.5, 42.4, 39.0, 42.3, 40.1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]
Escenario modificado: [32.9, 30.8, 33.0, 27.0, 37.6, 39.7, 37.7, 40.4, 38.0, 1, 1, 0, 1, 1, 0]
Model: "sequential_268"
=====
✓ 12 h 00 min 00 s completado a las 15:43

```

Figura 4.24 Vista de la terminal al finalizar el tiempo límite del punto estocada en Google Colaboratory (Elaboración propia).

Siguiendo la misma línea de los anteriores, el punto estocada no predice un caudal mayor al requerido, en la figura 4.24 solo predice uno de 7,67 m³/s.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La decisión de la cantidad y disposición de las variables, influyeron directamente en el caudal de aire al interior de la mina. También, la cantidad intervino en los escenarios calculados y generados por el Orthoplan.

La utilización del método Orthoplan fue primordial para disminuir la cantidad de escenarios iniciales del nivel de hundimiento, de 32.768 a 16 muestras representativas del conjunto, esto hizo más fácil el trabajo de la base de datos. La temporalidad, agregada a cada uno de los escenarios principales generados, dio variabilidad al modelo, teniendo un total de 208 escenarios. Asimismo, la cantidad de tiempo que se le dio a estos fue fundamentales en la dificultad que tuvo el entrenamiento de la red neuronal artificial.

De los tres modelos de predicción utilizados en este caso estudio, el de las redes neuronales obtuvo los mejores resultados. Esto se vio reflejado en los 6 puntos escogidos, representativos del nivel de hundimiento, los cuales obtuvieron rangos mayores en el coeficiente de correlación, R-cuadrado y R-cuadrado ajustado, y menores en error estándar de estimación, lo que conlleva a un mejor modelo.

Para mejorar el entrenamiento de la red, disminuir el valor del error y aumentar la exactitud entre los caudales reales y predichos, se debió añadir más capas ocultas y épocas en el código de la función de la red neuronal. Como consecuencia se hace más lento el entrenamiento.

El modelo de redes neuronales realizado en Google Colaboratory de la base de datos original y la base de datos modificada del primer entrenamiento, muestran valores de error de 0,51 y 0,52 respectivamente. Ya que los valores de error fueron similares, ambos tuvieron una exactitud de un 95%, demostrando que, con valores de entrada discretos y continuos, la red entrega cifras casi idénticas.

En el control optimal la cantidad de ciclos dificultó la obtención del resultado ya que Google Colaboratory tiene límites de tiempo para ejecución y límites de uso de memoria.

Ya que no existen más datos con respecto a cómo se conecta el nivel hundimiento con otros niveles, ni como influyen los ventiladores de estos, los caudales de ventiladores fueron bajos. Esto, llevó a cabo que se eligiera, de la base de datos de VentSim, los ventiladores que

llenaron el requerimiento de bajo flujo y de bajo kilovoltio, por consiguiente, un bajo cálculo de su costo kWh.

Por otro lado, los puntos extremo inferior, galería y estocada no fueron posible completar el control optimal ya que la mayor cantidad los valores de entrada fueron mucho más bajos que el caudal requerido por el equipo y personas.

Finalmente, el modelo para controlar la ventilación con inteligencia artificial funciona, sin embargo, existen algunas recomendaciones que podrían mejorar el modelo y así obtener mejores resultados:

- Se debe utilizar un programa o nube con alta memoria y ram que logre calcular los costos más rápidamente, sin complicaciones ni limitaciones.
- Se debe tener la mayor información posible del nivel y otros niveles con sus respectivos ventiladores para tener los valores más cercanos a la realidad.

REFERENCIAS

- Amat Rodrigo, J. (Mayo de 2021). *Ciencia de datos*. Obtenido de <https://www.cienciadedatos.net/documentos/py35-redes-neuronales-python.html>
- Autodesk. (Marzo de 2010). *Manual del usuario AutoCAD Architecture 2011*.
- Balparda, N. (24 de Noviembre de 2020). *Introducción al Machine Learning*. gub.uy.
- Barboza, M. (2019). *Metodología para la Determinación de Hundimiento en Minas de Panel Caving Bajo Incertidumbre Geológica*. Universidad de Chile, Santiago.
- Bustamante, M., Daza, A., & Bustamante, P. (2017). *Simulation software VENTSIM™ the influence of implementation of work abandoned sealings ventilation of an underground coal mine*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 6.
- Chilena, M. (Diciembre de 2014). *Ventilación subterránea: Adecuándose a grandes proyectos mineros*. Obtenido de <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/ventilacion-subterranea-adecuandose-grandes-proyectos-mineros/#>
- Chilena, M. (10 de Octubre de 2019). *Energía: Clientes regulados pagan 44% más que las empresas mineras*. Minería chilena. Obtenido de <https://www.mch.cl/2019/10/10/energia-clientes-regulados-pagan-44-mas-que-las-empresas-mineras/#>
- Córdoba, C., & Molina, J. (2011). *Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea*. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (29), 78.
- Cruz, C. M. (2020). *Ventiladores, Servicios mineros*, Universidad de Talca. Curico, Chile.
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed. ed.). USA.
- Escolano, F., Cazorla, M., Alfonso, M., Colomina, O., & Lozano, M. (2003). *Inteligencia artificial: modelos, técnicas y áreas de aplicación*. Madrid, España: Thomson Ediciones Spain.
- Fallas, J. (2012). *Universidad para la cooperación internacional*. Obtenido de https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/correlacion_lineal_2012.pdf
- Flores, R., & Fernández, J. (2008). *Las redes neuronales artificiales*. Obtenido de <https://books.google.cl/books?id=X0uLwi1Ap4QC&pg=PA60&dq=perceptron+multicapa&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKewj7zLjIpO32AhXYg5UCHTkLBKkQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q=perceptron%20multicapa&f=false>

- Freire, E., & Silva, S. (14 de Noviembre de 2019). *Redes neuronales*. Medium. Obtenido de <https://bootcampai.medium.com/redes-neuronales>
- Gastañaga, A., & Yataco, A. (1963). *Control del contaminante polvo en minas y plantas concentradoras*. Lima.
- Generales, P. S. (2020). *Pentagono MHH*. Obtenido de <https://www.pentagonosac.com>
- Gutiérrez, S. L. (2011). *Inteligencia artificial y simulación*. Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana, XXIV(3).
- Hanke, J. E., & Wichern, D. (2010). *Pronóstico en los negocios*. Pearson. Obtenido de file:///C:/Users/ariva/Downloads/HANke_Wichern.pdf
- Hartman, L., Mutmansky, M., Ramani, R., & Wang, Y. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Hernández, L. (2019). *Planificación de un sistema de ventilación en minería subterránea de Panel Caving*. Universidad de Talca, Curicó.
- IBM. (2011a). *IBM SPSS Conjoint 24*. España.
- IBM. (2011b). *Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 20*.
- IBM. (2021). *IBM*. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/SaaS?topic=networks-multilayer-perceptron>
- Innovation, A. (22 de Octubre de 2019). *Atria Innovation*. Obtenido de <https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/>
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. Nueva Delhi: PHI Learning Private Limited.
- Krishnakumar, P., K Rameshkumar, & K I Ramachandran. (2015). *Tool Wear Condition Prediction Using Vibration Signals in High Speed Machining (HSM) of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy*. Procedia Computer Science, 50, 270 – 275.
- López, R. E. (2021). *Libro online de IAAR*. Obtenido de <https://iaarbook.github.io/deeplearning/>
- Martínez, E. (2005). *Dialnet*. Obtenido de <file:///C:/Users/ariva/Downloads/Dialnet-ErroresFrecuentesEnLaInterpretacionDelCoeficienteD-1143023.pdf>
- Medium. (14 de Septiembre de 2018). *Diferencias entre la inteligencia artificial y el Machine Learning*. Medium. Obtenido de <https://medium.com>

- Nergeco. (2017). *Nergeco Entrematic*. Obtenido de <https://www.nergeco.com/es/puertas-para-la-industria-minera-97.html>
- Oficina Internacional del Trabajo. (1965). *Guía para la prevención y la supresión del polvo en las minas, los túneles y las canteras*. Ginebra.
- Olivera, O. G.-O. (16 de Septiembre de 2019). *Xeridia*. Obtenido de <https://www.xeridia.com/blog/redes-neuronales-artificiales-que-son-y-como-se-entrenan-parte-i>
- Pineda, C. (2021). *Aprendizaje automático y profundo en python: Una mirada hacia la inteligencia artificial*. Obtenido de <https://books.google.cl>
- Pino, R., Gómez, A., & de Abajo, N. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: Sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Ponce, J. (10 de Julio de 2021). *jahazielponce.com*. Obtenido de <https://jahazielponce.com/funciones-de-activacion-y-como-puedes-crear-la-tuya-usando-python-r-y-tensorflow/>
- Python Software Foundation. (08 de Septiembre de 2021). *Python*. Obtenido de <https://docs.python.org/es/3/tutorial/index.html>
- Ramirez, N., & Fuentes, C. (2019). *Modelamiento del sistema de ventilación y control de metano con el simulador VentSim™ en la mina subterránea de carbón Fezmine, Polonia*. Universidad de Concepción.
- Sánchez, R. (Noviembre de 2017). *Análisis Conjunto - Conjoint Analysis - y su aplicacion en la empresa*. Trabajo de investigación, Universidad de Piura, Pad-escuela de dirección. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu>
- SERNAGEOMIN. (07 de Febrero de 2004). *Normativa de seguridad minera*. Decreto supremo N° 72. Obtenido de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/Normativa%20de%20Seguridad%20Minera.pdf>
- SERNAGEOMIN, S. N. (2008). *Guía metodológica de seguridad*. Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN, S. N. (Octubre de 2015). *Ventilación de minas*. Curanilahue, Chile.
- Serrano, A., Soria, E., & Martín, J. (2009). *Redes neuronales artificiales*. Universidad de Valencia. Obtenido de http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-2/libro_ocw_libro_de_redes.pdf

- Soto, G. (1996). *El método Taguchi en diseños experimentales*. Xalapa.
- Spyder. (2020). *Spyder*. Obtenido de <https://www.spyder-ide.org/>
- Stanziola, L. (2016). *Optimización del desgaste de la herramienta en una talladora de engranajes CNC utilizando el método Taguchi y análisis de la varianza (ANOVA)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza.
- Ventius. (2016). *Polvo en minería, Sistemas de control de Polvo*. 8.
- VentSim. (2019). *VentSim 3D Mine Ventilation Simulation Software*. Obtenido de <https://www.ventsim.com/es/>
- Zitrón. (2010). *Ventilación de minas subterráneas*. Santiago.

APÉNDICE A

ESCENARIO	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
2	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
3	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0
6	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
7	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
8	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
9	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
10	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
11	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
12	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
13	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
14	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
15	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
16	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0
17	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
18	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
19	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
20	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1
21	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0
22	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
23	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
24	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
25	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
26	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
27	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1
28	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1
29	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
31	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
32	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1

33	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
34	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
35	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
36	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
37	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
38	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
40	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
41	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
42	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
43	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
44	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
45	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0
46	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
47	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
48	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
49	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
50	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
51	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
52	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
53	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
54	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
55	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
56	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
57	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
58	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
59	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
60	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
61	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
62	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
63	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
64	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
65	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
66	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
67	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
68	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
69	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
70	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
71	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0

72	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
73	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
74	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
75	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
76	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
77	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
78	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
79	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
80	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
81	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
82	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
83	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
84	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
85	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
86	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
87	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
88	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
89	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
90	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
91	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
92	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
93	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
94	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
95	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
96	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
97	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
98	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
99	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
100	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
101	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
102	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
103	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
104	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
105	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
106	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
107	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
108	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
109	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
110	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

111	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
112	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
113	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
114	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
115	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
116	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
117	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
118	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
119	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
120	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
121	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
122	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
123	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
124	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
125	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
126	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
127	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0
128	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
129	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
130	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
131	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
132	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
133	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
134	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
135	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
136	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
137	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
138	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
139	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
140	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
141	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
142	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
143	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
144	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
145	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
146	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
147	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
148	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
149	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0

150	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
151	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
152	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
153	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
154	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
155	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
156	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
160	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
161	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
162	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
163	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
164	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
165	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
166	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
167	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
168	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
169	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
170	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
171	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
172	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1
173	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1
174	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
175	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
176	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
177	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
178	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
179	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
180	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
181	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
182	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
183	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
184	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
185	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
186	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0
187	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
188	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0

189	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
190	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
191	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
192	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
193	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
194	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
195	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1
196	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
197	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
198	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
199	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
200	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
201	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
202	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1
203	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1
204	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
205	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
206	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
207	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0
208	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1

APÉNDICE B

Tabla B.1 Caudales simulados de escenarios adicionalmente generados.

ESCENARIO	Punto centro (m³/s)	Punto extremo inferior (m³/s)	Punto extremo superior (m³/s)	Punto esquina (m³/s)	Punto galería (m³/s)	Punto estocada (m³/s)
1	11,4	6,8	8,8	18,3	8,8	4,5
2	11,5	6,6	9,1	18,0	9,2	4,6
3	11,5	6,6	9,1	18,0	9,2	4,5
4	10,7	8,3	7,0	14,8	7,6	3,8
5	10,7	8,3	7,2	15,8	4,5	3,8
6	11,5	6,6	9,3	19,0	3,5	4,5
7	11,4	6,6	12,8	19,0	3,5	4,5
8	11,4	6,6	11,2	18,4	4,3	4,5
9	11,9	5,6	13,2	18,7	4,2	5,4
10	12,0	5,6	9,0	18,7	4,2	5,4
11	11,5	6,6	7,6	18,4	4,3	4,5
12	9,4	5,6	6,5	18,2	4,4	5,0
13	7,5	6,7	4,5	18,5	4,3	4,4
14	8,1	5,2	8,1	15,8	4,5	3,7
15	8,2	7,5	7,1	15,7	4,5	3,8
16	8,2	7,6	7,1	15,7	4,5	3,9
17	8,2	7,6	7,0	14,8	7,4	3,9
18	8,3	7,5	4,7	14,3	5,9	3,9
19	9,2	6,4	7,4	13,7	7,0	4,4
20	9,3	5,8	9,1	13,5	7,4	5,1
21	9,3	5,8	11,0	14,0	9,1	5,1
22	9,3	5,8	11,1	15,4	5,4	5,1
23	11,4	6,7	12,8	15,4	5,5	4,6
24	10,6	8,3	9,8	15,8	4,5	3,9
25	10,6	8,3	9,8	15,8	4,5	3,8
26	8,1	7,0	8,1	15,7	4,5	4,5
27	10,5	8,4	8,2	20,0	3,8	4,6
28	10,9	7,6	9,9	20,8	3,5	5,1
29	10,8	7,5	9,9	20,8	3,5	5,1
30	10,8	7,5	9,9	20,8	3,5	5,2
31	10,9	7,6	9,9	20,8	3,5	5,2
32	12,3	5,0	15,1	19,4	5,5	6,8
33	12,3	5,0	15,1	19,4	5,5	6,8

34	17,0	2,3	25,6	16,5	2,1	10,0
35	16,9	2,1	27,7	17,2	0,2	10,0
36	16,8	2,0	27,4	13,6	17,6	9,9
37	19,6	7,0	32,2	13,2	19,6	9,6
38	19,5	3,6	32,1	13,2	19,5	14,1
39	16,1	1,5	26,2	15,3	17,1	13,3
40	9,9	2,7	18,2	13,9	3,8	10,7
41	8,4	1,1	15,4	14,3	4,5	9,8
42	8,6	1,0	11,5	14,3	4,5	9,8
43	10,4	1,5	13,3	18,2	3,1	10,3
44	7,5	1,0	10,5	19,1	4,5	9,5
45	7,6	1,0	10,5	19,1	4,5	9,5
46	5,5	3,4	8,1	15,3	5,8	8,8
47	5,5	3,4	8,1	15,3	5,8	8,7
48	2,8	5,5	5,1	15,8	4,5	7,5
49	8,6	12,0	4,6	15,8	4,5	2,4
50	2,8	5,5	5,1	15,8	4,5	7,5
51	1,1	3,0	5,3	15,8	4,5	9,0
52	1,1	3,0	5,5	15,8	4,5	9,0
53	11,0	3,2	11,2	14,6	4,0	15,6
54	15,0	6,4	16,1	19,7	2,3	15,6
55	14,7	6,4	23,8	19,7	2,3	15,6
56	14,7	6,4	23,8	18,3	10,4	15,6
57	12,9	5,3	20,9	19,6	8,5	15,0
58	11,4	1,4	17,8	18,5	8,0	15,8
59	11,4	1,4	17,8	19,5	3,9	15,8
60	11,5	1,5	17,8	19,5	3,9	15,8
61	10,4	2,5	15,7	18,8	4,1	15,2
62	14,4	4,8	20,5	19,1	4,0	13,7
63	10,4	2,5	15,7	18,8	4,1	15,2
64	11,5	1,5	17,8	19,5	3,9	15,8
65	13,3	0,8	20,9	18,4	5,4	16,4
66	12,7	3,2	14,6	18,1	5,4	4,9
67	12,5	5,3	14,7	18,1	5,4	7,7
68	12,3	5,6	14,1	17,6	4,4	7,5
69	11,4	7,2	11,0	17,8	4,9	6,3
70	12,3	5,6	14,1	17,6	4,4	7,5
71	12,3	5,7	16,6	18,3	3,3	7,5
72	11,8	6,2	14,9	19,6	4,3	7,0
73	11,8	6,2	14,9	19,6	4,3	6,9
74	12,3	5,7	16,6	18,3	3,3	7,4

75	11,4	7,3	13,4	18,4	4,0	6,2
76	10,8	8,1	11,6	14,8	4,9	5,5
77	10,9	8,1	9,0	14,8	4,9	5,5
78	12,1	6,1	11,4	14,3	4,2	7,0
79	10,2	10,5	7,6	14,9	3,1	6,6
80	10,3	10,4	5,2	14,4	4,0	6,6
81	13,0	6,9	11,6	12,8	1,5	12,7
82	10,3	10,4	5,2	14,4	4,0	6,6
83	10,3	10,4	5,0	12,9	8,1	6,6
84	9,4	12,0	3,0	13,7	7,0	5,2
85	10,2	9,4	4,7	13,1	7,9	4,6
86	10,2	8,5	4,6	13,1	7,9	2,4
87	11,4	6,3	7,3	12,2	9,4	3,3
88	12,1	4,9	8,8	17,7	10,0	4,0
89	13,7	1,5	12,3	17	11,9	5,8
90	11,9	6,1	8,6	16,7	9,9	5,3
91	11,8	8,6	8,6	16,7	9,9	8,8
92	8,5	8,4	5,2	17,2	5,3	7,3
93	8,5	8,4	4,9	15,9	7,9	7,3
94	8,5	8,4	6,3	15,9	7,9	7,3
95	8,5	6,4	6,3	15,9	7,9	4,2
96	8,6	4,2	8,1	16,4	8,4	4,3
97	7,7	3,1	11,3	17,2	9,5	8,1
98	10,4	4,8	15,9	15,8	11,1	9,0
99	8,3	4,4	7,3	16,7	8,2	4,2
100	9,4	3,8	9,6	17,1	7,2	4,5
101	9,6	2,8	10,8	17,0	7,5	5,1
102	10,2	2,7	11,9	16,3	8,3	5,1
103	12,5	3,1	14,7	16,5	8,6	5,0
104	12,5	3,1	14,8	17,9	5,2	5,0
105	13,0	6,8	17,1	14,3	6,3	13,1
106	10,6	9,7	8,0	14,3	6,0	7,0
107	10,6	7,8	7,9	14,3	6,0	4,0
108	10,6	7,8	9,5	14,8	7,5	4,0
109	10,6	7,7	9,6	14,8	7,6	4,0
110	11,1	6,6	11,6	17,8	8,5	4,4
111	11,2	6,5	11,9	17,5	8,9	4,4
112	9,1	5,9	10,0	17,2	8,7	4,7
113	9,2	5,8	8,0	16,7	6,9	4,7
114	9,1	5,9	10,0	17,2	8,7	4,7
115	10,3	3,4	16,7	18,4	9,5	10,3

116	10,4	2,6	16,7	18,4	9,5	15,4
117	9,6	4,7	15,2	18,2	9,3	15,1
118	6,2	4,6	10,9	19,9	10,2	9,0
119	12,0	5,4	17,5	23,2	12,7	8,2
120	13,4	4,4	20,6	17,8	14,6	8,9
121	13,6	4,2	20,9	16,3	14,8	8,9
122	19,5	3,7	32,2	13,2	19,6	14,3
123	21,1	5,7	33,8	16,4	15,9	15,4
124	18,2	1,5	29,0	16,9	14,6	14,8
125	18,2	1,5	29,1	19,0	2,9	14,8
126	12,7	5,5	17,4	19,0	4,7	8,1
127	12,9	3,2	17,3	19,0	4,7	5,1
128	12,0	4,7	14,1	18,7	4,9	4,2
129	12,2	4,3	14,9	18,3	4,5	4,4
130	11,5	6,4	12,8	17,7	4,5	4,4
131	7,2	0,8	6,3	12,6	8,8	7,1
132	7,2	0,8	6,5	14,2	3,6	7,2
133	7,5	1,8	8,1	13,9	3,1	8,2
134	9,5	6,7	10,6	13,3	2,0	9,5
135	9,5	2,7	10,6	13,3	2,0	13,9
136	9,4	2,7	10,4	10,6	11,0	13,9
137	9,5	6,6	10,4	10,6	11,0	9,5
138	9,4	6,6	12,8	11,3	13,5	9,5
139	9,4	6,6	13,0	13,9	0,4	9,5
140	8,4	4,6	10,9	14,3	1,6	8,4
141	6,3	4,5	6,4	15,3	3,8	4,3
142	6,2	4,5	7,6	15,3	3,8	4,3
143	6,2	4,4	7,6	15,3	3,8	4,2
144	15,6	2,5	15,8	15,2	6,1	13
145	15,7	1,6	15,8	15,2	6,1	8,2
146	19,3	6,3	20	15,2	6,1	9,5
147	11,6	5,0	10,9	15,1	6,5	4,0
148	10,9	7,7	9,5	15,1	6,2	5,2
149	4,9	0,3	8,5	15,2	5,9	9,8
150	5,5	3,4	8,1	15,3	5,8	8,8
151	10,6	8,5	8,5	15,2	6,0	4,8
152	10,6	8,4	6,2	14,7	6,8	4,8
153	10,6	8,4	6,2	14,7	6,8	4,7
154	10,6	8,4	6,2	14,7	6,8	4,8
155	10,6	8,4	5,9	12,9	8,5	4,8
156	8,8	12,0	1,9	14,4	6,2	2,5

157	11,5	2,7	18,7	16,8	11,2	15,6
158	10,1	4,5	16,1	13,5	10,1	15,1
159	10,2	4,5	16,2	15,1	5,2	15,1
160	8,2	9,0	7,6	15,9	5,8	7,0
161	8,6	8,5	9,5	15,8	5,9	8,3
162	9,2	7,8	11,4	18,5	5,3	8,5
163	9,2	7,8	11,4	18,5	5,3	8,6
164	9,9	5,1	14,3	19,1	5,1	8,4
165	10,0	5,1	10,3	19,1	5,1	8,4
166	9,9	5,1	14,3	19,1	5,1	8,4
167	9,2	5,5	12,6	15,6	6,0	8,2
168	8,7	6,5	9,6	15,8	5,9	6,8
169	8,7	6,5	9,6	15,8	5,9	6,8
170	11,8	6,8	12,8	11,5	10,2	7,0
171	11,2	7,8	10,4	12,2	9,4	6,1
172	11,2	7,7	7,3	12,2	9,4	6,1
173	13,4	4,9	12,3	9,2	12	11,3
174	12,2	5,7	9,7	10,9	10,7	10
175	12,4	2,7	9,8	10,9	10,7	5,5
176	12,4	2,7	9,8	10,9	10,7	5,7
177	12,4	2,7	10,0	13,3	2,2	5,7
178	13,8	0,3	12,4	14,4	3,8	7,1
179	13,6	3,8	12,4	14,4	3,8	12,1
180	12,2	5,6	10,0	13,3	2,2	10,3
181	13,4	4,1	12,4	13	4,4	11,9
182	12,4	7,6	10,6	13,3	4,5	13,1
183	9,5	5,1	6,8	13,5	7,5	5,6
184	9,5	5,2	6,8	13,5	7,5	5,6
185	8,9	5,3	6,2	13,9	6,9	5,6
186	8,9	5,3	7,8	14,4	8,5	5,6
187	8,8	5,3	10,7	14,4	8,5	5,6
188	8,7	5,3	10,7	14,4	8,5	5,6
189	7,8	6,1	8,5	15,0	7,2	5,4
190	10,6	2,1	17,5	13,7	9,9	10,8
191	10,7	2,2	16,5	13,2	8,1	10,8
192	9,5	1,8	14,2	13,5	7,5	10,0
193	6,7	0,4	9,7	12,3	9,1	9,2
194	8,6	2,0	13,1	11,3	10,3	9,9
195	8,7	2,0	9,0	11,3	10,3	9,9
196	12,5	2,2	12,5	18,6	13,0	5,4
197	11,9	3,9	11,2	18,1	12,2	4,9

198	15,5	3,0	15,8	17,8	11,8	8,1
199	15,5	3,0	15,1	17,1	9,6	8,1
200	17,7	5,9	17,8	17,3	9,9	9,0
201	17,7	5,9	17,8	18,9	5,2	9,0
202	17,5	5,9	26,4	18,9	5,2	9,0
203	12,5	3,0	14,8	17,9	5,2	4,9
204	12,5	3,0	16,3	18,5	4,4	4,9
205	12,0	4,1	14,9	18,3	4,5	4,3
206	11,4	6,2	12,8	17,7	4,5	4,3
207	11,4	6,2	12,8	17,7	4,5	4,4
208	11,4	6,1	10,9	17,2	5,3	4,4

APÉNDICE C

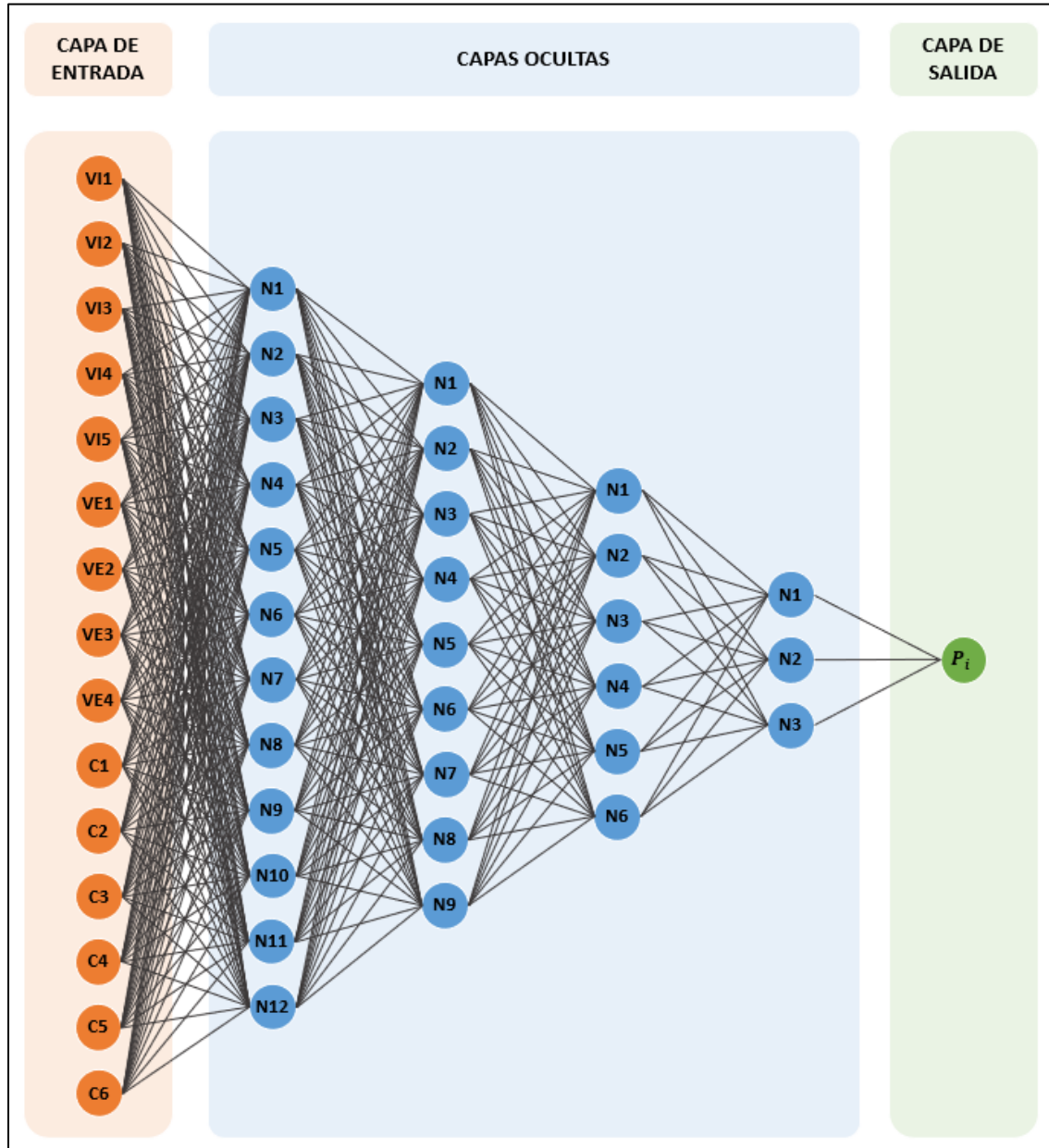


Figura C.1 Esquema de la red neuronal (Elaboración propia).

ESCENARIO	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VE1	VE2	VE3	VE4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	39,7	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	39,5	1	1	1	1	0	0
2	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	1	1	1	1	0	0
3	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	0	0
4	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	0	1	1	1	0	0
5	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	0	1	1	1	1	0
6	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	1	0
7	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	0	1	0
8	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	0	1	1
9	39,6	38,6	38,4	0,0	38,9	0,0	0,0	39,7	39,6	0	1	1	0	1	1
10	39,6	38,6	38,4	0,0	38,9	0,0	0,0	39,7	39,6	0	1	1	1	1	1
11	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	39,6	39,5	0	1	1	1	1	1
12	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	39,5	39,5	0	1	1	1	1	1
13	39,7	0,0	0,0	38,4	38,9	0,0	0,0	39,6	39,6	0	1	1	1	1	1
14	39,7	0,0	0,0	0,0	39,0	39,6	39,7	0,0	39,6	0	1	1	0	1	0
15	39,8	0,0	0,0	0,0	39,1	39,4	0,0	0,0	39,4	0	1	1	0	1	0
16	39,8	0,0	0,0	0,0	39,1	39,4	0,0	0,0	39,4	1	1	1	0	1	0
17	39,8	0,0	0,0	0,0	39,1	39,4	0,0	0,0	39,4	1	1	1	0	0	0
18	39,8	0,0	0,0	0,0	39,1	39,4	0,0	0,0	39,4	1	1	1	0	0	1
19	39,9	0,0	0,0	0,0	39,1	39,3	0,0	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
20	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	39,4	0,0	39,5	0,0	1	1	1	0	0	1
21	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	39,4	0,0	39,5	0,0	1	1	1	0	0	0
22	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	39,4	0,0	39,5	0,0	1	1	1	0	1	0
23	39,7	0,0	38,5	0,0	39,0	39,5	0,0	39,6	0,0	1	1	1	0	1	0
24	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	1	1	1	0	1	0
25	39,6	0,0	38,4	0,0	38,9	39,7	0,0	39,8	39,7	0	1	1	0	1	0
26	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	39,6	0,0	39,7	39,6	0	1	1	0	1	0
27	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	0,0	0,0	40,0	39,9	0	1	0	0	1	1
28	0,0	37,7	37,4	37,2	38,1	0,0	0,0	40,2	40,1	0	1	0	0	1	1
29	0,0	37,7	37,4	37,2	38,1	0,0	0,0	40,2	40,1	0	1	1	0	1	1
30	0,0	37,7	37,4	37,2	38,1	0,0	0,0	40,2	40,1	1	1	1	0	1	1
31	0,0	37,7	37,4	37,2	38,1	0,0	0,0	40,2	40,1	1	1	0	0	1	1
32	0,0	37,9	37,5	37,4	38,2	0,0	0,0	39,9	0,0	1	1	0	0	1	1
33	0,0	37,9	37,5	37,4	38,2	0,0	0,0	39,9	0,0	0	1	0	0	1	1

34	0,0	38,3	38,1	38,1	0,0	0,0	0,0	39,7	0,0	0	1	0	0	1	1
35	0,0	38,3	38,1	38,1	0,0	0,0	0,0	39,7	0,0	0	1	0	0	1	0
36	0,0	38,2	38,1	38,1	0,0	0,0	0,0	39,7	0,0	0	1	0	0	0	0
37	0,0	38,2	38,1	38,1	0,0	0,0	39,9	39,9	0,0	0	1	0	0	0	0
38	0,0	38,2	38,1	38,1	0,0	0,0	39,9	39,9	0,0	0	0	0	0	0	0
39	0,0	0,0	38,2	38,1	0,0	0,0	39,8	39,8	0,0	0	0	0	0	0	0
40	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	39,7	0,0	39,8	0,0	1	1	1	0	1	0
41	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	39,7	0,0	39,8	0,0	1	1	1	0	1	0
42	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	39,7	0,0	39,8	0,0	1	1	1	1	1	0
43	0,0	0,0	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	39,6	0,0	1	1	1	1	1	0
44	0,0	0,0	0,0	38,2	38,7	0,0	0,0	39,7	0,0	1	1	1	1	1	0
45	0,0	0,0	0,0	38,2	38,7	0,0	0,0	39,7	0,0	1	1	0	1	1	0
46	0,0	0,0	0,0	38,1	38,6	39,7	0,0	39,8	0,0	1	1	0	1	1	0
47	0,0	0,0	0,0	38,1	38,6	39,7	0,0	39,8	0,0	0	1	0	1	1	0
48	0,0	0,0	0,0	38,1	38,6	39,9	0,0	40,0	40,0	0	1	0	1	1	0
49	0,0	0,0	0,0	37,7	38,3	40,0	0,0	40,2	40,1	0	1	0	1	1	0
50	0,0	0,0	0,0	38,1	38,6	39,9	0,0	40,0	40,0	0	1	0	1	1	0
51	0,0	38,2	0,0	38,0	38,5	40,0	0,0	40,1	40,0	0	1	0	1	1	0
52	0,0	38,2	0,0	38,0	38,5	40,0	0,0	40,1	40,0	0	1	0	0	1	0
53	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	40,0	39,9	0	0	1	1	1	1
54	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	40,0	39,9	0	0	0	1	1	1
55	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	40,0	39,9	0	0	0	0	1	1
56	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	40,0	39,9	0	0	0	0	0	1
57	0,0	38,3	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	40,1	40,0	0	0	0	0	0	1
58	0,0	38,4	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	39,8	39,8	0	0	0	0	0	1
59	0,0	38,4	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	39,8	39,8	0	0	0	0	1	1
60	0,0	38,4	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	39,8	39,8	0	0	1	0	1	1
61	0,0	38,4	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	39,6	0	0	1	0	1	1
62	0,0	38,3	0,0	0,0	38,6	0,0	0,0	0,0	39,6	0	0	1	0	1	1
63	0,0	38,4	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	39,6	0	0	1	0	1	1
64	0,0	38,4	0,0	0,0	38,7	0,0	0,0	39,8	39,8	0	0	1	0	1	1
65	0,0	38,4	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	39,7	0,0	0	0	1	0	1	1
66	39,7	38,6	38,5	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	0	0	1	1
67	39,7	38,6	38,5	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	0	0	0	1	1
68	39,6	38,5	38,3	38,3	0,0	0,0	39,6	0,0	0,0	1	0	0	0	1	1
69	39,7	0,0	38,4	38,3	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	0	0	0	1	1
70	39,6	38,5	38,3	38,3	0,0	0,0	39,6	0,0	0,0	1	0	0	0	1	1
71	39,6	38,5	38,3	38,3	0,0	0,0	39,6	0,0	0,0	1	0	0	0	1	0
72	39,3	38,2	38,0	37,9	38,4	0,0	39,7	0,0	0,0	1	0	0	0	1	0

73	39,3	38,2	38	37,9	38,4	0,0	39,7	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
74	39,6	38,5	38,3	38,3	0,0	0,0	39,6	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
75	39,7	0,0	38,4	38,3	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
76	39,6	0,0	38,4	38,3	0,0	39,6	39,7	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
77	39,6	0,0	38,4	38,3	0,0	39,6	39,7	0,0	0,0	0	0	0	1	1	0
78	39,5	38,4	38,3	38,2	0,0	39,7	39,8	0,0	0,0	0	0	0	1	1	0
79	39,5	38,5	38,3	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	39,6	0	0	0	1	1	0
80	39,5	38,5	38,3	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	39,6	0	0	0	1	1	1
81	0,0	38,2	38,1	38,1	0,0	39,8	0,0	0,0	39,8	0	0	0	1	1	1
82	39,5	38,5	38,3	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	39,6	0	0	0	1	1	1
83	39,5	38,5	38,3	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	39,6	0	0	0	1	0	1
84	39,6	0,0	38,4	38,3	0,0	39,5	0,0	0,0	39,5	0	0	0	1	0	1
85	39,5	0,0	38,3	38,3	0,0	39,8	39,9	0,0	39,7	0	0	0	1	0	1
86	39,5	0,0	38,3	38,3	0,0	39,8	39,9	0,0	39,7	0	1	0	1	0	1
87	39,4	0,0	38,2	38,2	0,0	40,1	40,2	40,2	40,1	0	1	0	1	0	1
88	39,5	0,0	38,3	38,2	0,0	0,0	39,8	39,9	39,8	0	1	0	1	0	1
89	39,4	38,3	38,2	38,2	0,0	0,0	39,9	40,0	39,9	0	1	0	1	0	1
90	39,5	38,4	38,3	38,2	0,0	0,0	0,0	39,8	39,7	0	1	0	1	0	1
91	39,5	38,4	38,3	38,2	0,0	0,0	0,0	39,8	39,7	0	0	0	1	0	1
92	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0	1	1	1	1
93	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0	1	1	0	1
94	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0	1	0	0	1
95	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
96	39,8	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
97	0,0	0,0	0,0	0,0	38,6	0,0	39,7	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
98	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,7	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
99	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
100	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
101	39,8	38,7	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
102	39,8	38,8	0,0	0,0	39,1	0,0	39,4	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
103	39,7	38,7	38,5	0,0	38,9	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
104	39,7	38,7	38,5	0,0	38,9	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	1	0	1	1
105	0,0	38,2	38,1	0,0	38,6	39,8	0,0	0,0	39,8	1	0	1	0	0	1
106	39,7	38,6	38,4	0,0	38,9	39,5	0,0	0,0	39,5	1	0	1	0	0	1
107	39,7	38,6	38,4	0,0	38,9	39,5	0,0	0,0	39,5	1	1	1	0	0	1
108	39,7	38,6	38,4	0,0	38,9	39,5	0,0	0,0	39,5	1	1	1	0	0	0
109	39,7	38,6	38,4	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	39,5	1	1	1	0	0	0
110	39,7	38,7	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,4	1	1	1	0	0	0
111	39,8	38,7	38,5	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	39,4	1	1	1	0	0	0

112	39,9	38,8	0,0	0,0	39,1	0,0	0,0	0,0	39,3	1	1	1	0	0	0
113	39,9	38,8	0,0	0,0	39,1	0,0	0,0	0,0	39,3	1	1	1	0	0	1
114	39,9	38,8	0,0	0,0	39,1	0,0	0,0	0,0	39,3	1	1	1	0	0	0
115	0,0	38,4	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	39,6	1	1	1	0	0	0
116	0,0	38,4	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	39,6	1	0	1	0	0	0
117	0,0	0,0	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	39,5	1	0	1	0	0	0
118	39,4	38,4	0,0	38,2	38,7	0,0	39,9	40,0	39,9	1	0	0	0	0	0
119	38,4	36,7	36,3	36,2	37,1	0,0	40,7	40,8	40,7	1	0	0	0	0	0
120	39,4	38,3	38,2	38,2	0,0	0,0	39,9	40,0	39,9	1	0	0	0	0	0
121	39,5	38,4	38,3	38,2	0,0	0,0	39,7	39,7	0,0	1	0	0	0	0	0
122	0,0	38,2	38,1	38,1	0,0	0,0	39,9	39,9	0,0	1	0	0	0	0	0
123	0,0	38,3	38,2	0,0	0,0	0,0	39,8	39,8	0,0	1	0	0	0	0	0
124	0,0	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	39,8	39,8	0,0	1	0	0	0	0	0
125	0,0	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	39,8	39,8	0,0	1	0	0	0	1	0
126	39,7	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	39,6	39,6	0,0	1	0	0	0	1	0
127	39,7	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	39,6	39,6	0,0	1	1	0	0	1	0
128	39,8	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	0	0	1	0
129	39,8	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	39,5	0,0	0,0	1	1	0	0	1	0
130	39,9	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	1	0	0	1	0
131	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	39,9	40,0	0,0	39,9	1	1	0	1	0	1
132	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	39,9	40,0	0,0	39,9	1	1	0	1	1	1
133	0,0	0,0	0,0	38,2	0,0	40,2	40,3	40,3	40,2	1	1	0	1	1	1
134	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	1	0	1	1	1
135	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	0	0	1	1	1
136	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	0	0	1	0	1
137	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	1	0	1	0	1
138	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	1	0	1	0	0
139	0,0	38,2	0,0	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	1	1	0	1	1	0
140	0,0	38,3	0,0	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	1	1	0	1	1	0
141	39,6	38,5	0,0	38,3	0,0	39,8	39,8	0,0	39,7	1	1	0	1	1	0
142	39,6	38,5	0,0	38,3	0,0	39,8	39,8	0,0	39,7	1	1	0	0	1	0
143	39,6	38,5	0,0	38,3	0,0	39,8	39,8	0,0	39,7	0	1	0	0	1	0
144	0,0	0,0	38,2	0,0	38,6	40,0	40,0	40,0	0,0	1	0	0	1	1	0
145	0,0	0,0	38,2	0,0	38,6	40,0	40,0	40,0	0,0	1	1	0	1	1	0
146	0,0	38,2	38,1	0,0	38,6	40,0	40,1	40,1	0,0	1	1	0	1	1	0
147	0,0	37,5	37,1	37	37,9	40,4	40,4	40,4	0,0	1	1	0	1	1	0
148	0,0	37,7	37,4	37,2	38,1	40,0	0,0	40,1	0,0	1	1	0	1	1	0
149	0,0	38,2	0,0	38,0	38,5	39,8	0,0	39,9	0,0	1	1	0	1	1	0
150	0,0	0,0	0,0	38,1	38,6	39,7	0,0	39,8	0,0	1	1	0	1	1	0

151	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	39,8	0,0	39,9	0,0	1	1	0	1	1	0
152	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	39,8	0,0	39,9	0,0	1	1	0	1	1	1
153	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	39,8	0,0	39,9	0,0	0	1	0	1	1	1
154	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	39,8	0,0	39,9	0,0	1	1	0	1	1	1
155	0,0	0,0	37,9	37,8	38,4	39,8	0,0	39,9	0,0	1	1	0	1	0	1
156	0,0	0,0	37,8	37,7	38,3	40,0	0,0	40,2	40,1	1	1	0	1	0	1
157	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0
158	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0
159	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
160	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	39,4	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
161	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	39,5	0,0	0	0	0	0	1	0
162	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,4	0,0	0	0	0	0	1	0
163	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,4	0,0	1	0	0	0	1	0
164	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	39,6	0,0	1	0	0	0	1	0
165	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	39,6	0,0	1	0	0	1	1	0
166	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	39,6	0,0	1	0	0	0	1	0
167	39,7	0,0	0,0	0,0	0,0	39,7	39,7	39,7	0,0	1	0	0	0	1	0
168	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	39,6	0,0	0,0	1	0	0	0	1	0
169	39,8	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5	39,6	0,0	0,0	0	0	0	0	1	0
170	39,5	0,0	38,3	38,2	0,0	39,8	39,9	39,9	0,0	0	0	1	0	0	1
171	39,4	0,0	38,2	38,2	0,0	40,1	40,2	40,2	40,1	0	0	1	0	0	1
172	39,4	0,0	38,2	38,2	0,0	40,1	40,2	40,2	40,1	0	0	1	1	0	1
173	0,0	0,0	38,1	38,1	0,0	40,3	40,3	40,4	40,3	0	0	1	1	0	1
174	0,0	0,0	38,1	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	0	0	1	1	0	1
175	0,0	0,0	38,1	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	0	1	1	1	0	1
176	0,0	0,0	38,1	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	1	1	1	1	0	1
177	0,0	0,0	38,1	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	1	1	1	1	1	1
178	0,0	0,0	38,2	0,0	0,0	39,9	40,0	0,0	39,9	1	1	1	1	1	1
179	0,0	0,0	38,2	0,0	0,0	39,9	40,0	0,0	39,9	1	0	1	1	1	1
180	0,0	0,0	38,2	38,1	0,0	40,0	40,0	0,0	39,9	1	0	1	1	1	1
181	0,0	0,0	38,2	38,1	0,0	39,8	39,9	0,0	0,0	1	0	1	1	1	1
182	0,0	0,0	38,2	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	0,0	1	0	1	1	1	1
183	39,8	38,7	0,0	0,0	39,0	39,5	0,0	39,5	0,0	0	1	0	1	0	1
184	39,8	38,7	0,0	0,0	39,0	39,5	0,0	39,5	0,0	1	1	0	1	0	1
185	39,7	38,7	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	39,6	0,0	1	1	0	1	0	1
186	39,7	38,7	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	39,6	0,0	1	1	0	1	0	0
187	39,7	38,7	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	39,6	0,0	1	1	0	0	0	0
188	39,7	38,7	0,0	0,0	0,0	39,5	0,0	39,6	0,0	1	1	1	0	0	0
189	39,7	38,6	0,0	0,0	0,0	39,6	0,0	39,8	39,7	1	1	1	0	0	0

190	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	39,9	0,0	40,0	39,9	1	1	1	0	0	0
191	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	39,9	0,0	40,0	39,9	1	1	1	0	0	1
192	0,0	38,4	0,0	0,0	0,0	39,7	0,0	0,0	39,7	1	1	1	0	0	1
193	0,0	38,3	0,0	38,2	0,0	39,7	0,0	0,0	39,7	1	1	1	0	0	1
194	0,0	38,4	0,0	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	0,0	1	1	1	0	0	1
195	0,0	38,4	0,0	38,2	0,0	39,6	0,0	0,0	0,0	1	1	1	1	0	1
196	0,0	37,9	37,5	37,4	38,2	0,0	39,9	0,0	0,0	0	1	1	1	0	0
197	0,0	0,0	38,0	37,9	38,4	0,0	39,8	0,0	0,0	0	1	1	1	0	0
198	0,0	0,0	38,3	0,0	38,7	0,0	39,7	0,0	0,0	0	1	1	1	0	0
199	0,0	0,0	38,3	0,0	38,7	0,0	39,7	0,0	0,0	0	1	1	1	0	1
200	0,0	38,3	38,2	0,0	38,6	0,0	39,7	0,0	0,0	0	1	1	1	0	1
201	0,0	38,3	38,2	0,0	38,6	0,0	39,7	0,0	0,0	0	1	1	1	1	1
202	0,0	38,3	38,2	0,0	38,6	0,0	39,7	0,0	0,0	0	1	1	0	1	1
203	39,8	38,7	38,5	0,0	38,9	0,0	39,5	0,0	0,0	0	1	1	0	1	1
204	39,7	38,7	38,5	0,0	38,9	0,0	39,5	0,0	0,0	0	1	1	0	1	0
205	39,8	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	39,5	0,0	0,0	0	1	1	0	1	0
206	39,9	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	1	1	0	1	0
207	39,9	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	1	1	0	1	0
208	39,9	0,0	38,6	0,0	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	1	1	0	1	1