

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

Resumen trabajo de grado

Autor(es): Nombre y Apellidos

Nombres, Gilma Elena, Apellidos, Vivares Gelvez

Nombres, Jesús David, Apellidos, Martínez Luquez

Facultad: Ingeniería

Plan de estudios: Ingeniería de minas

Director: Ing. Yesid Castro Duque

Título del trabajo (tesis): “Estudio sicrométrico y determinación de cargas térmicas en rampa 1 de mina el silencio, de GranColombiaGold.”

En este trabajo de grado se presenta un estudio sicrométrico y determinación de cargas térmicas presentes en el frente de desarrollo rampa 1 de mina el Silencio, en Segovia- Antioquia, con lo cual, se propone un diseño de optimización del sistema de ventilación auxiliar.

Para esto, fue necesario realizar mediciones básicas, tales como: caudal de aire, temperatura húmeda, temperatura seca, presión barométrica y porcentaje de humedad relativa; se utilizaron sicrómetros, termo higrómetros, anemómetros y algunos cálculos se confrontaron con ayuda de software o calculadoras sicrométricas. Adicionalmente, se realizó un análisis del índice de estrés térmico a partir de la determinación de la temperatura global de bulbo húmedo (WBGT).

Se encontró que el calor calorífico (Sigma Heat) promedio generado en la zona de estudio es de 95,49 KJ/Kg de aire seco, la entalpía media del aire equivale a 98,720 KJ/Kg de aire seco, el calor total emitido al aire es de 317,06 KW, el índice de estrés térmico WBGT calculado en el frente de avance de la zona de estudio, por un valor de 30,7°C e indica condiciones ambientales riesgosas; adicionalmente, el índice de calor es superior a los 40°C, clasificando como rango 3 y sugiere que se está en zona de peligro.

En el diseño de optimización final se propone un sistema de ventilación auxiliar capaz de suministrar unos 50 Kcfm de caudal, bajo una combinación en paralelo y utilizando ducto liso de 0,8 metros de diámetro para una longitud de 280 metros.

Palabras clave: Temperaturas húmeda y seca, Entalpía, Sigma Heat, Gradiente Geotérmico, índice de estrés térmico

Características:

PÁGINAS: 93 ILUSTRACIONES: 39

ESTUDIO SICROMÉTRICO Y DETERMINACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS EN RAMPA 1
DE MINA EL SILENCIO, DE GRANCOLOMBIAGOLD.

JESÚS DAVID MARTÍNEZ LUQUÉS

GILMA ELENA VIVARES GELVEZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

ESTUDIO SICROMÉTRICO Y DETERMINACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS EN RAMPA 1
DE MINA EL SILENCIO, DE GRANCOLOMBIAGOLD.

JESÚS DAVID MARTÍNEZ LUQUEZ

GILMA ELENA VIVARES GELVEZ

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE: INGENIERO DE MINAS

DIRECTOR:

INGENIERO DE MINAS. YESID CASTRO DUQUE.

INGENIERO EN MINAS. MSC. INGENIERÍA AMBIENTAL

CODIRECTOR:

JORGE ENRIQUE CASTELLANOS ISCALA.

INGENIERO DE MINAS

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 15 de mayo de 2020

HORA: 4:00 p.m.

LUGAR: TICS MEET

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

TITULO DE LA TESIS: "ESTUDIO SICROMETRICO Y DETERMINACIONDE CARGAS TERMICAS EN RAMPA 1 DE MINA EL SILENCIO, DE GRANCOLOMBIAGOLD."

JURADOS: Ing. JOSE LUIS GOMEZ HERNANDEZ ENTIDAD: U. F. P. S.
Ing. GERMAN MIGUEL MENDEZ GOMEZ ENTIDAD: U. F. P. S.
Lic. JESUS ERNESTO URBINA CARDENAS ENTIDAD: U. F. P. S.

DIRECTOR: Ing. YESID CASTRO DUQUE

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN		(A) (M) (L)
		NUMERO	LETRA	
GILMA ELENA VIVARES GELVEZ	1180694	4.5	CUATRO, CINCO	MERITORIA
JESUS DAVID MARTINEZ LUQUEZ	1180616	4.5	CUATRO, CINCO	MERITORIA

OBSERVACIONES:

FIRMA DE LOS JURADOS:



Vº. Bº. 
COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR



Vigilada Mineducación

**GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y
BIBLIOTECARIOS**



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,
Señores
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS
Ciudad

Cordial saludo:

Gilma Elena Vivares Gelvez y Jesús David Martínez Luquez, identificado(s) con la C.C. N° 1.090.479.602 y 1,090.482.584, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado "ESTUDIO SICROMÉTRICO Y DETERMINACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS EN RAMPA 1 DE MINA EL SILENCIO, DE GRANCOLOMBIAGOLD", presentado y aprobado en el año dos mil veinte (2020) como requisito para optar al título de Ingeniería de minas; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que "los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atte.

Gilma Elena Vivares Gelvez, Cod, 1180694, C.c. 1.090.479.602
Jesús David Martínez Luquez, cod, 1180616, C.c. 1.090.482.584

Tabla de contenido

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	12
1.PROBLEMA	13
1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	13
1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	14
1.3.OBJETIVOS	14
Objetivo general.	14
Objetivos Específicos.	14
1.4.JUSTIFICACIÓN.	14
1.5.ALCANCES Y LIMITACIONES.	15
1.5.1.Alcances.	15
1.5.2.Limitaciones.	15
1.6.DELIMITACIONES.	15
1.6.1.Delimitación espacial.	15
1.6.2.Delimitación conceptual	16
2.GENERALIDADES	16
2.1.DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.	16
2.2.ACCESIBILIDAD.	18
2.3.TOPOGRAFÍA, ELEVACIÓN Y VEGETACIÓN.	19
2.4.CLIMA Y DURACIÓN DE LA TEMPERATURA OPERATIVA.	20
2.5.DISPONIBILIDAD DE INFRAESTRUCTURA, RECURSOS Y DERECHOS DE TIERRAS SUPERFICIALES.	21
2.6.HISTORIA	23
2.7.ENTORNO GEOLÓGICO Y MINERALIZACIÓN	24
2.7.1.Geología regional.	24
2.7.2.Geología local.	26
2.8.DEPOSITO MINERAL.	28
2.9.MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN.	28
2.9.1.Cámaras y pilares.	28
2.10.SISTEMAS DE VENTILACIÓN	30
2.10.1.Ventilación principal.	30
2.10.2.Ventilación secundaria.	32
2.10.3.Ventilación auxiliar.	33
3.MARCO REFERENCIAL	35
3.1.ANTECEDENTES.	35
3.1.1.Antecedentes bibliográficos.	35
3.2.MARCO TEÓRICO.	37
3.3.MARCO CONCEPTUAL.	40
3.4.MARCO LEGAL	50
4.METODOLOGÍA	51

5.DATA EXISTENTE.	55
6.DATA DE CAMPO	56
7.ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS.	56
7.1.PARAMETRIZACIÓN DE VARIABLES SICROMÉTRICAS	57
7.2.SICROMETRÍA GENERAL PARA EL TRAYECTO SUPERIOR DE RAMPA 1.	57
7.3.ESTUDIO SICROMÉTRICO ESPECÍFICO PARA EL FRENTE DE AVANCE DE LA RAMPA PRINCIPAL DE DESARROLLO – RAMPA 1.	58
7.4.DETERMINACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS PARA EL FRENTE DE AVANCE DE LA RAMPA PRINCIPAL DE DESARROLLO – RAMPA 1.	60
7.5.ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS TÉRMICO.	65
7.6.PROUESTA DE OPTIMIZACIÓN AL SISTEMA DE VENTILACIÓN AUXILIAR.	81
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	92

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Límites de licencia para proyectos Segovia y Carla (SRK Consulting (U.S.), 2018)	18
Ilustración 2. Mapa de accesibilidad por carretera al proyecto Segovia y las principales rutas a través del Departamento de Antioquia	19
Ilustración 3. Condiciones climáticas generales de superficie para Segovia. (Prosser, 2019)	21
Ilustración 4. Mapa geológico regional que ilustra la ubicación de la concesión minera de Segovia. (SRK Consulting (U.S.), 2018)	25
Ilustración 5. Esquema general de ventilación, El Silencio. (Prosser, 2019)	31
Ilustración 6. Esquema de ventilación zona norte, El Silencio. (Prosser, 2019).	31
Ilustración 7. Esquema de ventilación zona sur, El Silencio. (Prosser, 2019).	32
Ilustración 8. Ubicación de ventiladores secundarios, El Silencio.	33
Ilustración 9. Esquema de ventilación auxiliar del frente de desarrollo rampa 1, El Silencio.	34
Ilustración 10. Curva de operación del ventilador del frente de desarrollo rampa 1, El Silencio.	35
Ilustración 11. Gráfica de temperaturas térmicas de la roca (gradiente geotérmico), (Prosser, 2019)	44
Ilustración 12. Distribución de energía tomada y el calor producido por maquinas eléctricas. (McPherson, 1993)	46
Ilustración 13. Esquema de la zona de estudio.	50
Ilustración 14. Psicrómetro digital, Ambient Weather WS-HT350	52
Ilustración 15. Termo-higro-anemómetro digital, Kestrel 5200	53
Ilustración 16. Distanciómetro digital, Leica D110.	53
Ilustración 17. Anemómetro de paletas Davis.	54
Ilustración 18. Calculadora ANL-WGBT.	54
Ilustración 19. Asistente de calor de VentSim.	55
Ilustración 20. Gráfico de temperatura efectiva para el personal ligeramente vestido. (McPherson, 1993)	67
Ilustración 21. Temperatura efectiva para la estación número 3.	67
Ilustración 22. Influencia de la temperatura efectiva en el rendimiento del trabajador. (McPherson, 1993)	69
Ilustración 23. Influencia de la temperatura efectiva en el rendimiento del trabajador para la estación número 3.	69
Ilustración 24. Configuraciones de la Calculadora ANL. (OSHA, 2017)	71
Ilustración 25. Parámetros de ingreso y resultados de la Calculadora ANL (OSHA, 2017)	72

Ilustración 26. Factores de ajuste (CAF) para la WBGT, de acuerdo con la ropa usada (OTM). (OSHA, 2017)	73
Ilustración 27. Tasas de trabajo metabólico. (OSHA, 2017)	73
Ilustración 28. Gráfica de la ACGIH para TLV y AL. (OSHA, 2017).	74
Ilustración 29. Criterios de detección de la ACGIH para TLV y AL. (OSHA, 2017)	75
Ilustración 30. Determinación de la WBGT por medio de la calculadora ANL. (OSHA, 2017).	75
Ilustración 31. Factor de ajuste de ropa CAF para la WBGT. (OSHA, 2017).	76
Ilustración 32. Selección de la carga o tasa Metabólica. (OSHA, 2017).	76
Ilustración 33. Determinación del TLV y del AL.	77
Ilustración 34. Régimen de Trabajo – Descanso para el WBGT de 30,5°C y carga laboral pesada.	78
Ilustración 35. Determinación del TLV para corte 1400.	80
Ilustración 36. Resultados WBGT, índice de calor y régimen de trabajo - descanso para corte 1400.	81
Ilustración 37. Sistema de ventilación propuesto.	85
Ilustración 38. Curva de operación del ventilador #1 para el sistema propuesto.	86
Ilustración 39. Curva de operación del ventilador #2 para el sistema propuesto.	87

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Tasas metabólicas para diferentes actividades. (McPherson, 1993)	45
Tabla 2. Tiempo de permanencia en frentes de trabajo según temperatura efectiva. (Uribe, Garzon, & estrada, 2015).	51
Tabla 3. Cálculos sicrométricos generales para el trayecto superior de rampa 1.	57
Tabla 4. Cálculos sicrométricos específicos para el frente de avance de la rampa principal de desarrollo – Rampa 1.	58
Tabla 5. Cálculo de carga térmica, para Flujo radial de calor para túneles establecidos. (Ecuación 11.0)	61
Tabla 6. Cálculo de carga térmica, para frente de avance de desarrollo. (Ecuación 12.0).	61
Tabla 7. Cálculo de carga térmica, por Auto descompresión. (Ecuación 13.0).	62
Tabla 8. Cálculo de carga térmica, por metabolismo. (Ecuación 14.0).	63
Tabla 9. Cálculo de carga térmica, por equipos diésel. (Ecuación 15.0).	63
Tabla 10. Cálculo de carga térmica, por equipos eléctricos. (Ecuación 16.0).	64
Tabla 11. Cargas térmicas totales por equipos diésel y eléctricos.	64
Tabla 12. Cargas térmicas totales.	65
Tabla 13. Temperatura efectiva, zona de estudio.	66
Tabla 14. Temperatura efectiva y tiempos de permanencia, zona de estudio.	68
Tabla 15. Temperatura global de bulbo húmedo e índice de calor para la rampa 1.	78
Tabla 16. Temperatura global de bulbo húmedo e índice de calor para corte de producción 1400.	79
Tabla 17. Caudal requerido por carga térmica.	82
Tabla 18. Caudal requerido por equipos diésel.	83
Tabla 19. Caudal requerido por equipos diésel.	83
Tabla 20. Factores de choque.	84

Resumen

En este trabajo de grado se presenta un estudio sicrométrico y determinación de cargas térmicas presentes en el frente de desarrollo rampa 1 de mina el Silencio, en Segovia- Antioquia, con lo cual, se propone un diseño de optimización del sistema de ventilación auxiliar.

Para esto, fue necesario realizar mediciones básicas, tales como: caudal de aire, temperatura húmeda, temperatura seca, presión barométrica y porcentaje de humedad relativa; se utilizaron sicrómetros, termo higrómetros, anemómetros y algunos cálculos se confrontaron con ayuda de software o calculadoras sicrométricas. Adicionalmente, se realizó un análisis del índice de estrés térmico a partir de la determinación de la temperatura global de bulbo húmedo (WBGT).

Se encontró que la energía calorífica (sigma Heat) promedio generado en la zona de estudio es de 95,49 KJ/Kg de aire seco; y el incremento es de 4,717 KJ/Kg de aire seco. La entalpia media del aire en la zona de estudio equivale a 98,720 KJ/Kg de aire seco, y el delta entálpico es de 5,01 KJ/Kg de aire seco.

El calor total emitido desde las diferentes fuentes al aire es de 317,06 KW; siendo el proceso de auto compresión la fuente de mayor aporte, seguido de los equipos mecanizados; por otro lado, se identificó que el macizo rocoso ofrece una capacidad de enfriamiento.

El índice de estrés térmico WBGT calculado en el frente de avance de la zona de estudio, por un valor de 30,7°C indica condiciones ambientales riesgosas para el desempeño de las actividades del personal, adicionalmente el índice de calor es superior a los 40°C, clasificando como rango 3 y sugiere que se está en zona de peligro.

En el diseño de optimización final se propone un sistema de ventilación auxiliar capaz de suministrar unos 50 Kcfm de caudal, bajo una combinación en paralelo y utilizando ducto liso de 0,8 metros de diámetro para una longitud de 280 metros.

Palabras claves: Temperaturas húmeda y seca, Entalpia, Sigma Heat, Gradiente Geotérmico, índice de estrés térmico, índice de calor, etc.

Introducción

Debido a las fuentes que transfieren calor a todo ambiente subterráneo, como el gradiente geotérmico, la auto-comprensión del aire, el metabolismo humano, y los equipos mecanizados; las condiciones termo-ambientales en todas las labores mineras subterráneas suelen ser complejas.

Los frentes de desarrollo (rampas), en la mina “El Silencio” de la empresa Gran Colombia Gold, se caracterizan por tener un alto grado de mecanización en sus operaciones, con maquinaria que transfiere calor al ambiente y que pueden afectar las condiciones de trabajo en la labor.

Por lo anterior, todo sistema de ventilación ya sea principal o auxiliar, debe tener la capacidad de garantizar un óptimo confort a los trabajadores, mejorar las condiciones de higiene y seguridad, minimizar posibles daños en equipos y por ende aumentar los rendimientos. Este proyecto busca conocer las condiciones termo-ambientales actuales del frente de desarrollo rampa 1, durante la ejecución de las operaciones de minado, para con ello brindar un diseño de optimización al sistema de ventilación auxiliar, bajo parámetros sicrométricos, y a partir del cálculo de cargas térmicas.

En el desarrollo de este se hace uso de métodos adecuados para la recopilación de los datos de campo, a través, de la instrumentación mínima necesaria para el levantamiento de parámetros sicrométricos; se calcularon cargas térmicas y se indica el análisis elaborado para el cálculo del estrés térmico en la zona, así mismo se plantean las modificaciones necesarias al sistema auxiliar de ventilación con la ayuda de un modelo de simulación.

1. Problema

1.1. Planteamiento del problema.

Las condiciones termo-ambientales de todo frente de trabajo, caracterizadas por las variables sicrométricas de temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, presión barométrica, humedad relativa y flujo de aire que llega a través de los sistemas principales y auxiliares de ventilación, deben ser las adecuadas en cantidad y calidad, para lograr el normal desarrollo de las actividades en un ambiente de trabajo cómodo que permita obtener las más altas productividades y llevando los trabajos con la mayor seguridad en interior mina.

En la mina el Silencio propiedad de la empresa minera GranColombiaGold, debido a las fuentes que transfieren calor al ambiente subterráneo, como: el gradiente geotérmico, la auto-comprensión del aire, el metabolismo humano, y los equipos mecanizados; las condiciones termo-ambientales en los frentes de desarrollo (rampas), son complejas, presentándose condiciones de altas humedades y temperaturas, lo cual representa riesgos, que pueden causar tragedias en los peores casos. Uno de los riesgos es la afectación a la salud corporal de los trabajadores y el otro es el impacto sobre la seguridad y la productividad de la mina.

En mina el silencio en su frente de desarrollo rampa 1, se implementará un estudio sicrométrico que permita conocer las condiciones termo-ambientales actuales durante la ejecución de las operaciones de minado; adicionalmente, se calcularán las cargas térmicas presentes, y se analizará el índice de estrés térmico; para con ello sugerir un diseño de optimización al sistema auxiliar de ventilación del frente y obtener información que pueda ser utilizada para futuras proyecciones de los sistemas de ventilación en la mina.

1.2. Formulación del problema.

Con la presente investigación pretendemos dar respuesta al siguiente interrogante:

¿Cuáles son los parámetros sicrométricos y cargas térmicas a evaluar en el frente de desarrollo “Rampa 1 – mina el Silencio”, necesarios para la optimización del sistema de ventilación auxiliar que garantice la seguridad y confort de los mineros?

1.3. Objetivos

Objetivo general.

Realizar un estudio sicrométrico, y determinación de las cargas térmicas presentes en el frente de desarrollo Rampa 1 de la mina “El silencio”.

Objetivos Específicos.

- Cuantificar las cargas térmicas en rampa 1, producto del gradiente geotérmico, la auto-comprensión del aire, el metabolismo humano, y el uso de equipos diésel y eléctricos.
- Calcular la entalpía y el sigma heat, generados en el frente de desarrollo de Rampa 1.
- Realizar un cálculo y análisis del índice estrés térmico (WBGT).
- Sugerir un diseño de optimización para el sistema de ventilación auxiliar del frente de desarrollo.

1.4. Justificación.

El avance de las vías de desarrollo (rampas) en la mina el silencio, se realiza con un alto grado de mecanización; se utilizan perforadoras electrohidráulicas (jumbos), transloaders (Scoop), y equipos de bombeo y de ventilación. Estos equipos, además de las

condiciones naturales de la mina subterránea, las voladuras y otros factores; aumentan la transferencia de calor al medio.

Por lo anterior, con el presente proyecto se busca optimizar el sistema de ventilación auxiliar del frente de desarrollo rampa 1, para mejorar las condiciones de la atmósfera subterránea, brindando un mejor confort a los mineros, y garantizar el rendimiento de los equipos (jumbos, Scoop, Dámper truck, electrobombas, etc.), y por ende contribuir al alcance de estándares o niveles altos de desempeño laboral en un ambiente seguro.

1.5. Alcances y limitaciones.

1.5.1. Alcances.

Implementar el estudio sicrométrico y cuantificación de cargas térmicas para la propuesta de optimización del sistema auxiliar de ventilación del frente de desarrollo (Rampa 1) de la mina el Silencio, y con ello mejorar las condiciones de la atmosfera subterránea.

1.5.2. Limitaciones.

- Tiempo: La toma de datos y análisis de la información para este proyecto, está limitado por la disponibilidad de los investigadores de este, ya que cuentan con responsabilidades laborales adquirida con la empresa GranColombiaGold.

1.6. Delimitaciones.

1.6.1. Delimitación espacial.

El estudio sicométrico y la determinación de las cargas térmicas se llevará a cabo para el frente de desarrollo rampa 1 de la mina El Silencio, propiedad de la empresa GranColombiaGold, ubicada espacialmente en el distrito minero de Segovia – Remedios,

Antioquia, al noreste de Colombia, a unos 180 Km al noreste de Medellín, e identificada con el título minero 140 RMN: EDKE – 01, el cual es un título de reconocimiento de propiedad privada y no un contrato de concesión.

1.6.2. Delimitación conceptual

El estudio sicométrico y la determinación de cargas térmicas en rampa 1, abarcan conceptos generales, claros y concretos; en los cuales nos basaremos durante todo el transcurso de la investigación. Algunos de los términos específicos o primarios a tratar son: sicrometría, transferencia de calor, entalpia, sigma Heat, humedad relativa, presión barométrica, temperatura seca y húmeda, temperatura de roca virgen, índice de estrés térmico, entre otros.

2. Generalidades

2.1. Descripción de la empresa.

Gran Colombia Gold es una compañía canadiense, que cotiza en la bolsa de Toronto, líder en la exploración y producción de oro y plata, con operaciones enfocadas en Colombia, bajo tres proyectos principales; Segovia, Marmato y Zancudo.

El Proyecto Segovia se compone de varias áreas llamadas, Providencia, El Silencio, Sandra K, y las Verticales (Las Aves, Pomarroza y Pomarroza 2), ubicadas en los municipios mineros de Segovia-Remedios, departamento de Antioquia, noroeste de Colombia, aproximadamente 180 km al noreste de Medellín, capital del departamento, a $74^{\circ} 42' O$ y $7^{\circ} 04' N$. Adicionalmente, el área del Carla, el cual es un prospecto de

exploración ubicado aproximadamente a 10 km al sureste de Segovia a aproximadamente 7 ° 04 '18.0'' 'N, 74 ° 41' 55.5'' W. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

Los derechos mineros para el Proyecto Segovia comprenden el Título de Minería No. RPP 140 y dos Licencias de Exploración con un área total de aproximadamente 2,906 hectáreas (ha), ubicadas en los municipios de Segovia y Remedios, en el departamento de Antioquia. La licencia estaba en manos de FGM, pero, a partir de agosto de 2010, ahora es propiedad de Zandor Capital S.A. Colombia (Zandor), una subsidiaria de Gran Colombia. El Proyecto Carla comprende 9 concesiones, que tienen un área combinada de aproximadamente 1,915 ha, y se encuentran en gran parte al sur de la licencia de Segovia. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

El título fue registrado como RPP el 4 de abril de 1983 mediante Resolución N ° 000410. La FGM también tiene dos Licencias de Exploración rodeadas por el área de RPP 140. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

La licencia de Exploración No. 3855 fue expedida a FGM el 27 de julio de 1998 (Resolución 10397) y fue registrada el 24 de mayo de 2005. La Licencia de Exploración No. 3854 fue emitida el 3 de agosto de 1998 (Resolución 10440) y registrada el 14 de junio de 2005. Posteriormente FGM solicitó la conversión de las Licencias de Exploración N° 3854 y 3855 en Contratos de Concesión. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

El tipo de licencia de contrato RPP significa reconocimiento de propiedad privada de un título minero, y no es un Contrato de Concesión. Los RPP fueron creados por la Ley 20 de 1969. La ley, respetaba los derechos mineros y de tierras anteriores y requería que se presentara una prueba de la minería. El título RPP es una antigua propiedad de dominio absoluto que data del siglo XIX. Los títulos RPP otorgan derechos mineros a perpetuidad y la explotación es necesaria para mantener la validez de una licencia RPP. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

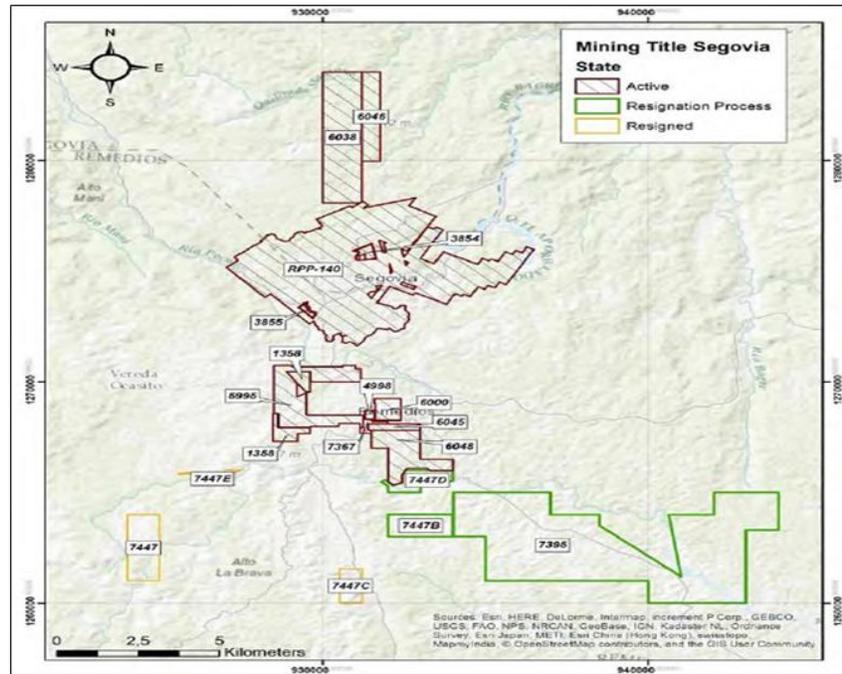


Ilustración 1. Límites de licencia para proyectos Segovia y Carla (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.2. Accesibilidad.

Segovia se encuentra a 180 km al NE de Medellín en el distrito minero de Segovia Remedios, Departamento de Antioquia, noroeste de Colombia, a $74^{\circ} 42' W$ y $7^{\circ} 04' N$. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

El acceso por carretera desde Medellín a Segovia es de 225 km, que recientemente se ha actualizado y ahora está pavimentado en toda su extensión. Yendo hacia el norte, hay una carretera de 61 km desde Segovia a Zaragoza, y otra de 120 km a Caucasia, para conectar con vías que conducen a los puertos marítimos de Colombia. El acceso aéreo se realiza en un vuelo chárter de 30 minutos desde Medellín a Otú, a 15 km al sur de Segovia, donde se tiene una pista de aterrizaje con superficie de asfalto. Desde Otú, Segovia se encuentra a 20 minutos en coche, pasando por los municipios de Remedios y La Cruzada. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

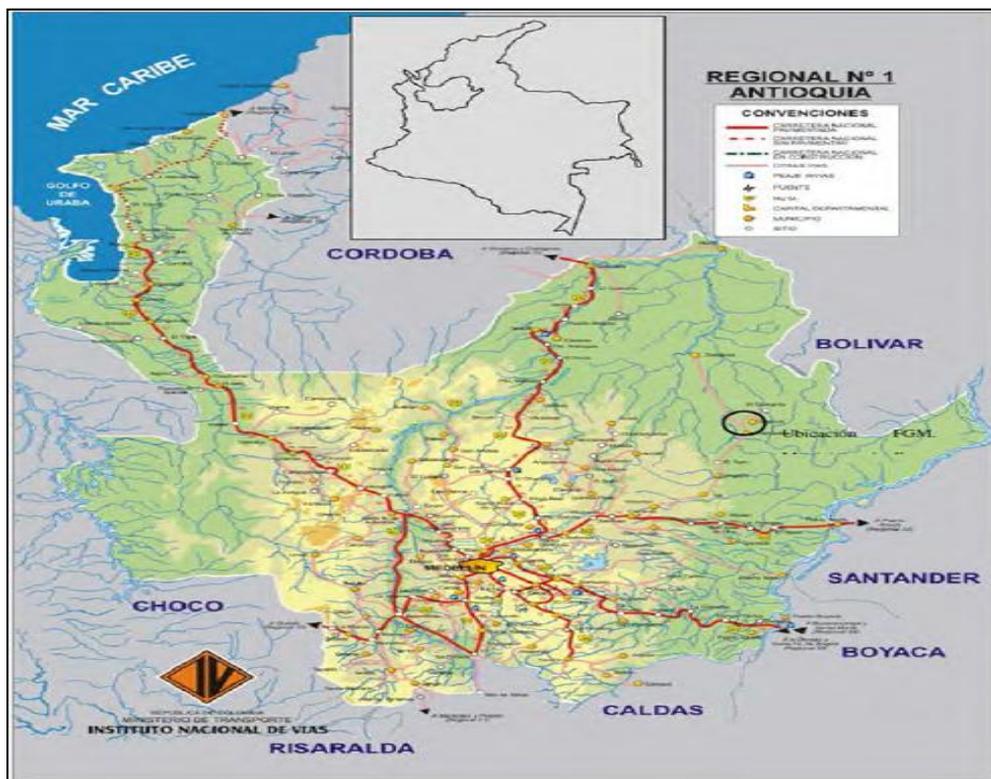


Ilustración 2. Mapa de accesibilidad por carretera al proyecto Segovia y las principales rutas a través del Departamento de Antioquia

2.3. Topografía, elevación y vegetación.

El proyecto está ubicado en las estribaciones de la parte noreste de la Cordillera Central de los Andes colombianos. La topografía es una meseta baja o una superficie erosiva a una altitud de 600 a 850 m, incidida por valles con un relieve de menos de 250 m, pero con pendientes pronunciadas de entre 20° y 40°. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

El patrón de drenaje es dendrítico. Los principales ríos en el área del Proyecto son Pocuné, Bagre e Ité. En el lado oeste de Segovia, el río Pocuné drena hacia el norte en el río Nechi, que alberga las principales operaciones de extracción de oro de placer. El Nechi es un afluente del río Cauca, que a su vez se une al río Magdalena que desemboca en el mar Caribe en

Barranquilla. El río Bagre drena la parte noreste del área y también es un afluente del Nechi. En el lado este de Segovia, el río Ité fluye hacia el sureste y luego hacia el noreste directamente hacia el río Magdalena. La vegetación en el área local en su estado primario es bosque tropical, pero la mayoría de las áreas han sido taladas para el pastoreo de ganado con cierto grado de crecimiento de bosque secundario. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.4. Clima y duración de la temperatura operativa.

Se pueden encontrar diferentes climas dentro de la región y varían con la elevación. Estos climas pueden ser definidos como:

- Caliente ($> 24^{\circ} \text{C}$) por debajo de 1,000 m en el valle del río Cauca;
- Templado (18°C a 24°C) entre 1,000 y 2,000 m;
- Frío por encima de 2,000 m (12°C a 18°C).

Segovia está situada dentro de la zona cálida donde el clima es tropical y húmedo con una precipitación anual de aproximadamente 2,670 milímetros (mm). El municipio de Segovia tiene una temperatura promedio de 25°C . (SRK Consulting (U.S.), 2018)

La lluvia tiene una distribución bimodal con los meses más húmedos de mayo a diciembre y una estación seca de diciembre a mayo. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

La temperatura alta diaria promedio es de 28°C , y generalmente se experimenta en marzo. La temperatura baja diaria promedio permanece constante durante todo el año a aproximadamente 21°C . (Prosser, 2019).

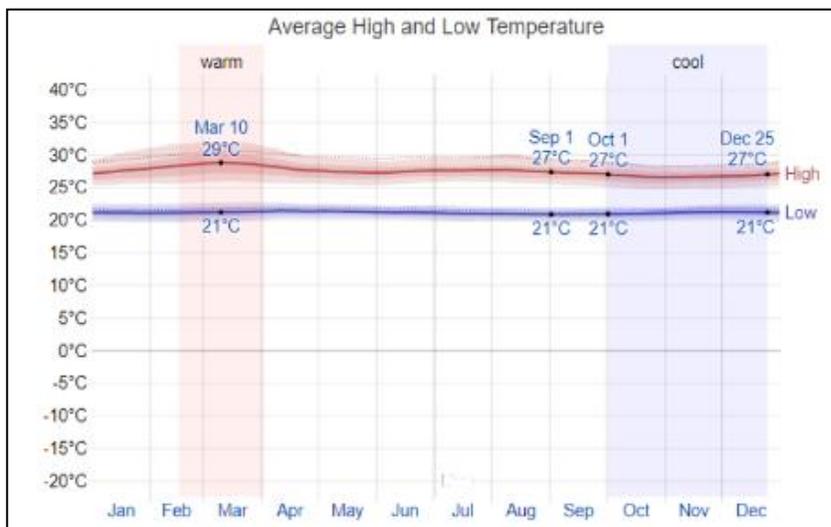


Ilustración 3. Condiciones climáticas generales de superficie para Segovia. (Prosser, 2019)

2.5. Disponibilidad de infraestructura, recursos y derechos de tierras superficiales.

La Compañía posee 177 propiedades de superficie (lotes y haciendas o granjas) en los municipios de Segovia y Remedios, por encima y adyacentes al título minero RPP 140 e instalaciones auxiliares tales como las plantas hidroeléctricas, estos tienen un área total de aproximadamente 6,406.8 ha. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Hay cuatro propiedades de tierra superficial que son esenciales para el desarrollo de la actividad minera, debido a su ubicación geográfica con respecto al acceso a las minas. Estas propiedades se describen como sigue:

- Propiedad La Salada (1,108 ha): ubicada sobre la mina El Silencio;
- Propiedad Marmajón (238 ha): ubicada sobre la mina Providencia;
- Propiedad de Santiago (134 ha): ubicada sobre la mina Providencia; y
- Propiedad La Llumidada (16.8 ha): ubicada sobre la mina Sandra K.

El proyecto está bien provisto de energía de dos fuentes. La primera es una gran empresa de servicios públicos Empresas Públicas de Medellín E.S.P (EPM), la segunda fuente de energía proviene de la Central Dona Teresa (PCH), que es un productor independiente más pequeño que opera el proyecto hidroeléctrico Doña Teresa de 8,6 millones de watts, aproximadamente a 20 km del sitio de Segovia. En cuanto al agua, es suministrada principalmente, por desagüe subterráneo y agua de lluvia. El agua se almacena en un estanque llamado lago La Tupia cerca de las instalaciones de procesamiento de María Dama. La planta usa aproximadamente 100 metros cúbicos por hora (m^3 / hr) suministrados principalmente por La Tupia. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Se hace utilización de la planta existente de María Dama para procesar el mineral extraído. Un segundo sitio está disponible si es necesario en la cercana ubicación de Pampa Verde, donde se inició la construcción de un molino, pero luego se detuvo a medida que bajó el precio del oro. No hay planes actuales para utilizar el sitio Pampa Verde. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Los desechos se almacenan en algunos sitios de la mina y se utilizan de manera productiva durante toda la operación. Sitios adecuados existen para gestionar los residuos. El proyecto tiene una instalación de almacenamiento de relaves, conocido como el Chocho, el cual entró en su totalidad de operación en agosto de 2018. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.6. Historia

La actividad de exploración inicial comenzó en la ciudad de Remedios en 1560, pero la actividad era limitada debido a la ubicación y al terreno difícil para acceder a las áreas minadas.

A mediados del siglo XVIII, la actividad minera estaba casi abandonada. Una segunda fase de extracción de oro comenzó después de la independencia y una afluencia de inversiones de Gran Bretaña, a través de compañías mineras registradas en Londres. La minería en el distrito comenzó en grande a principios de la década de 1850. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

La FMG se fundó en 1852, pero solo se detalla como Frontino y Bolivia (Sur American) Gold Company Limited en 1864. La empresa extrajo en el municipio de Frontino y la mina de Bolivia en Remedios. Se formó para comprar y trabajar las minas de El Silencio, Córdoba, La Salada y San Joaquín en una propiedad de 5,000 acres. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

En 1874, las operaciones en Frontino fueron eliminadas como una compañía separada, la Gold Mining Co Ltd. de Antioquia (Frontino). La compañía se centró entonces en el distrito de Remedios, donde compró minas adicionales, y para fines del siglo XIX era una de las empresas más grandes de Colombia, con 700 empleados. (SRK Consulting (U.S.), 2018) Gran Colombia Gold Corp. a través de su filial Zandor, hizo un acuerdo con fecha del 29 de marzo de 2010 para comprar los activos mineros y de otro tipo de FGM en virtud de una Promesa de Venta regida por un acuerdo colombiano, que fue aprobado por la Junta Asesora de Liquidación. La venta incluyó todos los activos de FMG sin responsabilidad financiera asociada. Los activos también incluyeron el RPP 140, más varios lotes de terreno que cubren la ubicación de las minas y las instalaciones auxiliares, así como las instalaciones de procesamiento, generación de energía, alojamiento y servicios médicos, entre otros. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

2.7. Entorno geológico y mineralización

Los límites de la licencia del Proyecto están separados en una serie de prospectos de exploración identificados y minas operativas, que forman parte del distrito aurífero Segovia-Remedios. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

2.7.1. Geología regional.

El distrito aurífero Segovia-Remedios se encuentra en y alrededor de los municipios de los mismos nombres dentro de la Cordillera Central colombiana. Esta región está dominada por rocas metamórficas e ígneas que están ampliamente orientadas de norte a sur. La región también contiene depósitos menores / localizados de material aluvial no consolidado y las condiciones climáticas predominantes han dado como resultado la formación de una gruesa capa de saprolito amarillo a parduzco que puede exceder los 60 m de profundidad. El distrito está alojado por el batolito Segovia de composición de granodiorita a diorita. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

El batolito tiene 10 km de ancho en Segovia y es alargado de Norte – Sur. La región está estructuralmente controlada por una serie de fallas orientadas de norte a sur a 350°, más notablemente los Otú-Pericos, que post-datan las fallas del Nus y Bagre, y son todos consideradas como más joven que el Cretáceo Inferior y forma parte del sistema de fallas Palestina que unía el Batolito de Segovia. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

La falla de Otú es sumamente inclinada, tiende 340° y tiene un desplazamiento lateral-sinistral de 66 km, define el contacto entre rocas paleozoicas que comprenden cuarzo-sericita y grafito esquistoso, esquistos metavolcánicos del grupo Cajamarca. La falla de Catarra tiende a 20° en el sur y 10° en el norte y tiene un desplazamiento sinistral-

lateral de 50 km. La falla de Nus tiende a 350° y tiene una inclinación empinada y desplazamiento lateral-dextral de 50 km. (SRK Consulting (U.S.), 2018).

El batolito de Segovia comprende un total de $5,600 \text{ km}^2$ orientados de norte a sur a 30° y predominantemente contiene diorita de grano medio a diorita de cuarzo y variaciones de cuarzo a granodiorita y gabro. Se encuentra intruido por diques andesíticos a lo largo de discontinuidades, que se consideran controles de la mineralización del oro. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Las fallas y fracturas en el batolito de Segovia constituyen un importante control sobre la mineralización y se considera que comprende tres conjuntos entre verticales, sub-verticales y de compresión. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

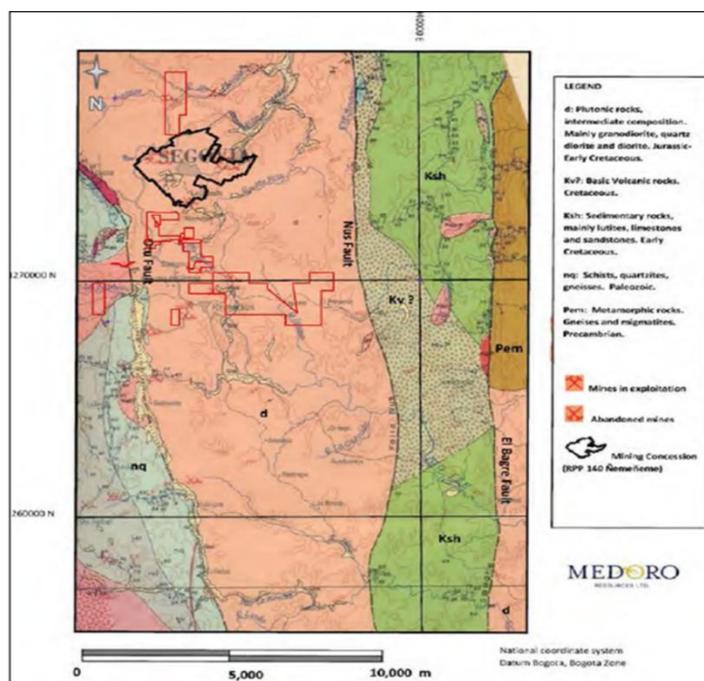


Ilustración 4. Mapa geológico regional que ilustra la ubicación de la concesión minera de Segovia. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.7.2. Geología local.

Dentro de los límites actuales de propiedad del RPP 140, hay una serie de minas o proyectos operativos, cuyas principales áreas de interés son: Providencia, El Silencio, las Verticales. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Cada una de las minas se ha centrado en una de las principales estructuras de las vetas, pero generalmente tiene una serie de vetas menores las cuales también se sabe que tienen continuidad geológica. La longitud de cuelga conocida de la mineralización de Providencia es de aproximadamente 2 km, y El Silencio de 2.7 km, mientras que Sandra K solo ha sido explorada en más de 1 km de longitud de cuelga. Con la excepción de Las Verticales, cada una de las vetas se clava en promedio entre 25° y 35°. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

El sistema de vetas Las Verticales está compuesto por una serie de zonas de cizallamiento que golpean hacia el noroeste y se consideran inmersiones pronunciadas (> 80°). (SRK Consulting (U.S.), 2018)

La única descripción publicada de la geología de Frontino es de Tremlett (1955) quien describió la geología como una estructura de vetas mineralizadas. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Las minas de la antigua Frontino están alojadas enteramente por rocas granodiorita / granitoide del batolito de Segovia, que se ha registrado como de edad jurásica tardía, pero algunas dataciones de rocas en la región sugieren que puede ser mucho más joven y de mediana a tardía-Cretáceo en edad ($\sim 68.4 \pm 5.5$ Ma a 84.1 ± 5.5 Ma). La granodiorita es de grano grueso (aproximadamente 5 mm), equigranular y de

color bastante oscuro con plagioclasa blanca, cuarzo y hornblende verde oscuro. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

La parte del distrito de Segovia-Remedios cubierta por el Proyecto, tiene tres fases principales de deformación reconocida, que comprende:

- Una fase temprana de deformación asociada con el emplazamiento de una serie empinadas y la inmersión superficial, diques de premineralización (D1),
- Una etapa de compresión orientada de manera general N-S (D2), y
- Una fase de compresión postmineralización orientada E-W (D3).

La mineralización del oro está alojada por una serie de venas de cuarzo-sulfuro. Los principales sulfuros presentes son pirita, calcopirita, esfalerita y galena. Las venas exhiben tres tendencias principales:

- N-S a golpe de NE, con un buzamiento de 30 ° E;
- E-W a golpe NW, con un buzamiento de 30 ° a N o NE; y
- NW con un buzamiento de 65-85 ° NE.

El ancho promedio las vetas de cuarzo son de 0,95 m, con un ancho máximo en ocasiones de hasta 9,00 m. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

Las venas de cuarzo comúnmente siguen diques básicos con un ancho de aproximadamente 2-3 m. Estos diques se pueden encontrar en la pared colgante o en el material de la pared del pie, ambos, o en el centro de la vena mineralizada. Los diques son basálticos y tienen fenocristales gruesos (7 mm) de color blanco plagioclasa en una matriz de grano fino y de color oscuro. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.8. Deposito mineral.

La mineralización del oro en Segovia se produce en las vetas de cuarzo-sulfuro mesotérmicas alojadas por un batolito. Se han clasificado como "Depósitos de oro relacionados con Plutón oxidado" según Sillitoe 2008, son consideraciones que se formaron después del enfriamiento del batolito y pueden tener una relación genética con el batolito, así como con el régimen de estrés regional relacionado con la falla de Otú. El depósito guarda una gran semejanza con los depósitos de Pataz en el norte de Perú. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.9. Métodos de explotación.

Las operaciones de Segovia están ubicadas en un distrito minero histórico que ha sido explotado por más de 100 años.

La mayor parte de la mineralización tiene buzamiento de aproximadamente 35°. Los métodos de minería actuales utilizados en las operaciones de Segovia incluyen cámaras y pilares, así como el método de corte y el relleno; este último utilizado exclusivamente en mina Providencia. El material generalmente se extrae de la mina mediante el uso de un sistema de elevación por apique (sistema de elevación en ángulo igual al del buzamiento de la mineralización). (SRK Consulting (U.S.), 2018)

2.9.1. Cámaras y pilares.

Consiste en dos fases; la fase primaria extrae una disposición de cámara y pilar de manera tradicional y la fase secundaria extrae material adicional de los pilares; es decir el pilar es entonces eliminado total o parcialmente según las condiciones geotécnicas. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

En la primera fase se aplican técnicas convencionales de cámaras y pilares con métodos de minería manual (uso de jacklegs o martillo neumático, rastrillos/azadones para transportar el material). Se accede a los paneles desde los niveles de acarreo subyacentes, así como también desde un desarrollo descendente (tambores) que divide los paneles en bloques. También se construyen tolvas desde la que se puede cargar la roca extraída. Los subniveles se desarrollan con una ligera pendiente para hacer que el manejo de materiales, usando rastrillos sea más fácil. (SRK Consulting (U.S.), 2018), Comúnmente, en la región al método se le denomina como zapas y conducciones, es decir tambores y sobre guías. El método requiere mucha mano de obra y utiliza principalmente azadones y jacklegs.

Los pilares son típicamente de 4m x 4m y las cámaras tienen de 4 a 6 m de ancho; hasta 2m x 2m; sin embargo, el tamaño del pilar puede variar significativamente. El soporte terrestre, en la mayoría de las áreas de las minas, es típicamente pernos de roca helicoidales, Split sets, madera, malla y hormigón proyectado. Los paquetes de madera y los pilares de cemento se usan cuando es necesario para lograr las proporciones de extracción planificadas, y por lo general en la segunda fase. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

En la mina El Silencio, se utiliza este método de explotación convencional mezclado con la utilización de equipos mecanizados (Volquetas, Scoop, Jumbos) para el cargue, acarreo del mineral y desarrollo de rampas. Las rampas, están ubicadas dentro de la mineralización y las pendientes están en ángulo para seguir la inmersión de la zona mineralizada y se utilizan para mover material y para acceder a los distintos niveles. (SRK Consulting (U.S.), 2018)

El tamaño de las rampas principales es de 4m x 3,5m, dependiendo del área de minería. Las inclinaciones principales de la rampa son del 13% con un radio de giro que varía de 11m a

15m. Las rampas principales se conectan a las venas a través de los accesos en cruzadas y los posteriores sill de desarrollo que tienen un tamaño de 4m x 3,5m.

2.10. Sistemas de ventilación

La mina El Silencio se divide en dos zonas de explotación; primero la zona norte que incorpora rampa 1, rampa 2 y el y nivel 38 explotados por GranColombiaGold; segundo, la zona sur profunda explotada por el contratista Navar.

2.10.1. Ventilación principal.

Actualmente, se tienen instalados en paralelo dos ventiladores axiales ubicados en superficie, cada uno de una capacidad nominal de 350 Hp de potencia y un caudal de 190 Kcfm; los cuales trabajan de manera extractiva, por medio de una chimenea vertical o Shaft de extracción de 3 metros de diámetro ubicada en el lado norte de la mina la cual llega hasta superficie.

El sistema de ventilación general proporciona aire fresco a través de Apique 0, Apique Bolivia, Nivel 18 y Nivel 5 (antigua ruta de escape.) Las áreas de trabajo o cortes (cámaras y pilares) son ventilados desde la parte superior hacia abajo con el flujo de aire siendo direccionado a la base del Alimak (Shaft). (Prosser, 2019), tal como se muestra en las ilustraciones 5 y 6.

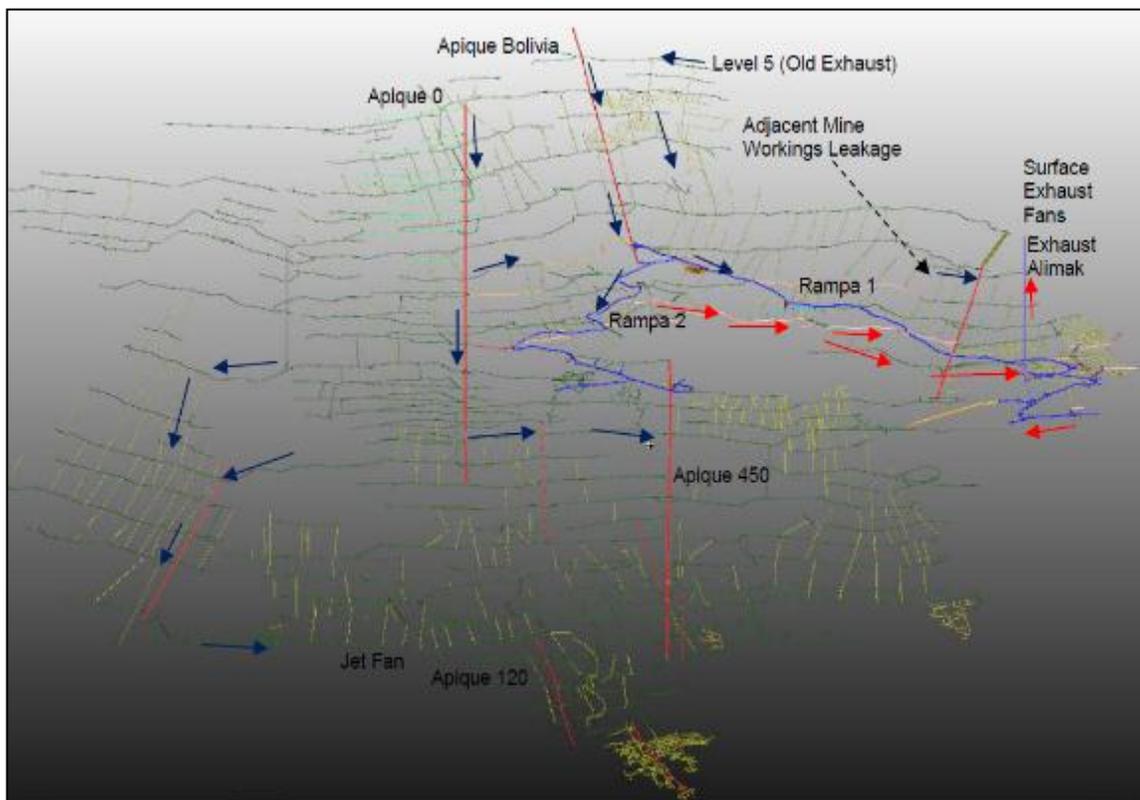


Ilustración 5. Esquema general de ventilación, El Silencio. (Prosser, 2019)

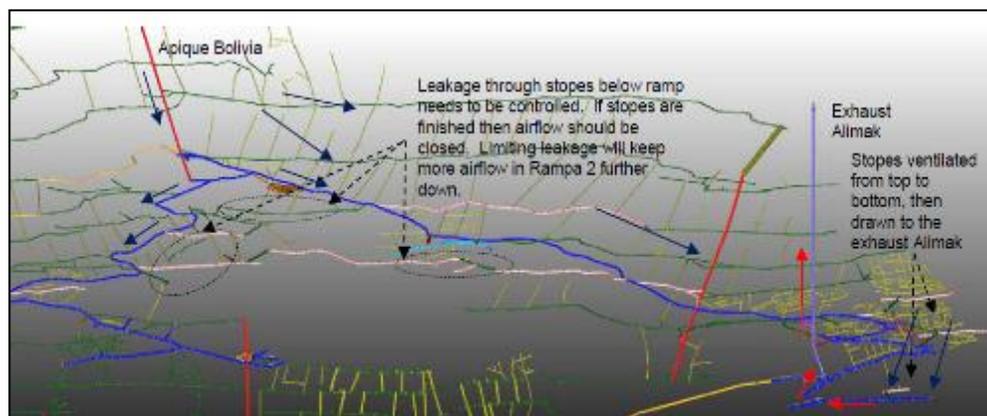


Ilustración 6. Esquema de ventilación zona norte, El Silencio. (Prosser, 2019).

La situación actual de ventilación para las áreas mineras del sur proporciona una ruta de aire fresco, pero no un escape. El flujo de aire se baja al Nivel 38 a través de una serie de

Apiques / rebajes antiguos y luego, una vez que se encuentra con el área Apique 450, se disipa. (Prosser, 2019).

El flujo de aire del nivel 38 no circula adecuadamente a las áreas inferiores o el lado norte del Nivel 38. Para establecer una ruta de escape para el nivel inferior áreas mineras, los tramos resueltos entre el Nivel 38 y la parte superior del Apique 450 podrían aislarse y se convertirá para la ruta de escape. (Prosser, 2019).

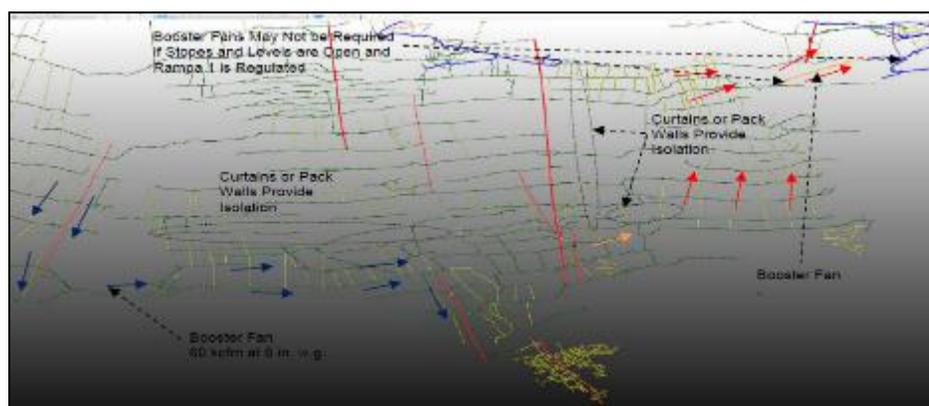


Ilustración 7. Esquema de ventilación zona sur, El Silencio. (Prosser, 2019).

Para atraer el flujo de aire a los niveles inferiores, se podría usar un ventilador de refuerzo formal instalado en un mamparo en el Nivel 38 sur. Una vez que el flujo de aire alcanza el Nivel 38, se puede dirigir a los niveles inferiores mediante la aplicación de cortinas y ventiladores de impulso (jet fans). (Prosser, 2019).

2.10.2. Ventilación secundaria.

En la mina El Silencio, se utilizan ventiladores secundarios o de refuerzo para relevar la presión de ventilación del sistema principal, puesto que han resultado demasiadas resistencias a los ventiladores principales, debido longitudes de tramos, curvaturas o reducción de áreas.

Actualmente, se tienen instalados en el nivel 23 dos ventiladores axiales de 125 Hp de potencia y 120 Kcfm de caudal, los cuales ayudan a extraer aire desde la zona norte rampa 2 y zona sur nivel inferiores; adicionalmente, se cuenta con un ventilador de refuerzo de 150 Hp y 60 Kcfm en el nivel 38 sur, para dirigir flujo de aire a los niveles inferiores.

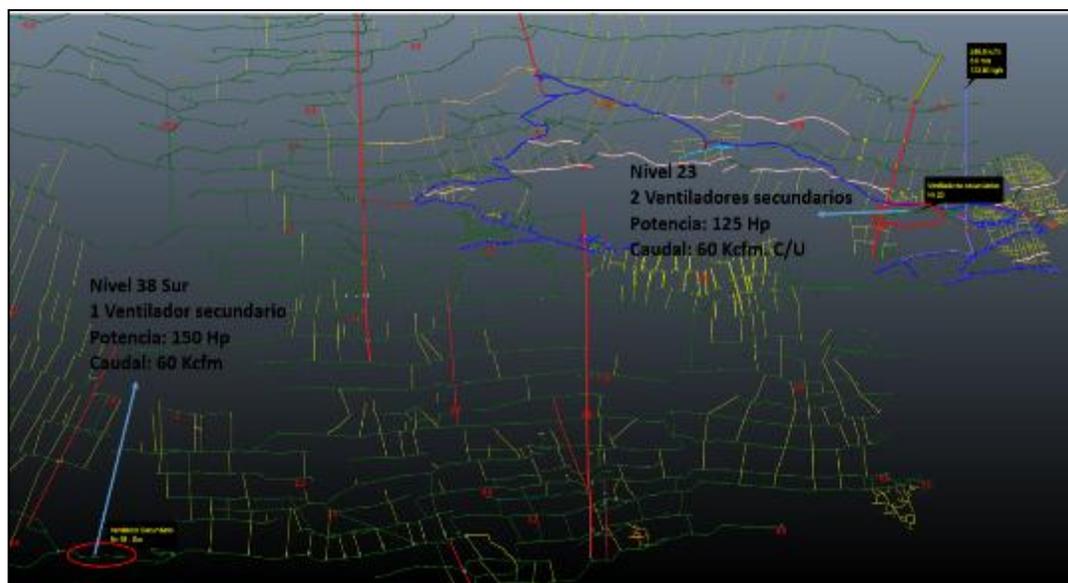


Ilustración 8. Ubicación de ventiladores secundarios, El Silencio.

2.10.3. Ventilación auxiliar.

La ventilación auxiliar está destinada a frentes ciegos, de producción y desarrollo, principalmente; sin embargo, también se utiliza en labores de exploración y geología.

En la mina El Silencio, generalmente, el cálculo de los ventiladores se realiza de acuerdo con la finalidad de la labor, es decir, si es una labor de desarrollo, se considera el aire requerido para la respiración del personal, potencia de los equipos mecanizados presentes o por la cantidad de explosivos a utilizar; por otra parte, si es una labor de exploración donde se van a realizar pozos de perforación, simplemente consideran el caudal requerido por personal y un factor adicional por fugas.

Finalmente, se escoge el ducto que será usado para llevar el aire desde el ventilador hasta el frente de la labor, para ello se considera la cantidad de flujo y la resistencia que el ducto genera. Normalmente en labores de desarrollo se usa ducto de 750 mm y en las demás labores ductos de 500-600 mm, sin embargo, existen otros factores que intervienen en la elección, por ejemplo, las dimensiones de la labor y el tipo de ventilador a usar.

En el frente de desarrollo, rampa 1 de mina El Silencio, actualmente se tiene instalado un ventilador axial marca Zitrón de referencia ZVN-1-7-52/2, el cual usa un motor eléctrico marca Weg de 52 KW de potencia, la manga utilizada para llevar el aire limpio hasta el frente de operación es ducto liso de 750 milímetros de diámetro; las ilustraciones 9 y 10 representan el esquema general del sistema auxiliar de ventilación instalado y la curva de operación del ventilador.

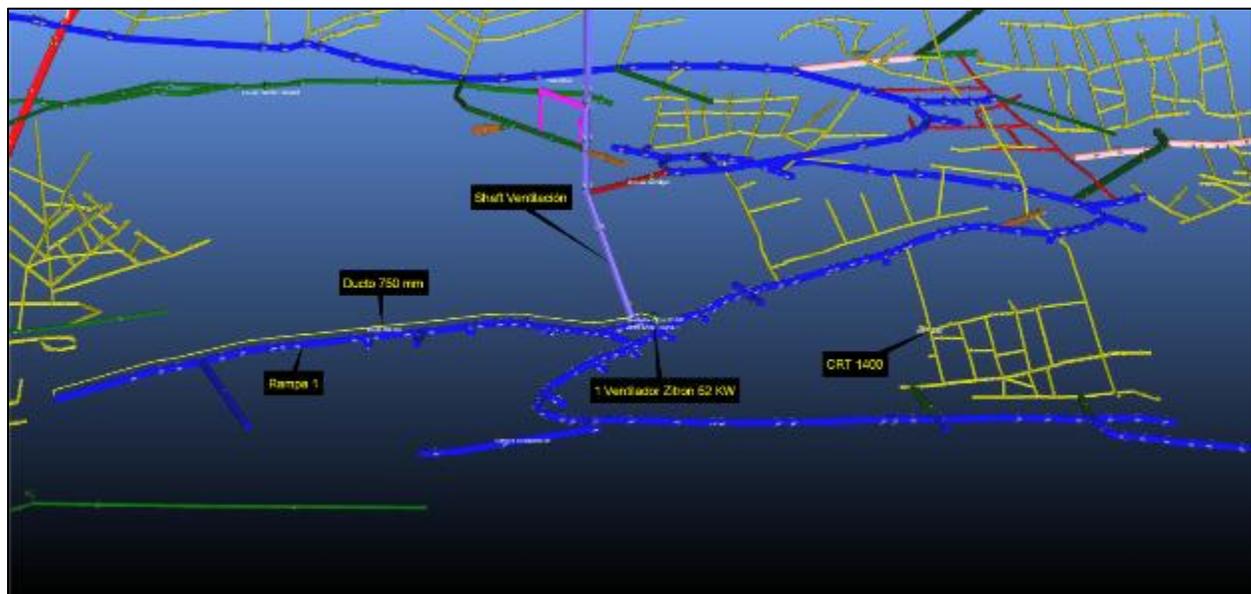


Ilustración 9. Esquema de ventilación auxiliar del frente de desarrollo rampa 1, El Silencio.

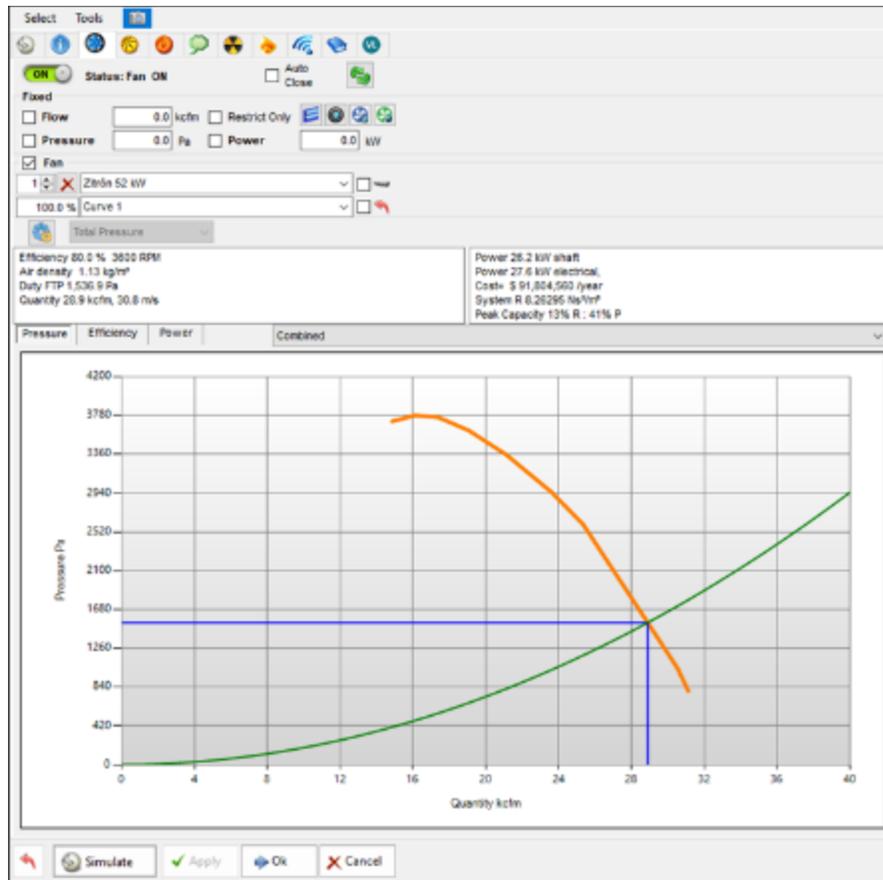


Ilustración 10. Curva de operación del ventilador del frente de desarrollo rampa 1, El Silencio.

3. Marco referencial

3.1. Antecedentes.

3.1.1. Antecedentes bibliográficos.

En el resumen de su trabajo de investigación, titulado, “Modelado matemático de estado térmico en la minería subterránea” cita: El efecto de la temperatura en las minas subterráneas se relaciona con los gradientes geotérmicos de rocas que recubren la excavación minera. Esto puede exceder los estándares de confort para los seres humanos que trabajan en un entorno subterráneo causando molestias térmicas y el riesgo asociado. Con el fin de evaluar la influencia de las altas temperaturas de ventilación de los mineros un modelo matemático ha sido desarrollado sobre la

base del concepto de transferencia de calor desde la masa de roca al flujo de aire en el ambiente subterráneo. Este modelo ha sido validado en la mina subterránea de cobre, Noves Corvo, Portugal. (Torres, Gama, & Singh, 2008).

En la introducción del artículo titulado, “Ley de distribución de parámetros del entorno térmico de altas temperaturas de minas y estudio de las causas del daño de calor” expone: Con el aumento de la profundidad de la minería y el grado de mecanización, las altas temperaturas y los daños producidos por el calentamiento se convierten en uno de los principales problemas que enfrenta la seguridad minera. Es por eso que la adaptación y mejora de las condiciones climáticas en la mina es más importante que nunca en nuestro país. El análisis de daño térmico en mina de alta temperatura y estudio de simulación de la distribución de la energía geotérmica puede proporcionar apoyo técnico para la implementación de medidas de enfriamiento de la mina. (Zhongpeng., 2012)

Del artículo titulado, “La transferencia de calor generado en un entorno de minería subterránea” cita: el artículo presenta los resultados del análisis de transferencia de calor que se genera en un entorno subterráneo, específicamente en minas de carbón. El objetivo es observar la variabilidad de los resultados, comparando minas con acceso a nivel y el acceso inclinado; Otro parámetro de comparación ha sido la variación de la altitud a la que se encuentran las minas; Los parámetros de temperaturas, flujo de aire, humedad relativa, la densidad del aire, longitud de las vías, la cantidad de explosivo, número de mineros, etc., se han recogido en una mina de carbón ubicada en la ciudad de Cúcuta - Colombia. Con el fin de acelerar su uso, se ha utilizado su propio software de desarrollo,

que sirve para modelar el confort y la calidad del medio ambiente subterráneo. (Castro, Gomez, & Acavedo, 2018).

En su trabajo de investigación, titulado, "Proyecto de ventilación, para aplicar el derribo por subniveles en la unidad minera de caudalosa chica-2014" en un aparte de su resumen relata: "La necesidad imperiosa de mejorar la Calidad de Vida del trabajador minero, hace, que la conducción del aire fresco en interior mina se mejore, realizando para tal efecto la profundización de la Rampa 224, esto se encuentra en etapa de desarrollo, alcanzando un avance de 10%.

Además, la implementación de una Chimenea Alimak 440 de 280 m. el cual servirá para evacuación de aire viciado del nivel más bajo de la Mina bienaventurada, con estas mejoras se podrá ejecutar otro tipo de método de explotación de minas como es el derribo por subniveles reemplazando al corte relleno ascendente aplicado hasta la actualidad." (V, 2015)

3.2. Marco Teórico.

En minería subterránea es indispensable proveer una atmosfera adecuada bajo los parámetros exigidos por el decreto 1886 del 2015, exigiendo a toda empresa minera subterránea contar con una adecuada ventilación, la cual realice la función indispensable de generar y conservar un ambiente de confort adecuado para la realización efectiva de las operaciones mineras.

A medida que profundizan todas las labores mineras, aumenta la transferencia de calor al ambiente subterráneo, los ambientes subterráneos calurosos afectan, la salud física y mental de los trabajadores, la seguridad, la higiene y la productividad. (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014).

El calor es emitido a los sistemas subterráneos de ventilación a partir de una gran variedad de fuentes; las tres principales fuentes de calor en las minas son la conversión de energía potencial en energía térmica a medida que el aire cae a través de los pozos de las pendientes (auto-compresión del aire), la transferencia de calor de la roca virgen debido al conocido gradiente geotérmico (calor geotérmico de los estratos), y el calentamiento por equipos mecanizados. (McPherson, 1993).

Cuando hay incremento de la temperatura, se pueden producir bajos rendimientos en las labores, generación de incendios, corrosión de equipos y materiales, reducción de la vida útil de los equipos, e incremento de los índices de accidentalidad, en un ambiente subterráneo de alta humedad y temperaturas, los trabajadores expuestos a estas condiciones climatológicas padecen sensación de no confort. Estas condiciones pueden ocasionar en los mineros, altos niveles de estrés, aumentado la posibilidad de incremento de accidentes y el decrecimiento de la productividad. (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014).

El confort térmico se define como el estado de ánimo en el que se expresa satisfacción con el entorno térmico. El confort humano térmico no es exclusivamente una función de la temperatura del aire, sino también de otros parámetros que incluyen la temperatura, velocidad del aire, la humedad, el nivel de actividad y la resistencia térmica de la ropa. (Torres, Gama, & Singh, 2008)

A mayor profundidad minera, la influencia de las propiedades térmicas de la masa de roca se vuelve más importante. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es desarrollar un modelo matemático para evaluar la influencia de la transferencia de la energía geotérmica a la atmósfera. (Torres, Gama, & Singh, 2008)

Instalaciones de control de la ventilación subterránea son las medidas básicas adoptadas para guiar el flujo de aire para lograr el objetivo de la asignación del volumen de aire deseado. En general, las instalaciones de control de la ventilación determinan la escala de influencia de acuerdo con su apertura en ambos lados de la presión del viento. Por lo tanto, la gestión de las instalaciones de control de ventilación subterránea debe fortalecerse para mejorar su fiabilidad. La mayor brecha presión del viento en ambos lados tiende a estar vinculado con la zona de suministro de aire principal y la zona de aire de retorno. Los daños o el uso incorrecto pueden dar lugar a flujo de aire de corto circuito de la alimentación de aire principal y volver zonas de aire. (Minkang & Yuanchun, 2011)

Los resultados del cálculo de la entalpía y la densidad conducen a cambiar las reglas de ellos también, que establecen bases para el análisis del estado de la distribución de fuentes de calor y presión térmica. Según los cálculos ambientales, se pueden obtener resultados de cada uno de los túneles y la variación ambiental. Por lo tanto, el grado de confort de los trabajadores se puede medir en cada lugar de medición de la mina. (Zhongpeng., 2012)

El aumento de la temperatura en ambientes subterráneos genera riesgos, que pueden causar tragedias en los peores casos. Dos aspectos principales deben ser tomadas en cuenta por el riesgo generado por las altas temperaturas: una es la afectación a la salud corporal de los trabajadores y el otro es el impacto sobre la seguridad y la productividad de la mina. (Castro, Gomez, & Acavedo, 2018).

La explotación mineral en ambientes de minas subterráneas profundas, altas temperaturas y humedad crean riesgos debido a las grandes cantidades de calor generado por el calor geotérmico, máquinas de minería, aguas subterráneas y agua de la mina. (Wang, Ren, Zhang, Liang, & Xu, 2012)

Para “Ernesto Arancibia, director Especialidad Minería Subterránea de la Gerencia de Tecnología e Innovación de Codelco, un aspecto adicional es que “no solamente las personas necesitan una buena calidad de aire; también las máquinas diésel dependen de ello para efectuar su combustión interna”. (Chilena, 2014).

3.3. Marco conceptual.

Estrés térmico: Corresponde a la carga neta de calor a la que los trabajadores están expuestos y que resulta de la contribución combinada de las condiciones ambientales del lugar donde trabajan, la actividad física que realizan y las características de la ropa que llevan. (OSHA, 2017).

Índices de estrés térmico: Para investigaciones amplias y detalladas, la disponibilidad de un sistema de cómputo rápido permite que se emplee un modelo de termorregulación; el cual requiere una especificación de todos los datos relevantes relacionados con la tasa de trabajo, la ropa y la condición sicrométrica del aire. (McPherson, 1993)

Para aplicaciones menos rigurosas, como el monitoreo manual rutinario del lugar de trabajo, es decir la comprobación rutinaria de la potencia de enfriamiento de un entorno existente o para diseños conceptuales iniciales, es conveniente emplear alguna medida de potencia de enfriamiento del aire o reacción fisiológica que puede ser citada como un solo número o índice de estrés térmico. (McPherson, 1993)

Los índices de estrés térmico, pueden ser clasificados en tres tipos:

- Mediciones individuales (incluyen mediciones de temperatura de bulbo húmedo, bulbo seco y velocidad del aire)

- Métodos empíricos (dependen de mediciones de temperatura y velocidad del aire)
- Índices racionales (basados en el balance metabólico de calor y en los modelos de termorregulación fisiológica)

Índice de calor: El índice de calor es la temperatura aparente que siente el cuerpo, debido a la combinación de los efectos de la temperatura y la humedad. Esto se debe a que la transpiración del cuerpo o sudor, no se puede evaporar tan bien cuando la humedad aumenta. Esto ocasiona que los efectos refrescantes del sudor disminuyan conforme la humedad aumenta, lo que trae como consecuencia que el cuerpo no se pueda enfriar de manera natural. (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014).

Sicrometría: Es la medición del contenido de humedad del aire, al igual es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. (Martinez, 2017)

t_d = Temperatura de bulbo seco (°C): Es la temperatura de la mezcla aire seco y vapor de agua en las condiciones del sistema. (amyd.quimica, 2018)

t_w = Temperatura de bulbo húmedo (°C): Es la temperatura que indica el equilibrio dinámico entre la transferencia de calor y la transferencia de masa, se define también como la temperatura límite de enfriamiento que alcanza una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mayor de aire húmedo. (amyd.quimica, 2018)

t_e = Temperatura efectiva (°C): Es la temperatura del aire saturado en reposo que daría la misma sensación térmica instantánea que el entorno real en consideración. Es uno de los más antiguos índices de estrés térmico. (McPherson, 1993)

P_b = Presión barométrica (Pa): Es la presión indicada por el barómetro, este da la lectura de la presión atmosférica a una altura determinada. (fullmecanica, 2014)

HR = Humedad relativa (%): Es la relación entre la presión de vapor real y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, (Ecuación 10.0). Por otro lado, es una forma conveniente de expresar el grado de saturación de un espacio. (McPherson, 1993)

S = Sigama Heat (J/Kg aire seco): El calor Sigma es el contenido de energía calorífica del aire, y es mucho más que simplemente una interesante propiedad de un proceso de saturación adiabática, es un valor que se mantendrá verdaderamente constante durante el proceso, puesto que se omite el calor sensible del agua, ya que se gana calor latente de evaporación; el calor sigma es para cualquier presión barométrica dada, una función únicamente de la temperatura de bulbo húmedo. (McPherson, 1993)

$$S = L_w X_s + 1005 t_w \quad (1.0)$$

Dónde; L_w es el calor latente de evaporación, X_s representa el contenido de humedad del aire saturado, t_w es la temperatura de bulbo húmedo, y 1005 representa el calor específico del aire seco a presión constante.

H = Entalpía (J/Kg aire seco): Se puede decir que es la energía térmica total que un sistema termodinámico intercambia con su entorno. (McPherson, 1993)

$$H = S + (4187 t_w \times X) \quad (2.0)$$

Dónde; X es el Contenido de humedad del aire.

Cargas térmicas: El calor es emitido a los sistemas subterráneos de ventilación a partir de una variedad de fuentes; las tres principales fuentes de calor en las minas son la conversión de la energía potencial en energía térmica a medida que el aire cae a través de los pozos de admisión o de las pendientes (auto-compresión), la maquinaria y el calor geotérmico de los estratos.

Calor geotérmico de los estratos: Los métodos puramente analíticos para cuantificar el flujo de calor del macizo rocoso son algo limitados para la aplicación práctica directa debido a la complejidad de las ecuaciones que describen la conducción de calor tridimensional transitoria en el tiempo. Sin embargo, la teoría que ha evolucionado a partir de la investigación analítica ha provisto la base para el modelamiento numérico el cual, a su vez, ha dado lugar al desarrollo de paquetes de simulación pragmática por computadora para la predicción detallada de las variaciones del clima de la mina. (McPherson, 1993)

Ahora bien, existen ecuaciones híbridas que son muy útiles para obtener aproximaciones rápidas del flujo de calor en tipos específicos de aberturas.

El Dr. Austin Whillier de la Cámara de Minas de Sudáfrica produjo muchas ecuaciones híbridas para una fácil aplicación manual, (McPherson, 1993), entre ellas.

a) Flujo radial de calor en túneles establecidos

$$q_r = 3.35 L x K^{0.854} x (VRT - t_d) \quad (11.0)$$

b) Frente de avance de un desarrollo

$$q_f = 6K x (L + 4DFA) x (VRT - t_d) \quad (12.0)$$

Dónde; K denota la conductividad térmica de la roca, VRT es la temperatura de la roca virgen, L equivale a la longitud del frente de avance de desarrollo, y no debe ser mayor que la longitud avanzada en el último mes, DFA es el avance diario del frente en metros y t_d es la temperatura media de bulbo seco en la zona de estudio.

Para la zona de estudio, la VRT ha sido medida en 27.1°C , la conductividad térmica K , es tomada como $1.57 \text{ W/m}\times^\circ\text{C}$. (Prosser, 2019)

Gradiente Geotérmico: La temperatura de la superficie de las rocas se eleva constantemente con la profundidad, este aumento se llama un gradiente geotérmico o la temperatura por unidad de profundidad. (McPherson, 1993)

El gradiente geotérmico se determinó midiendo las temperaturas de roca virgen en tres localizaciones en las minas Providencia y El Silencio; se calculó el gradiente como cero punto siete grados centígrados por cada cien metros verticales ($0.7^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$).

Además, no hay actividad geotérmica observada en las minas. (Prosser, 2019)

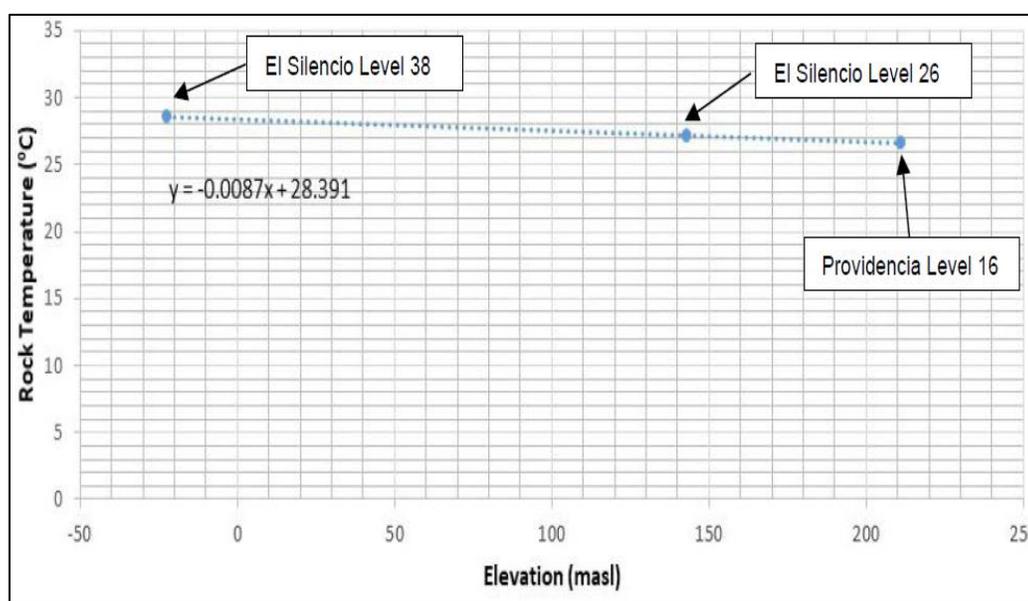


Ilustración 11. Gráfica de temperaturas térmicas de la roca (gradiente geotérmico), (Prosser, 2019)

Auto compresión del aire: El aire que entra a la mina, durante su recorrido a través de las labores se comprime y se calienta a medida que fluye. Cuando el aire o cualquier otro fluido fluyen hacia abajo, parte de su energía potencial se convierte en entalpía (H), lo que produce aumentos en la presión, energía interna y, por lo tanto, en la temperatura. (McPherson, 1993)

La carga calorífica (q) originada de la auto-compresión y expresada en KW, es el producto del delta entálpico ($H_2 - H_1$) menos energía cinética $\frac{(u_1^2 - u_2^2)}{2}$, menos energía potencial $(Z_1 - Z_2)g$, por el flujo másico (M). (McPherson, 1993)

$$q = M \times ((H_2 - H_1) - \frac{(u_1^2 - u_2^2)}{2} - (Z_1 - Z_2)g) \quad (13.0)$$

El metabolismo humano: La tasa a la que el cuerpo humano produce calor metabólico depende de un número de factores incluyendo la tasa de trabajo manual, condición física y nivel de estrés mental. El calor metabólico hace únicamente una pequeña contribución a la carga de calor de la mina. (McPherson, 1993) El calor metabólico (qh) producido por un trabajador en buen estado físico, que esta aclimatado al ambiente, varía desde aproximadamente 100 W para el trabajo sedentario, pasando por 400 W para un nivel medio de actividad, como caminar, hasta más de 600 W durante periodos intermitentes de trabajo manual extenuante. (McPherson, 1993)

$$q = qh \times n \quad (14.0)$$

Tabla 1. Tasas metabólicas para diferentes actividades. (McPherson, 1993)

ACTIVIDAD	PRODUCCIÓN METABÓLICA DE CALOR	
	W	W/m2 (M)
<i>Dormir</i>	73	40
<i>Sentarse</i>	107	58,5 *
<i>Pararse, pero relajado</i>	128	70
<i>Caminar sobre nivel a:</i>		
1m/s	238	130
1.4m/s	320	175
1.8m/s	403	220
<i>Trabajo manual:</i>		
Muy ligero	174	95
Ligero	265	145
Moderado	448	245
Pesado	622	340

* 1 Met (M) = 58,5 W/m2 y es usado a menudo como unidad de la tasa metabólica.

Maquinaria diésel y eléctrica: La energía consumida por los equipos utilizados en subterráneo transfiere calor a la atmósfera minera; pérdidas de potencia y el trabajo realizado generan calor directa o indirectamente por la fricción. Los motores de combustión interna de los equipos diésel tienen una eficiencia general de solo un tercio de la alcanzada por las unidades eléctricas.

Por lo tanto, los motores diésel producirán aproximadamente entre 2,6 y 3 veces más calor que los equipos eléctricos para la misma salida mecánica de trabajo. Entonces, un motor diésel de 100 kW de potencia que funciona a plena capacidad produce 300 kW de calor. (McPherson, 1993)

$$\text{Para equipos diésel: } q = P \times 3 \quad (15.0)$$

Dónde; P denota la potencia en KW del equipo mecanizado. Para efectos de cálculos, se debe añadir un factor de utilización de los equipos mecanizados, esto debido a que casi nunca un equipo trabaja al 100% de su capacidad.

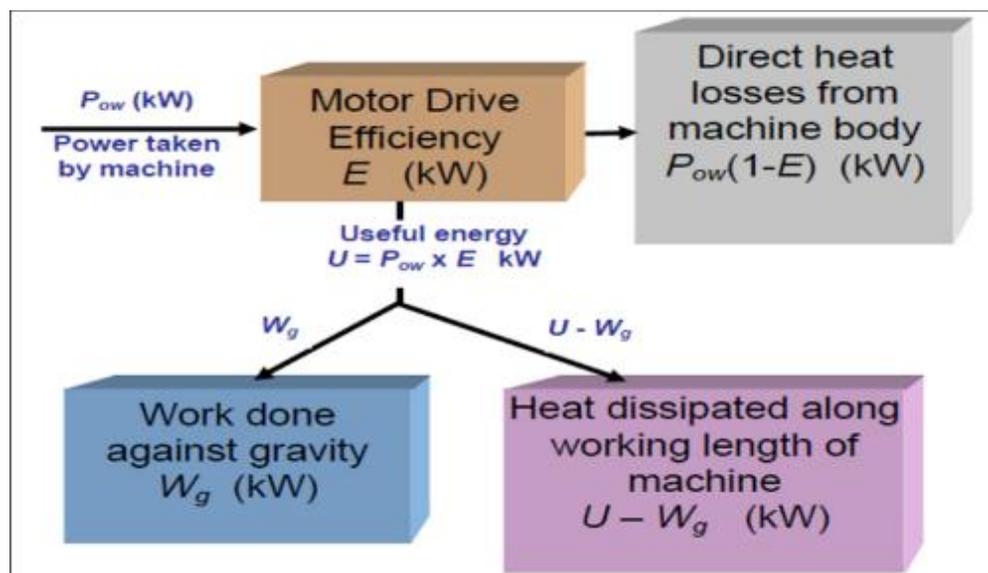


Ilustración 12. Distribución de energía tomada y el calor producido por máquinas eléctricas.

(McPherson, 1993)

La eficiencia de la máquina es relevante, dentro de este contexto, de dos maneras. Primero, la cantidad total de calor producido puede reducirse solo si la máquina es sustituida por otra de mayor eficiencia para dar el mismo resultado de potencia mecánica a un consumo más bajo de energía. Para cualquier máquina, el calor total producido es simplemente la tasa de suministro de energía menos cualquier trabajo realizado contra la gravedad. En segundo lugar, la eficiencia de la máquina determina la distribución del calor producido. Cuanto mayor sea la eficiencia, menor será el calor producido en el motor y la transmisión, y mayor será el porcentaje de calor producido en los puntos de corte, a lo largo de la marcha de la máquina o por cualquier otro efecto de fricción causado por el funcionamiento del dispositivo. (McPherson, 1993)

$$q_b = P(1 - E) + U - Wg \quad (16.0)$$

Resumen de ecuaciones psicrométricas y de cargas térmicas

- (1.0) Sigma Heat: $S = L_w X_s + 1005 t_w$ (J/Kg de aire seco)
- (2.0) Entalpia: $H = S + (4187 t_w X)$ (J/Kg de aire seco)
- (3.0) Calor latente de evaporación: $L_w = (2502.5 - 2.386 t_w) * 1000$ (J/Kg)
- (4.0) Contenido de humedad del aire saturado: $X_s = 0.622 \frac{e_{sw}}{(Pb - e_{sw})}$ (Kg/Kg de aire seco)
- (5.0) Presión parcial del aire húmedo: $e_{sw} = 610.6 \exp \left[\frac{17.27 t_w}{237.3 + t_w} \right]$ (Pa)
- (6.0) Presión de vapor real: $e = \frac{(Pb X)}{(0.622 + X)}$ (Pa)
- (7.0) Contenido de humedad del aire: $X = \frac{S - 1005 t_d}{[L_w + 1884 (t_d - t_w)]}$ (Kg/Kg de aire seco)

$$(8.0) \text{ Densidad real: } \rho_m = \frac{(Pb - 0.387e)}{[287.04(t_d + 273.15)]} \text{ (Kg de aire húmedo/m}^3\text{)}$$

$$(9.0) \text{ Flujo másico: } M = Q * \rho_m \text{ (Kg/s)}$$

$$(10.0) \text{ Temperatura Efectiva: } Te = (0.7 * t_w + 0.3 * t_d) - Ve \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$(11.0) \text{ Flujo radial de calor en túneles establecidos: } q_r = 3.35 L * K^{0.854} * (VRT - t_d) \text{ (KW)}$$

$$(12.0) \text{ Flujo de calor, frente de avance de un desarrollo: } q_f = 6K(L + 4DFA) * (VRT - t_d) \text{ (KW)}$$

$$(13.0) \text{ Carga por auto compresión: } q_c = M * ((H_2 - H_1) - \frac{(u_1^2 - u_2^2)}{2} - (Z_1 - Z_2)g) \text{ (KW)}$$

$$(14.0) \text{ Carga térmica por metabolismo humano: } q_h = qh * n \text{ (KW)}$$

$$(15.0) \text{ Carga térmica por maquinaria diésel: } q_p = P * 3 * \% \text{ utilización (KW)}$$

$$(16.0) \text{ Carga térmica por maquinaria eléctrica: } q_e = P(1 - E) + (U - Wg) \text{ (KW)}$$

$$(17.0) \text{ Flujo de aire requerido por cargas térmicas: } Q = \frac{q_{12}}{\rho_m(S_2 - S_1)} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Descripción de la zona de estudio: El presente trabajo, se lleva a cabo para el frente de desarrollo principal de mina El Silencio; al referirnos a dicha labor, hacemos referencia a una rampa de desarrollo de sección de 4m x 3.5m (ancho por alto) de tipo arqueada.

Esta labor es una labor de frente ciego, por lo cual su ventilación se ve limitada al uso de ventilación auxiliar; la longitud máxima de este frente ciego será de 300 metros, y actualmente tiene un avance de 200 metros, como se muestra en la ilustración 13.

El ciclo de minado, a grosso modo se describe como; una fase inicial de ABC minero (ventilar, regar, desabombar; es decir una revisión inicial de las condiciones del frente), posterior se realizan las operaciones de perforación y voladura, para la perforación se utiliza un Jumbo referencia DD210 de la marca Sandvik; posterior a la

voladura se repite el proceso de ABC, por lo general, se tienen longitudes de avance de 3 metros, a continuación sigue la etapa de descargue del estéril generado por la voladura, con ayuda de un Scoop referencia LH 307 y dos Dámper referencia TH315 ambos de la marca Sandvik y de combustión interna a diésel.

La fase de descargue se compone de dos etapas; una es una fase conocida como rezagado, en esta, el Scoop limpia el frente de la rampa y estoquea la carga en cámaras de acopio ubicadas a una distancia de 80 metros del frente, para que el Jumbo pueda entrar a perforar; y la segunda fase es el proceso de cargue de las volquetas, y se realiza en la zona de stocks ubicada a 80 metros del tope del frente. Es en la fase de descargue y perforación, donde se concentran en simultaneo los equipos mecanizados en la zona de estudio; razón por la cual, para el cálculo de la carga térmica generada por la operación de equipos mecanizados se incluyen estos cuatro equipos.

Un Scoop LH 307 tiene una potencia del motor de unos 160 KW, mientras que para la volqueta TH 315 la potencia del motor es de 185 KW, los porcentajes promedio de utilización de potencia del motor en una fase común de descargue del frente de desarrollo, son 75%, el Jumbo posee un motor eléctrico de 60 KW y motor diésel de 55 KW con porcentaje de utilización de un 10%. (Prosser, 2019)

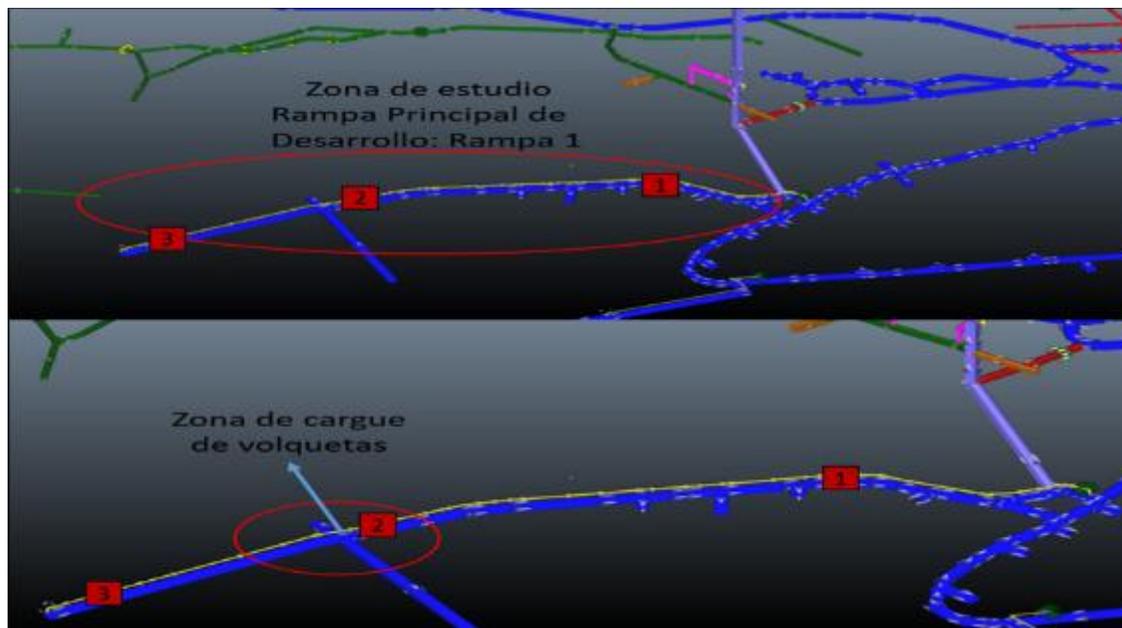


Ilustración 13. Esquema de la zona de estudio.

La data de campo de la zona de estudio se tomó en tres puntos de medición, el punto número 3, a 20 metros del tope del frente de la rampa 1, el punto número 2, a unos 60 metros del tercero y cercano a la zona de cargue de volquetas, y por último el punto número 1 situado a 70 metros del segundo punto.

3.4. Marco legal

La disposición legal colombiana más relevante sobre la temática planteada, es el decreto 1886 de 2015, por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas, especialmente el Título II (Ventilación) y el capítulo III (Temperatura) del Título X (Higiene y condiciones de trabajo), el artículo 218; determina el tiempo de permanencia en un frente de trabajo de acuerdo a la caracterización de la temperatura efectiva, esto se detalla en la tabla 2. (Uribe, Garzon, & estrada, 2015).

Tabla 2. Tiempo de permanencia en frentes de trabajo según temperatura efectiva. (Uribe, Garzon, & estrada, 2015).

<i>Temperatura efectiva</i>	<i>Tiempo de permanencia</i>
(°C)	<i>Horas</i>
28	<i>Sin limitaciones</i>
29	<i>Seis (6)</i>
30	<i>Cuatro (4)</i>
31	<i>Dos (2)</i>
32	<i>Cero (0)</i>

4. Metodología

La metodología de trabajo se llevó a cabo mediante tres fases principales; una etapa inicial de recopilación de información existente referente a la temática de estudio, seguida de un trabajo de campo, en el cual se colectó toda la data referente a las variables sicrométricas de la zona de estudio (variables independientes) y adicional una información sicrométrica general a lo largo de toda la rampa, desde el ingreso principal del aire en bocamina hasta la columna de extracción; finalmente, una etapa de oficina o trabajo de gabinete, donde se realizaron una serie de cálculos por medio de ecuaciones matemáticas (variables dependientes) e interpretación de los resultados obtenidos; adicionalmente, se compararon algunos de los resultados de los cálculos manuales con el uso de software computacional.

En la fase de campo, las mediciones se realizaron durante un total de 30 días calendario. Se tomaron tres puntos de medición en la zona de estudio, tal como se muestran en la ilustración 11, y para la data general de toda la rampa se tomaron ocho estaciones de medición. Posterior a

esto, se procedió con la etapa de oficina, inicialmente se calculó una media para todos los datos obtenidos en campo, seguido de la aplicación de fórmulas sicrométricas, determinación de cargas térmicas y análisis del índice de estrés térmico; la aplicación de fórmulas sicrométricas se llevó a cabo tanto para nuestra zona de estudio y de manera general para todo el trayecto de rampa; por otro lado, los cálculos de cargas térmicas y análisis del índice de estrés térmico, solo se realizaron para nuestra zona de estudio, el índice de estrés térmico, se realizó bajo dos métodos empíricos; el cálculo de la temperatura efectiva (T_e) y el cálculo de la temperatura global de bulbo húmedo (WGBT) a través, de la metodología establecida en el manual técnico de la OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional).

Los equipos de medición y herramientas computacionales utilizadas fueron:

Psicrómetro digital WS-HT350, marca Ambient Weather, utilizado para la toma de temperaturas húmedas y secas, también puede medir humedad relativa, aunque esta se puede calcular por formulas.



Ilustración 14. Psicrómetro digital, Ambient Weather WS-HT350

Termo-higro-anemómetro digital, marca Kestrel 5200, usado para la toma de la presión barométrica y la altitud o cota.



Ilustración 15. Termo-higro-anemómetro digital, Kestrel 5200

Distanciómetro laser D110, marca Leica, para medir dimensiones características de las secciones donde se monitoreará la velocidad del aire.



Ilustración 16. Distanciómetro digital, Leica D110.

Anemómetro mecánico de paletas tipo Davis, utilizado para medir la velocidad del aire, mediante el método de acumulación de distancia en una sección transversal.



Ilustración 17. Anemómetro de paletas Davis.

Calculadora ANL-WBGT y Asistente de calor de VentSim.

WBGT
File Options Help

Air Temperature: C

Solar Irradiance: W/m²

Wind Speed: m/s

Relative Humidity: %

Time: (GMT-5) [Set to Current Time and Date](#)

Date:

Atmospheric Pressure: mb

Globe Temperature: 27.7 C

Natural Wet Bulb Temperature: 30.2 C

Psychrometric Wet Bulb Temperature: 30.2 C

Wet Bulb Globe Temperature: 30.7 C

Heat Index: 48.0 C

Acry Heat Category: **3 (Yellow)**

	Work Load	Work/Rest (min)	Water Intake (qt/hr)
Acry Work/Rest Region	easy	no limit	3/4
	moderate	40/20	3/4
	hard	30/30	1

OSHA Work/Rest Region

- 50% work, 50% rest (light work load)
- 25% work, 75% rest (moderate work load)
- highest permissible heat exposure threshold limit exceeded (heavy work load)

Ilustración 18. Calculadora ANL-WBGT.

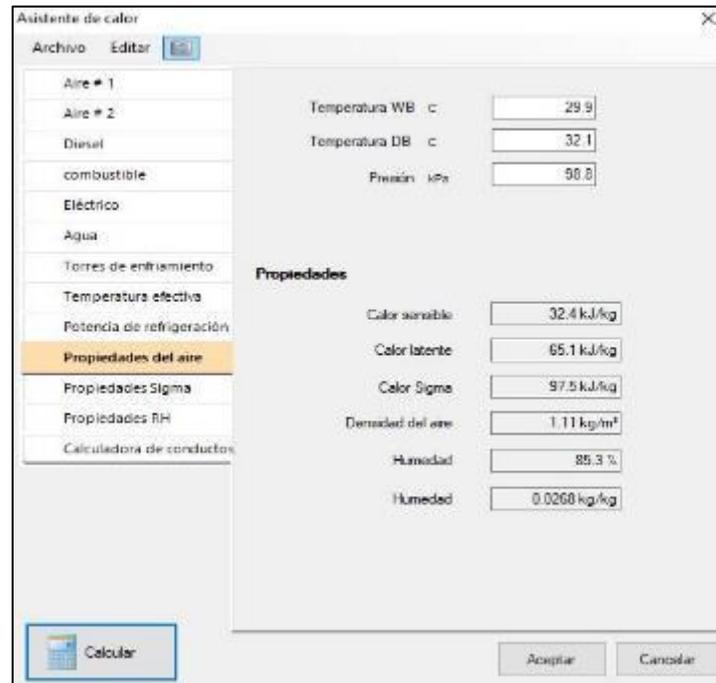


Ilustración 19. Asistente de calor de VentSim.

5. Data existente.

Se llevó a cabo una revisión de bases de datos de la empresa GranColombiaGold, para extraer y analizar información existente referente no solo a los sistemas de ventilación de la mina El Silencio y asociados a determinación de cargas térmicas; si no también, de información general de los proyectos mineros de la empresa en Segovia. Los estudios encontrados fueron:

- Informe - Revisión de los sistemas de ventilación para las minas Providencia, El Silencio, Sandra K y Carla. Número de proyecto SRK 461800.220.
- Informe Técnico NI 43-101 – Modificado, Actualización del Estudio de Pre-factibilidad. Número de proyecto SRK 461800.200.

6. Data de campo

Se realizaron mediciones en campo durante un total de 30 días calendario. Se tomaron datos de temperaturas húmedas, secas, porcentaje de humedad relativa, presión barométrica, altitud, velocidad del aire, y secciones de la labor en cada punto de medición.

Para la data general en el trayecto de toda la rampa, desde el portal de ingreso hasta la base de la extracción, se establecieron ocho estaciones de medición, separadas cada 200 metros. Para la data específica de la zona de estudio, se implementaron tres puntos de medición, el punto identificado como número 3, a 20 metros del tope del frente de la rampa 1, el punto número 2, a unos 60 metros del número 3 y cercano a la zona de cargue de volquetas, y por último el punto número 1, situado a 70 metros del segundo punto, distribuidos como se muestra en la Ilustración 13. (Anexo 1).

7. Análisis de la información y resultados.

Se dividió el estudio sicrométrico en dos partes, primero, el trayecto en rampa desde el ingreso principal del aire fresco hasta la base de la extracción; para tener una base global de las condiciones termo-ambientales en todo el trayecto de rampa que no guarda dependencia de un sistema de ventilación auxiliar y que por el contrario está gobernado por el sistema principal de ventilación, y segundo, la zona central de estudio de este trabajo; es decir el frente de avance de la rampa principal de desarrollo: Rampa 1.

7.1. Parametrización de variables sicrométricas

Variables independientes:

- Temperaturas húmeda y seca (°C)
- Humedad relativa (%)
- Presión Barométrica (Pa)

Variables dependientes:

- Sigma Heat y Entalpia (J/Kg de aire seco)
- Calor latente de evaporación (J/Kg)
- Contenido de humedad del aire (Kg/Kg de aire seco)
- Contenido de humedad del aire saturado (Kg/Kg de aire seco)
- Presión parcial del aire húmedo y Presión de vapor real (Pa)
- Densidad real (Kg de aire húmedo/m³)

7.2. Sicrometría general para el trayecto superior de rampa 1.

La siguiente tabla fue producida por medio de una hoja de cálculo en Excel, programada con las ecuaciones sicrométricas (Anexo 2).

Tabla 3. Cálculos sicrométricos generales para el trayecto superior de rampa 1.

ECUACIÓN	PARÁMETRO	ESTACIÓN 1	ESTACIÓN 2	ESTACIÓN 3	ESTACIÓN 4	UNIDADES
Medido	P_b	94.350	96.660	97.010	97.270	Pa
Medido	t_w	19,24	27,05	23,26	23,43	°C
Medido	t_d	23,51	28,41	27,76	27,57	°C
Medido	HR	70,46	89,56	70,15	73,19	%
(5.0)	e_{sw}	2.229,78	3.574,64	2.852,99	2.882,40	Pa
(5.0) usando t_d	e_{sd}	2.896,33	3.869,84	3.726,21	3.685,11	Pa
(4.0)	X_s	0,015	0,024	0,019	0,019	Kg/Kg de aire seco
(3.0)	L_w	2.456.593,36	2.437.958,70	2.447.001,64	2.446.596,02	J/Kg

(1.0)	S	56.321,64	85.418,07	69.494,46	70.019,16	J/Kg de aire seco
(7.0)	X	0,013	0,023	0,017	0,017	Kg/Kg de aire seco
(6.0)	e	1.970,17	3.490,24	2.571,98	2.623,18	Pa
(2.0)	H	57.390,26	88.057,07	71.144,24	71.710,33	J/Kg de aire seco
(8.0)	ρ_m	1,099	1,101	1,112	1,115	Kg de aire húmedo/m3
ECUACIÓN	PARÁMETRO	ESTACIÓN 5	ESTACIÓN 6	ESTACIÓN 7	ESTACIÓN 8	UNIDADES
Medido	P_h	97.590	97.750	97.980	98.150	Pa
Medido	t_w	24,31	24,33	24,34	24,03	°C
Medido	t_d	27,75	27,78	28,05	28,03	°C
Medido	HR	76,87	77,07	76,70	77,10	%
(5.0)	e_{sw}	3.038,90	3.042,54	3.044,36	2.988,32	Pa
(5.0) usando t_d	e_{sd}	3.724,04	3.730,56	3.789,71	3.785,30	Pa
(4.0)	X_s	0,020	0,020	0,0199	0,0195	Kg/Kg de aire seco
(3.0)	L_w	2.444.496,34	2.444.448,62	2.444.424,76	2.445.164,42	J/Kg
(1.0)	S	73.300,05	73.296,98	73.218,33	71.909,99	J/Kg de aire seco
(7.0)	X	0,019	0,019	0,018	0,018	Kg/Kg de aire seco
(6.0)	e	2.822,88	2.825,53	2.810,44	2.735,62	Pa
(2.0)	H	75.185,93	75.183,04	75.090,27	73.704,26	J/Kg de aire seco
(8.0)	ρ_m	1,117	1,119	1,121	1,123	Kg de aire húmedo/m3

7.3. Estudio sicrométrico específico para el frente de avance de la rampa principal de desarrollo – Rampa 1.

La siguiente tabla fue producida por medio de una hoja de cálculo en Excel, programada con las ecuaciones sicrométricas (Anexo 2).

Tabla 4. Cálculos sicrométricos específicos para el frente de avance de la rampa principal de desarrollo – Rampa 1.

ECUACIÓN	PARÁMETRO	ESTACIÓN 3	ESTACIÓN 2	ESTACIÓN 1	PROMEDIO	UNIDADES
Medido	P_h	98.540	98.380	98.230	98.383	Pa
Medido	t_w	30,10	29,10	29,10	29,43	°C
Medido	t_d	32,10	31,30	30,90	31,43	°C
Medido	HR	86,96	85,40	87,85	86,74	%
(5.0)	e_{sw}	4.266,07	4.027,57	4.027,57	4.107,07	Pa
(5.0) usando t_d	e_{sd}	4.780,14	4.568,40	4.465,62	4.604,72	Pa
(4.0)	X_s	0,028	0,027	0,027	0,027	Kg/Kg de aire seco
(3.0)	L_w	2.430.681,40	2.433.067,40	2.433.067,40	2.432.272,1	J/Kg

(1.0)	S	98.665,97	93.845,72	93.948,58	95.486,76	J/Kg de aire seco
(7.0)	X	0,027	0,026	0,026	0,026	Kg/Kg de aire seco
(6.0)	e	4.139,86	3.888,81	3.914,22	3.980,96	Pa
(2.0)	H	102.103,71	96.964,70	97.093,77	98.720,73	J/Kg de aire seco
(8.0)	ρ_m	1,106	1,109	1,108	1,108	Kg de aire húmedo/m ³

En resumen, las características sicrométricas del frente de desarrollo rampa 1, bajo el sistema de ventilación auxiliar actual son:

- Temperatura de Bulbo Seco Máxima: 32,40 C
- Temperatura de Bulbo Seco Promedio: 31,43 C
- Temperatura de Bulbo Húmedo Máxima: 30,70 C
- Temperatura de Bulbo Húmedo Promedio: 29,43 C
- Presión Barométrica Promedio: 98.383 Pa

En la zona de estudio definida como frente de avance de la rampa principal de desarrollo, Rampa 1 de mina El Silencio, se puede apreciar un incremento en la temperatura entre los puntos 1 y 3; esto debido, a las diferencias entre los caudales circundantes entre los puntos de medición y alas fuentes de calor presente.

Adicionalmente, se observa un incremento en el contenido de humedad del aire entre los puntos 3 y 1; dicho aporte de humedad se da principalmente, debido a la presencia de equipos diésel, puesto que la combustión diésel genera vapor en el tubo de escape, por otro lado, existen pozas de colección del agua cercanas al frente de la labor.

El contenido de energía calorífica promedio del aire (Sigma Heat), se encuentra cercano a los 95,49 KJ/Kg de aire seco; y el incremento a lo largo de la zona de estudio, es de 4,717 KJ/Kg de aire seco.

El Sigma Heat depende principalmente de la temperatura de bulbo húmedo, por lo que un incremento en la temperatura de bulbo húmedo indica un calentamiento del aire y, de manera inversa, una disminución en la temperatura del bulbo húmedo, indica un enfriamiento del aire; entre los puntos 1 y 3, observamos un incremento en la temperatura del bulbo húmedo, lo cual expresa que existe un aumento en el contenido de energía calorífica, es decir un calentamiento del aire.

La entalpía media del aire en la zona de estudio equivale a 98,720 KJ/Kg de aire seco, y el delta entálpico es de 5,01 KJ/Kg de aire seco.

7.4. Determinación de cargas térmicas para el frente de avance de la rampa principal de desarrollo – Rampa 1.

Flujo de calor por los estratos:

Para determinar el flujo de calor emitido por el macizo rocoso, se han utilizado dos de las ecuaciones híbridas desarrolladas por el Dr. Austin Whillier, de la cámara de minas de Sudáfrica; la ecuación 11.0 para el flujo radial de calor para túneles establecidos y la ecuación 12.0 para frente de avance de un desarrollo; los resultados obtenidos de ambas ecuaciones se han promediado para obtener una estimación del flujo de calor emitido.

La longitud avanzada para el último mes (L) equivale a 40 metros, y la longitud del avance diario (DFA) es de 1,5 metros, la longitud total del túnel es de 200 metros.

Los valores de la conductividad térmica (K) y de la temperatura de la roca virgen (VRT) son de 1,57 W/m×°C y 27,1°C respectivamente. (Prosser, 2019)

Tabla 5. Cálculo de carga térmica, para Flujo radial de calor para túneles establecidos. (Ecuación 11.0)

Longitud del túnel (L)	VRT	Conductividad térmica (K)	Temperatura seca	Carga térmica
(m)	(°C)	W/m×°C	(°C)	(KW)
200	27,1	1,57	31,4	-4264,4

Tabla 6. Cálculo de carga térmica, para frente de avance de desarrollo. (Ecuación 12.0).

Longitud avanzada último mes (L)	VRT	Conductividad Térmica (K)	Temperatura Seca	DFA	Carga Térmica
(m)	(°C)	W/m×°C	(°C)	(m)	(KW)
40	27,1	1,57	31,4	1,5	-1882,6

La carga térmica promedio, producto del macizo rocoso es de -3073,5 KW; el símbolo negativo, indica que el macizo rocoso genera un enfriamiento; esto se aprecia también en el hecho de que la temperatura de la roca virgen es menor que la del aire.

Flujo de calor por auto compresión del aire:

En un proceso de auto-compresión, el aire que entra a la mina durante su recorrido a través de las labores se comprime y se calienta a medida que fluye hacia abajo, el proceso inverso, auto descompresión, indica una reducción en la temperatura del aire; esta pérdida de calor, se ve reflejado como reducción en el calor sensible del aire, sin embargo; como este calor es utilizado para evaporar moléculas de agua, esta energía calorífica es devuelta al aire en forma de calor latente. Se ha utilizado la ecuación 13.0 para programar la siguiente tabla de Excel.

Tabla 7. Cálculo de carga térmica, por Auto descompresión. (Ecuación 13.0).

PROCESO DE AUTO-DESCOMPRESIÓN DEL AIRE							
Estación	Elevación	Temperatura Seca	Temperatura Húmeda	Presión Barométrica	Densidad	Velocidad	Caudal
	(m)	(°C)	(°C)	(KPa)	(Kg/m ³)	(m/s)	(m ³ /s)
1	251	30,9	29,1	98,23	1,108	0,69	9,36
3	230	32,1	30,1	98,54	1,106	0,5	6,65
Estación	Elevación	Flujo Másico	Entalpia	Delta Entálpico	Energía cinética	Energía Potencial	Heat Load
	(m)	(Kg/s)	(KJ/kg)	(KJ/kg)	KJ	(KJ)	(KW)
1	251	10,37	97,093	5,01	0,11305	206,01	2085,72
3	230	7,35	102,103				

Durante este proceso de auto descompresión, se añaden 2058,72 KW de calor a la labor minera, se pierden 0,113 KJ de calor a expensas de la energía cinética a medida que la descompresión aumenta la velocidad del aire y se pierden 206,01 KJ de energía térmica a partir de la ganancia de energía potencial.

Flujo de calor por metabolismo humano:

La tasa a la que el cuerpo humano produce calor metabólico depende de varios factores, incluyendo la tasa de trabajo manual, la condición física y el nivel de estrés mental. La relación entre esta transferencia de calor y el medio ambiente circundante es de gran importancia para determinar el riesgo de estrés térmico en los trabajadores mineros.

El calor metabólico, hace únicamente una pequeña contribución a la carga de calor de la mina; no obstante, podría llegar a ser significativo en lugares donde se lleven a cabo actividades intensivas de mano de obra en una zona de limitado flujo de ventilación, tal como un frente ciego mal ventilado. (McPherson, 1993).

Haciendo uso de la ecuación 14.0 y de la tabla 1, se ha programado la siguiente tabla de Excel para obtener la carga térmica producto del metabolismo humano:

Tabla 8. Cálculo de carga térmica, por metabolismo. (Ecuación 14.0).

PERSONAL	PRODUCCIÓN METABÓLICA UNITARIA	CARGA TÉRMICA
<i>Cantidad</i>	(W)	(KW)
10	448,0	4,48
<i>Total</i>	448,0	4,48

Se ha utilizado un valor de 448W como tasa de producción metabólica unitaria, correspondiente a un trabajo manual moderado; esto partiendo de la consideración de que el trabajo minero desarrollado en el frente de desarrollo de la zona de estudio no es una actividad pesada; puesto que se realiza en su mayoría con ayuda de equipos mecanizados. El número de personas se distribuye de la siguiente manera: 1 operario para el Scoop, 2 operarios para las Volquetas, 1 operario para el Jumbo, 2 ayudantes de perforación y 4 personas más consideradas como supervisión.

Flujo de calor por equipos mecanizados:

El cálculo de la carga térmica producto de la utilización de equipos mecanizados se ha dividido en equipos diésel y equipos eléctricos; las ecuaciones 15.0 y 16.0 se han utilizado para programar las respectivas tablas de Excel.

Tabla 9. Cálculo de carga térmica, por equipos diésel. (Ecuación 15.0).

Flota de Equipos Diésel		Flota en operación	Potencia del Motor	Utilización del motor	Total Potencia	Carga Térmica
		-	(KW)	(%)	(KW)	(KW)
Truck	Volqueta (TH315)	2	185,0	75%	277,5	832,5
Scoop	Cargador (LH 307)	1	160,0	75%	120,0	360,0

Tabla 10. Cálculo de carga térmica, por equipos eléctricos. (Ecuación 16.0).

Equipos Eléctricos	Cantidad	Potencia Absorbida (KW)	Potencia Motor (KW)	Eficiencia (%)	Energía útil (KW)	Pérdidas directas de calor (KW)	Trabajo realizado contra la gravedad (KW)	Calor disipado por el trabajo (KW)
Jumbo	1	57,0	60,0	95%	54,2	2,9	0,0	54,2
Ventilador	1	49,4	52,0	95%	46,9	2,5	0,0	46,9
Luces Vehículos	17	0,05	0,05	90%	0,8	0,1	0,0	0,8
Luces fijas	10	0,06	0,06	90%	0,5	0,1	0,0	0,5

Tabla 11. Cargas térmicas totales por equipos diésel y eléctricos.

Ítem	Carga Térmica (KW)
Volqueta (TH315)	832,5
Cargador (LH 307)	360,0
Jumbo	57,0
Ventilador	49,4
Luces	1,5
Total	1300,4

Cargas térmicas totales emitidas al aire:

Las cargas térmicas totales transferidas al aire desde las diversas fuentes presentes en la zona de estudio, se exponen en la tabla 11; la cual contiene la sumatoria de las cargas netas producto de los estratos del macizo rocoso, la auto descompresión del aire, el metabolismo humano y los equipos diésel y eléctricos (Anexo 3).

Tabla 12. Cargas térmicas totales.

<i>FUENTE</i>	<i>CARGA TÉRMICA (KW)</i>
<i>Estratos del macizo rocoso</i>	<i>-3073,49</i>
<i>Auto descompresión del aire</i>	<i>2085,72</i>
<i>Metabolismo humano</i>	<i>4,48</i>
<i>Equipos diésel y eléctricos</i>	<i>1300,35</i>
TOTAL	317,06

El símbolo negativo presente en la carga térmica proveniente de los estratos, indica que el macizo rocoso ofrece una capacidad de enfriamiento de 3073,49 KW; es decir tiene la capacidad de absorber esta cantidad de calor otorgando enfriamiento al aire.

El proceso de auto descompresión, a pesar de que por sí solo ofrece un enfriamiento expresado como reducción en el calor sensible del aire; al llevarse a cabo en un ambiente húmedo donde existe presencia de agua, genera un incremento en el calor latente del aire y debido a que este calor es utilizado para evaporación de las moléculas de agua, esta energía calorífica es devuelta al aire.

7.5. Análisis del índice de estrés térmico.

El índice de estrés térmico se dividió para dos zonas específicas; primeramente, la zona central de estudio (Frente de avance rampa 1) y segundo, corte de producción 1400; el análisis del índice de estrés térmico para rampa 1, se estudia a partir de dos métodos empíricos: Temperatura efectiva (Te) y temperatura global de bulbo húmedo (WBGT).

Cálculo de temperatura efectiva (Te):

El concepto de temperatura efectiva ha sido empleado ampliamente como un índice de confort para trabajadores de oficina y como un índice de estrés térmico para las ocupaciones industriales y militares; el uso de la temperatura efectiva para predicción del estrés fisiológico, ha probado tener varias deficiencias y la mayoría de las industrias mineras lo han abandonado; no obstante, en donde aún se emplea, se recomienda que los periodos de trabajo continuo se reduzcan cuando las temperaturas efectivas superen los 28°C y que el trabajo se dé por concluido si dicha temperatura se eleva por encima de los 32°C. (McPherson, 1993).

A partir de los datos de campo en cada una de las estaciones de medición en la zona de estudio, se ha calculado la temperatura efectiva haciendo uso de la ecuación 10.0. Adicionalmente, se calcula la media aritmética para la zona de estudio, tal cual como se evidencia en la tabla 13:

Tabla 13. Temperatura efectiva, zona de estudio.

TEMPERATURA EFECTIVA				
Estación	Velocidad	Temperatura Seca	Temperatura Húmeda	Temperatura Efectiva
	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)
3	0,50	32,06	30,10	30,18
2	0,61	31,34	29,18	29,18
1	0,69	30,90	29,18	28,95
MEDIA	0,60	31,43	29,44	29,44

Históricamente, se han desarrollado gráficos que permiten leer la temperatura efectiva para una temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco y velocidad del aire determinadas (McPherson, 1993); la ilustración 20 muestra la temperatura efectiva para el personal ligeramente vestido.

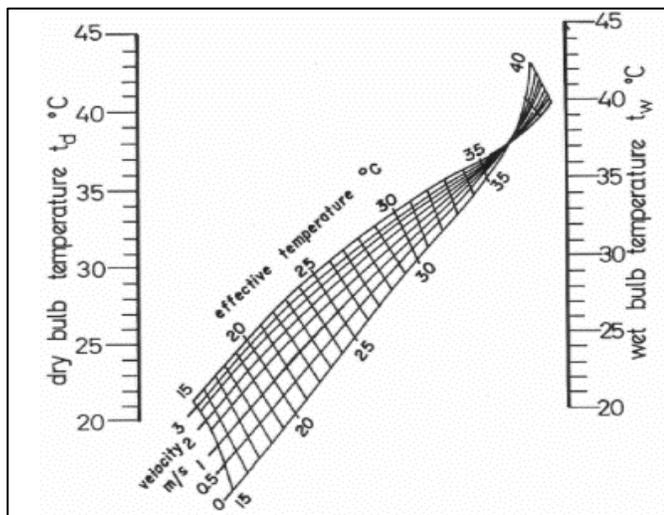


Ilustración 20. Gráfico de temperatura efectiva para el personal ligeramente vestido. (McPherson, 1993)

Haciendo uso de este gráfico, podemos tener lecturas rápidas del valor de temperatura efectiva para nuestra zona de estudio, ya sea de manera promediada o para cada estación de medición.

Veamos la ilustración 21 como un ejemplo directo de la estación número 3.

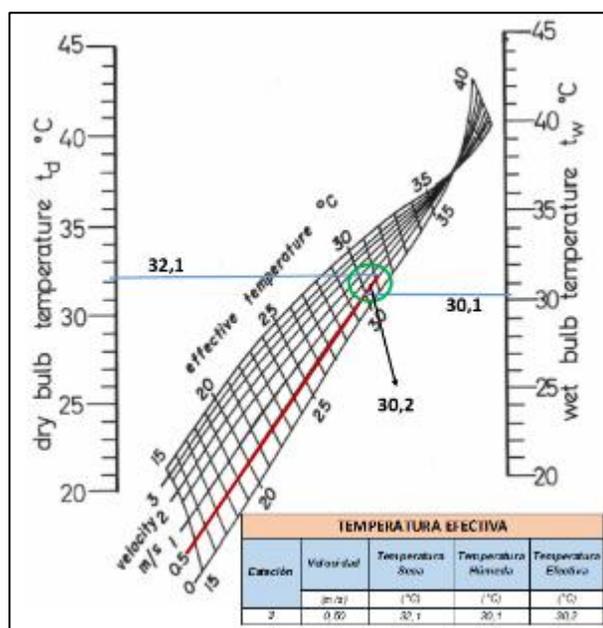


Ilustración 21. Temperatura efectiva para la estación número 3.

Siguiendo la normatividad expuesta en el decreto 1886, para los tiempos de permanencia del personal en los frentes de trabajo; tenemos las siguientes especificaciones para las estaciones de medición de la zona de estudio:

Tabla 14. Temperatura efectiva y tiempos de permanencia, zona de estudio.

TEMPERATURA EFECTIVA					
<i>Estación</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Temperatura Seca</i>	<i>Temperatura Húmeda</i>	<i>Temperatura Efectiva</i>	<i>Tiempo de permanencia</i>
	<i>(m/s)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(°C)</i>	<i>Horas</i>
3	0,50	32,06	30,10	30,18	Cuatro (4)
2	0,61	31,34	29,18	29,18	Seis (6)
1	0,69	30,90	29,18	28,95	Seis (6)
MEDIA	0,60	31,43	29,44	29,44	Seis (6)

Para nuestro caso en particular, la estación de medición número 3; representa el frente de trabajo del equipo de perforación Jumbo DD210, y es el frente donde labora de forma continua en un turno el mayor número de personal del frente de desarrollo; es decir el operario del Jumbo y sus dos ayudantes; razón por la cual es el frente de mayor importancia y donde se deben garantizar las mejores condiciones climáticas que permitan los más altos porcentajes de desempeño del personal.

La Ilustración 22 muestra la influencia de la temperatura efectiva en el rendimiento de los trabajadores; donde el rendimiento del trabajo a una temperatura efectiva de 22°C fue tomado para representar el 100 por ciento, los resultados muestran que la eficiencia del trabajo comienzan a sufrir a una temperatura efectiva de 27°C y disminuye rápidamente cuando la temperatura efectiva excede los 30°C. (McPherson, 1993).

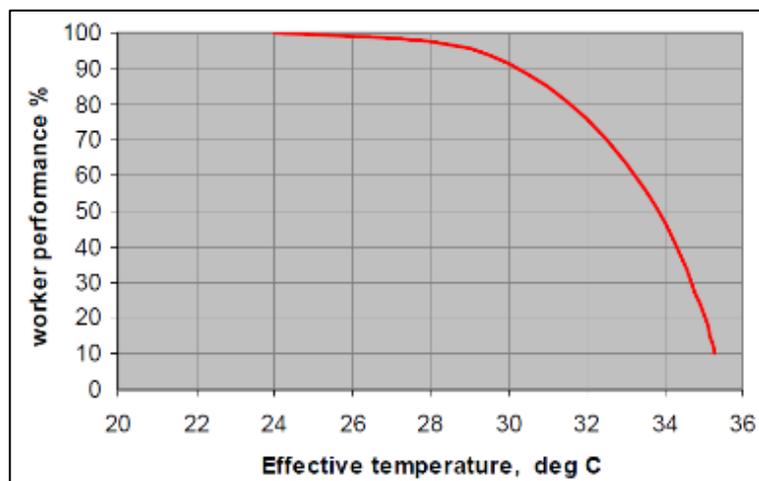


Ilustración 22. Influencia de la temperatura efectiva en el rendimiento del trabajador. (McPherson, 1993)

Utilizando este gráfico, podemos tener lecturas rápidas del desempeño del personal para cualquier punto de medición deseado de nuestra zona de estudio. Veamos la ilustración 23 como un ejemplo directo de la estación número 3.

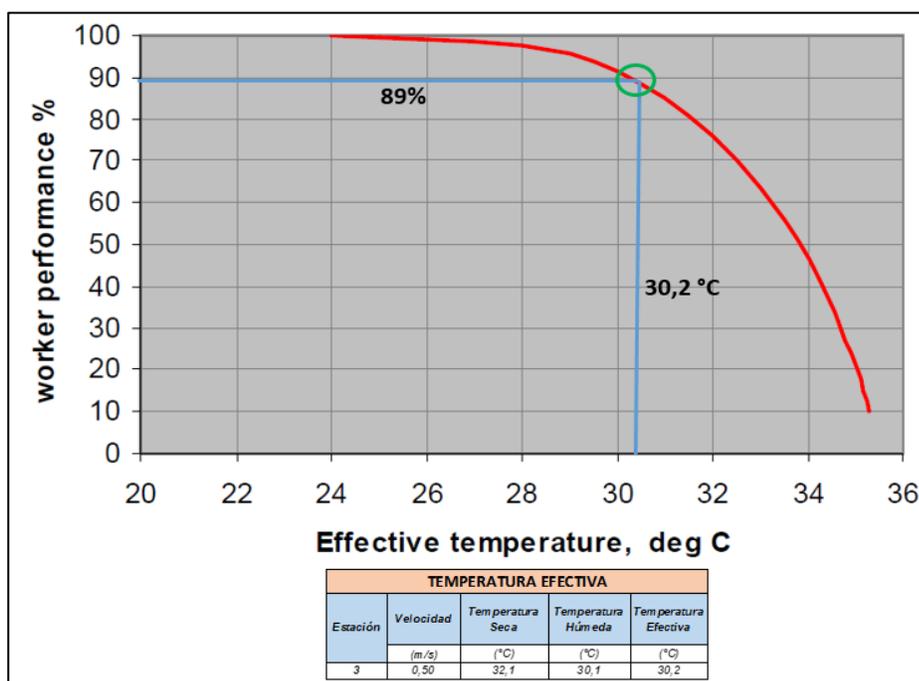


Ilustración 23. Influencia de la temperatura efectiva en el rendimiento del trabajador para la estación número 3.

Cálculo de temperatura global de bulbo húmedo (WBGT):

El paso inicial para llevar a cabo un análisis del índice de estrés térmico mediante el cálculo de la temperatura global de bulbo húmedo es precisamente determinar el valor más exacto posible de este parámetro; para ello, existen en la actualidad instrumentación electrónica portátil y algunas aplicaciones o software computarizados que brindan indicaciones de este valor. Para este estudio, al no contar con un medidor WBGT, utilizamos la calculadora del Laboratorio Nacional de Argonne (ANL). La humedad relativa, velocidad del viento, la temperatura del aire, el calor radiante; la ropa y la tasa metabólica, se consideran al determinar si existe un peligro de calor presente en un lugar de trabajo. Después de medir o calcular el WBGT, se agrega un factor de ajuste de la vestimenta y la carga de trabajo se traduce en tasa metabólica; use la tabla ACGIH TLV y Límite de acción para determinar el riesgo de exposición al estrés por calor por encima del límite de acción (AL) para trabajadores no aclimatados o el valor límite umbral (TLV) para trabajadores aclimatados. (OSHA, 2017)

La calculadora ANL utiliza la siguiente información para determinar la WBGT:

- Temperatura del aire, ° F o ° C
- Irradiación solar, W / m²
- Velocidad del viento, mph o m/s
- Humedad relativa, %
- Fecha y hora
- Presión barométrica, In Hg o milibares
- Longitud y latitud

Los datos ingresados en la calculadora ANL determinan la precisión de los cálculos de la temperatura global de bulbo húmedo (WBGT). Una WBGT calculada es más precisa cuando la fuente de datos tiene una humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento similares a los del lugar de trabajo. Si la hora, la fecha, la longitud, la latitud o la presión barométrica no son precisas, los ajustes de cálculo de WBGT no serán precisos. (OSHA, 2017).

Se debe incluir en las configuraciones de la calculadora, las coordenadas de la zona o lugar de estudio, seleccionar la zona horaria y las unidades de trabajo de preferencia, ya sean métricas o inglesas. Ver la ilustración 24.

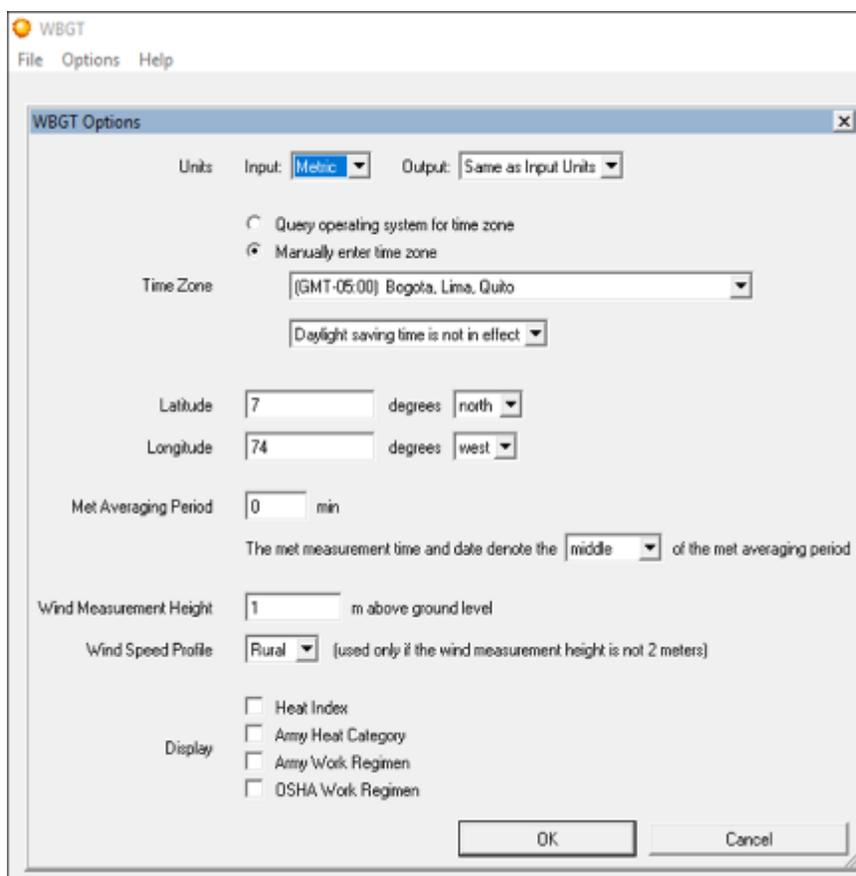


Ilustración 24. Configuraciones de la Calculadora ANL. (OSHA, 2017)

Posterior a la configuración, se deben ingresar los datos o parámetros de ingreso. Inicialmente, se debe ingresar el valor de la temperatura del aire o temperatura seca, posterior se debe indicar el valor de la Irradiación solar; este dato al ser en un ambiente subterráneo donde no se tiene contacto directo con la luz solar, se debe incluir como cero; seguido se ingresan los datos o valores correspondientes a velocidad del aire, porcentaje de humedad relativa, presión barométrica y fecha y hora en que se toman los datos.

Una vez ingresados todos estos valores, la calculadora arrojará el valor de la temperatura global de bulbo húmedo (WBGT), además de mostrar los valores de temperatura global, temperatura de bulbo húmedo natural y temperatura de bulbo húmedo sicrométrico. Adicionalmente, puede mostrar resultados recomendados para regímenes de trabajo/descanso. Ver ilustración 25.

The screenshot shows the WBGT calculator interface with the following sections:

Datos de Ingreso (Input Data):

- Air Temperature: 32.06 C
- Solar Irradiance: 0 W/m²
- Wind Speed: 0.5 m/s
- Relative Humidity: 07 %
- Time: 0:00 a.m. (GMT-5) [Set to Current Time and Date]
- Date: 10/15/2019
- 10m-2m Delta Temperature: 0 C (only needed when the wind speed measurement height is not 2 meters)
- Atmospheric Pressure: 995.4 mb

Resultados (Results):

- Globe Temperature: 31.8 C
- Natural Wet Bulb Temperature: 30.1 C
- Psychrometric Wet Bulb Temperature: 30.1 C
- Wet Bulb Globe Temperature: 30.7 C

Recomendaciones de regímenes de trabajo/descanso (Work/Rest Recommendations):

	Work Load	Work/Rest (min)	Water Intake (qt/hr)
Army Work/Rest Regimen	easy	no limit	3/4
	moderate	40/20	3/4
	hard	30/30	1
OSHA Work/Rest Regimen	50% work, 50% rest (light work load)		
	25% work, 75% rest (moderate work load)		
	highest permissible heat exposure threshold limit exceeded (heavy work load)		

Ilustración 25. Parámetros de ingreso y resultados de la Calculadora ANL (OSHA, 2017)

Una vez calculada la WBGT, se debe realizar la corrección de acuerdo con el tipo de ropa utilizada, agregar el factor de ajuste de ropa (CAF) para determinar la WBGT_{eff}. La CAF se puede identificar en la ilustración 26.

Clothing Worn	CAF
Work clothes (long sleeves and pants). Examples: Standard cotton shirt/pants.	0
Coveralls (w/only underwear underneath). Examples: Cotton or light polyester material.	0
Double-layer woven clothing.	3
SMS Polypropylene Coveralls	0.5
Polyolefin coveralls. Examples: Micro-porous fabric (e.g., Tyvek™).	1
Limited-use vapor-barrier coveralls. Examples: Encapsulating suits, whole-body chemical protective suits, firefighter turn-out gear.	11

Ilustración 26. Factores de ajuste (CAF) para la WBGT, de acuerdo con la ropa usada (OTM). (OSHA, 2017)

Posterior a la corrección de la WBGT, se debe proceder con la determinación de la tasa de trabajo metabólico, el manual técnico de OSHA, presenta una clasificación para una serie de tasas metabólicas diferente a la expuestas por McPherson; la Ilustración 27 muestra dicha clasificación.

Work Category	Metabolic Rate (Watts)	Examples
Rest	115	Sitting
Light	180	Sitting, standing, light arm/hand work and occasional walking
Moderate	300	Normal walking, moderate lifting
Heavy	415	Heavy material handling, walking at a fast pace
Very Heavy	520	Pick and shovel work

Ilustración 27. Tasas de trabajo metabólico. (OSHA, 2017)

Seguido de la determinación de la tasa de trabajo metabólico, y con la ayuda del WBGT_{eff}, se hace uso de la gráfica de la ACGIH para valor límite umbral y límite de acción, para determinar el TLV o AL; el TLV es donde el WBGT_{eff} y la tasa metabólica se cruzan con la línea continua y AL es donde se cruzan con la línea de puntos. El TLV es la temperatura a la

cual existe un peligro de calor presente para un trabajador aclimatado y el AL es la temperatura a la cual existe un peligro de calor presente para un trabajador no aclimatado. Una vez que se alcanzan estos límites, ya sea a través de factores ambientales o de la carga de trabajo, se necesitan controles para prevenir enfermedades relacionadas con el calor. (OSHA, 2017).

La ilustración 28, muestra la gráfica de la ACGIH para el valor límite umbral (TLV) y el valor del límite de acción (AL).

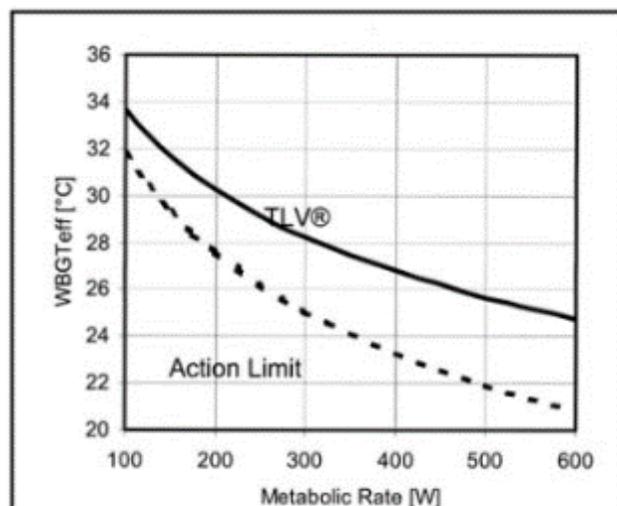


Ilustración 28. Gráfica de la ACGIH para TLV y AL. (OSHA, 2017).

Los criterios de detección de ACGIH para TLV y el límite de acción para las tablas de estrés por calor son una herramienta de detección inicial para evaluar si puede existir una situación de estrés por calor basada en WBGT, carga de trabajo y régimen de trabajo / descanso, (OSHA, 2017).

CRITERIOS DE DETECCIÓN PARA VALOR LIMITE UMBRAL (TLV)				
% Work	Workload			
	Light	Moderate	Heavy*	Very Heavy*
75 to 100% (Continuous)	31.0°C	28.0°C	N/A	N/A
50 to 75%	31.0°C	29.0°C	27.5°C	N/A
25 to 50%	32.0°C	30.0°C	29.0°C	28.0°C
0 to 25%	32.5°C	31.5°C	30.5°C	30.0°C

CRITERIOS DE DETECCIÓN PARA LIMITE DE ACCIÓN (AL)				
% Work	Workload			
	Light	Moderate	Heavy*	Very Heavy*
75 to 100% (Continuous)	28.0°C	25.0°C	N/A	N/A
50 to 75%	28.5°C	26.0°C	24.0°C	N/A
25 to 50%	29.5°C	27.0°C	25.5°C	24.5°C
0 to 25%	30.0°C	29.0°C	28.0°C	27.0°C

Ilustración 29. Criterios de detección de la ACGIH para TLV y AL. (OSHA, 2017)

A continuación, se muestra un análisis puntual para la estación de monitoreo 3; considerando una carga metabólica de 448W, la cual según la clasificación del doctor Malcom J. McPherson, corresponde a un valor moderado, sin embargo, según la clasificación del manual técnico de la OSHA, es una clasificación pesada.

- Determinación de la WBGT a través de la calculadora ANL

The screenshot shows the 'WBGT' calculator interface. It has a menu bar with 'File', 'Options', and 'Help'. The 'Data de Ingreso' (Input Data) section includes the following fields:

- Air Temperature: 32.06 C
- Solar Irradiance: 0 W/m²
- Wind Speed: 0.5 m/s
- Relative Humidity: 86.96 %
- Time: 10:00 am (GMT-5) with a 'Set to Current Time and Date' button
- Date: 11/10/2019
- 10m-2m Delta Temperature: 0 C (only needed when the wind speed measurement height is not 2 meters)
- Atmospheric Pressure: 985.4 mb

The 'Resultado de la WBGT e Índice de calor' (Result of WBGT and Heat Index) section shows:

- Globe Temperature: 31.8 C
- Natural Wet Bulb Temperature: 30.1 C
- Psychrometric Wet Bulb Temperature: 30.1 C
- Wet Bulb Globe Temperature: 30.7 C** (circled in red)
- Heat Index: 47.7 C

Ilustración 30. Determinación de la WBGT por medio de la calculadora ANL. (OSHA, 2017).

- Corrección de la WBGT por el factor de ajuste de ropa CAF

Clothing Worn	CAF
Work clothes (long sleeves and pants). Examples: Standard cotton shirt/pants.	0
Coveralls (w/only underwear underneath). Examples: Cotton or light polyester material. →	0
Double-layer woven clothing.	3
SMS Polypropylene Coveralls	0.5
Polyolefin coveralls. Examples: Micro-porous fabric (e.g., Tyvek™).	1
Limited-use vapor-barrier coveralls. Examples: Encapsulating suits, whole-body chemical protective suits, firefighter turn-out gear.	11

Ilustración 31. Factor de ajuste de ropa CAF para la WBGT. (OSHA, 2017).

Como la CAF tiene un valor de cero, al aplicar la corrección a la WBGT, la WBGT_{eff} continúa siendo la misma de 30,7°C.

$$WBGT = 30,7^{\circ}\text{C}$$

$$CAF = 0$$

$$WBGT_{\text{eff}} = 30,7^{\circ}\text{C} + 0 = 30,7^{\circ}\text{C}$$

- Selección de la carga metabólica.

MANUAL TÉCNICO DE LA OSHA		
Work Category	Metabolic Rate (Watts)	Examples
Rest	115	Sitting
Light	180	Sitting, standing, light arm/hand work and occasional walking
Moderate	300	Normal walking, moderate lifting
Heavy	415	Heavy material handling, walking at a fast pace
Very Heavy	520	Pick and shovel work

MALCOM J. MCPHERSON		
ACTIVIDAD	PRODUCCIÓN METABÓLICA DE CALOR	
	W	W/m2 (M)
Dormir	73	40
Sentarse	107	58,5 *
Pararse, pero relajado	128	70
Caminar sobre nivel a:		
1m/s	238	130
1.4m/s	320	175
1.8m/s	403	220
Trabajo manual:		
Muy ligero	174	95
Ligero	265	145
Moderado	448	245
Pesado	622	340

* 1 Met (M) = 58,5 W/m2 y es usado a menudo como unidad de la tasa metabólica.

Ilustración 32. Selección de la carga o tasa Metabólica. (OSHA, 2017).

- Determinación del valor límite umbral y del límite de acción.

Haciendo uso de la ilustración 28, se determinan los valores para el TLV y AL para una carga metabólica de 448W. Como se puede evidenciar en la ilustración 33, la temperatura global de bulbo húmedo efectiva ($WBG_{Teff} = 30,7^{\circ}C$) de la estación de monitoreo número 3, comparada con el TLV ($26^{\circ}C$) para la misma carga metabólica de trabajo (448W) se encuentra por encima, y es aún mucho mayor que el AL ($22,5^{\circ}C$); esto indica que un trabajador ya sea que este aclimatado o no, y que desarrolla una carga metabólica de 448W, se encuentra expuesto a un estrés por calor excesivo en esta zona de trabajo.

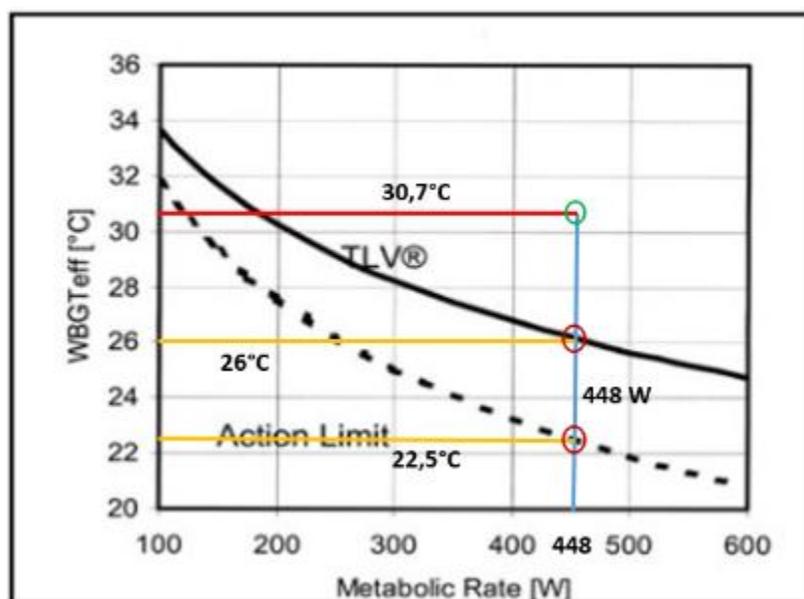


Ilustración 33. Determinación del TLV y del AL.

Basados en este índice de estrés térmico de $30,7^{\circ}C$ para el WBGT y de acuerdo con la anterior comparación con el TLV, se define el régimen Trabajo – Descanso para cada hora de la jornada laboral siguiendo las recomendaciones del manual técnico de la OSHA.

CRITERIOS DE DETECCIÓN PARA VALOR LIMITE UMBRAL (TLV)				
% Work	Workload			
	Light	Moderate	Heavy*	Very Heavy*
75 to 100% (Continuous)	31.0°C	28.0°C	N/A	N/A
50 to 75%	31.0°C	29.0°C	27.5°C	N/A
25 to 50%	32.0°C	30.0°C	29.0°C	28.0°C
0 to 25%	32.5°C	31.5°C	30.5°C	30.0°C

Ilustración 34. Régimen de Trabajo – Descanso para el WBGT de 30,5°C y carga laboral pesada.

Según este criterio recomendado por la OSHA, para estas condiciones de trabajo, es recomendable que trabajadores aclimatados laboren tan solo un 25% por cada hora de trabajo; dicho de otra manera, para un turno efectivo de 6 horas en el frente de trabajo, se recomienda por cada 60 minutos laborar 15 seguidos y descansar 45, esto para disminuir el factor de riesgo.

Adicionalmente, es recomendable complementar la evaluación con la determinación del índice de calor; con este índice se establece la sensación térmica a la que están expuestos los trabajadores; este parámetro se calculó con el software de la OSHA, la calculadora ANL.

Tabla 15. Temperatura global de bulbo húmedo e índice de calor para la rampa 1.

TEMPERATURA GLOBAL DE BULBO HÚMEDO E INDICE DE CALOR						
Estación	Velocidad	Temperatura Seca	Temperatura Húmeda	Humedad Relativa	WBGT	INDICE DE CALOR
	(m/s)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
3	0,50	32,1	30,1	86,96	30,7	47,7
2	0,61	31,3	29,1	85,43	29,7	44,0
1	0,69	30,9	29,1	87,85	29,6	43,4
MEDIA	0,60	31,4	29,4	86,75	30,0	45,0

Según (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014), el índice de calor se clasifica de acuerdo con su grado de severidad en una escala de 1 a 4 de la siguiente manera: 1.

Precaución 27-32°C 2. Precaución Extrema 32-41°C 3. Peligro 41-54°C 4. Peligro extremo >54°C.

De acuerdo con la anterior clasificación se puede evidenciar que, en todas las estaciones de monitoreo de la zona de estudio, los trabajadores están sometidos a índices de calor riesgosos.

Paralelamente, se ha calculado el índice de estrés térmico WBGT y el índice de calor para un frente de producción cercano a la zona de estudio (Corte 1400), con el fin de conocer características del aire en una zona donde no se tienen presentes cargas térmicas de equipos mecanizados.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 16. Temperatura global de bulbo húmedo e índice de calor para corte de producción 1400.

TEMPERATURA GLOBAL DE BULBO HÚMEDO E ÍNDICE DE CALOR								
PUNTO	MEDIDA	VELOCIDAD (m/s)	TEMPERATURA SECA (°C)	TEMPERATURA HÚMEDA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (KPa)	WBGT (°C)	ÍNDICE DE CALOR (°C)
CRT 1400	1	1,24	27,80	25,90	86,23	98,61	26,3	32,5
	2	1,29	27,20	25,60	88,20	98,60	26,0	31,1
	3	1,19	27,50	25,50	85,45	98,63	26,0	31,6
	4	1,32	27,60	25,70	86,18	98,65	26,1	32,0
	5	1,28	27,20	25,10	84,66	98,64	25,6	30,7
	6	1,21	27,80	25,40	82,77	98,64	26,0	32,0
	7	1,23	27,70	25,30	82,74	98,63	25,9	31,7
	8	1,30	27,30	25,80	88,94	98,64	26,1	31,5
	9	1,33	27,10	25,60	88,90	98,63	25,9	30,9
	10	1,33	27,40	25,20	84,03	98,62	25,7	31,1
MEDIA		1,27	27,46	25,51	85,81	98,63	26,0	31,5

Se puede evidenciar que en el corte de producción 1400, los trabajadores están sometidos a índices de calor aceptables, sin embargo, se debe tener precaución ya que una sensación térmica de $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ clasifica en rango de severidad de 1, lo que significa precaución de acuerdo (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014).

Por otro lado, el WBGT experimentado de $26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ comparado con una tasa metabólica de trabajo pesada de 448 W , se encuentra justo en el valor límite permisible para esta actividad, tal como se puede evidenciar en la ilustración 35:

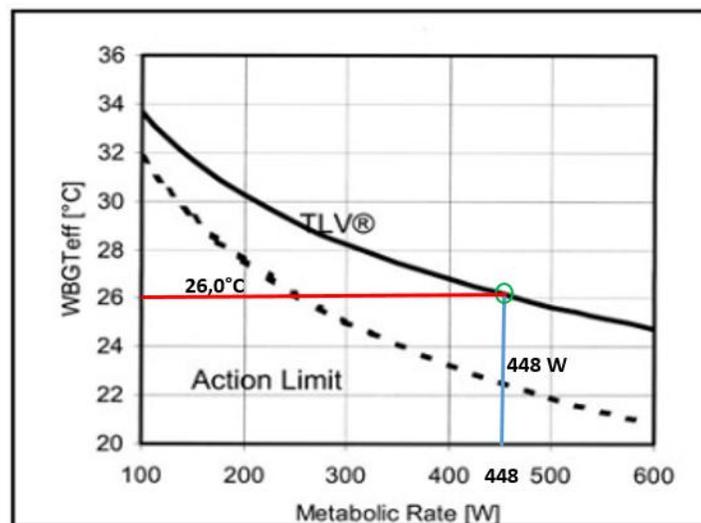


Ilustración 35. Determinación del TLV para corte 1400.

Según el criterio recomendado por la OSHA, es recomendable que trabajadores aclimatados tengan un régimen de trabajo / descanso de 50% - 50% por cada hora de trabajo, para disminuir el factor de riesgo. Esto se puede apreciar en la ilustración 36:

The screenshot shows the WBGT software interface with the following data:

Parameter	Value	Unit
Air Temperature	27.46	C
Solar Irradiance	0	W/m ²
Wind Speed	1.27	m/s
Relative Humidity	85.81	%
Time	10:00 am	(GMT-5)
Date	12/22/2019	
10m-2m Delta Temperature	0	C (only needed when the wind speed measurement height)
Atmospheric Pressure	986.3	mb
Globe Temperature	26.9	C
Natural Wet Bulb Temperature	25.5	C
Psychrometric Wet Bulb Temperature	25.5	C
Wet Bulb Globe Temperature	26.0	C
Heat Index	31.5	C
OSHA Work/Rest Regimen	continuous work (light work load) continuous work (moderate work load) 50% work, 50% rest (heavy work load)	

Ilustración 36. Resultados WBGT, índice de calor y régimen de trabajo - descanso para corte 1400.

7.6. Propuesta de optimización al sistema de ventilación auxiliar.

Como se ha podido evidenciar por medio de los datos de campo y los cálculos del índice de estrés térmico de la zona de estudio, el sistema auxiliar de ventilación no garantiza condiciones ambientales adecuadas para el normal desarrollo de las actividades operativas; es por ello por lo que se deben proyectar mejoras significativas al sistema actual.

El primer paso, ha sido determinar el requerimiento de aire necesario que garantiza condiciones ambientales óptimas y elimine el calor presente; para esto, se evalúa el sigma de calor del aire en la admisión (S1) y el valor del sigma de calor más alto aceptado en el aire (S2), este valor según (McPherson, 1993), puede establecerse como un valor umbral límite en términos de uno de los índices de estrés térmico u simplemente como un valor máximo aceptable (de corte) de temperatura de bulbo húmedo, adicional a la evaluación de los valores sigma se estimó el flujo de calor total (q12) en el aire entre la admisión y la salida.

En la tabla 17, programada como hoja de cálculo de Excel utilizando la ecuación 17.0, se cuantifica el flujo de aire necesario para eliminación del calor presente en la zona de estudio; se ha establecido un valor máximo de corte para temperatura húmeda de 27°C a una presión barométrica de 99,0 KPa, la cual corresponde al punto final a la longitud de los 300 metros de la rampa.

Adicionalmente, en la tabla 18, se cuantifica el requerimiento de aire por equipos diésel de acuerdo con los lineamientos establecidos por el decreto 1886; esto para tener un valor comparativo entre el flujo necesario para eliminación del calor y el requerido por tránsito de equipos diésel.

Tabla 17. Caudal requerido por carga térmica.

CAUDAL REQUERIDO POR CARGA TÉRMICA			
ECUACIÓN	PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
-	q12	KW	317,06
Medido	Pb	Pa	99000
VLP	tw	°C	27
(5.0)	esw	Pa	3618,90
(4.0)	Xs	Kg/Kg de aire seco	0,023599609
(3.0)	Lw	J/Kg	2437457,64
(1.0)	S1	KJ/Kg de aire seco	71,91
(1.0)	S2	KJ/Kg de aire seco	84,92
(8.0)	Densidad	Kg de aire húmedo/m3	1,123
(17.0)	Q	m3/s	21,70
Caudal Requerido	Qr	m3/s	21,70
		Kcfm	45,98
Caudal por Fugas	QFu	m3/s	2,17
		Kcfm	4,60
Caudal Total	QT	m3/s	23,87
		Kcfm	50,58

El caudal total requerido para eliminación del flujo de calor se ha determinado en unos 45,9 Kcfm, adicionalmente, se consideró un 10% de fugas, para un caudal total requerido de 50,58 Kcfm.

Tabla 18. Caudal requerido por equipos diésel.

CAUDAL REQUERIDO POR EQUIPOS DIÉSEL							
Ítem	Equipo	Cantidad	Potencia Nominal (KW)	Potencia Nominal (HP)	Potencia Total (HP)	m3/min	Kcfm
1	Volqueta TH 315	2	185,0	248,1	186,1	744,3	26,3
2	Scoop LH 307	1	160,0	214,6	160,9	643,7	22,7
3	Jumbo DD 210	1	55,0	73,8	0,0	0,0	0,0
TOTAL		4	400,0	536,4	347,0	1.388,0	49,0

El jumbo no se considera en el cálculo del requerimiento por diésel, debido a que mientras se está en perforación del frente solo se utiliza el motor eléctrico; comparando el caudal por equipos diésel vs el caudal por calor, se estableció que el requerimiento calculado por calor satisface el requerimiento para dilución de gases de equipos diésel.

Posterior al cálculo del caudal por cargas térmicas o flujo para eliminación del calor, se debe proceder con los cálculos de la potencia requerida del ventilador; la tabla 19 se ha programado utilizando las leyes básicas de ventilación, la ley cuadrática y la ecuación de Atkinsón.

Tabla 19. Caudal requerido por equipos diésel.

CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL VENTILADOR			
PARAMETROS		SISTEMA INTERNACIONAL	
Caudal Total	Q	11,94	m ³ /s
Diámetro Ducto	D	0,8	m
Área Ducto	A	0,50	m ²
Velocidad	V	23,75	m/s
Factor Fricción	K	2,90E-03	Kg/m ³
Longitud Ducto	L	280	m
Perímetro Ducto	Per	2,51	m
Resistencia Ducto	Rd	16,07	N.s ² /m ⁸
Resistencia Choque	Rshx	0,54	N.s ² /m ⁸
Resistencia Total	Rt	16,61	N.s ² /m ⁸
Densidad	d	1,123	Kg/m ³
Presión Total	HT	2366,19	Pa
Potencia Absorbida	P	35,30	KW
		47,34	HP
Eficiencia Asumida	E	80%	

La potencia absorbida del ventilador se ha calculado en 35,30 KW a una presión total de 2366,19 Pa, se asumió una eficiencia de 80%; el diámetro del ducto se incrementó a unos 800 mm, se utilizó una longitud de 280 metros de ducto, esto debido a que la manga de ventilación nunca alcanza a llegar al tope de la labor minera, dejándose siempre a unos 20 metros atrás de la frente para evitar daños por voladuras.

La resistencia total se cuantificó en $16,61 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^8$; para la resistencia por choque, se consideraron factores de choques en la entrada al ducto, en la salida a la atmosfera y por curvas existentes en la labor de 90° y 120° ; estos se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Factores de choque.

Factor de Choque	X
Entrada	1
Salida	1
Curva 90°	0,6
Curva 120°	1,2
TOTAL	3,8

Una vez calculada la potencia requerida para suministrar el caudal proyectado, se procedió con la selección de ventiladores existentes en la mina que logran coincidir con estos parámetros, se realizó la simulación en el software VentSim de un sistema en paralelo, utilizando el ventilador Zitrón de referencia ZVN-1-7-52/2 con ducto de 800 mm.

En la ilustración 37, se muestra el esquemático del sistema auxiliar propuesto.



Ilustración 37. Sistema de ventilación propuesto.

Al realizar las simulaciones dinámicas correspondientes con el ventilador seleccionado y con los parámetros de diseño ajustados, se obtuvieron las curvas de operación correspondientes.

Ver ilustraciones 38 y 39.

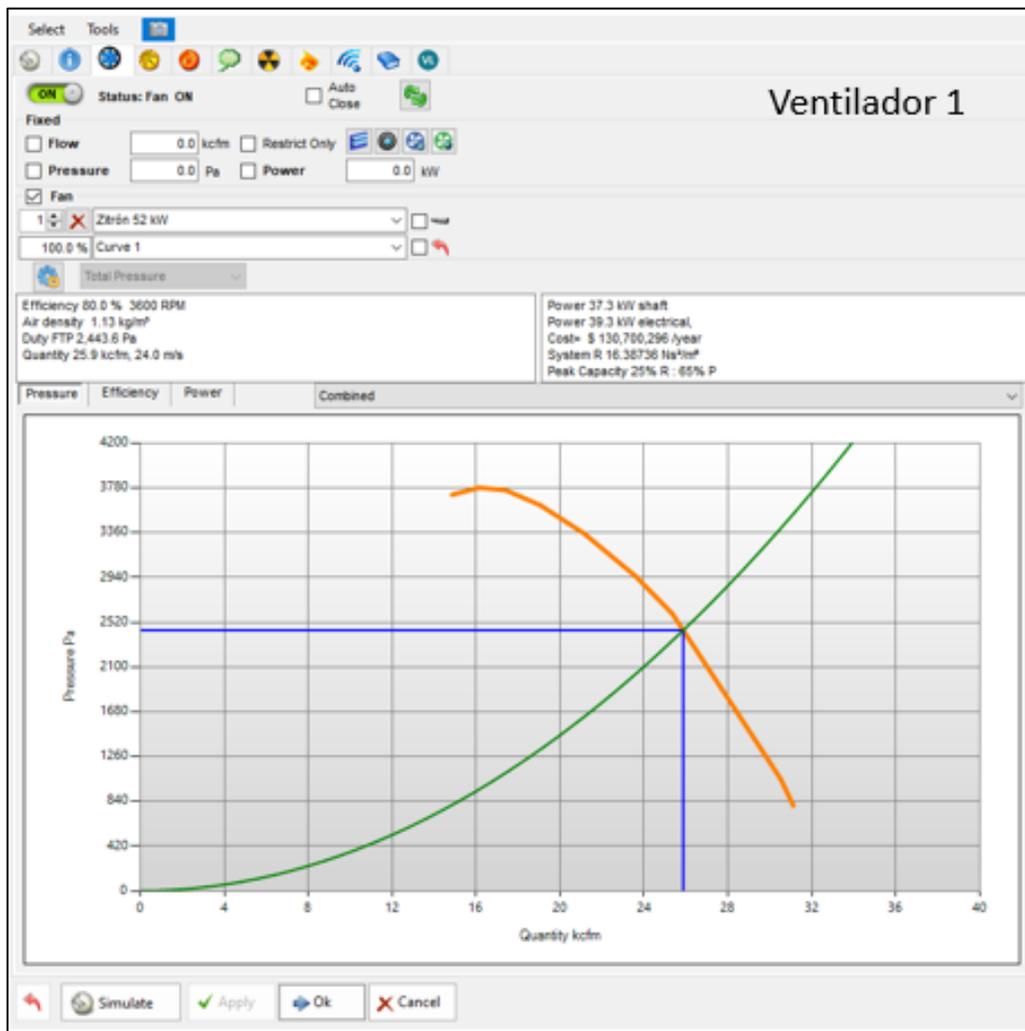


Ilustración 38. Curva de operación del ventilador #1 para el sistema propuesto.

Tal como se puede observar, el ventilador #1 tendría las siguientes características de operación:

Caudal: 25,9 Kcfm

Presión total: 2443,6 Pa

Resistencia del sistema: 16,38 N.s²/m⁸

Eficiencia del 80%

Densidad del aire de 1,13 Kg/m³

Potencia consumida: 39,3 KW.

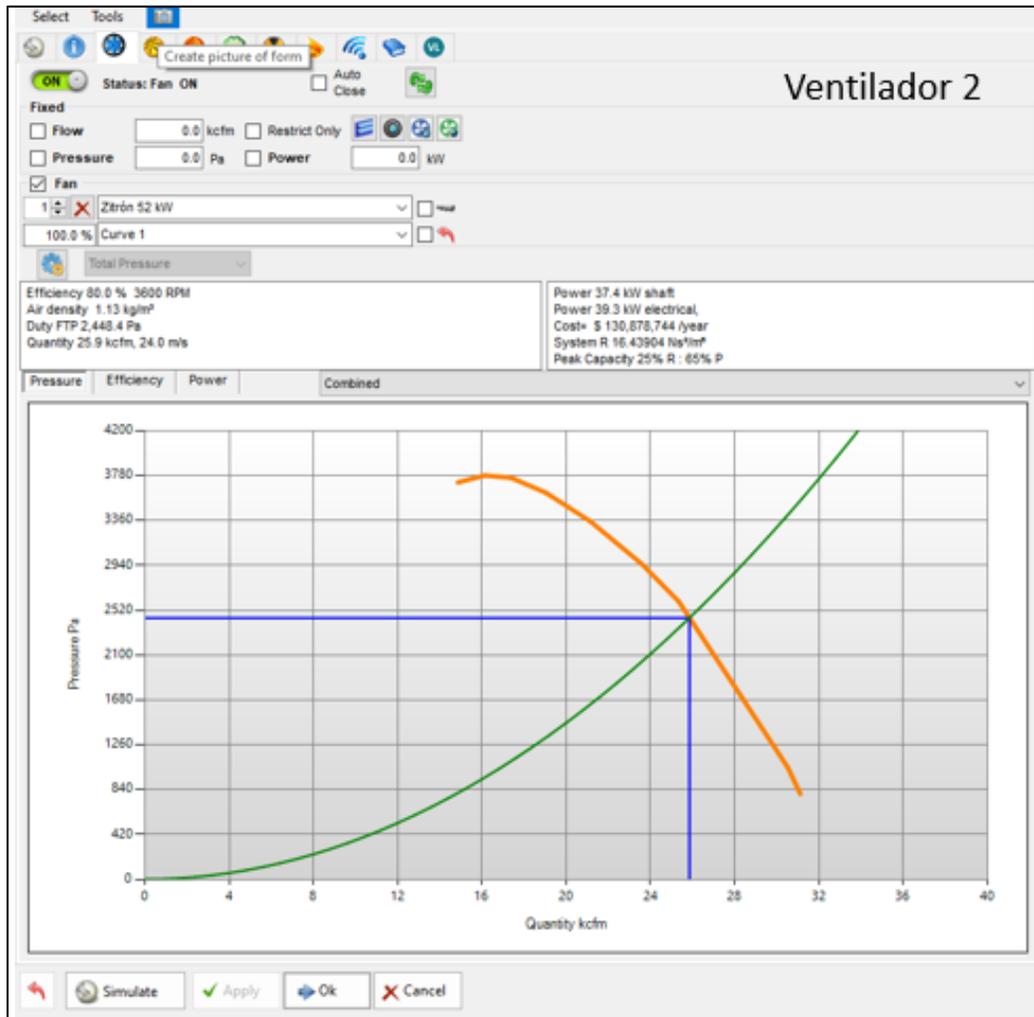


Ilustración 39. Curva de operación del ventilador #2 para el sistema propuesto.

Se puede observar, que el ventilador #2 tendría las siguientes características de operación:

Caudal: 25,9 Kcfm

Presión total: 2448,4 Pa

Resistencia del sistema: 16,43 N.s²/m⁸

Eficiencia del 80%

Densidad del aire de 1,13 Kg/m³

Potencia consumida: 39,3 KW.

Conclusiones

Al realizar el estudio y análisis sicrométrico de la zona de estudio, se encontró que el calor calorífico (σ Heat) promedio generado fue de 95,49 KJ/Kg de aire seco; y el incremento de 4,717 KJ/Kg de aire seco. Por otro lado, la entalpía media del aire, resulto ser equivalente a 98,720 KJ/Kg de aire seco, con un delta entálpico de 5,01 KJ/Kg de aire seco. Estos dos valores se pueden comparar con valores umbrales límites establecidos para presiones barométricas conocidas y a partir de una temperatura húmeda de 28°C y una seca de 30°C como valores de corte de acuerdo a (McPherson, 1993), un valor límite umbral promedio de σ heat y entalpía para la zona de estudio a una presión barométrica promedio de 98383 Pa, se determinó en 88,65 KJ/Kg de aire seco para el σ heat y 90,10 KJ/Kg de aire seco para la entalpía. Estos resultados nos permiten ver que las condiciones de entalpía y σ heat presentes en la zona de estudio superan los VLP recomendados.

El calor total emitido desde las diferentes fuentes al aire, fue de 317,06 KW; siendo el proceso de auto compresión la fuente de mayor aporte con 2085,72 KW de calor, seguido de los equipos mecanizados con 1300,35 KW y el metabolismo humano con una carga mínima de 4,48KW; por su parte, se identificó que el macizo rocoso ofrece una capacidad de enfriamiento de 3073,5 KW, este enfriamiento se debe a que la VRT es menor que la temperatura del aire; sin embargo, a medida que se profundicen las labores mineras esta capacidad se perderá y el calor total emitido será mayor, para este punto los requerimientos de aire para control de cargas térmicas puede ser muy elevados y quizá sea necesario implementar sistemas de refrigeración.

El índice de estrés térmico WBGT calculado para el frente de avance de la zona de estudio, fue de 30,7°C y supera el VLP indicado por la OSHA para una carga metabólica cercana a los 450W, este valor indica condiciones ambientales riesgosas para el desempeño del personal, ya que se los trabajadores estén aclimatados o no se encuentra expuestos a un estrés por calor excesivo; al reevaluar el análisis con la determinación del índice de calor, este fue superior a los 40°C, clasificando como rango 3 de acuerdo a (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014) sugiriendo que se está en una zona de peligro.

Adicionalmente, según (Castro, Delgado, & Cáceres, 2014) cuando la humedad relativa alcanza el 90%, el comportamiento del metabolismo humano es normal mientras que la temperatura seca no exceda los 28°C; sin embargo, al comparar esto con las medidas realizadas para el frente de avance de la zona de estudio, donde se detectaron humedades relativas cercanas al 90% con temperaturas secas hasta de 32°C, se concluye que el ambiente se torna riesgoso por el posible aumento de la temperatura corporal que pueden experimentar los mineros.

El sistema auxiliar de ventilación no garantiza condiciones ambientales adecuadas para el normal desarrollo de las actividades operativas; es por ello por lo que se deben proyectar mejoras significativas al sistema actual, incrementar el caudal entregado al frente de trabajo es la principal medida para contrarrestar los efectos negativos en la salud de los trabajadores y evitar accidentes laborales relacionados por excesivo estrés térmico.

Se cuantificó el flujo de aire necesario para eliminación del calor presente en la zona de estudio en unos 45,98 Kcfm, adicionalmente, se incluyó un 10% de fugas, para un caudal total requerido de 50,58 Kcfm; se estableció un valor máximo de corte para temperatura húmeda de 27°C a una presión barométrica de 99,0 KPa.

Se realizaron los cálculos para el ventilador necesario que suministre el caudal requerido, basados en un sistema en paralelo, potencia consumida por el ventilador en 35,30 KW a una presión total de 2366,19 Pa, asumiendo una eficiencia de 80% y diámetro el ducto incrementado a unos 800 mm y la resistencia total se cuantificó en $16,61 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^8$.

Recomendaciones

Se recomienda realizar la planeación de los futuros sistemas de ventilación auxiliar teniendo en cuenta las cargas térmicas que serán transferidas al ambiente, a partir de todas las fuentes posibles, como estratos de la roca circundante, procesos de auto-compresión del aire, maquinaria diésel y eléctrica, etc.

El principal control ingenieril para aplicar para la eliminación del calor es incrementar la circulación general del aire en la zona de estudio; para las condiciones actuales, se recomienda incrementar el caudal entregado al frente en unos 50 Kcfm, implementando un sistema en paralelo. Esto se puede lograr con la utilización de dos ventiladores Zitrón referencia ZVN-1-7-52/2 existente en la operación e incrementando el diámetro del ducto a unos 800 mm.

Se deben tener presentes medidas administrativas que ayuden a controlar los riesgos por estrés térmico, ofrecer información y formación a los trabajadores sobre el estrés térmico, así como instrucciones y procedimientos de trabajo precisos y programas de entrenamiento frecuentes; para trabajadores nuevos en la operación, se deben incluir procesos de aclimatización y garantizar regímenes de trabajo-descanso adecuados.

Es recomendable la implementación de zonas o puntos de hidratación dentro del área de trabajo, buscando con ello que el personal recupere líquidos vitales perdidos con la sudoración.

De acuerdo con la (OSHA, 2017), para las condiciones actuales del frente de trabajo, se recomienda un régimen de trabajo-descanso de 25-70, para trabajadores aclimatados, es decir que laboren tan solo un 25% por cada hora de trabajo. Sin embargo, esta medida afectaría drásticamente la productividad, razón por lo cual se debería ir trabajando en ella de manera pausada hasta que se logren eliminar las condiciones que generan el excesivo estrés por calor.

Es recomendable incluir en los estudios para análisis del estrés térmicos, medidas del balance metabólico de calor y realizar modelos de termorregulación fisiológica; que permitan tener data más exacta del comportamiento del cuerpo humano y con ello poder implementar las mejoras necesarias.

Una buena práctica que se recomienda realizar es el monitoreo manual rutinario del lugar de trabajo, es decir, la comprobación rutinaria de la potencia de enfriamiento de un entorno existente, basados en mediciones individuales del índice de estrés térmico, las cuales incluyen mediciones de temperatura de bulbo húmedo, bulbo seco y velocidad del aire.

Bibliografía

- amyd.quimica. (2018). *amyd.quimica conceptos basicos* . Obtenido de [http://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/1607/mod_resource/content/1/CONCEPTO S%20BASICOS.pdf](http://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/1607/mod_resource/content/1/CONCEPTO%20BASICOS.pdf)
- Castro, Y., Delgado, J. R., & Cáceres, J. J. (2014). *Análisis del índice de impacto térmico generado en un ambiente subterráneo*. Cúcuta: Respuestas.
- Castro, Y., Gomez, J., & Acavedo, C. (2018). Heat transfer generated in an underground mining environment. *SciencesDirect*, 9.
- Chilena, M. (4 de Diciembre de 2014). *Mineria Chilena informacion confiable y oportuna*. Obtenido de <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/ventilacion-subterranea-adequando-se-grandes-proyectos-mineros/>
- fullmecanica. (2014). Obtenido de <http://www.fullmecanica.com/definiciones/p/1403-presion-barometrica>
- Martinez, M. d. (2017). *slideplayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/11512599/>
- McPherson, & J, M. (1993). *Ingenieria de ventilacion subterranea*.
- Minkang, T., & Yuanchun, D. (2011). The reliability of ergonomics in the ventilation system of an underground metal mine. *ScienceDirect*, 7.
- OSHA, M. T. (2017). *Liljegren, James; Argonne, Laboratorio Nacional de; DIS, División*. Obtenido de https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_4.html
- Prosser, B. (2019). *Ventilation Review For Gran Colombia-Segovia*. Segovia Antioquia: Mine Ventilation Services/SRK Consulting.

- SRK Consulting (U.S.), I. (2018). Reporte técnico SRK NI-43-101 GCG. *SRK CONSULTING*, 1-10.
- Torres, V. F., Gama, C. D., & Singh, R. N. (2008). Mathematical modelling of thermal state in underground mining. *ScienceDirect*, 9.
- Torres, V. N., Gama, C. D., & Singh, R. N. (2008). Mathematical modelling of thermal state in underground mining. *ScienceDirect*, 9.
- Uribe, A. G., Garzon, L. E., & estrada, T. G. (21 de Septiembre de 2015). *Agencia Nacional minera, Reglamento de seguridad en las labores mineras subterranes*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto_1886_de_2015.pdf
- V, L. (2015). *Proyecto de ventilación, para aplicar el derribo por subniveles en la unidad minera de caudalosa chica-2014*. Ayacucho - Perú: Universidad nacional de san cristóbal de humanga.
- Wang, S., Ren, T., Zhang, T., Liang, Y., & Xu, Z. a. (2012). Hot environment - estimation of thermak comfort in deep underground mines. *Research online*, 9.
- Zhongpeng., X. (2012). Distribution law of high temperature mine's thermal environment paramenters and study oh heat damage's causes. *ScienceDirect*, 7.