



Escuela de Postgrado GĚRENS

Maestría en Gestión Minera

MGM- Promoción 2019

“ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DESPACHO Y LA PRODUCTIVIDAD LABORAL DE LAS OPERACIONES EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA: UN ESTUDIO DE CASO PARA LA MINA VAZANTE EN BRASIL”

Trabajo de investigación presentado de acuerdo con los reglamentos de la Escuela de Postgrado GĚRENS para obtener el grado de Magíster en Gestión Minera, por:

Emerson Alex Yapias Cajahuanca _____

Juan Edgar Manrique Maraví _____

Ronald Rojas García _____

Oscar Roberto Torres Oliva _____

Asesor: PH.D. Arturo Vásquez Cordano

Lima, 28 de junio de 2022

Copyright © 2022 por Emerson Alex Yapias Cajahuanca, Juan Edgar Manrique Maraví, Ronald Rojas García, Oscar Roberto Torres Oliva. Todos los derechos reservados.

Este trabajo está dedicado a mis Padres,
motivo de todos mis esfuerzos

Alex Yapias

A mi esposa Elizabeth e Hijos Juan y
Julián motivo de todos mis esfuerzos

Juan Manrique

A toda mi familia, motivo de todos mis
esfuerzos

Ronald Rojas

A mis Padres, esposa Janet e hijos Diego
y Gianella, motivo de todos mis esfuerzos

Oscar Torres

AGRADECIMIENTOS

Al profesor **PH.D. Arturo Vásquez Cordano**, por su orientación y dedicación para que este trabajo cumpla con los objetivos trazados.

A nuestros colegas y amigos del programa de maestría 2019 por sus observaciones y porque en todo momento nos incentivaron para que culminemos este trabajo.

A los profesores de la Escuela de Postgrado GĒRENS, principalmente a las profesoras Evelyn Contreras, Ana Rosa Adaniya, Mariluz Adaniya y Gabriela Palacios por sus observaciones teóricas que nos sirvieron de mucho para llevar a cabo este trabajo.

A todas aquellas personas que indirectamente nos ayudaron para culminar este trabajo y que muchas veces constituyeron un invaluable apoyo para lograr concluir esta investigación.

RESUMEN EJECUTIVO

La implementación del sistema de despacho (*dispatch*) en las operaciones de la minería subterránea aún es escasa en países como el Perú, pese a que en las últimas décadas se ha venido demostrando sus beneficios a nivel internacional. Estos abarcan el mejor despliegue de indicadores claves de desempeño (KPI's) de equipos de producción móviles, el soporte, desarrollo y aplicación de sistemas auxiliares para la ejecución del minado; el control y optimización del ciclo de actividad, así como el control del ciclo de mantenimiento de equipos, gestión de los equipos de operadores y el control de la mezcla de materiales.

Nexa Resources antes Votarrantim metais, elige a la mina Vazante para implementar el sistema "Dispatch" porque representa una de las minas más importante del grupo, en Brasil por el contenido metálico de 12% de Zn, el tipo de yacimiento, considerada la más grande en su producción con 3 900 TMD, hasta antes de la adquisición de las minas de Perú. Por la cual da la iniciativa de mejorar sus procesos de automatización antes del 2019. Durante los años 2016 y 2017 inician con la primera etapa de la automatización en el sistema de bombeo, ventilación y comunicación radial en interior mina.

Entre las diversas operaciones mineras que trabajan con este sistema destaca el caso de la unidad minera Vazante en Brasil, de la empresa minera NEXA Resources, cuya implementación data de octubre del año 2019. Precisamente luego de su implementación se ha observado en esta unidad minera una tendencia creciente relativamente estable de la productividad laboral, la cual se ha mantenido incluso en el contexto de la pandemia de la COVID 19, que obligó a muchas empresas y unidades mineras peruanas a paralizar su producción durante al menos dos meses (NEXA, 2020: 10).

Por otro lado, pese a que la productividad laboral viene siendo una preocupación creciente para los investigadores en economía minera, a la fecha aún son pocos los trabajos que han estudiado los impactos de los sistemas de despacho en la productividad laboral minera. En ese contexto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo contribuir a esta literatura analizando el cambio estructural en la productividad laboral de la unidad minera Vazante de la empresa NEXA

Resources, con la implementación del sistema de despacho subterráneo. Para ello se utilizará el modelo de producción Cobb Douglas-KLEMS para estimar la productividad laboral, y una regresión multivariante para explicar su comportamiento a lo largo del tiempo, considerando el impacto de factores productivos tales como el “consumo de energía” (medido por la variable “diésel 2”), el trabajo (medido por la variable “cantidad de horas-hombre de mano de obra”), el capital (aproximado por la variable “avance”, cuantificada en metros), así como la implementación del sistema *dispatch*, que se representará mediante una variable ficticia (*dummy*).

Los resultados de esta investigación buscan ser útiles para la toma de decisiones en las operaciones mineras subterráneas, verificando si la incorporación de un sistema de despacho subterráneo puede incrementar la productividad laboral. En tales casos, también podría motivar una evaluación económica y financiera de su implementación para estimar su rentabilidad.

ABSTRACT

The implementation of a dispatch system in underground mining operations is still limited in countries such as Peru, although in later decades the benefits associated with it have been demonstrated internationally. These feature the improvement in the display of keys performance indexes (KPI's) of mobile production equipment, the support, development and auxiliaries for the execution of mining, control and optimization of the activity cycle, as well as control of the equipment maintenance cycle, operator equipment management and materials mixing control.

Among many enterprises and mining operations that work with this system, the case of Vazante mining unit of mining enterprise NEXA Resources is remarkable. In this case, the implementation began in October 2019, and precisely after its implementation a growing and relatively stable tendency of labor productivity has been observed. This tendency has maintained even throughout the COVID 19 pandemic critical context, which forced many Peruvian companies and mining units to pause their production during at least two months (NEXA, 2020: 10).

On the other hand, whilst labor productivity has come to be of growing concern to mining economics researchers, there are still few research works that have studied the impacts of dispatch systems in labor productivity. In that framework, the present research work aims to analyze the structural change in labor productivity of mine operations with the implementation of the underground dispatch system in the case of Vazante mining unit. With this aim we will use a combined Cobb-Douglas/KLEMS model to estimate labor productivity and a multivariable regression in order to explain its oscillations along time, considering also the effect of variables such as Diesel Consumption, Labor, as well as Capital and the implementation of the dispatch system, which will be represent through a dummy variable.

The results of this research work aim to be useful for the decision making in underground mining operations as to whether or not introducing a dispatch system might increase labor productivity. In such cases, it could also encourage the financial and economical assessment of its implementation to estimate its' profitability.

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DESPACHO Y LA PRODUCTIVIDAD LABORAL DE LAS OPERACIONES EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA: UN ESTUDIO DE CASO PARA LA MINA VAZANTE EN BRASIL

Por Emerson Alex , Juan Edgard, Ronald, Oscar Roberto Yapias Cajahuanca, Manrique Maraví, Rojas García, Torres Oliva

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DESPACHO Y LA PRODUCTIVIDAD LABORAL DE LAS OPERACIONES EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA: UN ESTUDIO DE CASO PARA LA MINA VAZANTE EN BRASIL

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.osinerg.gob.pe Internet	302 palabras — 1%
2	repositorio.gerens.edu.pe Internet	126 palabras — 1%
3	repositorio.ulima.edu.pe Internet	109 palabras — 1%
4	www.siel.gov.co Internet	63 palabras — < 1%
5	www.coursehero.com Internet	62 palabras — < 1%
6	renati.sunedu.gob.pe Internet	54 palabras — < 1%
7	www.termpaperwarehouse.com Internet	45 palabras — < 1%
8	repositorio.economiayfinanzas.gob.bo Internet	40 palabras — < 1%

9	es.scribd.com Internet	39 palabras — < 1%
10	dokumen.pub Internet	38 palabras — < 1%
11	hdl.handle.net Internet	37 palabras — < 1%
12	ri.ues.edu.sv Internet	36 palabras — < 1%
13	www.volcan.facea.puc.cl Internet	29 palabras — < 1%
14	docplayer.es Internet	25 palabras — < 1%
15	repositorio.uaustral.edu.pe Internet	21 palabras — < 1%
16	www.asf.gob.mx Internet	19 palabras — < 1%
17	futuroambiental.wordpress.com Internet	18 palabras — < 1%
18	moonsbd.wordpress.com Internet	18 palabras — < 1%
19	www.scribd.com Internet	17 palabras — < 1%
20	www2.bcra.gob.ar Internet	16 palabras — < 1%

idus.us.es

21 Internet 15 palabras — < 1%

22 revistas.ucv.edu.pe Internet 15 palabras — < 1%

23 weblog.bizkaiadigitala.net Internet 15 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS ACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES < 15 PALABRAS

EXCLUIR COINCIDENCIAS DESACTIVADO

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	V
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
1.2 DEFICIENCIAS/VACÍOS ACTUALES EN EL CONOCIMIENTO DEL TEMA.....	3
1.3 OBJETIVO GENERAL	4
1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	5
2.1 ESTUDIOS PREVIOS.....	6
2.1.1. ESTUDIOS SOBRE PRODUCTIVIDAD EN MINERÍA.....	6
2.1.2. MEDICIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD LABORAL EN MINERÍA.....	8
2.1.3. SISTEMAS DE DESPACHO EN OPERACIONES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA.....	9
2.1.4. GESTIÓN DE FLOTA Y OPERACIÓN DE MINA EN VAZANTE	12
2.1.5. ESTUDIOS SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE DESPACHO Y LA PRODUCTIVIDAD	13
2.2. MODELOS EMPLEADOS.....	15
2.2.1. MODELO DE COBB DOUGLAS	15
2.2.2. MODELO DE KLEMS:.....	17
2.2.3. FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN COBB DOUGLAS - KLEMS.....	19
2.2. MODELO CONCEPTUAL ELEGIDO	24

2.3.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	25
2.4.	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES	26
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN		26
3.2.	MÉTODO EMPLEADO Y SUS LIMITACIONES	26
3.3.	UNIDAD DE ANÁLISIS	27
3.4.	DISEÑO DEL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	27
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS		29
4.1.	ANÁLISIS DESCRIPTIVO.....	29
4.2.	TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS	41
4.3.	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES	43
4.4.	INCLUSIÓN DE LA VARIABLE DUMMY:.....	45
4.5.	REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIANTE.....	47
4.6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	52
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		59
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES		61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64
ANEXOS.....		67

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Casos de éxito con el sistema de despacho de Hexagon Mining por unidad minera	10
Cuadro 2: Base de datos de variables dependiente e independientes en Excel...	28
Cuadro 3: Análisis descriptivo de la variable Ratio de Productividad	30
Cuadro 4: Análisis descriptivo de la variable Consumo de Diesel.....	33
Cuadro 5: Test de Asimetría/Curtosis de la variable Consumo de Diesel	33
Cuadro 6: Análisis descriptivo de la variable Horas-Hombre.....	35
Cuadro 7: Test de Asimetría/Curtosis para la variable “Horas-Hombre”	36
Cuadro 8: Análisis descriptivo de la variable Capital (Avances).....	38
Cuadro 9: Test de Asimetría/Curtosis para la variable “Avances”	39
Cuadro 10: Transformación logarítmica de las variables del modelo	42
Cuadro 11: Coeficientes de correlación entre las variables del modelo	43
Cuadro 12: Variables del modelo incluyendo la variable Dummy.....	46
Cuadro 13: Resultados de la primera regresión multivariable	47
Cuadro 14: Variables del modelo incluyendo interacciones con la dummy	50
Cuadro 15: Resultados de la segunda regresión (incorporando interacciones)	51

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Modelo conceptual elegido.....	25
Gráfico 2: Histograma de la variable Ratio de Productividad Laboral	31
Gráfico 3: Ratio de Productividad laboral	32
Gráfico 4: Histograma de la variable Consumo de Diesel	34
Gráfico 5: Variable Consumo de Diesel.....	34
Gráfico 6: Histograma de la variable Horas-Hombre	36
Gráfico 7: Variable Horas-Hombre.....	37
Gráfico 8: Histograma de la variable Capital (Avances)	39
Gráfica 9: Variable Capital (Avances, m).....	40
Gráfico 10: Ratio de Productividad laboral vs Consumo de Diesel (Dispersión)...	44
Gráfico 11: Ratio de Productividad vs Horas-Hombre	44
Gráfico 12: Ratio de Productividad vs Capital (Avances)	45
Gráfico 13: Productividad Laboral (T/HH).....	53
Gráfico 14: Esquema explicativo - Cambio de nivel en el intercepto vs. Cambio de pendiente	53
Gráfico 15: Esquema explicativo – Cambio de nivel en el intercepto para el caso de la productividad laboral	54
Gráfico 16: Esquema explicativo – Cambio de pendiente	55
Gráfico 17: Cambio de nivel en el intercepto y la pendiente luego de la implementación del dispatch.....	57

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Modelo Cobb-Douglas	16
Ecuación 2: Forma aplicada del modelo Cobb-Douglas.....	16
Ecuación 3: Modelo KLEMS	18
Ecuación 4: Variación en el producto en el modelo KLEMS.....	18

Ecuación 5: Modelo Cobb Douglas - KLEMS	19
Ecuación 6: Forma funcional del modelo Cobb Douglas - KLEMS.....	20
Ecuación 7: Productividad Laboral según el modelo Cobb Douglas - KLEMS.....	20
Ecuación 8: Incorporación de la Innovación tecnológica en el modelo	21
Ecuación 9: Forma funcional de la productividad laboral incorporando la Innovación tecnológica.....	21
Ecuación 10: Linealización de la forma funcional de la Productividad laboral mediante la aplicación de logaritmos naturales	22
Ecuación 11: Modelo de productividad laboral incorporando interacciones	23
Ecuación 12: Primera Hipótesis nula y alternativa.....	25
Ecuación 13: Segunda Hipótesis nula y alternativa.....	26

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y SIGLAS

PTF: Productividad Total de los Factores

Dummy: Variable dicotómica

Productividad Laboral: Definida como la producción por unidad de trabajo empleada en un periodo de tiempo determinado.

Capítulo 1: Introducción

El presente trabajo de investigación analizará el cambio estructural en la productividad laboral de las operaciones de mina que se genera por la implementación del sistema de despacho subterráneo para el caso de la Mina Vazante.

Vazante es una mina que está ubicada en Minas Gerais - Brasil, produce Zinc como mineral principal. Es una unidad minera perteneciente al grupo Nexa Resources.

La mina está 100% mecanizada con el método de explotación sublevel stoping, tiene una producción de 3900 TMD como mineral de cabeza.

Dentro de la información proporcionada por la minera Vazante, se incluye en la data el tonelaje de mineral mensualizado.

Para el presenta caso de estudio solo se considera personal del área de operaciones mina En la mina Vazante – Brasil, la legislación no permite terciarización de personal.

Según explica Willcox, P (2005), el sistema de despacho permite el control y gestión de toda la flota principal en tiempo real. Esto incluye: control de la producción, indicadores claves de rendimiento (KPI) de flotas y frentes de minado, para posicionamiento y gestión de alarmas de equipos, e informes automáticos que permiten que un supervisor de primera línea reaccione a la variación dentro de un turno y no al final. Las mejoras del flujo de información, según dicho autor, se traducen en toneladas adicionales que van a la concentradora, es decir en un incremento de la productividad laboral.

En el pasado, varias características únicas de la minería subterránea limitaban el uso de un sistema de despacho a escala de toda la mina. Por ejemplo, la estructura complicada de las minas subterráneas podría hacer que los sistemas de comunicación y posicionamiento subterráneos sean extremadamente caros, mientras que los modelos de minas 3D actualizados inevitablemente requerirían algoritmos exigentes para las operaciones y el procesamiento de datos de alto rendimiento. Además, la falta de habilidades en tecnologías de la información (TI) de los mineros y la falta de interoperabilidad entre los sistemas de control individuales también harían menos viable el uso en toda la mina. Con

el desarrollo de las TI y otras tecnologías relacionadas, las barreras técnicas anteriores se han superado sustancialmente.

En este contexto, considerando que las aplicaciones en minería subterránea son recientes en las operaciones de la región, existen pocos estudios cuantitativos que analicen el impacto de la implementación de sistemas de despacho en la productividad laboral. Este estudio busca contribuir a cerrar esa brecha de conocimiento en la gestión minera, así como brindar una referencia con base estadística para la toma de decisiones. Para este estudio se tomará datos de la empresa Minera Nexa Resources, Mina Vazante en Brasil, la cual se considera como un caso relevante puesto que, para el momento de formulación de la tesis, tenía un año de haber iniciado su proceso de automatización. Consideramos que su caso puede ser ilustrativo para las operaciones mineras subterráneas en el Perú, ya que, en caso permitiese mejorar la productividad laboral, esto podría brindar fundamentos para considerar su implementación en el país.

1.1 Justificación del estudio

El estudio propuesto es relevante puesto que permitirá generar conocimiento para la industria minera subterránea, respecto de los efectos económicos de la implementación de un “sistema de despacho subterráneo”. Según estudios previos, se postula que su implementación contribuye a incrementar la productividad, asegurando el logro exitoso del plan de mina y de la unidad de negocio en su conjunto. (Willcox, P, 2005)

Los hallazgos del presente estudio permiten evaluar, en base a estimaciones estadísticas, los incrementos de productividad laboral asociados a la implementación de un sistema de despacho. Se espera así, que esta investigación contribuya a generar conocimiento sobre el tema, y brinde específicamente información útil para la toma de decisiones en las empresas mineras.

1.2 Deficiencias/vacíos actuales en el conocimiento del tema

Pocos documentos tratan sobre el sistema de despacho para minas subterráneas. Y estos no se han implementado y difundido debido a la falta de medios tecnológicos de monitoreo en tiempo real que sean de bajo costo para su implementación en minería subterránea. Según Gamache et al. (2004), la transferencia de los sistemas de despacho desarrollados para operaciones a tajo abierto hacia las minas subterráneas no se puede hacer tan sencillamente debido a la diferencia entre los contextos. La principal dificultad para el desarrollo de sistemas de despacho en operaciones subterráneas está asociada a las condiciones de los circuitos de transporte, dado que los vehículos deben compartir segmentos de vías que no soportan más de un vehículo a la vez y la selección óptima de tareas se convierte en una de las actividades más desafiantes.

La medición y seguimiento de los indicadores clave de performance (*key performance indicators*, KPI) en una mina que no cuenta con un sistema de despacho constituyen un proceso lento, el cual, por otra parte, no permite cambios con agilidad, y además presenta informes con baja confiabilidad, debido a que hay discordancias entre lo reportado por los operadores y los mecánicos de los equipos utilizados¹. Cuando las distancias entre los frentes

¹ Esta controversia entre el operador y el mecánico de un equipo puede ilustrarse por medio del siguiente ejemplo: Supongamos que la jornada laboral del operador comienza a las 7am, y el mecánico señala que, a dicha hora, el equipo ya está operativo. No obstante, en realidad el operador a esa hora recién se encuentra en su reparto de guardia u en alguna otra charla. Incluso a las 7:40am puede que el equipo aún siga inoperativo. En esto se pierde disponibilidad y confiabilidad. El mecánico puede indicar que tiene el equipo a un 80%, cuando no es así necesariamente. O cuando el operador reporta una cifra determinada, la máquina podría estar solamente disponible en un 60% o hasta menos. Ese cruce de información no es preciso, y a raíz de esto es que se empieza a implementar el dispatch. La primera etapa es la comunicación, que empieza con la instalación de la radio comunicación. Y así se empieza a hacer un seguimiento al reporte de la operación, lo cual también permite que no se dé la situación en

de minado aumentan, se incrementa el tiempo requerido para transportar equipos como cargadores (LHD²), perforadoras (jumbos) y camiones, reduciendo su utilización y dificultando que los supervisores y la unidad minera puedan controlar las actividades. La situación más común en una operación es la falla del equipo y las paradas de mantenimiento, lo cual exige rapidez en la toma de decisiones, la reubicación de la máquina, y la reprogramación de las actividades.

En una mina que no cuenta con un sistema de despacho, solo hay un seguimiento de los informes realizados por los propios operadores de los equipos, además de poca estandarización en la descripción de fallas y desviaciones (Willcox, P, 2005). En caso surgieran estas fallas, muchas veces los operadores deben buscar al mecánico o supervisor, lo cual toma periodos largos de tiempo. Así, no solo se dificulta identificar las fallas, sino también darles solución con rapidez y eficiencia.

1.3 Objetivo General

El objetivo general del trabajo de investigación es analizar el cambio estructural en la productividad laboral de la unidad minera Vazante con la implementación del sistema de despacho subterráneo. Esto, en caso se determine que hay un impacto positivo, podría servir de fundamento para considerar su implementación en otras unidades mineras subterráneas en el Perú. Y asimismo, podría fomentar futuras investigaciones que analicen otros posibles impactos positivos de la incorporación de sistemas de despacho³.

que un equipo esté malogrado por largo tiempo sin que el mecánico lo repare, sino que más bien pueda dar su atención en el periodo más corto posible.

² LHD (Load Haul Dump), se refiere a equipos de Carga, descarga y acarreo.

³ Por ejemplo, en el caso de la mina Vazante, en una primera etapa del proceso de automatización, se ha logrado optimizar muchos procesos más allá de lo concerniente al volumen de mineral procesado, e incluso más allá de los procesos estrictamente mecánicos. Es decir, en áreas tales como: servicios, ventilación, relleno, sostenimiento e incluso en

1.4 Pregunta de investigación

¿En qué medida el sistema de despacho afecta la productividad laboral en las operaciones subterráneas de la unidad minera Vazante?

Una vez desarrollados los principales aspectos introductorios de la tesis, es decir, su pertinencia, su objetivo y la pregunta principal que busca responder, pasaremos a desarrollar los principales conceptos que nos permitirán diseñar un marco conceptual y analítico de trabajo. Este paso es muy importante, puesto que dará mayor precisión a nuestra aproximación al fenómeno que se busca estudiar en el marco de la presente investigación. En otras palabras, nos permitirá acotarla y darle un alcance más definido y delimitado.

Capítulo 2: Marco conceptual

Este capítulo se organizará del modo siguiente. En primer lugar, se hará una revisión de los principales estudios previos con respecto de los temas principales de interés para nuestra investigación, es decir, la productividad laboral y los sistemas de despacho. Esto nos permitirá definir y articular los conceptos principales con los que trabajaremos, así como tener una comprensión más amplia de cómo estos funcionan u operan en el marco del

seguridad. En todas estas áreas antes había muchos tiempos muertos. Con respecto de la ventilación, por ejemplo, cada fin de guardia (turno) se realiza voladuras, en las cuales se hace detonar explosivos. En el caso de Vazante hay hasta 35 labores, cada una de las cuales se dispara con explosivos. Producto de esta voladura se generan gases, como el gas nitroso que es letal, por lo que el personal debe salir, primeramente, porque es fin de guardias y obviamente tiene que salir para hacer explotar. El siguiente turno debe esperar que las labores se ventilen. Las labores de avance son los túneles, se asigna cada túnel a algunas personas. Con el dispatch, el operador enciende desde una sala de control las bombas, al igual que las voladuras (antes tenía que ir una persona a prender la mecha), de modo que se puede hacer la voladura a control remoto. Esto, además de ser más eficiente, es más seguro.

desarrollo de la actividad minera. Especialmente nos interesa indagar en la existencia de una posible relación entre la incorporación de sistemas de despacho en minería subterránea e incrementos de la productividad laboral.

En segundo lugar, se desarrollará los principales modelos que nos permitirán operacionalizar estos conceptos o variables de trabajo. Estos se basan también en investigaciones previas en economía minera y nos permitirán cuantificarlos, pero también relacionarlos matemática y estadísticamente. Posteriormente, se pasará a definir el modelo conceptual por medio del cual se relacionará estos conceptos, y se presentará la hipótesis principal de la investigación. Finalmente, se definirá detalladamente las variables con las que se trabajará a lo largo de la presente investigación, que es de corte cuantitativo.

2.1 Estudios previos

En este apartado se considerará algunos estudios previos, principalmente relacionados a la productividad en minería, así como a la productividad laboral en específico. Posteriormente se ahondará en los estudios que hayan abordado la influencia de la implementación de los sistemas de despacho sobre la productividad laboral minera.

2.1.1. Estudios sobre Productividad en minería

Según describe Humphreys (2020), la productividad es clave para todos los sectores económicos, y es fundamental para el bienestar económico general de un país. Sin embargo, en el caso de la minería, la noción de productividad tiene un significado particular, puesto que se trata de una industria con recursos minerales que se agotan. Este agotamiento puede tomar diversas formas, desde la disminución de leyes en los recursos disponibles restantes, hasta la aparición de índices de extracción crecientemente altos (y la consiguiente necesidad de eliminar mayores sobrecargas), así como de roca más dura, mineralogía más compleja y más impurezas en el mineral (requiriendo más procesamiento). Así mismo, puede tratarse de un aumento de los desechos líquidos y sólidos que deben ser adecuadamente gestionados, generando

mayores costos. En ese marco, si no es posible hacer que los factores que contribuyen positivamente a la productividad superen los efectos negativos del agotamiento, los costos de producción de minerales aumentarán y, por ende, también los precios.

Esto es refrendado por autores como John Tilton —uno de los principales investigadores en economía minera— quien ha señalado la importancia de la productividad para el desarrollo de la actividad minera. Dicho autor, asimismo, ha identificado que, pese a que dicha productividad, tanto laboral como de los demás factores, había sido creciente durante las décadas de 1980 y 1990, esta ha venido reduciéndose a partir de la década del 2000. Si bien existe un debate respecto de las causas de este fenómeno, muchos apuntan a dos cuestiones principales: el desgaste de recursos minerales de alta calidad (y la incapacidad de encontrar reemplazos), y el declive en el ritmo con que surgen y se difunden las innovaciones reductoras de costos (Tilton, 2014). Así mismo, en este marco, a partir de la década siguiente, la inversión en productividad comenzó a ser una de las prioridades de muchas empresas mineras (Humphreys, 2020).

Por otro lado, la productividad, que es de importancia central para la minería, no surge de forma espontánea, sino en el seno de los ciclos que caracterizan el funcionamiento y comportamiento de la actividad misma. Esto es así, pues, como se sabe, la actividad minera suele estar sujeta a las tendencias de los precios internacionales de los *commodities*, ya sean altos o bajos. En medio de estos ciclos, según señala Tilton, se observa que los ciclos de precios altos tienden a desincentivar el aumento de la productividad, puesto que las empresas se enfocan más en producir grandes volúmenes, mientras que los ciclos de precios bajos tienden a fomentarla, ya que las empresas buscan modos de reducir costos (Tilton, 2014).

A lo largo de este ítem, hemos podido ver que la Productividad constituye un concepto fundamental dentro del desarrollo de la actividad minera, y su importancia viene creciendo en las últimas décadas. Esto nos permite situar mejor nuestro propio tema de interés en el marco de los debates e investigaciones recientes sobre la economía minera. A continuación, se presentará algunos estudios que han abordado la medición de la productividad laboral minera en específico.

2.1.2. Medición de la productividad laboral en minería

En el trabajo de García, Knights & Tilton (2001) se estudia la productividad laboral para la minería chilena de 1978 a 2000. Dado que la productividad laboral del trabajo parece haberse cuadruplicado en dicho periodo, los autores deciden partir de la pregunta siguiente ¿Es la producción de metal por trabajador una correcta medida de la productividad del trabajo?

Según dichos autores, la productividad laboral en la minería a menudo se mide por la producción por empleado de la empresa minera durante un período de tiempo determinado, como un año, donde la producción suele ser el contenido del principal producto metálico contenido en el mineral. No obstante, pese a que los datos necesarios para esta medida pueden ser fácilmente obtenidos, aquella presenta deficiencias conocidas. En particular, no tiene en cuenta los cambios en la cantidad promedio de horas que los empleados de la empresa minera trabajan anualmente, el uso creciente de empleados contratados y subcontratados, las fluctuaciones en las cantidades de subproductos producidos y los cambios en la medida en que el mineral se procesa. La investigación de estos autores se aboca a evaluar la importancia de dichas deficiencias y ver en qué magnitud, la forma de medición utilizada es adecuada para el estudio de la productividad laboral minera en el caso chileno.

La revisión hecha en este ítem nos permite apreciar la complejidad detrás de la medición de la productividad laboral en un sector como el minero. En ese sentido, nos permite tener una idea de las posibilidades y limitaciones de la investigación que proponemos. Esto se verá con mayor claridad en el ítem 2.4. (Definición de las variables), así como en otros ítems a lo largo de la investigación. A continuación, se abordará algunos detalles sobre los sistemas de despacho, tales como el contexto de su surgimiento y desarrollo en el marco de la actividad minera a tajo abierto y subterránea. Se mencionará también algunas de las ventajas de su implementación observadas en diversas operaciones mineras subterráneas a nivel mundial para el caso de la empresa Hexagon Mining.

2.1.3. Sistemas de despacho en operaciones en minería subterránea

El sistema DISPATCH, llamado inicialmente “DISPATCH fleet management system” (Sistema de gestión de flota DISPATCH), fue desarrollado en 1979, por la empresa Modular Mining. para operaciones mineras a tajo abierto. Su finalidad era optimizar, organizar y hacer más confiable y eficiente el ciclo de transporte (haulage cycle), considerado como el eje fundamental de este tipo de operaciones mineras (E&MJ, 2021). Esto se logró mediante el uso de algoritmos de optimización computarizados, que a la larga permitieron a muchas empresas del sector optimizar sus ciclos de transporte, así como maximizar la producción e incrementar la utilización de equipos (Modular Mining). Posteriormente, en 1991, este sistema se desarrollaría y aplicaría también en operaciones subterráneas, particularmente en el caso de la mina Finsch en Sudáfrica, en la que se producía diamantes. Para este uso se tuvo que adaptar la utilización de computadoras, así como los sistemas de radio a las duras condiciones de la minería subterránea. Y, según señalan algunas fuentes, la aplicación del sistema permitió alcanzar las metas de producción de la mina (Marais & Luke, 1992)

Desde ese entonces, si bien con cierta demora, muchas operaciones mineras subterráneas alrededor del mundo han recurrido al uso de los sistemas de despacho. No obstante, en el caso de la minería peruana, los sistemas de despacho están implementados exclusivamente en operaciones a cielo abierto, esto debido a las dificultades que tienen para ser adaptados a un entorno de mina subterránea.

Las condiciones de conectividad y de los circuitos de transporte representan la principal dificultad para el desarrollo de un sistema de despacho en operaciones subterráneas, dado que los vehículos deben compartir segmentos de vías que no soportan más de un vehículo a la vez, y la selección óptima de tareas se convierte en una de las actividades más desafiantes con respecto de los contextos a cielo abierto. (Gamache et al., 2004). Sin embargo, la investigación y los avances tecnológicos han permitido ir superando muchas de estas limitantes operativas y de conectividad. Esto hace hecho posible que hoy en día se pueda contar con un gran número de compañías que ofrecen productos

de sistema de despacho para minería subterránea, tales como: Modular, Newtrax, Pitram, Mining Tag, Hexagon Mining, entre otras.

A continuación, se muestra un cuadro resumen de los casos de éxito con el sistema de despacho (Sistema UG Pro) de Hexagon Mining en cada unidad minera por país. Dicha información proviene de una entrevista realizada al Gerente de la empresa Hexagon Mining (proveedora de sistemas de despacho en minería subterránea)⁴

Cuadro 1: Casos de éxito con el sistema de despacho de Hexagon Mining por unidad minera

Unidad Minera / País	Tamaño del sitio	Red de comunicación	Desde el año
Lamego Mine – AGA (BR)	35 equipos	Hotspots Wi-Fi (Subterráneo y superficie)	2012
Cuiabá Mine – AGA (BR)	55 equipos	Hotspots Wi-Fi (Subterráneo)	2014
Córrego do Sítio Mine – AGA (BR)	30 equipos	Hotspots Wi-Fi (Superficie)	2018
Vazante Mine – NEXA (BR)	30 equipos	Hotspots Wi-Fi (Superficie)	2018
San Julián Mine – Fresnillo PLC (MX)	220 equipos	Hotspots Wi-Fi (Subterráneo y superficie)	2019
Jacobina Mine – Yamana Gold (BR)	66 equipos	Ninguna	2020
Zinkgruvan – Lundin (SE)	20 equipos	Hotspots Wi-Fi y LTE (Subterráneo)	2019
Aripuanã Mine – NEXA (BR)		En implementación	2020/21

Fuente: Hexagon Mining: Digital Mining Solutions. Elaboración propia

Cuando se realiza labores en la mina es importante tener una adecuada conexión y comunicación. Cuando todo se conecta sin problemas, el trabajo se

⁴ La entrevista fue llevada a cabo de manera virtual el día 03 de diciembre del 2020. En los anexos se ha colocado la guía de la entrevista.

lleva a cabo sin inconvenientes, y eso es posible mediante la implementación de un sistema de despacho, el cual reúne las actividades de monitoreo, comunicaciones, programación y reportes en un *sistema único centralizado*. Dicha plataforma ayuda a:

- Optimizar los procesos,
- Reducir los tiempos improductivos,
- Aumentar la seguridad.

Así mismo, hace la mina aún más segura para todos los trabajadores que laboran bajo tierra. Con monitoreo en tiempo real se puede saber la ubicación de todo vehículo y todo trabajador minero en todo momento, así como dirigir a los mineros hacia el lugar correcto, en el momento correcto, todo el tiempo. Se puede actualizar al instante los flujos de trabajo y los programas para marcar una dirección clara, aumentar la disponibilidad y las horas trabajadas.

El sistema puede medir cuánto duran las brocas de perforación y registrar estados para maximizar la condición de la maquinaria y puede aprovechar el reporte automatizado de minado para saber siempre que está pasando bajo tierra con comunicaciones transparentes con el centro de operaciones a través de varios canales de comunicación tales como:

- WiFi; Wireless Fidelity,
- Leaky feeder,
- LTE (Long Term Evolution); que es un estándar para la comunicación inalámbrica de alta velocidad. Estos sistemas de redes brindan velocidades inferiores a una red 4G.

A medida que crece la demanda por minerales la capacidad de expandir la producción eficientemente debe crecer también en una operación minera. Es importante conectar la mina subterránea con un sistema de despacho debido a los beneficios que están relacionados con la mayor visibilidad de los índices de

equipos y los lugares de trabajo (Garrido, com. pers)⁵ Así, es posible reducir el tiempo de inactividad del equipo, aumentando el uso. De esta manera, como en una reacción en cadena se producirá un aumento de productividad, una reducción de costos y el aumento de márgenes operativos. El uso del sistema también tiene el beneficio de monitorear el plan de minado, lo que genera una mejor adherencia al plan (ibíd..).

Lo revisado hasta el momento nos permite apreciar los beneficios que se han observado luego de la implementación de sistemas de despacho en diversas unidades mineras de diferentes países, tanto de la región de Latinoamérica, como fuera de ella. Esto nos brinda unos primeros indicios de que nuestro tema de investigación puede ser pertinente. Por ello, a continuación, se revisará el caso de estudio de la presente investigación, es decir, la mina Vazante. En concreto, se presentará algunos antecedentes sobre la implementación del sistema de despacho en dicha unidad minera.

2.1.4. Gestión de flota y operación de mina en Vazante

En nuestro caso de estudio, es decir, en la unidad minera Vazante, se implementó el sistema de gestión de flota y operaciones de mina, conocido como sistema de despacho (*dispatch*) en el año 2019. Este habría tenido una serie de beneficios a nivel técnico y de gestión en la unidad minera mencionada. Así, habría permitido gestionar las actividades que tienen lugar en los equipos y el estatus de los frentes de operaciones subterráneas, así como el desempeño de los respectivos equipos y operadores.

Al centralizar en una sala de control (ubicada en la superficie) la información proveniente de los equipos de producción y desarrollo de la mina, se ha logrado visibilizar una serie de ineficiencias y demoras que existían en las operaciones y, posteriormente, agilizarlas tanto durante los turnos como durante los cambios

⁵ Esta afirmación proviene de la entrevista a Jorge Garrido, gerente de HEXAGON Mining, que es una empresa proveedora de sistemas de despacho. La guía de entrevista se presenta en la sección de Anexos.

de turno en donde las principales actividades de cada equipo, operador y frente pueden ser programadas y alineadas con la planificación de la mina.

Las posibilidades que ofrece el sistema no se agotan allí, puesto que también el sistema ofrece el control y monitoreo por medio de la elaboración de informes. De esta manera, es posible integrar toda la información de producción y calidad en un tablero de control automatizado. Estos informes, además, pueden realizarse de manera automática alineada con los indicadores clave (KPI) de control y planificación de la mina y de manera interconectada con el sistema MES (*Manufacturing Execution System*) con gestión de la información en tiempo real. Todo ello puede generar mejoras a nivel de la producción, de la reducción de costos, y de la planificación a largo plazo en la unidad minera.

Como puede apreciarse, ***la descripción de los beneficios esperados del sistema dispatch brinda elementos de juicio para pensar en que existiría una relación positiva entre la incorporación de sistemas de despacho en minería subterránea y la productividad laboral.*** En la siguiente sección, analizaremos esta hipótesis de trabajo.

2.1.5. Estudios sobre la relación entre los sistemas de Despacho y la productividad

Dado que los sistemas de despacho subterráneo permiten enviar información importante sobre los equipos de la unidad minera en tiempo real, podría esperarse que permitan tomar decisiones correctas a los operadores, y que generen aumentos de la productividad laboral en general. No obstante, esto no es tan sencillo. Según Saayman (2006), hay muchos factores que determinan el éxito de las diversas estrategias de implementación de los sistemas de despacho, tales como la infraestructura, así como la cantidad y calidad de la información disponibles. En caso de que las metas sean demasiado ambiciosas, podría parecer que el costo de implementar un sistema de despacho no vale la pena. Sin embargo, de acuerdo con este autor, en la mayoría de las situaciones, la implementación ofrecerá grandes ventajas en términos de seguridad y productividad.

Por su parte, Willcox, P (2005) analiza en el año 2003, el caso de la mina Osborne, una operación de cobre y oro, que, “[...] fue emergiendo del "modo de supervivencia" y en medio de un entorno de bajos niveles de precios de los metales. Dada la tendencia creciente del mercado de commodities, el procesamiento de los depósitos superficiales de mineral de leyes bajas se volvió económico durante el 2004. Y posteriormente, a medida que estos se consumían, el enfoque se centró “en las minas subterráneas y las rentables oportunidades que existían para aumentar la producción” (ibíd.: 133).

La implementación de un Sistema de Despacho Subterráneo se vio como una forma de alcanzar la mejora de la productividad general, para así asegurar el logro exitoso del plan de mina y de la unidad de negocio en su conjunto, según los lineamientos de su propio proyecto llamado BPM (Business Management Project).

Los dos estudios revisados nos brindan evidencia sobre el impacto positivo de la incorporación de sistemas de despacho subterráneo en la productividad general⁶. En ese sentido son útiles para nuestra investigación. No obstante, no enfocan la observación ni el análisis en la relación entre la incorporación de dichos sistemas y la productividad laboral en específico. Todo esto reafirma la pertinencia de nuestra investigación, que precisamente propone poner el enfoque en la productividad laboral.

A lo largo de este capítulo se ha definido la productividad laboral y los sistemas de despacho en el contexto de la actividad minera. Asimismo, se ha señalado la importancia de relacionarlas, dada la evidencia que se muestra en los estudios revisados. Por ello a continuación, dado que nuestra investigación es cuantitativa, buscaremos modos de expresar matemática y estadísticamente estas relaciones, a fin de hacerlas medibles. Para ello abordaremos a continuación los principales modelos econométricos que han analizado las

⁶ En este contexto, productividad general se refiere al cociente entre el nivel de producción y las cantidades de los diversos factores productivos que se hayan utilizado en el proceso productivo, ya sea tierra, maquinaria, mano de obra, u otros recursos.

relaciones entre los niveles de producción y diversos factores productivos (especialmente el trabajo), e incluso otros aspectos relevantes, como la innovación tecnológica (donde podría considerarse la incorporación de sistemas tales como *dispatch*). Una vez hecho esto, buscaremos adaptarlos al contexto de la presente investigación, es decir, al sector minero en general, y al contexto de la producción de una unidad minera y de la productividad laboral en particular.

2.2. Modelos empleados

En el presente trabajo se ha decidido trabajar con una combinación de los modelos Cobb Douglas y KLEMS. Esto se debe a que se ha observado dicho uso en investigaciones previas, como veremos en los ítems siguientes, donde se definirá y explicará en qué consiste cada uno de estos modelos, sus aplicaciones y su pertinencia para el contexto de esta investigación.

2.2.1. Modelo de Cobb Douglas

El modelo de Cobb Douglas consiste en una función de producción que permite determinar un nivel de producto dado, relacionándolo con factores productivos tales como capital o activos y mano de obra o trabajo. Si bien fue inicialmente propuesto en 1928, ha sido utilizado continuamente por diversos investigadores preocupados por el desarrollo económico y tecnológico hasta la actualidad. Así mismo, su pertinencia para el caso del sector minero también ha sido evaluada en la literatura económica (Hsing, 1993). Finalmente, si bien se suele utilizar para cálculos de producción a escala nacional, algunos estudios recientes han postulado que también puede ser utilizado a escala microeconómica con

ventanas importantes⁷ (Tsolas, 2019). Por ello, se ha decidido trabajar con dicho modelo en la presente investigación, que consiste en analizar la productividad de una unidad minera. Su forma general es la siguiente:

Ecuación 1: Modelo Cobb-Douglas

$$y=AK^{\alpha}L^{\beta}$$

donde:

y = Producción,

α ; β = Parámetros,

A = Progreso tecnológico (exógeno),

K = Stock de capital (conjunto de bienes o activos que se utilizan para producir)

L = Cantidad de empleados (mano de obra)

La forma aplicada de dicha función es la siguiente:

Ecuación 2: Forma aplicada del modelo Cobb-Douglas

$$f(x, y) = Ax^b y^{b-1}$$

Donde:

f(x, y) = Producción (resultado),

b; b-1 = Parámetros,

A = Progreso tecnológico,

y = Unidad de capital,

x = Mano de obra.

⁷ En el estudio citado, si bien se propone el uso de la Análisis de Frontera Estocástica (Stochastic Frontier Analysis, SFA), a diferencia del modelo empleado en la presente investigación, se defiende el uso de la función Cobb-Douglas a nivel de unidad minera.

En relación con la forma aplicada: se toma la primera derivada respecto a X y respecto a Y (derivada parcial)

Al tener:

$$f(x, y) = Ax^b y^{b-1}$$

El resultado indica que la derivada parcial (f [x, y]):

$$\frac{df}{dx} = \text{Productividad marginal de mano de obra}$$

$$\frac{df}{dy} = \text{Productividad marginal de capital}$$

Por lo tanto, la derivada parcial de la función de producción Cobb-Douglas brinda una medida de la productividad laboral. A continuación, se analizará el modelo KLEM, el cual nos permite integrar en nuestro análisis otros insumos productivos intermedios como la energía y los servicios, que también son de gran importancia para el caso del sector minero.

2.2.2. Modelo de KLEMS:

En la actualidad, el modelo KLEMS es uno de los principales esquemas utilizados para medir la productividad laboral desde una perspectiva multifactor, dado que considera el impacto de diversos factores productivos tales como el trabajo, el capital, la energía y los servicios (OECD, 2001).

Una de las ventajas que presenta el modelo KLEMS es que permite tener una mirada desagregada de diversos sectores productivos (ibíd.), y es por dicha razón que se ha decidido considerarlo como el modelo para evaluar la hipótesis de la presente investigación.

Asimismo, este modelo está basado teóricamente en los trabajos pioneros de Dale Jorgenson (Jorgenson & Griliches, 1967; Hudson & Jorgenson, 1974), que se han venido aplicando al estudio del crecimiento económico y de la productividad para el caso de la economía norteamericana (Mas & Navarro, 2012). El modelo KLEMS está basado en una función de producción de la forma siguiente:

Ecuación 3: Modelo KLEMS

$$f(x) = (K, L, E, M, S).$$

En este modelo, la variación en el producto se puede expresar como:

Ecuación 4: Variación en el producto en el modelo KLEMS

$$\Delta Y = \alpha \Delta K + \beta \Delta L + \gamma \Delta E + \varepsilon \Delta M + \theta \Delta S + \Delta A,$$

donde:

K: Capital,

L: Trabajo,

E: Energía,

M: Materiales,

S: Servicios

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \theta$: coeficientes de los factores dentro del valor de producción;

A: Indicador de la PTF (Productividad Total de los Factores).⁸

Δ : denota incremento

Es posible despejar la PTF como residual; para ello, se necesita reordenar la Ecuación 4 del siguiente modo:

$$\Delta A = \Delta Y - \alpha \Delta K - \beta \Delta L - \gamma \Delta E - \varepsilon \Delta M - \theta \Delta S.$$

Según las fuentes consultadas, la PTF incorpora “el cambio tecnológico, innovaciones técnicas, cambios en la manera de administración y organización de las empresas, así como cambios en su composición social” (INEGI, 2018:

⁸ En este modelo, la PTF representa, “[...] tanto para el valor añadido como para el output bruto, el crecimiento no explicado por los inputs primarios e intermedios” (Mas & Navarro, 2012: 11)

486). Por tal motivo, en el marco de nuestra investigación, esta variable será la adecuada para considerar a la incorporación del sistema de despacho subterráneo, como veremos en las siguientes secciones.

2.2.3. Función de producción Cobb Douglas - KLEMS

En el marco de esta investigación aplicaremos una combinación de los modelos Cobb-Douglas y KLEMS, para medir la productividad laboral de una unidad minera. Esto se debe a que la estructura del modelo KLEMS permite también tomar en cuenta la participación de insumos energéticos. Si bien en la ecuación original del modelo KLEMS se considera las materias primas o materiales (M), en nuestro modelo se asume que la materia prima son las reservas minerales y del depósito y que estas se encuentran constantes por lo que no tienen un efecto en el análisis de productividad en el periodo de estudio. De esta manera, no se considerarán en el modelo.

La función de producción que se utiliza en este estudio es una versión simplificada del modelo KLEMS que hemos presentado anteriormente. Se tiene el nivel de producción, que va a depender del tiempo y de otros factores de producción, como el Capital, el trabajo y la Energía. Asimismo, se considera una sola unidad de producción, que es la Mina Vazante. La función, entonces, tendrá la siguiente forma:

Ecuación 5: Modelo Cobb Douglas - KLEMS

$$Q_t = A f(K_t, L_t, E_t),$$

donde:

K: Capital (metros lineales⁹)

⁹ Los avances son los metros lineales que dependen del despliegue de capital al momento de hacer las labores. Está asociado al CAPEX, por lo cual en esta investigación se utiliza esta variable como *proxy* del capital.

L: Mano de obra (horas-hombre trabajadas)

E: Consumo de energía (Diesel)

Q: Producción (toneladas de roca)

A: Progreso tecnológico (se trata de un coeficiente, por lo que su valor no tiene magnitud en este caso)

Todas estas variables dependen del tiempo (t), y deben ser observadas en dicha dimensión.

Se optó por emplear el consumo de diésel, porque es la fuente principal de energía que utilizan los equipos en las operaciones de mina. La unidad de medida estándar en Brasil es en litros.

A continuación, se plantea la **forma funcional**, que es la especificación Cobb Douglas – KLEMS

Ecuación 6: Forma funcional del modelo Cobb Douglas - KLEMS

$$Q_t = A K_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma e^{\varepsilon_t},$$

donde:

A: Progreso tecnológico

e: error econométrico (exponencial que va a depender de t)

A continuación, por medio de algunas modificaciones a la ecuación, se buscará expresarla en términos de productividad laboral. Esta equivale al nivel de producción (Q) dividido entre la cantidad de mano de obra (L), de modo que se tendría:

$$\frac{L_t^\beta}{L_t} = L_t^{\beta-1},$$

y la forma resultante de la ecuación sería la siguiente:

Ecuación 7: Productividad Laboral según el modelo Cobb Douglas - KLEMS

$$\text{Productividad Laboral} = \frac{Q_t}{L_t} = A K_t^\alpha L_t^{\beta-1} E_t^\gamma e^{\varepsilon_t},$$

Además, se debe incorporar una variable *dummy* (D), la cual será una variable dicotómica, que toma el valor de cero (0) cuando se representa la situación sin implementación del sistema de dispatch subterráneo y toma el valor de uno (1), cuando se representa la situación con la implementación del sistema *dispatch*.

$$D_t = \begin{cases} 0 & \text{no se implementa el sistema,} \\ 1 & \text{si se implementa el sistema.} \end{cases}$$

Se asume que, el cambio tecnológico incorpora el impacto de la introducción de una innovación tecnológica, como es la implementación del sistema *dispatch*, de la siguiente manera¹⁰:

Ecuación 8: Incorporación de la Innovación tecnológica en el modelo

$$A = A_0 e^{\theta_1 D_t},$$

donde:

$\theta_1 D_t$: representa la situación en que sí hay cambio tecnológico,

$D_t = 1$, con Dispatch subterráneo

$D_t = 0$, sin Dispatch.

De este modo, se tendría la forma funcional siguiente:

Ecuación 9: Forma funcional de la productividad laboral incorporando la Innovación tecnológica

$$\text{Productividad Laboral} = \frac{Q_t}{L_t} = A_0 e^{\theta_1 D_t} * K_t^\alpha * L_t^{\beta-1} * E_t^\gamma e^{\varepsilon_t}.$$

¹⁰ Tomando como referencia lo realizado en otras investigaciones, en nuestro modelo se considerará como “Productividad Total de los factores” al progreso tecnológico no incorporado en los factores productivos (Torres & Rodríguez, 2012: 6). Asimismo, se considerará a la incorporación del sistema *dispatch* como la principal medida relacionada con dicho progreso tecnológico.

Posteriormente, se realizó la log-linealización para lo cual se homogenizó el modelo aplicando logaritmos neperianos a las variables a fin de que la estimación se pueda realizar mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Esto también permitió corregir las disparidades en las magnitudes de las variables, dado que se trata de distintas unidades.

La ecuación lineal en logaritmo neperiano que habría que estimar sería:

$$\ln \frac{Q_t}{L_t} = \ln A_0 + \theta_1 D_t t + \alpha \ln K_t + (\beta - 1) \ln L_t + \gamma \ln E_t + \varepsilon_t,$$

donde:

Los parámetros α ; β ; γ son elasticidades. En el modelo logarítmico presentado, estos parámetros miden qué tanto por ciento cambia la productividad laboral cuando cambia alguna de las variables: capital, mano de obra, consumo de energía y el cambio tecnológico asociado a la introducción del sistema *dispatch* en la mina Vazante.

Finalmente, dado que, en la ecuación obtenida, los valores de la productividad laboral son menores que uno, podría haber problemas en el cálculo de su logaritmo y en su utilización directa como variable dependiente en el modelo. Por ello, se realizará una transformación monótona que permitirá evitar dicha situación sin alterar significativamente la expresión del modelo. La transformación se dará multiplicando ambos miembros de la ecuación por un “factor de escala”:

$$\frac{Q_t}{L_t} = A_0 e^{\theta_1 D_t} * K_t^\alpha * L_t^{\beta-1} * E_t^\gamma e^{\varepsilon_t}.$$

Multiplicando por cien a ambos lados de la ecuación:

$$(100) * \frac{Q_t}{L_t} = (100) * A_0 e^{\theta_1 D_t} * K_t^\alpha * L_t^{\beta-1} * E_t^\gamma e^{\varepsilon_t}.$$

Luego, aplicando logaritmos naturales a ambos miembros de la ecuación:

**Ecuación 10: Linealización de la forma funcional de la Productividad
laboral mediante la aplicación de logaritmos naturales**

$$\ln(100 * \frac{Q_t}{L_t}) = \ln 100 + \ln A_0 + \theta_1 D_t + \alpha \ln K_t + (\beta - 1) \ln L_t + \gamma \ln E_t + \varepsilon_t.$$

Esto nos permitirá tener una medida de la productividad que podríamos denominar “Ratio de productividad laboral”, es decir, el número de toneladas de producción que se generan por cada 100 horas-hombre adicionales. Mientras que, la alteración generada en la ecuación al multiplicar por 100 uno de sus miembros, puede ser compensada luego al restar el valor de $\ln 100$ al intercepto una vez obtenidos los parámetros de la regresión. Como se ha mencionado, dicha transformación sólo se ha realizado con el objetivo de facilitar el análisis descriptivo y la regresión multivariante. Esto se verá con mayor detalle en el Capítulo 4.

En nuestro modelo se considerará como equivalentes a las variables “Productividad Total de los factores” (del modelo KLEMS) y “Progreso tecnológico” (del modelo Cobb-Douglas). En ambos casos, como ya se dijo anteriormente, se trata de una variable que puede explicar el crecimiento de la producción y no está directamente relacionada con cambios en los factores productivos básicos ni en los insumos básicos ni intermedios. Asimismo, se considerará como variable “Progreso Tecnológico” de la ecuación Cobb Douglas – KLEMS, a la incorporación del sistema dispatch.

Finalmente, puede considerarse también la posibilidad de que existan interacciones entre la variable dummy y las variables independientes, por ello, la ecuación, considerando las interacciones, adoptaría la siguiente forma matemática:

Ecuación 11: Modelo de productividad laboral incorporando interacciones

$$\ln 100 * \frac{Q_t}{L_t} = \ln A_0 + \ln 100 + \theta_1 D_t + \alpha \ln K_t + (\beta - 1) \ln L_t + \gamma \ln E_t + \delta D_t \ln K_t + D_t (\mu - 1) \ln L_t + \rho D_t \ln E_t + \varepsilon_t,$$

donde:

A_0 = Intercepto,

$\theta_1; \alpha; \beta; \gamma; \delta; \mu; \rho$ son coeficientes de elasticidad de las variables,

K : Capital; metros lineales¹¹,

L : Mano de obra; horas hombre trabajadas,

E : Consumo de energía (diésel),

Q : Producción; toneladas de roca,

D_i : variable dicotómica donde 0 indica la no implementación del sistema de despacho y 1 significa que se ha implementado el sistema de despacho.

Se incluye también todas las interacciones con el consumo de Diesel, Horas-hombre y el capital (metros de avance).

Se observa en el gráfico 3, en el periodo octubre 2019 a diciembre del 2020 que corresponde a los últimos 5 trimestres del caso de estudio, muestra un incremento de la productividad laboral.

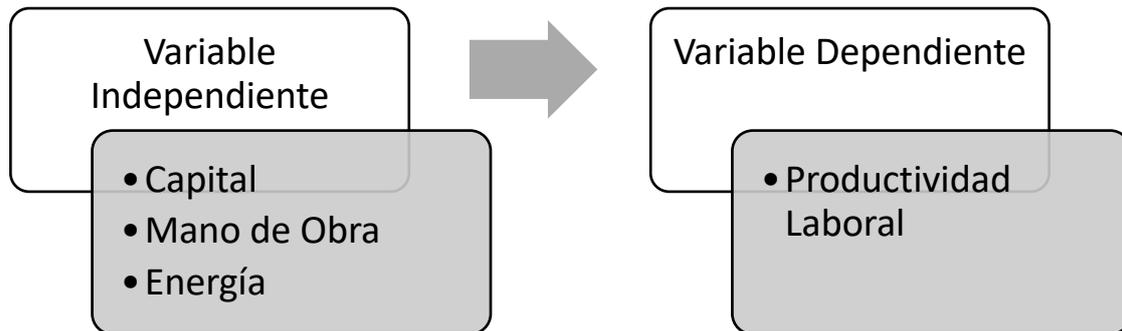
2.2. Modelo conceptual elegido

Como se ha reiterado a lo largo del documento, en la presente investigación, se analizará la relación entre la implementación del “Sistema de Despacho Subterráneo” (sistema *dispatch*) y los niveles de productividad laboral en las operaciones en Mina.

El modelo conceptual que se presentará a continuación ha sido elegido con base en algunos modelos tales como el de Cobb-Douglas y KLEMS, vistos en los ítems anteriores. La combinación y la manipulación de las ecuaciones respectivas que se hizo en el ítem anterior, nos permitieron llegar a una ecuación que expresa nuestro modelo conceptual. Este puede graficarse del siguiente modo:

¹¹ Los avances son los metros lineales que dependen del despliegue de capital al momento de hacer las labores. Están asociados a los gastos de capital de la mina (CAPEX).

Gráfico 1: Modelo conceptual elegido



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se contemplará la incorporación de una variable ficticia (*dummy*), la cual se definirá de la siguiente manera:

- La implementación del sistema *Dispatch*:
0 = sin *Dispatch*,
1 = con *Dispatch*.

2.3. Hipótesis de la investigación

La hipótesis formulada a continuación se ha venido desarrollando previamente desde la motivación de la tesis, así como a lo largo de la revisión de la literatura y la elaboración del marco y el modelo conceptual. Tomando en cuenta las diferentes posibilidades relativas al impacto de la variable *dummy* sobre los diversos parámetros del modelo, se ha decidido considerar dos hipótesis nulas y alternativas, una que contemple el impacto de la *dummy* sobre el intercepto del modelo, y otra que considere el impacto sobre las pendientes de las variables. La formulación matemática de dichas hipótesis nulas y alternativas con base en el modelo sería de la siguiente forma:

Ecuación 12: Primera Hipótesis nula y alternativa

$$H_0 : \theta_1 = 0 ; H_a : \theta_1 > 0 ,$$

θ_1 : Coeficiente que mide el efecto de la variable *dummy* sobre el intercepto.

Esta especificación establece que en la hipótesis alternativa el sistema *dispatch* en la mina Vazante provocó un cambio en el nivel de productividad laboral (el intercepto del modelo de regresión).

Ecuación 13: Segunda Hipótesis nula y alternativa

$$H1_0 : \mu = \rho = \delta = 0 ; H1_a : \mu, \rho, \delta > 0$$

Esta especificación establece que en la hipótesis alternativa la incorporación del sistema dispatch en la mina Vazante provocó un cambio positivo en al menos una las pendientes o elasticidades del modelo.

2.4. Definición de las variables

Variable dependiente: Productividad laboral en las operaciones en Mina (Toneladas / horas-hombre). Cifras mensuales.

Variable independiente:

- Capital (Aproximada por el Avance, medido en metros)
- Mano de Obra (medido en horas-hombre)
- Energía (Consumo de diésel, medido en litros). Cifras mensuales.

Variable Dummy: Para el presente estudio se considerará la implementación del sistema de despacho subterráneo como una variable Dummy, donde el valor “0” representará la situación sin implementación del sistema y el valor “1” representará la situación con la implementación del sistema.

Una vez desarrollado el marco conceptual, que nos ha permitido definir los principales conceptos con los que trabajaremos, pasaremos a abordar el diseño de nuestra investigación. Aquí desarrollaremos los pasos necesarios para operacionalizar los conceptos y variables relevantes para nuestra investigación de modo que puedan ser traducidos a magnitudes que nos permitan medir su intensidad, en términos cuantificables. De igual manera se buscará trabajar con un modelo o ecuación que permita relacionar dichas variables cuantitativas a fin de poder analizar y estimar la magnitud de sus relaciones.

Capítulo 3: Diseño de la investigación

3.2. Método empleado y sus limitaciones

Como ya se ha señalado anteriormente, en el presente trabajo de investigación se empleará métodos cuantitativos para la prueba de hipótesis.

El diseño de la investigación que se propone realizar es de tipo correlacional, para lo cual se emplearán modelos de producción con datos correspondientes a un horizonte de tiempo longitudinal (series de tiempo). Posteriormente se llevará a cabo una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios a fin de encontrar las posibles relaciones entre las variables independientes y dependientes.

Así mismo, debe señalarse que el método que se empleará en la presente investigación es el denominado “estudio de caso”, lo cual implica que sus resultados no tendrán un alcance demasiado grande ni concluyente a nivel de la minería subterránea. Para ello, sería necesario llevar a cabo investigaciones en un mayor número de unidades mineras y durante periodos de tiempo más extensos. Sin embargo, a partir de este estudio de caso obtendremos lecciones y recomendaciones de gestión estratégica minera que pueden ser útiles para adoptar prácticas de gestión asociadas al método *dispatch* en otras unidades mineras subterráneas de características similares a la mina Vazante.

3.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis para este estudio es la unidad minera Vazante de Nexa Resources, para la cual se tomarán datos mensuales en el periodo que va desde enero del 2016 hasta diciembre del 2020, y se realizará un análisis antes y después de la implementación del sistema de despacho. Como se ha mencionado anteriormente, este caso se ha elegido por su pertinencia para nuestro tema de estudio, dado que se trata de una unidad minera que ha comenzado su proceso de automatización, mediante la implementación del sistema de despacho subterráneo, hace aproximadamente dos años. Por otro lado, se tenía una mayor posibilidad de acceso a información cuantitativa relevante para nuestro estudio.

3.4. Diseño del procesamiento y análisis de datos

La estructura de la base de datos es la siguiente, ver cuadro 2

Cuadro 2: Base de datos de variables dependiente e independientes en Excel

ITEM	FECHA MENSUAL	PRODUCTIVIDAD LABORAL (T/HH)	CONSUMO DE DIESEL (L)	HORAS HOMBRE (HH)	CAPITAL (Avances, m)
1	ene.-16	85.73	222,022	128,032	998
2	feb.-16	68.59	217,913	132,711	676
3	mar.-16	82.70	204,670	137,215	953
4	abr.-16	73.98	194,843	141,620	1,259
5	may.-16	73.51	221,577	146,163	1,230
6	jun.-16	75.92	224,659	144,332	1,073
7	jul.-16	79.37	226,414	141,801	1,126
8	ago.-16	76.87	272,731	147,009	1,118
9	sep.-16	77.99	236,399	144,173	1,178
10	oct.-16	77.46	244,643	146,725	1,246
11	nov.-16	77.71	248,455	141,160	1,256
12	dic.-16	71.59	239,898	141,291	1,555
13	ene.-17	74.72	237,995	139,658	1,348
14	feb.-17	70.32	189,349	138,699	1,214
15	mar.-17	69.14	262,933	150,985	1,446
16	abr.-17	74.47	240,041	143,167	1,295
17	may.-17	85.07	294,386	142,279	1,309
18	jun.-17	86.99	259,868	144,322	1,306
19	jul.-17	90.58	270,867	129,308	1,343
20	ago.-17	85.56	254,921	134,181	1,300
21	sep.-17	85.06	250,140	134,181	1,291
22	oct.-17	90.17	269,515	132,578	1,198
23	nov.-17	86.58	239,180	128,835	1,139
24	dic.-17	86.64	247,966	128,835	1,121
25	ene.-18	87.20	283,119	128,835	1,284
26	feb.-18	81.23	247,091	123,128	1,149
27	mar.-18	81.50	248,204	136,380	1,295
28	abr.-18	80.42	248,543	133,295	1,225
29	may.-18	89.25	210,095	106,636	1,213
30	jun.-18	78.55	226,488	133,295	1,339
31	jul.-18	68.24	296,112	175,058	1,366
32	ago.-18	84.35	253,731	142,740	1,541
33	sep.-18	78.03	233,294	147,672	1,364
34	oct.-18	85.77	269,134	143,811	1,262
35	nov.-18	83.64	210,550	145,812	1,231
36	dic.-18	89.14	221,986	145,593	1,255
37	ene.-19	81.81	296,412	149,221	1,320
38	feb.-19	75.74	242,759	147,748	1,165
39	mar.-19	78.90	276,319	156,705	1,354
40	abr.-19	77.92	288,654	156,705	1,418
41	may.-19	83.24	273,896	144,889	1,367
42	jun.-19	86.99	256,695	144,889	1,489
43	jul.-19	87.20	307,808	144,889	1,430
44	ago.-19	72.57	298,793	173,638	1,259
45	sep.-19	68.16	296,450	186,788	1,402
46	oct.-19	61.35	273,651	185,027	1,461
47	nov.-19	55.51	260,750	177,787	1,508
48	dic.-19	71.52	308,753	172,502	1,539
49	ene.-20	82.59	308,160	154,066	1,551
50	feb.-20	76.09	286,022	154,933	1,357
51	mar.-20	73.07	334,155	167,285	1,504
52	abr.-20	84.88	302,461	149,639	1,452
53	may.-20	87.42	286,702	150,644	1,507
54	jun.-20	82.36	315,597	155,711	1,305
55	jul.-20	75.96	276,240	159,176	1,369
56	ago.-20	85.64	318,677	157,412	1,440
57	sep.-20	92.63	283,577	140,429	1,359
58	oct.-20	89.30	314,008	149,077	1,500
59	nov.-20	91.65	280,632	143,801	1,452
60	dic.-20	92.69	293,998	142,893	1,372

Fuente: Nexa Resources S.A., 2020. Elaboración propia.

Capítulo 4: Análisis de Resultados

Los datos son tomados de la operación de la mina Vazante en una serie de tiempo longitudinal de 5 años con periodicidad mensual, desde enero de 2016 hasta diciembre de 2020, haciendo un total de 60 observaciones.

Para el cálculo se ha hecho uso del paquete de herramientas de análisis de datos de estadística descriptiva de Microsoft Excel, así como herramientas del software Minitab. Esto nos permitirá ver si nuestras variables reúnen las condiciones necesarias para aplicarles el método de regresión de mínimos cuadrados ordinarios, lo cual verificaremos en el análisis descriptivo. Posteriormente, en el ítem siguiente se realizará algunas transformaciones o ajustes necesarios a los datos a fin de que satisfagan mejor los requisitos de una regresión lineal multivariante, y luego se pasará a realizar un análisis de las correlaciones entre dichas variables. Se realizará la inclusión de la variable *dummy*, que aproxima el efecto de la implementación del *dispatch* en la presente investigación, y, finalmente, se pasará a la realización de la regresión lineal multivariante y la interpretación de los resultados de dicha regresión.

4.1. Análisis descriptivo

Se realizará un análisis descriptivo de la data recogida de campo de cada variable independiente. Principalmente se considerará las medidas de tendencia central (media y mediana), así como de dispersión (desviación estándar y rango), y finalmente, el coeficiente de asimetría y curtosis. Estos últimos coeficientes, específicamente, nos permitirán verificar que la distribución de las variables no se aleje demasiado del comportamiento de una distribución normal, pues en ese caso, se podría inflar los errores estándar y reducir las probabilidades de que algunas relaciones en la regresión sean significativas (Hair et al, 2022: 61). Los resultados obtenidos se han resumido en los siguientes cuadros y tablas:

4.1.1. Ratio de productividad laboral: Esta variable tiene una media de 80.15 y una mediana de 81,37. Esto quiere decir, que por cada 100 horas-hombre utilizadas, se produce 80 toneladas de mineral en la unidad minera Vazante. Es necesario conocer las cifras de productividad laboral

de otras unidades mineras para poder afirmar si este nivel de productividad laboral en promedio es alto. Con respecto de la dispersión de los datos, se observa una desviación estándar de 7.81 con respecto a su media y un rango de 37.19, lo cual indica un comportamiento centralizado de los datos respecto a su media.

El coeficiente de curtosis es de 0.53, y el coeficiente de asimetría -0.7. Esto indica que los datos se encuentran concentrados alrededor de su media, con una ligera asimetría hacia la derecha. No obstante, esto no necesariamente implica que la variable no sea adecuada para el modelo, pues valores por encima de +1 o debajo de -1, para ambos casos, sí serían indicadores de un comportamiento excesivamente alejado del de una distribución normal (Hair et al, 2022: 61)

Cuadro 3: Análisis descriptivo de la variable Ratio de Productividad

	% DE PRODUCTIVIDAD LABORAL (T/HH)
Cuenta	60.00
Media	80.15
Mediana	81.37
Moda	#N/A
Error típico	1.01
Desviación estándar	7.81
Varianza de la muestra	60.98
Rango	37.19
Mínimo	55.51
Máximo	92.69
Suma	4,809.25
Curtosis	0.53
Coeficiente de asimetría	- 0.70

Elaboración Propia

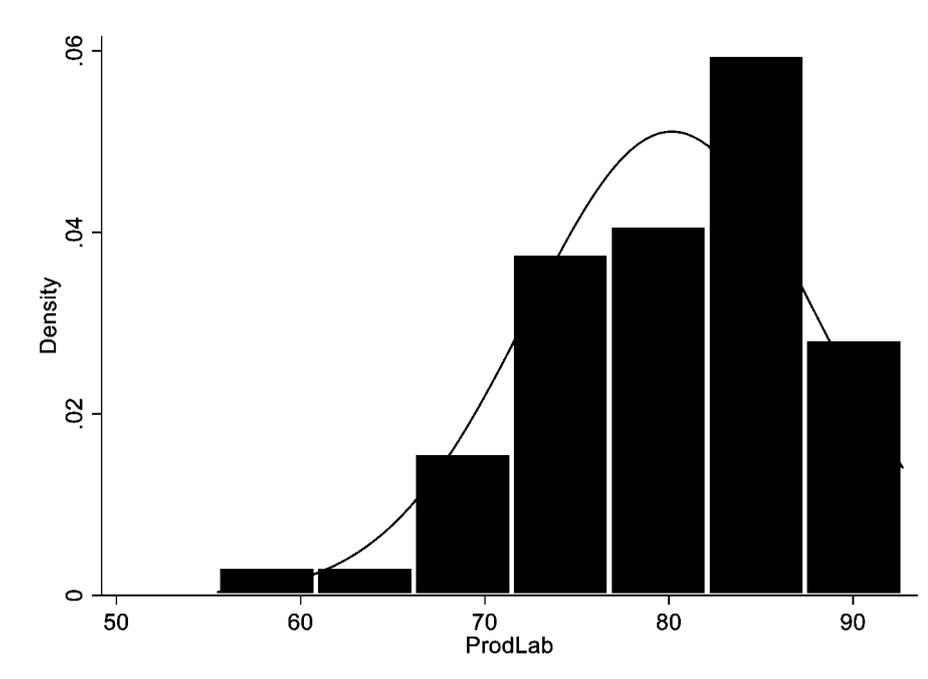
Analizando el histograma de frecuencias, podemos observar que los datos siguen un comportamiento aproximadamente gaussiano y presentan datos muy extremos. Asimismo, como se observó en los coeficientes de curtosis y asimetría, su desviación respecto del comportamiento gaussiano no es tanta

como para alterar significativamente el comportamiento de los errores, por lo que sí es factible el empleo de dichos datos en el modelo de regresión lineal (Hair, 2022: 61). Este resultado se ratificó al aplicar una prueba de Asimetría/Curtosis, cuyo resultado fue finalmente que no podía rechazarse la hipótesis de que la variable “Ratio de Productividad Laboral” se distribuye normalmente

Skewness/Kurtosis tests for Normality					
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2 (2)	joint Prob>chi2
ProdLab	60	0.0278	0.3199	5.58	0.0615

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 2: Histograma de la variable Ratio de Productividad Laboral



Elaboración propia

Graficando los datos en la serie de tiempo de enero de 2016 hasta diciembre de 2020, se puede observar que la tendencia de los datos es ligeramente creciente, como se muestra en el gráfico siguiente:



En el periodo octubre 2019 a diciembre del 2020 que corresponde a los últimos 5 trimestres del caso de estudio, muestra un incremento de la productividad laboral.

Fuente: Vazante. Elaboración propia

4.1.2. **Consumo de Diesel:** Esta variable tiene una media de 261,681.7 y una mediana de 260,309, lo cual indica que se consume en promedio 260 litros de diésel por mes. En cuanto a la desviación estándar, esta es de 33,886.1 con respecto a su media y tiene un rango más amplio de 144,806. Esto nos indica un comportamiento centralizado de los datos respecto a su media.

La curtosis (-0.7) y el coeficiente de asimetría (-0.0), indican que los datos se encuentran distribuidos ligeramente separados de su media, en mayor proporción encima de la media. Esta variable, como se ha mencionado antes, se está incluyendo como aproximación al factor productivo energía. El hecho de que la curtosis no sea menor que -1 nos

da un índice de que la distribución no es demasiado achatada, y la distribución de los datos no está demasiado lejos del comportamiento

Cuadro 4: Análisis descriptivo de la variable Consumo de Diesel

normal o gaussiano (Hair et al, 2022).

CONSUMO DE DIESEL (L)	
Cuenta	60
Media	261,682
Mediana	260,309
Moda	N/D
Error típico	4,375
Desviación estándar	33,886
Varianza de la muestra	1,148,266,858
Rango	144,806
Mínimo	189,349
Máximo	334,155
Suma	15,700,900
Curtosis	- 0.71
Coefficiente de asimetría	- 0.04

Elaboración propia

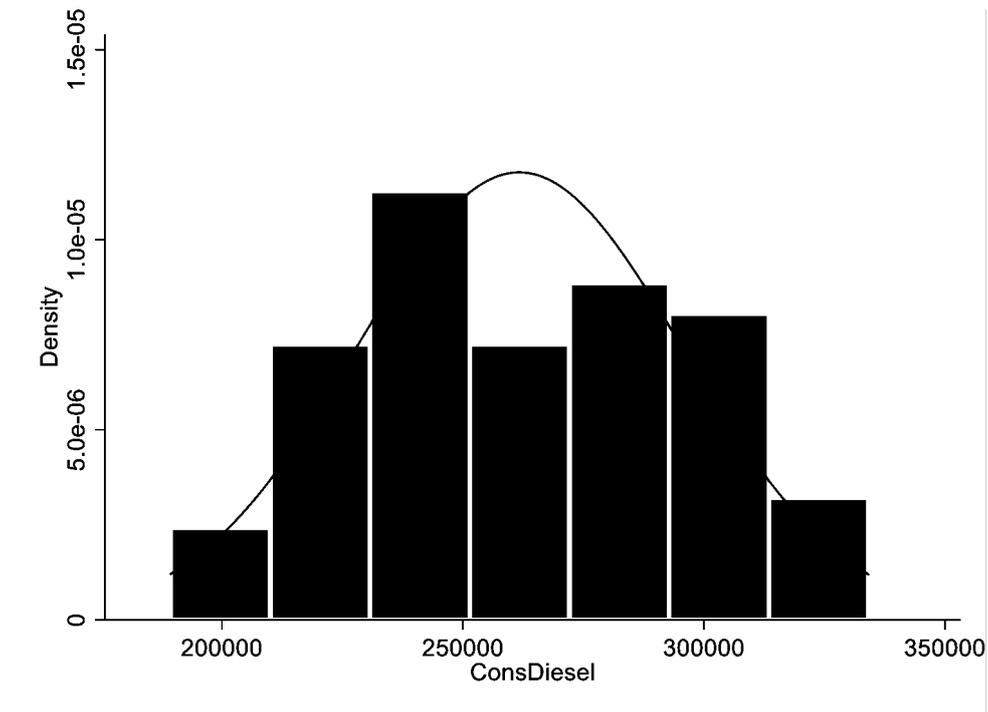
Luego de revisar el histograma de frecuencias, se realizó también un test de Asimetría/Curtosis cuyo resultado fue que no se podía rechazar la hipótesis de que la variable “Consumo de Diesel” se distribuye normalmente. Así, se puede observar que los datos siguen un comportamiento aproximadamente gaussiano y no se presenta datos extremos, lo cual es favorable a los cálculos realizados.

Cuadro 5: Test de Asimetría/Curtosis de la variable Consumo de Diesel

Skewness/Kurtosis tests for Normality					
Variable	Obs	Pr (Skewness)	Pr (Kurtosis)	adj chi2 (2)	joint Prob>chi2
ConsDiesel	60	0.8965	0.1281	2.44	0.2954

Fuente: Elaboración propia

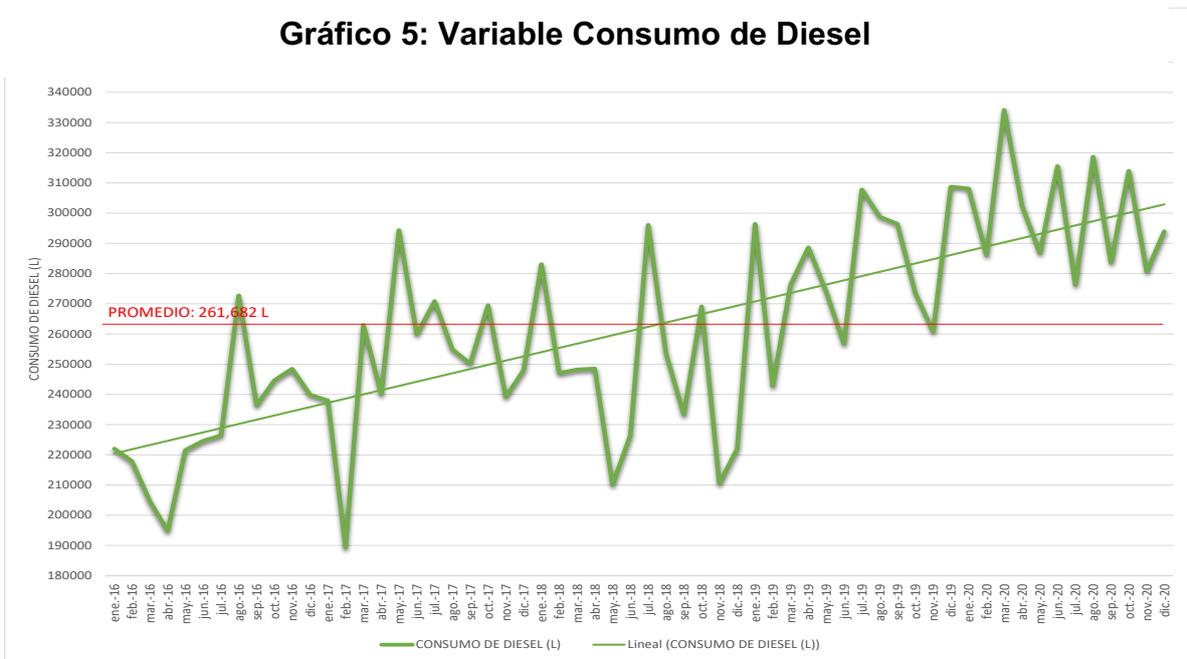
Gráfico 4: Histograma de la variable Consumo de Diesel



Elaboración propia

Graficando los datos de la serie de tiempo de enero de 2016 hasta diciembre de 2020, se puede apreciar que la tendencia de los datos es creciente, como se muestra en el gráfico siguiente:

Gráfico 5: Variable Consumo de Diesel



Elaboración propia

4.1.3. **Horas-Hombre:** Esta variable tiene una media de 146,122.8, una mediana de 144,327.0 y una moda de 128,835. Esto nos indica un comportamiento centralizado de los datos respecto a su media.

En cuanto a la desviación estándar, ésta es de $\pm 14,716.2$ con respecto a su media y tiene un rango más amplio de 80,152.

La curtosis (1.4) y el coeficiente de asimetría (0.7), indican que los datos se encuentran muy concentrados alrededor de su media, pero en mayor proporción debajo de su media. Así mismo, hay una ligera asimetría hacia la izquierda en la distribución. Mientras que el valor del coeficiente de asimetría es menor que +1, el coeficiente de curtosis tiene un valor mayor que +1, lo cual indica que se trata de una distribución demasiado apuntada. Esto debería corregirse posteriormente por medio de una transformación ya que puede afectar el comportamiento de los errores, más aún tomando en cuenta que, en el modelo, esta variable aproxima la “mano de obra”, que es la variable dependiente central de la investigación.

Cuadro 6: Análisis descriptivo de la variable Horas-Hombre

	HORAS HOMBRE (HH)
Cuenta	60
Media	146,123
Mediana	144,327
Moda	128,835
Error típico	1,900
Desviación estándar	14,716
Varianza de la muestra	216,565,156
Rango	80,152
Mínimo	106,636
Máximo	186,788
Suma	8,767,369
Curtosis	1.41
Coeficiente de asimetría	0.68

Elaboración propia

Revisando el histograma de frecuencias, se puede apreciar que los datos no siguen un comportamiento gaussiano y presentan algunos datos extremos. Asimismo, la realización del test de Asimetría/Curtosis, confirma que esta variable no sigue un comportamiento normal y, dada su elevada curtosis, podría afectar la significatividad de algunas variables en la regresión. Por ello, como ya se dijo, será necesario hacer alguna transformación que corrija esta situación.

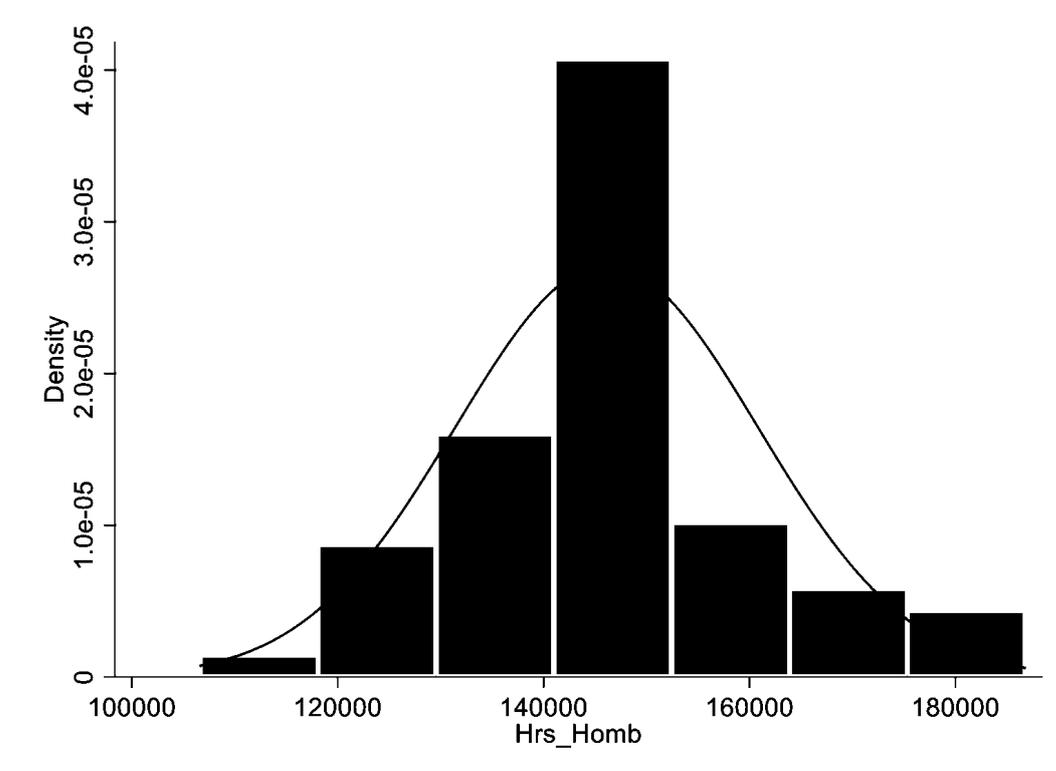
Cuadro 7: Test de Asimetría/Curtosis para la variable “Horas-Hombre”

```
. sktest Hrs_Homb
```

Skewness/Kurtosis tests for Normality					
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
Hrs_Homb	60	0.0312	0.0591	7.34	0.0254

Elaboración propia

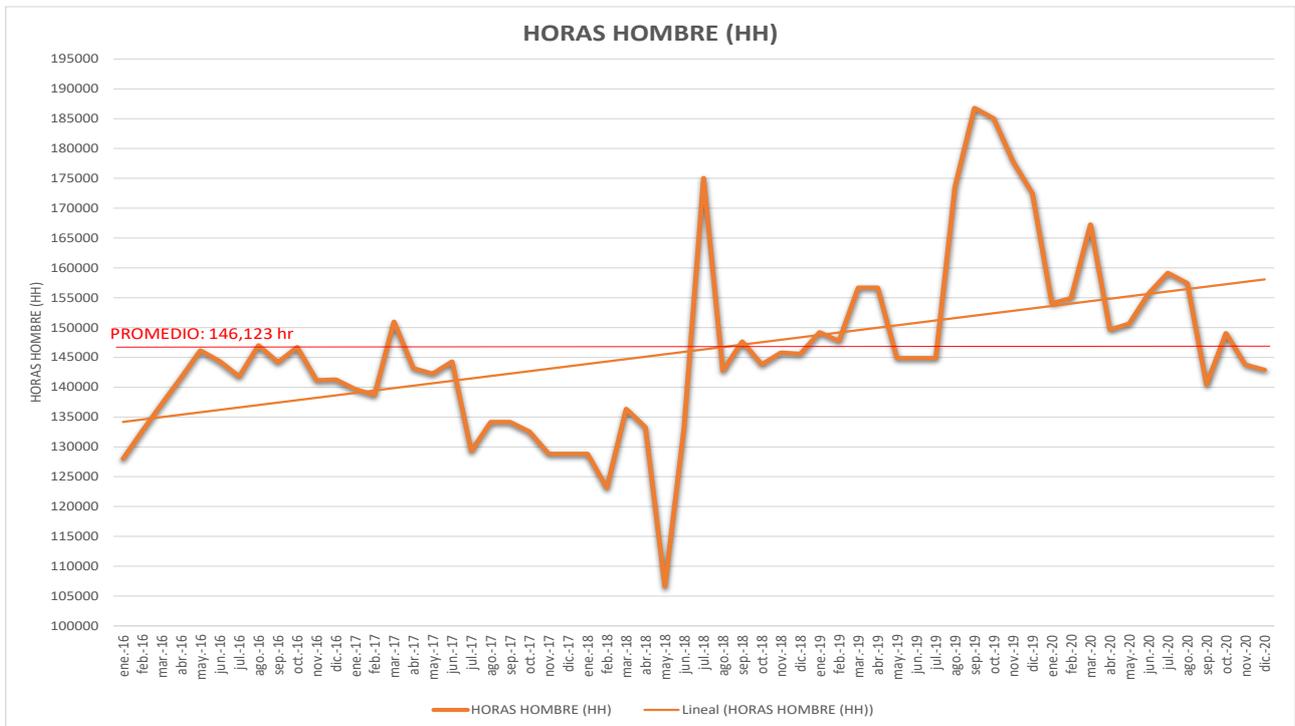
Gráfico 6: Histograma de la variable Horas-Hombre



Elaboración propia

Graficando los datos en la serie de tiempo de enero de 2016 hasta diciembre de 2020, se puede observar que la tendencia de los datos es ligeramente creciente, como se muestra en el gráfico siguiente:

Gráfico 7: Variable Horas-Hombre



Elaboración propia

4.1.4. Capital (Avances): Esta variable tiene una media de 1,306.3, una mediana de 1,307.3 y no tiene moda porque no se repiten los datos. Esto nos indica un comportamiento centralizado de los datos respecto a su media.

En cuanto a la desviación estándar es de ± 160.5 con respecto a su media y tiene un rango más amplio de 879.9.

La curtosis 2.9 y el coeficiente de asimetría -1.1, indican que los datos se encuentran altamente concentrados en su media, pero en mayor proporción encima de su media. El hecho de que estos coeficientes tengan valores mayores que +1 en el primer caso, y menor que -1 en el segundo, nos dan a entender que su distribución tiene una curva demasiado apuntada, y, así mismo, tiene una asimetría demasiado grande hacia la derecha. Esta variable está asociada al indicador de

“Capital” en la ecuación Cobb-Douglas puesto que se asocian al despliegue de capital en el transcurso de la operación de la mina. Será necesario realizar algunas transformaciones en esta variable para evitar que altere los resultados de la regresión.

Cuadro 8: Análisis descriptivo de la variable Capital (Avances)

	CAPITAL (Avances)
Cuenta	60
Media	1,306
Mediana	1,307
Moda	N/D
Error típico	21
Desviación estándar	161
Varianza de la muestra	25,763
Rango	880
Mínimo	676
Máximo	1,555
Suma	78,376
Curtosis	2.93
Coefficiente de asimetría	- 1.11

Elaboración propia

Revisando el histograma de frecuencias se puede apreciar que los datos no parecen tener un comportamiento gaussiano, puesto que la distribución está muy sesgada hacia la derecha, lo cual se confirma al observar el coeficiente de asimetría. Así mismo, el resultado del test de Asimetría/Curtosis aplicado a la variable indica que se debe rechazar la hipótesis de que la variable se distribuye normalmente. Esto no necesariamente es bueno para el análisis, por lo que se hará los ajustes necesarios en el ítem 4.2.

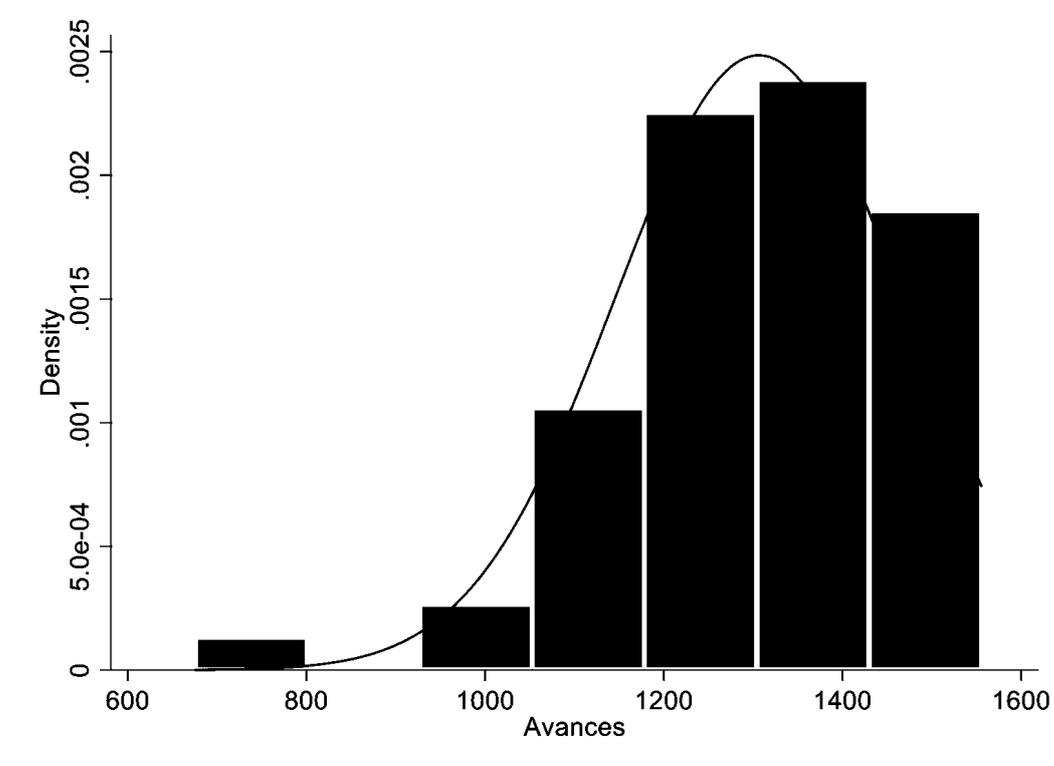
Cuadro 9: Test de Asimetría/Curtosis para la variable “Avances”

. sktest Avances

Skewness/Kurtosis tests for Normality						
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint	Prob>chi2
Avances	60	0.0012	0.0045	14.57		0.0007

Elaboración propia

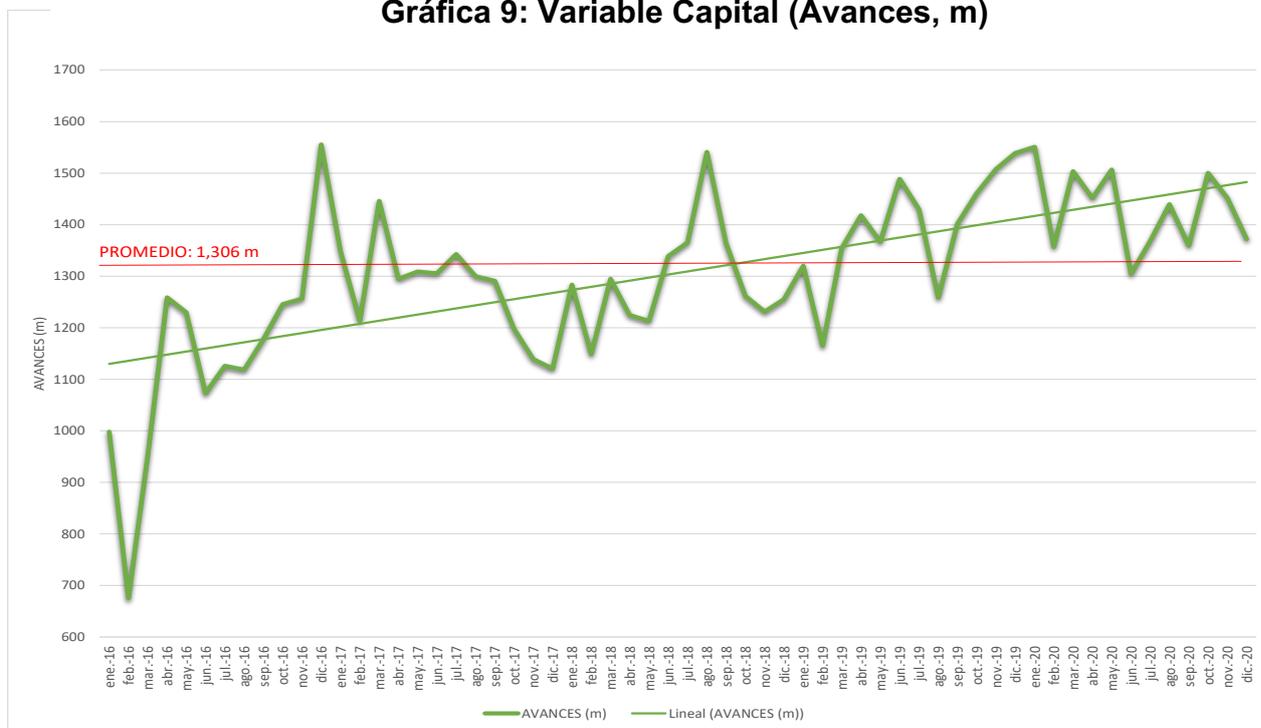
Gráfico 8: Histograma de la variable Capital (Avances)



Elaboración propia

Graficando los datos en la serie de tiempo de enero de 2016 hasta diciembre de 2020, se puede observar que la tendencia de los datos es ligeramente creciente, como se muestra en el gráfico siguiente. Esto no es ni bueno ni malo para la regresión, pero nos sirve para tener un índice de la utilización de los factores productivos:

Gráfica 9: Variable Capital (Avances, m)



Elaboración propia

El avance está medido en metros lineales.

En el periodo de febrero del 2016 presentó una paralización de las operaciones restringiendo los avances debido a factores geotécnicos en la zona norte de la mina. Esto conlleva a la caída significativa de los metros de avance. Pero los metros de avance no se agotan por que se tiene que realizar la preparación continua de la mina.

En base al análisis de resultados de los datos de las cuatro variables, puede decirse que algunas de ellas, como el “Consumo de Diesel” siguen un comportamiento gaussiano y no presentan datos extremos considerables. No obstante, otras como los “Avances”, “Horas-Hombre” y “Ratio de Productividad Laboral”, sobre todo las dos primeras, se distribuyen según una curva cuyo comportamiento se aleja mucho del comportamiento gaussiano, lo cual podría alterar los resultados de la regresión y alterar la distribución de los residuos.

Por ese motivo, se realizará las transformaciones y ajustes necesarios a las variables en el ítem siguiente.

4.2. Transformación de los datos

A continuación, se realizará la transformación de los datos a logaritmos para poder revisar la correlación lineal entre las variables y regresión lineal multivariable.

Cuadro 10: Transformación logarítmica de las variables del modelo

ITEM	FECHA MENSUAL	In_%PRODUCTIVIDAD	In_CONSUMO DE DIESEL (L)	In_HORAS HOMBRE (HH)	In_CAPITAL (AVANCES, m)
1	ene.-16	4.45	12.31	11.76	6.91
2	feb.-16	4.23	12.29	11.80	6.52
3	mar.-16	4.42	12.23	11.83	6.86
4	abr.-16	4.30	12.18	11.86	7.14
5	may.-16	4.30	12.31	11.89	7.11
6	jun.-16	4.33	12.32	11.88	6.98
7	jul.-16	4.37	12.33	11.86	7.03
8	ago.-16	4.34	12.52	11.90	7.02
9	sep.-16	4.36	12.37	11.88	7.07
10	oct.-16	4.35	12.41	11.90	7.13
11	nov.-16	4.35	12.42	11.86	7.14
12	dic.-16	4.27	12.39	11.86	7.35
13	ene.-17	4.31	12.38	11.85	7.21
14	feb.-17	4.25	12.15	11.84	7.10
15	mar.-17	4.24	12.48	11.92	7.28
16	abr.-17	4.31	12.39	11.87	7.17
17	may.-17	4.44	12.59	11.87	7.18
18	jun.-17	4.47	12.47	11.88	7.17
19	jul.-17	4.51	12.51	11.77	7.20
20	ago.-17	4.45	12.45	11.81	7.17
21	sep.-17	4.44	12.43	11.81	7.16
22	oct.-17	4.50	12.50	11.79	7.09
23	nov.-17	4.46	12.38	11.77	7.04
24	dic.-17	4.46	12.42	11.77	7.02
25	ene.-18	4.47	12.55	11.77	7.16
26	feb.-18	4.40	12.42	11.72	7.05
27	mar.-18	4.40	12.42	11.82	7.17
28	abr.-18	4.39	12.42	11.80	7.11
29	may.-18	4.49	12.26	11.58	7.10
30	jun.-18	4.36	12.33	11.80	7.20
31	jul.-18	4.22	12.60	12.07	7.22
32	ago.-18	4.43	12.44	11.87	7.34
33	sep.-18	4.36	12.36	11.90	7.22
34	oct.-18	4.45	12.50	11.88	7.14
35	nov.-18	4.43	12.26	11.89	7.12
36	dic.-18	4.49	12.31	11.89	7.14
37	ene.-19	4.40	12.60	11.91	7.19
38	feb.-19	4.33	12.40	11.90	7.06
39	mar.-19	4.37	12.53	11.96	7.21
40	abr.-19	4.36	12.57	11.96	7.26
41	may.-19	4.42	12.52	11.88	7.22
42	jun.-19	4.47	12.46	11.88	7.31
43	jul.-19	4.47	12.64	11.88	7.27
44	ago.-19	4.28	12.61	12.06	7.14
45	sep.-19	4.22	12.60	12.14	7.25
46	oct.-19	4.12	12.52	12.13	7.29
47	nov.-19	4.02	12.47	12.09	7.32
48	dic.-19	4.27	12.64	12.06	7.34
49	ene.-20	4.41	12.64	11.95	7.35
50	feb.-20	4.33	12.56	11.95	7.21
51	mar.-20	4.29	12.72	12.03	7.32
52	abr.-20	4.44	12.62	11.92	7.28
53	may.-20	4.47	12.57	11.92	7.32
54	jun.-20	4.41	12.66	11.96	7.17
55	jul.-20	4.33	12.53	11.98	7.22
56	ago.-20	4.45	12.67	11.97	7.27
57	sep.-20	4.53	12.56	11.85	7.21
58	oct.-20	4.49	12.66	11.91	7.31
59	nov.-20	4.52	12.54	11.88	7.28
60	dic.-20	4.53	12.59	11.87	7.22

Elaboración propia

Estas transformaciones han permitido que ahora el comportamiento de algunas de las variables se aproxime más al comportamiento gaussiano y sean más adecuadas para la realización de la regresión multivariante. Los histogramas respectivos, así como los resultados de los test de Asimetría/Curtosis para estas variables transformadas pueden consultarse en la sección de Anexos.

A continuación, se revisará las posibles correlaciones entre la variable dependiente y las variables independientes del modelo. Esto nos permitirá indagar preliminarmente si las variables a considerar en el modelo muestran indicios de correlación con la variable dependiente.

4.3. Análisis de correlación entre variables

Para revisar la correlación entre las variables se ha empleado las herramientas correspondientes de Microsoft Excel ®, y se ha utilizado la función de coeficiente de correlación (=COEF.DE.CORREL()), obteniendo los siguientes resultados:

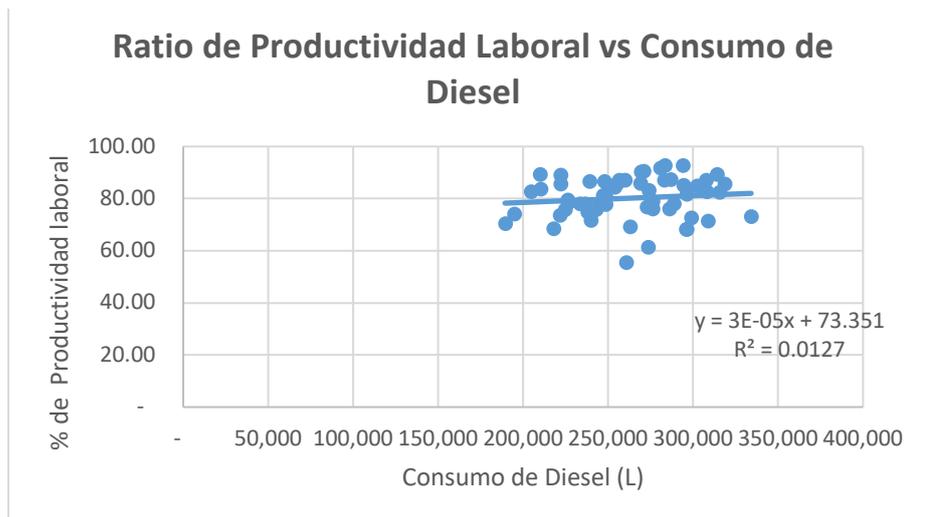
Cuadro 11: Coeficientes de correlación entre las variables del modelo

	% DE PRODUCTIVIDAD LABORAL VS DIESEL	% DE PRODUCTIVIDAD LABORAL VS HORAS-HOMBRE	% DE PRODUCTIVIDAD LABORAL VS CAPITAL (AVANCES)	% DE PRODUCTIVIDAD LABORAL VS DUMMY
Coefficiente de correlación	0.113	-0.601	-0.024	0.002
Grado de Correlación	Bajo	Alto	Bajo	Bajo

Así mismo, también se ha buscado analizar el comportamiento de las correlaciones entre las variables mediante gráficos de dispersión. Esto ha dado como resultado la constatación de que todas algunas correlaciones son directas, mientras otras son inversas y otras incluso son nulas. Esto nos permite tener una medida preliminar del nivel de relación existente entre la variable dependiente y cada una de estas variables independientes, y así evaluar qué tan adecuadas podrían ser para el modelo. La correlación más alta que se ha encontrado es negativa y corresponde a la variable Horas-Hombre, lo cual es resaltante, puesto que justo esa es la variable clave del modelo en la presente

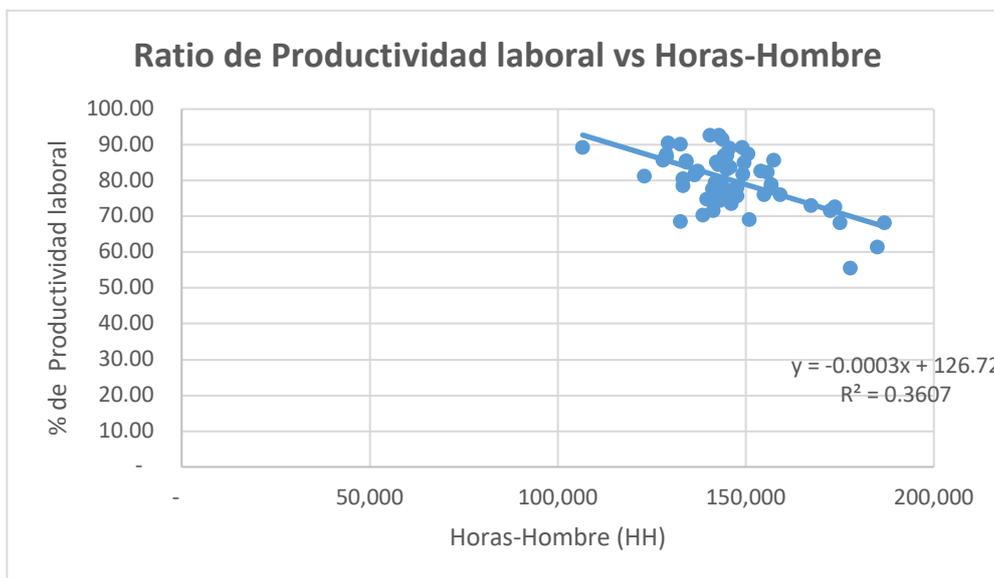
investigación. Por otro lado, si bien se ha encontrado algunas correlaciones bajas, o incluso una correlación nula (en el caso de la variable dummy), será el modelo el que nos brindará mayores luces sobre la idoneidad de las variables consideradas, según resulten o no significativas.

Gráfico 10: Ratio de Productividad laboral vs Consumo de Diesel



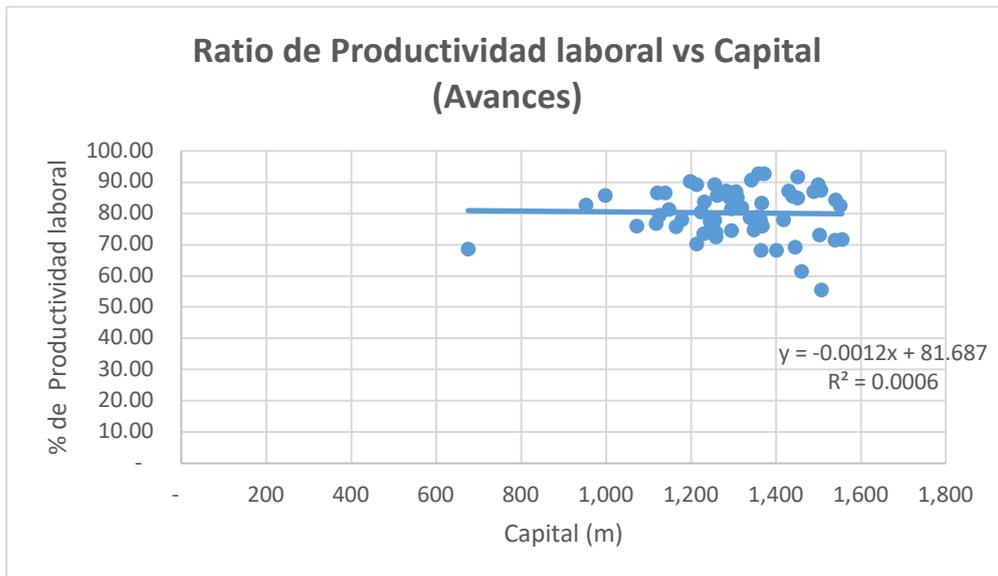
Elaboración propia

Gráfico 11: Ratio de Productividad vs Horas-Hombre



Elaboración propia

Gráfico 12: Ratio de Productividad vs Capital (Avances)



Elaboración propia

4.4. Inclusión de la Variable Dummy:

Para poder analizar la interacción e impacto de la implementación del sistema de despacho subterráneo (*dispatch*), que es una variable de tipo cualitativa, ha sido necesario incorporar una variable ficticia (*dummy*). Esta, como ya se definió en el capítulo 2, contempla el valor “0” para la situación sin implementación del sistema *dispatch*, mientras que el valor “1” representa la situación con la incorporación de dicho sistema. De este modo se ha ingresado a la serie de datos, los valores 0 y 1 para la variable dummy respectivamente según lo indicado.

Los datos para el caso de esta investigación muestran que la incorporación del sistema *dispatch* se realizó en octubre del 2019, como puede apreciarse en la siguiente tabla de datos que incorpora al Cuadro 7 la variable *dummy*, y que recoge el quiebre estructural por el nuevo *dispatch* en la mina Vazante:

Cuadro 12: Variables del modelo incluyendo la variable Dummy

ITEM	FECHA MENSUAL	In_%PRODUCTIVIDAD	In_CONSUMO DE DIESEL (L)	In_HORAS HOMBRE (HH)	In_CAPITAL (AVANCES, m)	DUMMY	LD	HHD	MD
1	ene.-16	4.45	12.31	11.76	6.91	0.00	0.00	0.00	0.00
2	feb.-16	4.23	12.29	11.80	6.52	0.00	0.00	0.00	0.00
3	mar.-16	4.42	12.23	11.83	6.86	0.00	0.00	0.00	0.00
4	abr.-16	4.30	12.18	11.86	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
5	may.-16	4.30	12.31	11.89	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00
6	jun.-16	4.33	12.32	11.88	6.98	0.00	0.00	0.00	0.00
7	jul.-16	4.37	12.33	11.86	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00
8	ago.-16	4.34	12.52	11.90	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00
9	sep.-16	4.36	12.37	11.88	7.07	0.00	0.00	0.00	0.00
10	oct.-16	4.35	12.41	11.90	7.13	0.00	0.00	0.00	0.00
11	nov.-16	4.35	12.42	11.86	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
12	dic.-16	4.27	12.39	11.86	7.35	0.00	0.00	0.00	0.00
13	ene.-17	4.31	12.38	11.85	7.21	0.00	0.00	0.00	0.00
14	feb.-17	4.25	12.15	11.84	7.10	0.00	0.00	0.00	0.00
15	mar.-17	4.24	12.48	11.92	7.28	0.00	0.00	0.00	0.00
16	abr.-17	4.31	12.39	11.87	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
17	may.-17	4.44	12.59	11.87	7.18	0.00	0.00	0.00	0.00
18	jun.-17	4.47	12.47	11.88	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
19	jul.-17	4.51	12.51	11.77	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00
20	ago.-17	4.45	12.45	11.81	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
21	sep.-17	4.44	12.43	11.81	7.16	0.00	0.00	0.00	0.00
22	oct.-17	4.50	12.50	11.79	7.09	0.00	0.00	0.00	0.00
23	nov.-17	4.46	12.38	11.77	7.04	0.00	0.00	0.00	0.00
24	dic.-17	4.46	12.42	11.77	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00
25	ene.-18	4.47	12.55	11.77	7.16	0.00	0.00	0.00	0.00
26	feb.-18	4.40	12.42	11.72	7.05	0.00	0.00	0.00	0.00
27	mar.-18	4.40	12.42	11.82	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
28	abr.-18	4.39	12.42	11.80	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00
29	may.-18	4.49	12.26	11.58	7.10	0.00	0.00	0.00	0.00
30	jun.-18	4.36	12.33	11.80	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00
31	jul.-18	4.22	12.60	12.07	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
32	ago.-18	4.43	12.44	11.87	7.34	0.00	0.00	0.00	0.00
33	sep.-18	4.36	12.36	11.90	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
34	oct.-18	4.45	12.50	11.88	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
35	nov.-18	4.43	12.26	11.89	7.12	0.00	0.00	0.00	0.00
36	dic.-18	4.49	12.31	11.89	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
37	ene.-19	4.40	12.60	11.91	7.19	0.00	0.00	0.00	0.00
38	feb.-19	4.33	12.40	11.90	7.06	0.00	0.00	0.00	0.00
39	mar.-19	4.37	12.53	11.96	7.21	0.00	0.00	0.00	0.00
40	abr.-19	4.36	12.57	11.96	7.26	0.00	0.00	0.00	0.00
41	may.-19	4.42	12.52	11.88	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
42	jun.-19	4.47	12.46	11.88	7.31	0.00	0.00	0.00	0.00
43	jul.-19	4.47	12.64	11.88	7.27	0.00	0.00	0.00	0.00
44	ago.-19	4.28	12.61	12.06	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
45	sep.-19	4.22	12.60	12.14	7.25	0.00	0.00	0.00	0.00
46	oct.-19	4.12	12.52	12.13	7.29	1.00	12.52	12.13	7.29
47	nov.-19	4.02	12.47	12.09	7.32	1.00	12.47	12.09	7.32
48	dic.-19	4.27	12.64	12.06	7.34	1.00	12.64	12.06	7.34
49	ene.-20	4.41	12.64	11.95	7.35	1.00	12.64	11.95	7.35
50	feb.-20	4.33	12.56	11.95	7.21	1.00	12.56	11.95	7.21
51	mar.-20	4.29	12.72	12.03	7.32	1.00	12.72	12.03	7.32
52	abr.-20	4.44	12.62	11.92	7.28	1.00	12.62	11.92	7.28
53	may.-20	4.47	12.57	11.92	7.32	1.00	12.57	11.92	7.32
54	jun.-20	4.41	12.66	11.96	7.17	1.00	12.66	11.96	7.17
55	jul.-20	4.33	12.53	11.98	7.22	1.00	12.53	11.98	7.22
56	ago.-20	4.45	12.67	11.97	7.27	1.00	12.67	11.97	7.27
57	sep.-20	4.53	12.56	11.85	7.21	1.00	12.56	11.85	7.21
58	oct.-20	4.49	12.66	11.91	7.31	1.00	12.66	11.91	7.31
59	nov.-20	4.52	12.54	11.88	7.28	1.00	12.54	11.88	7.28
60	dic.-20	4.53	12.59	11.87	7.22	1.00	12.59	11.87	7.22

Elaboración propia

4.5. Regresión Lineal Multivariante

Una vez analizadas las variables descritas en la sección anterior, se procede a continuación a realizar la regresión lineal multivariante detallada en el Capítulo 3 para verificar si las variables independientes explican bien la productividad laboral y analizar si la hipótesis de trabajo de esta investigación es válida.

Según se detallará a continuación, se realizó dos regresiones multivariantes. La primera versión de esta regresión incorpora el efecto del sistema dispatch en el nivel (intercepto) del modelo de productividad laboral. Mientras que la segunda, además, incorpora las interacciones entre la dummy y las demás variables independientes del modelo. En el cuadro siguiente se observa los resultados de la primera regresión:

Cuadro 13: Resultados de la primera regresión multivariable

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.78
Coeficiente de determinación R ²	0.60
R ² ajustado	0.57
Error típico	0.07
Observaciones	60.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4.00	0.37	0.09	20.88	0.00
Residuos	55.00	0.24	0.00		
Total	59.00	0.62			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	10.26	1.31	7.81	0.00	7.63	12.90	7.63	12.90
CONSUMO DE DIESEL (L)	0.39	0.09	4.26	0.00	0.21	0.58	0.21	0.58
HORAS HOMBRE (HH)	-0.96	0.11	-8.93	0.00	-1.18	-0.74	-1.18	-0.74
CAPITAL (Avances, m)	0.09	0.08	1.08	0.29	-0.07	0.25	-0.07	0.25
DUMMY	0.01	0.03	0.39	0.70	-0.04	0.06	-0.04	0.06

Elaboración propia

De los resultados de esta regresión, se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0.78, el cual se puede considerar como una correlación alta, y un coeficiente de determinación R^2 de 0.6, mientras que el R^2 Ajustado es de 0.57. Esto implica que el grado de ajuste de la regresión es moderado.

Asimismo, es posible observar que las variables de consumo de diésel (que representa el factor productivo “energía”) y horas-hombre (que es la aproximación del factor “mano de obra”) son significativas. No obstante, la variable *dummy* no es una variable explicativa de la productividad laboral. La influencia de la variable horas-hombre sobre la productividad laboral no sería negativa, pues se debe recordar que el coeficiente resultante en realidad equivale a la elasticidad de la productividad respecto de las horas-hombre – 1, es decir a $(\beta - 1)$, de modo que dicha elasticidad sería de 0.04.

De los resultados obtenidos para esta primera versión de la regresión propuesta, no es posible observar un impacto directo de la implementación del sistema de despacho sobre el nivel de productividad laboral de la mina Vazante. Por ello, se procede a analizar si la variable *dummy* genera un efecto estructural de interacción con las variables que aproximan los tres factores productivos considerados en esta investigación, ya que la implementación de dicho sistema podría bien mejorar el desarrollo de los avances en la mina (que se asocia a una mejora de la utilización del capital físico de la unidad minera), reducir la cantidad de horas-hombre utilizadas en la mina o reducir el consumo de diésel.

A fin de poder apreciar este potencial impacto, se incorporarán las interacciones entre las variables independientes y la variable *dummy*, multiplicando dichas variables entre sí, lo cual dará lugar a un segundo análisis de regresión lineal multivariante. Se muestra, entonces, la versión de la ecuación de productividad que incorpora las interacciones entre variables independientes y la *dummy* (Ecuación 12):

$$\ln 100 * \frac{Q_t}{L_t} = \ln A_0 + \ln 100 + \theta_1 D_t + \alpha \ln K_t + (\beta - 1) \ln L_t + \gamma \ln E_t + \delta D_t \ln K_t + D_t (\mu - 1) \ln L_t + \rho D_t \ln E_t + \varepsilon_t$$

Donde:

A_0 = Intercepto

$\theta_1; \alpha; \beta; \gamma; \delta; \mu; \rho$ son coeficientes de elasticidad de las variables,

K: Capital; metros lineales¹²,

L: Mano de obra; horas hombre trabajadas,

E: Consumo de energía (diésel),

Q: Producción; toneladas de roca,

D_i: variable dicotómica donde 0 indica la no implementación del sistema de despacho y 1 significa que se ha implementado el sistema de despacho.

Se incluye también todas las interacciones con el consumo de Diesel, Horas-hombre y el capital (metros de avance). Los resultados de la regresión lineal multivariante se muestran en el siguiente cuadro:

El Cuadro 11 resume la inversión de la base de datos ampliada considerando las variables de interacción descritas previamente. Las variables LD, HHD y MD hacen referencia a las interacciones “Consumo de Diesel-Dummy”, “Horas-hombre/Dummy” y “Avances-Dummy”, respectivamente.

¹² Los avances son los metros lineales que dependen del despliegue de capital al momento de hacer las labores. Están asociados a los gastos de capital de la mina (CAPEX).

Cuadro 14: Variables del modelo incluyendo interacciones con la dummy

ITEM	FECHA MENSUAL	ln_%PRODUCTIVIDAD	ln_CONSUMO DE DIESEL (L)	ln_HORAS HOMBRE (HH)	ln_CAPITAL (AVANCES, m)	DUMMY	LD	HHD	MD
1	ene.-16	4.45	12.31	11.76	6.91	0.00	0.00	0.00	0.00
2	feb.-16	4.23	12.29	11.80	6.52	0.00	0.00	0.00	0.00
3	mar.-16	4.42	12.23	11.83	6.86	0.00	0.00	0.00	0.00
4	abr.-16	4.30	12.18	11.86	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
5	may.-16	4.30	12.31	11.89	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00
6	jun.-16	4.33	12.32	11.88	6.98	0.00	0.00	0.00	0.00
7	jul.-16	4.37	12.33	11.86	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00
8	ago.-16	4.34	12.52	11.90	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00
9	sep.-16	4.36	12.37	11.88	7.07	0.00	0.00	0.00	0.00
10	oct.-16	4.35	12.41	11.90	7.13	0.00	0.00	0.00	0.00
11	nov.-16	4.35	12.42	11.86	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
12	dic.-16	4.27	12.39	11.86	7.35	0.00	0.00	0.00	0.00
13	ene.-17	4.31	12.38	11.85	7.21	0.00	0.00	0.00	0.00
14	feb.-17	4.25	12.15	11.84	7.10	0.00	0.00	0.00	0.00
15	mar.-17	4.24	12.48	11.92	7.28	0.00	0.00	0.00	0.00
16	abr.-17	4.31	12.39	11.87	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
17	may.-17	4.44	12.59	11.87	7.18	0.00	0.00	0.00	0.00
18	jun.-17	4.47	12.47	11.88	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
19	jul.-17	4.51	12.51	11.77	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00
20	ago.-17	4.45	12.45	11.81	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
21	sep.-17	4.44	12.43	11.81	7.16	0.00	0.00	0.00	0.00
22	oct.-17	4.50	12.50	11.79	7.09	0.00	0.00	0.00	0.00
23	nov.-17	4.46	12.38	11.77	7.04	0.00	0.00	0.00	0.00
24	dic.-17	4.46	12.42	11.77	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00
25	ene.-18	4.47	12.55	11.77	7.16	0.00	0.00	0.00	0.00
26	feb.-18	4.40	12.42	11.72	7.05	0.00	0.00	0.00	0.00
27	mar.-18	4.40	12.42	11.82	7.17	0.00	0.00	0.00	0.00
28	abr.-18	4.39	12.42	11.80	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00
29	may.-18	4.49	12.26	11.58	7.10	0.00	0.00	0.00	0.00
30	jun.-18	4.36	12.33	11.80	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00
31	jul.-18	4.22	12.60	12.07	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
32	ago.-18	4.43	12.44	11.87	7.34	0.00	0.00	0.00	0.00
33	sep.-18	4.36	12.36	11.90	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
34	oct.-18	4.45	12.50	11.88	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
35	nov.-18	4.43	12.26	11.89	7.12	0.00	0.00	0.00	0.00
36	dic.-18	4.49	12.31	11.89	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
37	ene.-19	4.40	12.60	11.91	7.19	0.00	0.00	0.00	0.00
38	feb.-19	4.33	12.40	11.90	7.06	0.00	0.00	0.00	0.00
39	mar.-19	4.37	12.53	11.96	7.21	0.00	0.00	0.00	0.00
40	abr.-19	4.36	12.57	11.96	7.26	0.00	0.00	0.00	0.00
41	may.-19	4.42	12.52	11.88	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00
42	jun.-19	4.47	12.46	11.88	7.31	0.00	0.00	0.00	0.00
43	jul.-19	4.47	12.64	11.88	7.27	0.00	0.00	0.00	0.00
44	ago.-19	4.28	12.61	12.06	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00
45	sep.-19	4.22	12.60	12.14	7.25	0.00	0.00	0.00	0.00
46	oct.-19	4.12	12.52	12.13	7.29	1.00	12.52	12.13	7.29
47	nov.-19	4.02	12.47	12.09	7.32	1.00	12.47	12.09	7.32
48	dic.-19	4.27	12.64	12.06	7.34	1.00	12.64	12.06	7.34
49	ene.-20	4.41	12.64	11.95	7.35	1.00	12.64	11.95	7.35
50	feb.-20	4.33	12.56	11.95	7.21	1.00	12.56	11.95	7.21
51	mar.-20	4.29	12.72	12.03	7.32	1.00	12.72	12.03	7.32
52	abr.-20	4.44	12.62	11.92	7.28	1.00	12.62	11.92	7.28
53	may.-20	4.47	12.57	11.92	7.32	1.00	12.57	11.92	7.32
54	jun.-20	4.41	12.66	11.96	7.17	1.00	12.66	11.96	7.17
55	jul.-20	4.33	12.53	11.98	7.22	1.00	12.53	11.98	7.22
56	ago.-20	4.45	12.67	11.97	7.27	1.00	12.67	11.97	7.27
57	sep.-20	4.53	12.56	11.85	7.21	1.00	12.56	11.85	7.21
58	oct.-20	4.49	12.66	11.91	7.31	1.00	12.66	11.91	7.31
59	nov.-20	4.52	12.54	11.88	7.28	1.00	12.54	11.88	7.28
60	dic.-20	4.53	12.59	11.87	7.22	1.00	12.59	11.87	7.22

Elaboración propia

Los resultados de la regresión, por otra parte, se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 15: Resultados de la segunda regresión (incorporando interacciones)

REPORTE DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.85
Coefficiente de determinación R ²	0.72
R ² ajustado	0.69
Error típico	0.06
Observaciones	60.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	7.00	0.45	0.06	19.55	0.00
Residuos	52.00	0.17	0.00		
Total	59.00	0.62			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	8.70	1.20	7.28	0.00	6.30	11.10	6.30	11.10
CONSUMO DE DIESEL (L)	0.27	0.09	3.07	0.00	0.09	0.44	0.09	0.44
HORAS HOMBRE (HH)	-0.70	0.11	-6.60	0.00	-0.92	-0.49	-0.92	-0.49
CAPITAL (Avances, m)	0.10	0.07	1.39	0.17	-0.04	0.24	-0.04	0.24
DUMMY	8.67	4.13	2.10	0.04	0.38	16.96	0.38	16.96
LD	0.28	0.25	1.13	0.27	-0.22	0.77	-0.22	0.77
HHD	-0.99	0.23	-4.25	0.00	-1.46	-0.52	-1.46	-0.52
MD	-0.04	0.32	-0.12	0.90	-0.69	0.61	-0.69	0.61

De los resultados de la regresión lineal multivariante, se observa un coeficiente de correlación múltiple de 0.85, lo cual puede considerarse una buena correlación entre las variables del modelo. Asimismo, los coeficientes de determinación R² de 0.72 y R² ajustado de 0.69 indican que el ajuste de las variables independientes del modelo para explicar la productividad laboral de la mina Vazante es mejor que el ajuste mostrado por la primera regresión lineal multivariante mostrada en el Cuadro 10. El valor del R² ajustado (0.69) indica que, con los datos reales, el modelo está explicando bien la productividad laboral.

Por otro lado, la variable “Avances” (que aproxima a la variable de “capital” en la función de producción de la mina) no explica directamente la productividad laboral en el modelo econométrico según se observa en los resultados, dado que esta variable no es significativa.

Con respecto del resto de factores explicativos de la regresión, se puede notar que las variables “Diesel” (que aproxima al factor productivo “energía”), “Horas-Hombre” (que es una proxy de la variable “mano de obra” en la función KLEM), “Dummy” y “HHD” (interacción de Horas-hombre y la variable dummy) ahora son significativas. Así mismo, hay un coeficiente de 8.67 para la variable *Dummy* y además, debido a la manipulación que se hizo en la ecuación original para poder linearizarla, el intercepto como coeficiente neto se debe calcular como $8.70 + 8.67 - \ln 100 = 12.76$.

El cambio en el intercepto que resulta es muy significativo. Es necesario interpretar este valor en términos económicos y de gestión de la mina. Podría indicar que la implementación del *dispatch* produce un aumento casi inmediato en el nivel de productividad laboral, independientemente del aporte de los demás factores productivos considerados (capital, trabajo y energía). Esto podría deberse a otros factores como la reducción de tiempos muertos por la mayor disponibilidad de los equipos, entre otros aspectos que generan una mayor eficiencia en las operaciones.

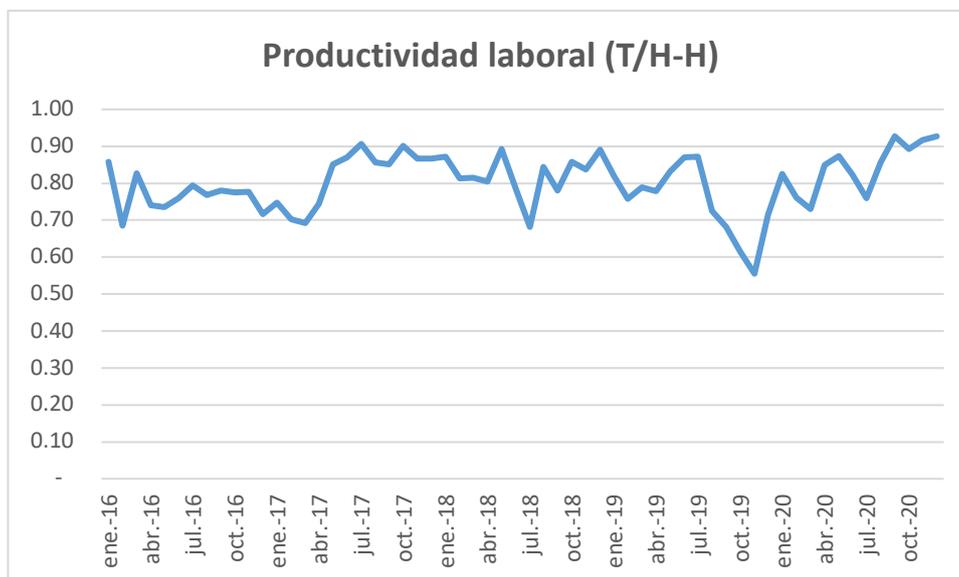
En el caso de la pendiente, se observa que la elasticidad de la productividad laboral respecto de la mano de obra, en términos netos, aumenta de 0.3 (luego de normalizar los coeficientes β y μ) a 0.31. Este cambio implica que, luego de la implementación del *dispatch*, la mano de obra contribuye más al incremento de la productividad laboral. Esto también podría ser coherente con los cambios mencionados por la mayor disponibilidad de equipos y la reducción de tiempos muertos, así como las mejores condiciones de comunicación entre las diversas áreas de la unidad minera. Profundizaremos más en la interpretación de estos resultados en el apartado siguiente.

4.6. Interpretación de Resultados

Dado que se ha demostrado que la implementación del sistema *Dispatch* tiene un impacto sobre la productividad —no solo directamente, sino también a través de la interacción con otras variables—, se plantea a continuación la pregunta respecto del tipo de impacto que se genera por su implementación en la mina

Vazante. Para ello, se comenzará por mostrar el comportamiento de la productividad laboral por medio del gráfico siguiente:

Gráfico 13: Productividad Laboral (T/HH)



Elaboración propia

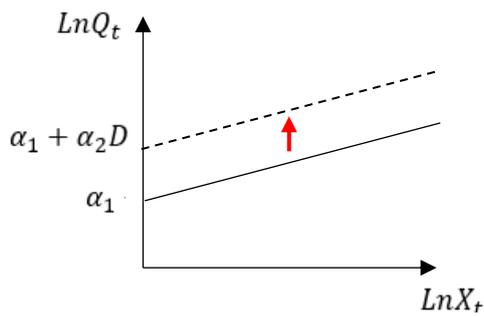
Lo que se puede observar es que la productividad laboral (medida en toneladas por horas-hombre), estaba en una relativa declinación, al menos hasta abril del 2017, periodo a partir del cual hubo algunos picos y caídas más o menos marcadas, hasta agosto del 2019, mes en que su caída fue más pronunciada. Finalmente, a partir de octubre del 2019 —justamente el mes en que se implantó el sistema *Dispatch*— se ha observado un aumento relativamente estable de la productividad laboral. En ese contexto, se buscará demostrar si se trata de un cambio estructural en el nivel (i. e. el intercepto) o de un cambio de pendiente en la ecuación, o en ambos factores. El siguiente esquema explicativo es útil para ilustrar al lector este punto:

Gráfico 14: Esquema explicativo - Cambio de nivel en el intercepto vs. Cambio de pendiente

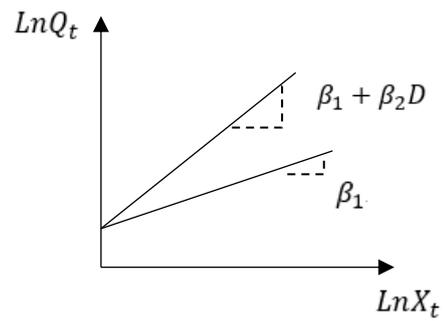
Esquema 1:

$$\ln Q_t = \alpha + \beta \ln X_t + \varepsilon_t$$

$$\ln Q_t = \alpha_1 + \alpha_2 D_t + \beta_1 \ln X_t + \beta_2 D_t \ln X_t + \varepsilon_t$$



Cambio de nivel en el intercepto



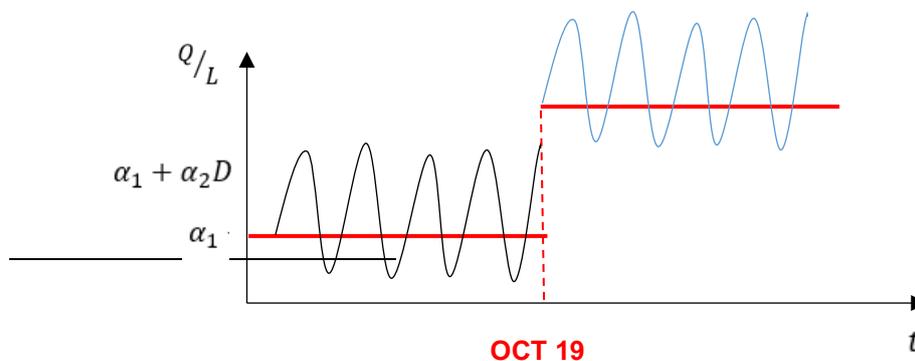
Cambio de pendiente

Los resultados de la segunda regresión han dado como resultado muchas variables que tienen coeficientes significativos como el consumo de diesel, los metros lineales de avance (capital), las horas-hombre y algunas interacciones de la Dummy o variable ficticia que mide el cambio estructural. A la luz del Esquema 1, debe analizarse la significancia de los coeficientes, y se tendría que observar qué tan significativo es el α_2 para ver el cambio en escala que no se observa en la regresión original y ver si el cambio en las pendientes es significativo o no.

Según el Esquema 1, en caso hubiera un cambio en el nivel del intercepto, se observaría un desplazamiento de la gráfica a lo largo del eje Y. El siguiente esquema nos permite observar cómo sería la situación en que hubiera un cambio de intercepto para la productividad laboral.

Gráfico 15: Esquema explicativo – Cambio de nivel en el intercepto para el caso de la productividad laboral

Esquema 2¹³:

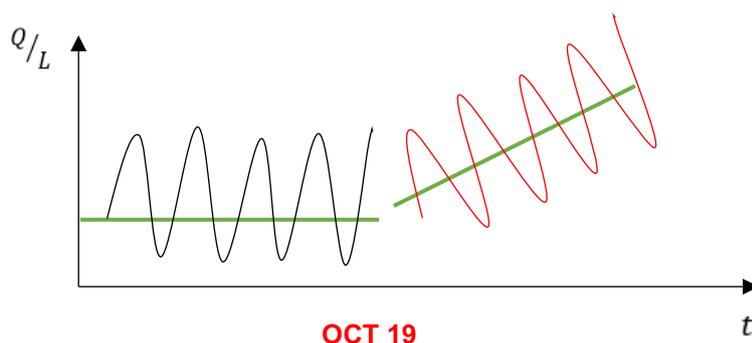


¹³ Con respecto de este esquema, debe aclararse que la variable tomada en cuenta es Q/L no, su logaritmo neperiano ($\ln Q/L$)

Dado que, en octubre del 2019, no se ha introducido un cambio de nivel o de escala en la mina, entonces no se debería encontrar un cambio en el intercepto, puesto que no hay una expansión de mina, que podría darse a través de una ampliación de la planta de beneficio, o de la escala de producción. Lo que ha ocurrido es un cambio en el método de la productividad laboral (Q/L). Y la productividad está relacionada con los retornos incrementales, no con un cambio estructural en el intercepto del modelo. El esquema 3, mostrado a continuación, permite observar con mayor claridad lo que ocurre en el caso de un cambio de pendiente.

Gráfico 16: Esquema explicativo – Cambio de pendiente

Esquema 3:



Q/L es la variable dependiente y t el tiempo. Lo que se observa es un ciclo de producción estacionario que va a depender de los frentes que se vaya extrayendo en función de la diseminación metalúrgica del metal que es aleatoria. Así, no se debería esperar un comportamiento creciente porque el depósito mineralizado tiene diseminado el recurso metálico de forma aleatoria, así como se entiende según la geoestadística. Salvo que venga un cambio de nivel o una nueva expansión o una ampliación de la planta, evidentemente habría un salto a otro nivel, pero que no es lo que se realizó en Vazante.

En el caso de la mina Vazante, los cambios de productividad se darían principalmente por el cambio de las pendientes de la función de producción, pero no del intercepto de la función que se asocia a la escala de la operación minera. Asimismo, Q/L en este punto está incorporando un cambio, lo que es

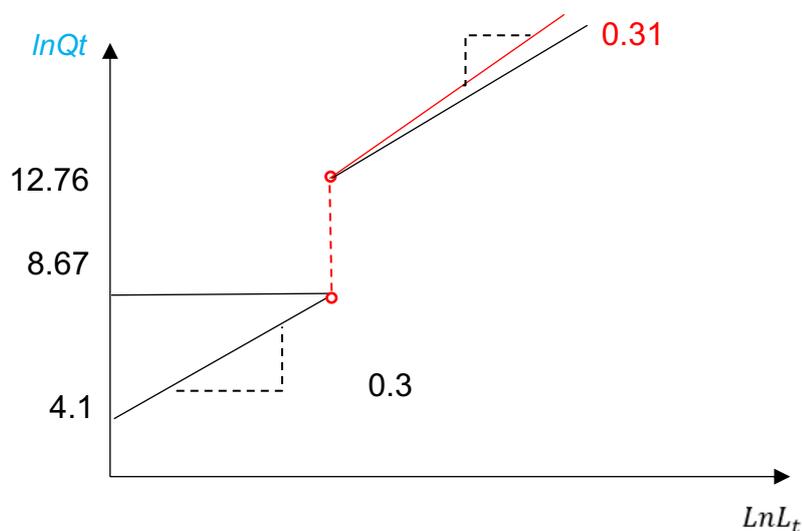
el efecto esperado en la hipótesis de trabajo planteada en este estudio. Se debe hacer análisis de costo/beneficio para tomar la decisión de invertir, o ver si es mejor llevar a cabo una ampliación de mina, con el mismo método de productividad, pero a mayor escala.

Según los resultados de la última estimación del modelo, θ_1 es el coeficiente de la variable *dummy*, que representa la introducción del sistema dispatch en la mina Vazante, y cuyo valor es 8.67. Este valor es significativo estadísticamente, lo que quiere decir que el intercepto que inicialmente es 4.10 va a ir aumentando en 0.27 por cada unidad de consumo de Diesel, 0.30 por cada unidad de Horas-hombre. Finalmente, los avances (medidos en metros) no tendrían impacto, puesto que dicha variable resultó ser no significativa.

Lo que explica el modelo en relación con la Dummy es el cambio estructural que se desea observar, es decir, que cuando se implementa el dispatch, el nivel del intercepto aumenta en 8.6. De modo que sí se observa el cambio de nivel, porque se están controlando por las otras variables y también por las interacciones.

No todas las interacciones han resultado ser significativas, solo las horas-hombre, la cual es, precisamente, la variable clave. Además, esta resulta ser significativa con un coeficiente neto positivo, y ello significa que antes de la implementación del sistema de dispatch, los aumentos en una unidad de las Horas-hombre generaban aumentos de 0.3 en la producción (Q). Luego del quiebre, se debe sumar dicho valor con el coeficiente de la interacción (entre la Dummy y las Horas-Hombre) que es de 0.01. Esto da como resultado 0.31, que sería el coeficiente neto de las horas-hombre. De modo que cada aumento de horas-hombre conllevará un incremento neto de la producción (Q) en 0.31. Así, el modelo explica que antes de la implementación del sistema dispatch la pendiente es 0.3 y después de su implementación, dicha pendiente es de 0.31. Este cambio puede apreciarse mejor por medio de la siguiente gráfica:

Gráfico 17: Cambio de nivel en el intercepto y la pendiente luego de la implementación del dispatch



Cuando hay un quiebre existen dos pendientes, es decir, se tienen dos regímenes, uno con la Dummy y el otro sin la Dummy. Un primer régimen con el coeficiente 0.3, antes del quiebre; y luego uno con el coeficiente 0.3 más 0.01, es decir, 0.31.

El coeficiente de la variable de interacción entre Horas-Hombre y la Dummy (0.01) no indica nada, sino se relaciona con el coeficiente de las horas-hombre. Los coeficientes encontrados para antes y después del cambio de pendientes, se interpretan, entonces, como un cambio de nivel y el incremento de la pendiente positiva.

En el agregado debería aumentar la producción (Q). No obstante, el coeficiente de elasticidad por cada incremento de 1% en la cantidad de horas-hombre disponibles genera un aumento de la producción (Q) en 0.3%, y cuando se da el quiebre, por cada 1% de aumento de las horas-hombre, la producción (Q) se incrementa en 0.31%. Se observa entonces que el sistema Dispatch genera una mejora en el uso del factor trabajo (HH).

Con la implementación del sistema de despacho por cada 10% de aumento de Horas Hombre, se tiene un incremento del 3.1% en la producción (Q), también permitió mejorar la productividad total en los factores de producción, tal como se sustenta en el incremento del intercepto obtenido en la segunda regresión con respecto a la primera, este desplazamiento positivo es significativo y nos

da a entender que la implementación del sistema de despacho mejoró la productividad de los factores de producción, mano de obra y consumo de diésel y en cierto grado el uso de activos. Sin embargo, la significancia estadística de la variable avances no fue la más adecuada. Lo cual no permitió probar que haya contribuido a mejorar la productividad de los equipos.

Por otro lado, el efecto neto en el intercepto es de $8.67 - \ln 100$, que resulta aproximadamente 4.06. Así, se tendría dos efectos positivos, pues la implementación del sistema de despacho tiene un efecto positivo tanto en el intercepto, como en la pendiente. La implementación del sistema de despacho da un impulso y aumento a la productividad laboral, y también al coeficiente de elasticidad de las horas-hombre que aumenta ligeramente.

En lo que respecta a las hipótesis planteadas, debe recordarse sus enunciados, que eran los siguientes:

$$H_0 : \theta_1 = 0 ; H_a : \theta_1 > 0$$

$$H1_0 : \mu = \rho = \delta = 0 ; H1_a : \mu, \rho, \delta > 0$$

Los resultados demuestran que ni la hipótesis nula (H_0) ni la hipótesis nula ($H1_0$) pueden aceptarse. Se debe rechazar dicha hipótesis y favorecer las hipótesis alternativas (H_a y $H1_a$), porque, por un lado, $\theta_1 > 0$ (el intercepto cambia y es mayor luego de la aplicación del sistema dispatch); y, por otro lado, $\mu > 0$ (la incorporación del sistema dispatch aumenta la contribución del trabajo al aumento de la productividad laboral).

La disponibilidad de la data nos hizo optar por el uso de esta variable, en lugar de activos fijos medidos en dólares, es por ello que relacionamos los metros lineales de avance mensual como CAPEX, y esta se ajusta a la función de producción del modelo de Cobb Douglas y Klems.

Los avances son los metros lineales que dependen del despliegue de capital al momento de hacer las labores. Están asociados a los gastos de capital de la mina (CAPEX).

Capítulo 5: Conclusiones

La implementación del sistema no ocasiona un cambio estructural en la función de productividad laboral en sentido estricto. Lo que se genera es un doble efecto positivo. Por un lado, se observa un aumento del intercepto de la función de productividad laboral, respecto del trabajo, que pasa de ser 4.1 a ser 12.76. Mientras que, por otra parte, el coeficiente neto de las horas-hombre pasa de ser 0.3, a ser $(0.3+0.01) = 0.31$. Esto quiere decir que la implementación del sistema dispatch también tiene el efecto de incrementar la pendiente, es decir, aumentar la contribución del trabajo (medido en horas-hombre) a la productividad laboral.

Se debe analizar estos resultados tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista del contexto del negocio y del sector. En lo que respecta al primero, es posible que el incremento de la pendiente se deba a que la implementación del sistema dispatch ha permitido reducir los tiempos muertos e incrementar la disponibilidad de los equipos, así como hacer más eficiente el uso de insumos. No obstante, no hay muchos elementos a favor de estas dos últimas posibilidades, puesto que los coeficientes de la interacción de los avances y del consumo de diésel con la dummy resultaron ser no significativos.

En lo que respecta al contexto del negocio, por ejemplo, debe considerarse que la implementación del sistema casi ha coincidido temporalmente con el inicio de la crisis de la pandemia de la CO-VID 19. Es posible que el efecto de aumento moderado de la pendiente pueda deberse al ausentismo asociado al contexto de la COVID 19 o a otras circunstancias derivadas de esta crisis.

En suma, debe revisarse cuidadosamente estos resultados a la luz de la situación de la empresa, así como de otras investigaciones a fin de ratificar su posibilidad y sus implicancias. En el caso de Vazante, por ejemplo, la implementación del sistema dispatch le ha permitido tener un esquema lo suficientemente eficiente y de altos rendimientos, como para mantener sus niveles de producción incluso en el marco de la pandemia. Esto contrasta con la situación de empresas y unidades mineras peruanas, tales como Atacocha, Milpo o Cerro Lindo.

Por otro lado, la variable Capital (Avances), parece no tener un impacto significativo sobre la productividad laboral. Y esta situación no cambia ni siquiera con la implementación del sistema dispatch, que parece no tener impacto en la contribución de esta variable ni del consumo de diésel al aumento de la productividad laboral.

En nuestro caso de estudio, relativo a la unidad minera Vazante, finalmente, se rechaza ambas hipótesis nulas y se acepta las hipótesis alternativas. Estas nos señalan que los coeficientes θ_1 y μ son mayores que cero. No obstante, sí se evidencia un cambio estructural, el cual se aprecia en los cambios en el intercepto, aunque también se haya dado un aumento de la pendiente. El coeficiente de elasticidad por cada incremento de 1% en la cantidad de horas-hombre disponibles genera un aumento de la producción (Q) en 0.3%, y cuando se da el quiebre, por cada 1% de aumento de las horas-hombre, la producción (Q) se incrementa en 0.31%. Se observa entonces que el sistema de despacho genera una mejora en el uso del factor trabajo (HH). Con la implementación del sistema de despacho por cada aumento de 10% en las Horas Hombre se tiene un incremento del 3.1% en la producción (Q), también permitió mejorar la productividad total en los factores de producción, tal como se sustenta en el incremento del intercepto obtenido en la segunda regresión con respecto a la primera, este desplazamiento positivo es significativo y nos da a entender que la implementación del sistema de despacho mejoró la productividad de los factores de producción, mano de obra y consumo de diésel y en cierto grado el uso de activos. Sin embargo, la significancia estadística de la variable avances no fue la más adecuada. Lo cual no permitió probar que haya contribuido a mejorar la productividad de los equipos.

Para este caso de estudio el alcance se centralizó en la productividad laboral y su análisis técnico, y obviando el análisis económico por las limitaciones de la disponibilidad de la información económica. Por tal motivo se recomienda para casos de estudios siguientes realizar estudios de inversión vs mejoras en sus eficiencias.

Las condiciones que debe tener principalmente es el método de explotación, la conectividad en la mina.

El riesgo más latente es la inestabilidad del macizo rocoso, y esto representa un costo adicional reponer toda esta infraestructura. Para poder realizar un análisis de costo beneficio

Capítulo 6: Recomendaciones

Es importante considerar a futuro la realización de un análisis de la productividad laboral en una perspectiva de largo plazo, ya que en el corto plazo es más difícil observar u obtener resultados que evidencien un cambio estructural en la productividad laboral. Como ya se mencionó en el ítem 2.1.2., existe una serie de matices que debe tenerse en cuenta en la medición de la productividad laboral, y muchos de estos implican contar con datos en un periodo largo de tiempo.

Así mismo, debe señalarse, como ya se hizo en el apartado 3.2., que otra de las principales limitaciones del estudio es que trabaja con el método del “estudio de caso”, por lo que no se trata de un estudio cuyos resultados sean generalizables a todas las unidades mineras. Será necesario que a futuro se realice investigaciones que abarquen una mayor cantidad de unidades mineras. Esto debería ser parte importante de la agenda para los futuros investigadores interesados en la minería subterránea y la mejora de su productividad laboral.

Debe considerarse también algunas sugerencias a nivel de la gestión minera que pueden derivarse de los resultados de la presente investigación. El caso de la unidad minera Vazante es relevante, ante todo porque a diferencia de lo que sucede en otros continentes, en la región (Sudamérica) son muy pocas las minas que han logrado implementar el sistema de despacho subterráneo. Este solo se utiliza en Brasil y en Chile. Con este estudio se logra mostrar y documentar los resultados de la implementación del sistema *dispatch* en Vazante que, pese a las limitaciones mencionadas, puede ser un punto de partida para que los gestores de otras empresas y unidades mineras subterráneas consideren su implementación.

Los resultados encontrados en el presente caso de estudio —es decir, que la introducción del sistema *dispatch* contribuye positivamente a la productividad laboral— podrían ser similares o incluso mejores en otros casos de

implementación. Cabe señalar que, además de ser pocas las unidades mineras que han implementado el sistema *dispatch* subterráneo en la región, son también muy pocos los estudios que se enfocan en dichos casos.

Por otra parte, más allá de las técnicas modernas que permitieron el desarrollo e introducción del sistema *dispatch* en la minería subterránea señaladas a lo largo de esta investigación, el caso de estudio de Vazante muestra que los gestores de una mina subterránea toman en cuenta que el tema de *conectividad* continúa siendo un gran reto para la actividad minera subterránea, y de que es necesario fomentar mucho la investigación para solucionarlo. Ese es el principal problema que no permite que esta herramienta tenga las mismas posibilidades de desarrollarse como se hace en una operación a tajo abierto. Cabe señalar que, si bien en Vazante la empresa Nexa logró instalar el sistema, ello se hizo con muchas limitaciones. Los gestores mineros deberían invertir en mejoras de la conectividad a fin de que se pueda implementar el sistema *dispatch* de manera eficiente en operaciones subterráneas, pero también en investigar sobre las últimas tecnologías vinculadas a la *conectividad* subterránea. Como es sabido, los reacomodos del macizo rocoso, que son inevitables en una operación minera subterránea, generan problemas en la *conectividad*. Para tener conectividad, se requiere pasar un cable de fibra óptica por toda la mina, y esto hace que la conexión sea inestable, pues los cables suelen dañarse y deben ser reemplazados constantemente.

Así, en resumen, puede señalarse que lo abordado y hallado en la presente investigación puede brindar elementos de decisión a los gestores de unidades mineras subterráneas tanto en el país como en la región.

Por otro lado, en lo que respecta a la agenda para futuras investigaciones, la posibilidad de reunir más información sobre la empresa y sobre los casos de otras empresas del sector, tanto en la región como en otras regiones, puede permitir evaluar los impactos que la pandemia ha tenido en el sector, a nivel de los distintos factores de producción e insumos. Por ejemplo, puede considerarse sus efectos a nivel de los costos o del ausentismo laboral. Todas estas cuestiones, que no han podido aún ser recogidas muy explícitamente en nuestra investigación, podrían haber determinado que el incremento en la

productividad laboral debido a la incorporación del dispatch no haya sido tan alto.

Esto último está relacionado también con el hecho de que la variable Capital (Avance, medido en metros) haya resultado no significativa, tanto de manera independiente, como en su efecto por la interacción con la variable *dummy*. Todo ello nos puede dar indicios para evaluar una reformulación del modelo propuesto a fin de considerar variables que puedan ser más relevantes para explicar la productividad laboral en contextos más recientes, teniendo en cuenta las cuestiones técnicas, así como la situación del negocio y del sector minero.

Referencias Bibliográficas

- Aydin, H., & Tilton, J. E. (2000). Mineral endowment, labor productivity, and comparative advantage in mining. *Resource and Energy Economics*, 22(4), 281-293. [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(00\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(00)00026-9)
- De Solminihac, H., Gonzales, L. E., & Cerda, R. (2018). Copper mining productivity: Lessons from Chile. *Journal of Policy Modeling*, 40(1), 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2017.09.001>
- Dougall, A. W., & Mmola, M. (2015). Identification of key performance areas in the southern African surface mining delivery environment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(11), 1001–1006. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n11a3>
- EM&J, 2021. Fleet Management for Today and Tomorrow. Recuperado de: <https://www.e-mj.com/features/fleet-management-for-today-and-tomorrow/>
- Ferreira, N. (2017). 'Improving production data quality in underground operations', En: M. Hudyma & Y. Potvin (eds), *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 617-622, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_50_Ferreira
- Gamache, M., Cohen, P., Grimard, R., & Bigras, L.-P. (2004). “Fleet management system for underground mines”. *CIM Bulletin*, 97(1077), 66–70. <http://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=222571>
- Garcia, P., Knights, P. F., & Tilton, J. E. (2000). “Measuring labor productivity in mining”. *Minerals & Energy - Raw Materials Report*, 15(1), 31-39. <https://doi.org/10.1080/14041040009362549>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., and Sarstedt, M. 2022. *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. 3rd Ed. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Hsing, Yu. (1993). “On the choice of production functions: The case of US manufacturing industries,” *Applied Economics*, vol. 25, no. 3, pp. 321–324.

- Humphreys, D. (2020). "Mining productivity and the fourth industrial revolution". *Mineral Economics*, 33(1), 115-125. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00172-9>.
- Hudson, E. A., & Jorgenson, D. W. (1974). U. S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 5(2), pp. 461–514.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México; 2018). *Sistema de Cuentas Nacionales de México: fuentes y metodologías: año base 2013*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI.
- Jorgenson, D. W., & Griliches, Z. (1967). The Explanation of Productivity Change. *The Review of Economic Studies*, 34(3), pp. 249–283.
- Marais, M. G., & Luke, R. A. "A computerized dispatch system for underground production machines at Finsch Mine". *MASSMIN*, 92, pp. 311-314.
- Mas, M., & Navarro, M. (2012). *Un modelo de crecimiento y productividad regional: El caso del País Vasco*. Marcial Pons.
- Mining Technology. Modular Mining, Intelligent Mine Management Solutions. Recuperado de:
<https://www.mining-technology.com/contractors/communications/modular-mit/>
- NEXA Resources. Informe Annual Nexa 2020.
- OECD. (2001). *Measuring Productivity - OECD Manual: Measurement of Aggregate and Industry-level Productivity Growth*, OECD Publishing, Paris.
- Paraszczak, J. (2014). Maximization of productivity of autonomous trackless loading and haulage equipment in underground metal mines—a challenging task. *Mining Engineering*, 66, 24-41.
- Saayman, P. (2006). Optimization of an Autonomous Vehicle Dispatch System in an Underground Mine. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106, 77-86. <https://www.onemine.org/document/document.cfm?docid=148728>

- Tilton, J. E., & Landsberg, H. H. (1997). Innovation, Productivity Growth, and the Survival of the U.S. Copper Industry (Discussion Paper 97-41). <https://doi.org/10.22004/ag.econ.10534>
- Tilton, John E. (2014) Cyclical and secular determinants of productivity in the copper, aluminum, iron ore, and coal industries. *Mineral Economics*. 27. 1-19. 10.1007/s13563-014-0045-9.
- Torres, J., & Rodríguez, J. (2012). Capital humano, progreso tecnológico y crecimiento de la productividad en Andalucía (No. E2012/04). Centro de Estudios Andaluces.
- Tsolas, Ioannis. (2019) "Mine Performance Assessment by Means of Stochastic Frontier Analysis", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 8657348, 7 pages.
- Willcox, P. (2005). Installation of an Underground Dispatch System and its Use in Business Performance Management within Osborne's Mining Department. 133-137. <http://www.OneMine.org/document/abstract.cfm?docid=188634>

Anexos

1. Análisis descriptivo de variables transformadas:

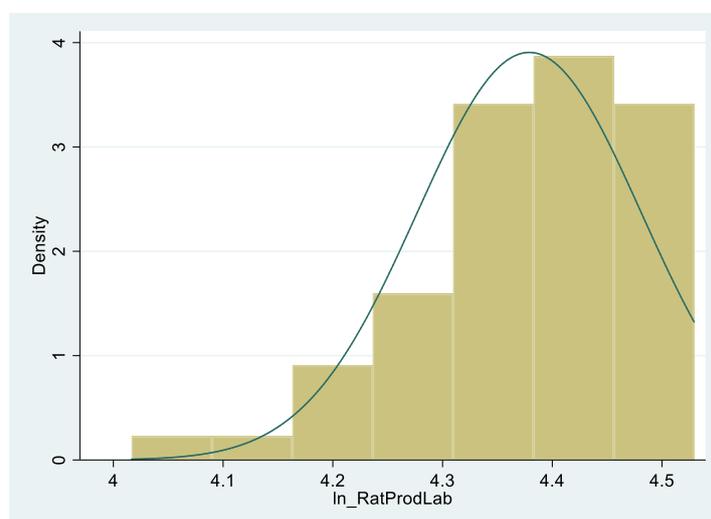
Medidas de tendencia central y dispersión para las variables transformadas (Logaritmo del Ratio de Productividad Laboral, Avances y Horas-Hombre)

```
. tabstat ln_RatProdLab ln_Hrs_Homb ln_Avances, statistics( mean median sd skewness kurtosis )
```

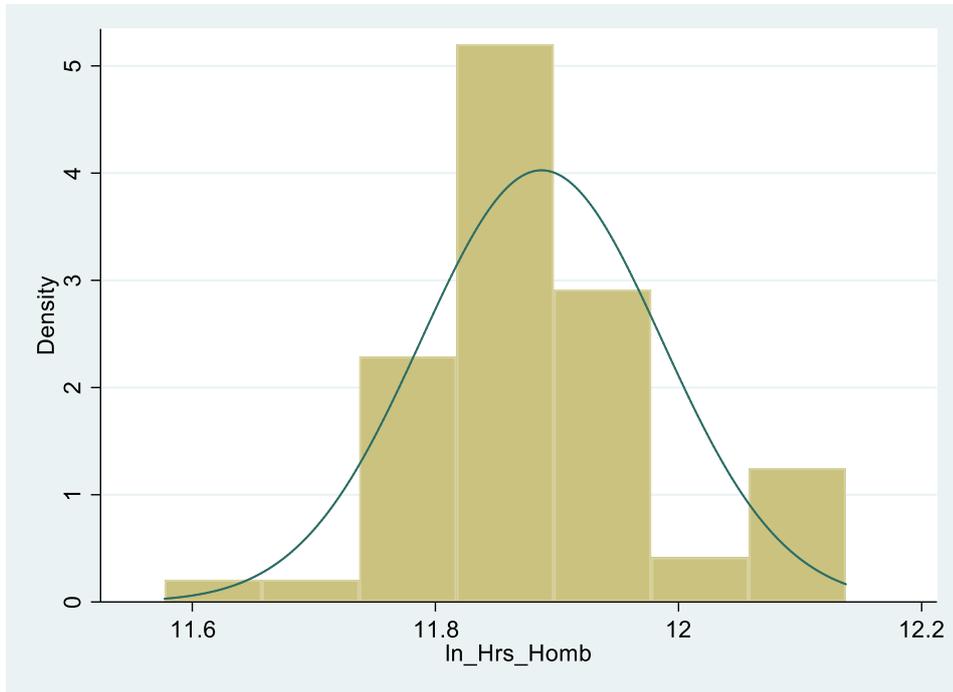
stats	ln_Rat~b	ln_Hrs~b	ln_Ava~s
mean	4.378991	11.88734	7.166395
p50	4.398951	11.87984	7.17568
sd	.1021311	.0990858	.1373165
skewness	-1.010389	.2174229	-1.956695
kurtosis	4.41603	4.303318	9.8824

Dado el tipo de test realizado, debe considerarse como el valor del coeficiente de curtosis al valor mostrado menos 3 unidades. De ese modo puede apreciarse que la mayoría de valores de curtosis para el caso de las tres variables continúa siendo mayor que 1. Los coeficientes de asimetría, por otro lado, también continúan teniendo valores algo alejados de los máximos establecidos para un comportamiento cercano al gaussiano. En este caso, el valor menor a -1 nos indica que presentan asimetrías hacia la derecha, como puede verse, además, en los histogramas siguientes:

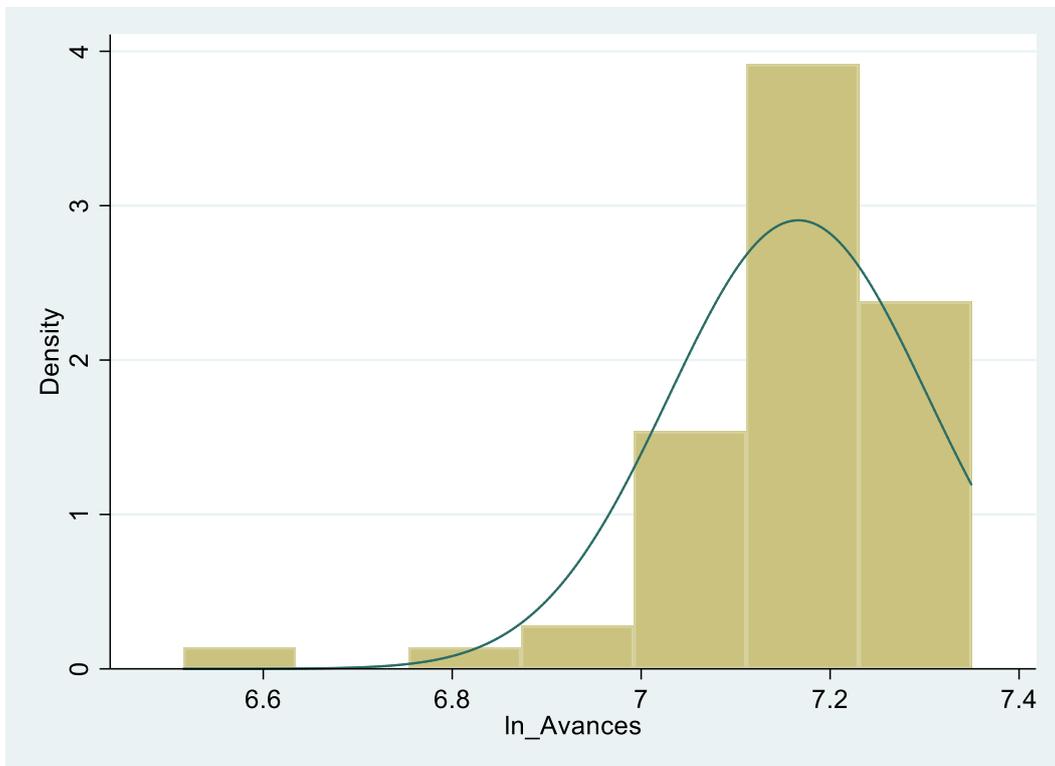
Variable logaritmo del Ratio de Productividad Laboral



Variable logaritmo de las Horas-Hombre



Variable Logaritmo de Avances



Test de Asimetría/Curtosis para las variables Logaritmo de Ratio de Producción Laboral, Horas-Hombre y Avances

Skewness/Kurtosis tests for Normality						
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj	joint chi2(2)	Prob>chi2
ln_RatProd~b	60	0.0022	0.0384		11.26	0.0036
ln_Hrs_Homb	60	0.4535	0.0480		4.52	0.1041
ln_Avances	60	0.0000	0.0000		30.26	0.0000

Puede apreciarse que, de las tres variables, solo en el caso del logaritmo de Horas-Hombre (ln_Hrs_Homb) no se puede rechazar la hipótesis de que la variable se distribuye normalmente. Ello quiere decir que las otras dos variables aún no se aproximan al comportamiento gaussiano. Si bien esta situación no es óptima, sí ha habido una mejora respecto de la situación previa a la aplicación de las transformaciones logarítmicas.
