



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL

**METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD EN
OPERACIONES MINERAS: PRODUCTIVIDAD TOTAL DE FACTORES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE
EMPRESAS

MONSERRAT BEATRIZ MUÑOZ YÉVENES

PROFESOR GUÍA:
ENRIQUE ALEJANDRO SILVA RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAFAEL DAVID EPSTEIN NUMHAUSER
JUAN IGNACIO GUZMÁN BARROS

SANTIAGO DE CHILE
2021

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE:** Magíster en Gestión y Dirección de
Empresas.
POR: Monserrat Beatriz Muñoz Yévenes
FECHA: abril 2021.
PROFESOR GUÍA: Enrique Alejandro Silva
Ramos

METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD EN OPERACIONES MINERAS: PRODUCTIVIDAD TOTAL DE FACTORES

La minería, y en particular la minería del cobre es un sector muy importante para el crecimiento en Chile, contribuyendo significativamente tanto al ingreso nacional a través de su contribución anual al PIB como a través de la recaudación fiscal; por lo que los márgenes que pueda obtener la industria son de vital importancia para el desarrollo económico en nuestro país. Por otra parte, la productividad del sector se ha tomado la agenda en los últimos años, principalmente debido a la sostenida baja que ha sufrido desde el año 2000 a la fecha en nuestro país, sobre todo durante el súper ciclo de los *commodities* durante inicios de dicha década, impactando fuertemente a la competitividad, en parte por las estrategias adoptadas por los productores, pero también debido a variables exógenas.

En esta tesis se propone y analiza el valor de implementar una metodología integral para medir la productividad en la industria. Para esto, se escoge la productividad total de factores como medida para analizar la productividad, ya que captura todo el crecimiento del producto que no es explicado por la acumulación de capital, trabajo e insumos. En este trabajo, se aplica esta metodología y se utiliza para analizar la evolución de la productividad en las actuales minas de cobre operadas por Angloamerican, Los Bronces y El Soldado, para identificar así en qué medida es posible mejorar el desempeño de estas operaciones a través de iniciativas de tecnología y/o gestión y, por lo tanto, analizar el valor de utilizar esta metodología como base para llevar la productividad a discusiones de nivel estratégico en las distintas empresas mineras.

Por último, se analizan tendencias dentro de la industria y cómo éstas pueden impactar a la productividad del sector o de una empresa en específico, además de hacer un repaso de las lecciones que nos dejó el último súper ciclo de *commodities* en cuanto a productividad, para obtener el mayor beneficio en el contexto de precios actual dando la debida prioridad a la gestión de la productividad.

DEDICATORIA

“A Angloamerican por haber puesto su confianza en mí y por el permanente apoyo económico y moral para permitir graduarme de esta prestigiosa casa de estudios”.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a Angloamerican por la oportunidad de poder desarrollar este trabajo, proponiendo ideas que puedan desafiar la manera actual en que entendemos y gestionamos la gran minería del cobre.

Un agradecimiento a mi profesor guía Enrique Silva, quien con dedicación y profesionalismo supo orientar el trabajo hacia la creación de valor económico al negocio. Agradecimiento a todo el equipo del MBA Minero de la prestigiosa Universidad de Chile, quienes han sabido mantener la excelencia de este programa.

Mis agradecimientos también a mis compañeros y compañeras de la Generación 2019 que hicieron de estos dos años una experiencia muy enriquecedora desde el punto de vista humano.

Finalmente, gracias a mi familia, por haber estado siempre presente en estos dos años muy intensos.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodología	2
1.4 Información y datos	3
CAPITULO 2: COMPONENTE ESTRATEGICO	5
2.1 Descripción general de la división de Cobre de Angloamerican en Chile	5
2.2 Estrategia Angloamerican	5
CAPITULO 3: COMPONENTE ECONÓMICA-FINANCIERA.....	7
CAPITULO 4: REVISIÓN DE ESTUDIOS ANTERIORES EN EL TEMA	9
CAPITULO 5: RESULTADOS EMPIRICOS.....	11
5.1 Tendencias de cuocientes – Mediciones tradicionales	22
5.2 Presentación de la productividad factorial propiamente tal	28
CAPITULO 6: CONCLUSIÓN	32
CAPITULO 7: BIBLIOGRAFIA	40

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

La minería, y en particular la minería del cobre es un sector muy importante para el crecimiento en Chile, contribuyendo significativamente tanto al ingreso nacional, con un 10% de contribución anual al PIB en promedio durante los últimos 10 años, como a la recaudación fiscal, con un 13,8% de aporte en promedio durante los últimos 20 años; por lo que el precio del *commodity* y los márgenes que pueda obtener la industria son de vital importancia para el desarrollo económico en nuestro país. Por otra parte, la productividad del sector se ha tomado la agenda en los últimos años, principalmente debido a la sostenida baja que ha sufrido desde el año 2000 a la fecha en nuestro país, sobre todo durante el súper ciclo de los *commodities* durante inicios de dicha década, impactando fuertemente a la competitividad, en parte por las estrategias adoptadas por los productores, pero también debido a variables exógenas. Tal es el nivel de preocupación que, en el año 2016, la Comisión Nacional de Productividad (CNP) realizó y publicó un estudio de productividad en la gran minería del cobre donde se hizo un levantamiento y comparación a detalle del nivel de productividad de distintos procesos en empresas mineras tanto nacionales como extranjeras, planteando una serie de desafíos y recomendaciones.

Adicionalmente, la evolución de la productividad nos marca nuestras posibilidades de mejorar el nivel de vida. De este modo, si sistemáticamente el crecimiento de la remuneración de los factores es superior al crecimiento de su productividad, las empresas verán aumentar sus costes medios, perderán competitividad y tendrán, con el paso del tiempo, enormes dificultades para sobrevivir en un escenario donde la competencia es cada vez mayor. Esto se reforzará porque las empresas y economías menos productivas resultarán menos atractivas tanto para inversionistas como para trabajadores. Esto último es relevante, ya que, de acuerdo con estudios de la Sociedad Nacional de Minería, existe una correlación directa entre la inversión en minería y la formación bruta de capital fijo (FBCF) en Chile durante los últimos 30 años, lo cual aporta al concepto de que la minería ha sido por largo tiempo y aún sigue siendo un motor de crecimiento para el país.

Durante los últimos años los países productores de materias primas han visto caer el ritmo de crecimiento de su productividad agregada. Chile no es la excepción. El Informe Anual de la Comisión Nacional de Productividad 2016 encontró que la productividad total de factores (PTF) de la economía chilena en su conjunto se desaceleró de 2.3% anual en los años 1990, a 0.1% al año en los años 2000. Causa fundamental, aunque no exclusiva, fue la caída en la productividad minera. Esta caída se debió, en parte, a la complejización de la función de producción reflejada en menores leyes de mineral, factores medioambientales como la mega sequía de la última década y a la reacción que el súper ciclo de precios del cobre indujo en la industria, y que llevó a priorizar el nivel de producción por sobre otros criterios.

Desde aquí nace el interés en el desarrollo de este tema como motivo de tesis. Si bien en minería es esperable que la operación de un yacimiento vaya declinando su productividad, en términos de producto sobre cantidad de insumos empleados, a medida va transcurriendo el tiempo debido a factores minero-metalúrgicos como: la ley de mineral, razón lastre mineral y recuperación; es importante comprender cuánto de esta variación corresponde a la calidad del recurso y cuánto corresponde a factores controlables como tecnología o gestión. Donde respecto a esto último, la reciente

emergencia sanitaria provocada por el COVID-19 nos ha llevado a desafiar nuestra manera de hacer las cosas y nos ha comprobado de que la minería es capaz de adaptarse rápidamente y buscar soluciones más allá de lo que se imaginaba posible cuando la situación lo amerita.

1.2 Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es proponer y analizar el valor de implementar una metodología más integral para medir la productividad en la industria. Para esto, se escoge la productividad total de factores como medida para analizar la productividad, ya que captura todo el crecimiento del producto que no es explicado por la acumulación de capital, trabajo e insumos. Se le considera una medida de la eficiencia con la cual los factores productivos son empleados y considera factores tales como el progreso tecnológico, la eliminación de ineficiencias en el proceso productivo, el impacto de cambios regulatorios, entre otros.

Objetivos específicos

El objetivo específico de esta tesis es aplicar esta metodología y analizar la evolución de la productividad en las actuales minas de cobre operadas por Angloamerican, Los Bronces y El Soldado, para identificar así en qué medida es posible mejorar el desempeño de estas operaciones a través de iniciativas de tecnología y/o gestión y, por lo tanto, analizar el valor de utilizar esta metodología como base para llevar la productividad a discusiones de nivel estratégico en las distintas empresas mineras.

1.3 Metodología

Se recopilaron datos reales de las operaciones anteriormente mencionadas, desde el año 2009 al 2020 con una periodicidad trimestral.

Para el cálculo de la productividad total de factores (en adelante, PTF), se utilizará una función de producción del siguiente tipo:

$$Y = A K^{\beta_K} L^{\beta_L} M^{\beta_M}$$

Donde:

Y: producción, medida en unidades físicas.

A: PTF.

K: stock de capital físico.

L: cantidad de trabajo.

M: cantidad de insumos y materiales, medida en términos físicos.

Esta función de producción será adaptada para aislar el efecto de las variables minero-metalúrgicas que afectan a la productividad, como son: la recuperación (porcentaje de cobre presente en el mineral que se captura en la planta de procesamiento), ley del mineral y razón estéril mineral:

$$Y = A REC^{\beta_{REC}} G^{\beta_G} R^{\beta_R} K^{\beta_K} L^{\beta_L} M^{\beta_M}$$

Donde:

REC: recuperación

G: ley de mineral tratado.

R: razón estéril-mineral

Aplicando una transformación logarítmica a la función de producción antes presentada, se estimarán, econométricamente, las elasticidades de la producción frente a la recuperación (β_{REC}), ley de mineral tratado (β_G), razón estéril-mineral (β_R), stock de capital (β_K), la cantidad de trabajo (β_L) y los materiales e insumos (β_M). La elasticidad de la producción frente a cada factor productivo muestra la sensibilidad de la producción frente a los cambios en la cantidad de dicho factor.

Una vez estimadas las elasticidades, la productividad total de factores se puede calcular como:

$$A = Y / (REC^{\beta_{REC}} G^{\beta_G} R^{\beta_R} K^{\beta_K} L^{\beta_L} M^{\beta_M})$$

En esta tesis se calculará tanto la PTF convencional (sin aislar el efecto de los factores minero-metalúrgicos) como la PTF aislando el efecto de factores minero-metalúrgicos. La discusión acerca de la productividad, hasta hace poco, ha estado metodológicamente basada en la comparación de ratios. Existen pocos estudios a nivel microeconómico y los estudios agregados tienen significativas oportunidades de mejora, específicamente por las limitaciones de acceso a la información, razón por la cual se considera relevante profundizar en esta medida de productividad a nivel de empresa con datos microeconómicos.

1.4 Información y datos

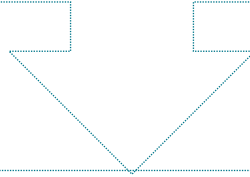
Toda la información base corresponde a la obtenida de la unidad de negocios Cobre de la empresa Angloamerican, en particular a la recopilada de las operaciones Los Bronces y El Soldado entre los años 2009 y 2020 con una periodicidad trimestral.

La información requerida por operación corresponde principalmente a:

- Capital
- Uso de mano de obra, tanto interna como externa
- Consumo físico de los principales insumos productivos
- Razón estéril mineral por período
- Leyes por período
- Recuperación para cada período
- Mineral tratado en cada período

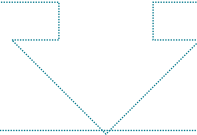
Recolección de Información Base (Input)

- Dotaciones por categorías (Personal directo e Indirecto)
- Razón estéril mineral por período
- Leyes de alimentación a planta concentradora
- Recuperación planta concentradora
- Consumos de los principales insumos (identificar canasta)
- Eventos contraproducentes que hayan afectado la producción más allá de los KPIs (días de invierno, fallas de mantención, huelgas,, sequía, otros)



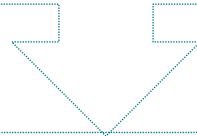
Reuniones con especialistas

- Especialistas de Recursos Humanos
- Profesionales del área de Planificación Minera
- Profesionales del área de Abastecimiento
- Profesores y/o expertos en materia de Productividad
- Ejecutivos de compañías mineras



Análisis de Datos y Resultados (Output)

- Estimación de los KPI para cada período
- Análisis de regresión para determinar la Productividad Total de Factores
- Selección y cálculo de cuocientes de productividad
- Revisión con especialistas
- Presentación de resultados y conclusiones



Conclusiones y próximos pasos

CAPITULO 2: COMPONENTE ESTRATEGICO

2.1 Descripción general de la división de Cobre de Angloamerican en Chile



En Chile, Angloamerican posee el 50,1% de las minas Los Bronces y El Soldado, y la fundición Chagres, entre las tres conforman Angloamerican Sur, muy cerca de la ciudad capital de Chile, Santiago. Angloamerican también tiene una participación del 44% en la mina de cobre Collahuasi. Las primeras tres operaciones mencionadas son operadas directamente por Angloamerican, mientras que, en Collahuasi, Angloamerican tiene participación a través de un *Joint Venture*.

Entre todas sus operaciones, la división de Cobre de Angloamerican produjo en 2019 un total de 638 mil toneladas de cobre fino equivalentes a un 11% de la producción de Chile y un 3% de la producción mundial. Las ventas de la división de Cobre en el mismo año fueron de 644 mil toneladas, equivalentes a ingresos por US\$5.840 millones.

Los Bronces es una mina de cobre y molibdeno que se explota a rajo abierto. El mineral que se extrae es molido y transportado por un mineroducto de 56 kilómetros a la planta de flotación Las Tórtolas, en la que se produce cobre y molibdeno contenido en concentrados. Además, en la mina se produce cobre en cátodos.

En 2019, Los Bronces produjo 335 mil toneladas de cobre fino, entre cátodos de alta pureza y cobre contenido en concentrado y contó con una dotación aproximada de 6.970 trabajadores, entre personal propio y contratistas de operación y proyectos.

El Soldado es un yacimiento minero ubicado en la comuna de Nogales, en el sector de El Melón, ubicado a 132 kilómetros de Santiago y a 600 msnm. Actualmente comprende una mina a rajo abierto, planta de chancado e instalaciones para el tratamiento de minerales sulfurados.

En 2019, El soldado produjo 53 mil toneladas de cobre fino con una dotación aproximada de 1.600 trabajadores, entre personal propio y contratistas de operación y proyectos.

Collahuasi es una mina de cobre y molibdeno que se explota a rajo abierto. Sus instalaciones industriales y los yacimientos Rosario y Ujina, ubicados en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, conforman el Área Cordillera. En el sector de Ujina se encuentra también la planta concentradora, desde donde nace un sistema de mineroductos de 203 km de extensión, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado hasta el Terminal Marítimo Collahuasi. Desde este recinto, ubicado en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, se embarcan los productos hacia los mercados internacionales. En este lugar, se encuentran también las plantas de molibdeno y de filtrado de concentrado.

El 2019 Collahuasi produjo 565 mil toneladas de cobre fino y contó con una fuerza laboral total de 5.099 trabajadores, compuesta en un 37% por dotación propia y un 63% de tercerizados.

2.2 Estrategia Angloamerican

Angloamerican tiene un propósito claro, el cual guía sus acciones y que es “Re-imaginar la minería para mejorar la vida de las personas”

Según describe la empresa en su sitio web: “Nuestra estrategia es asegurar, desarrollar y operar una cartera de activos con recursos de larga duración y alta calidad, desde la cual entregaremos las mejores rentabilidades a los accionistas. Esto es posible aplicando prácticas y tecnologías innovadoras -que confiamos a nuestra gente, de nivel mundial- en pos de un objetivo común”.

Figura 2.2 Elementos de la Estrategia de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con información de Memoria Anual 2019 de Angloamerican

Bajo el propósito de Angloamerican, la compañía tiene una ambición declarada y bien definida que es: “Ser la compañía minera más valorada del mundo al año 2023 por todos nuestros grupos de interés”

Para cumplir con el propósito y la ambición, el Grupo ha definido los siguientes siete pilares de valor sustentable:



Fuente: elaboración propia con información de Memoria Anual 2019 de Angloamerican

Dentro de cada uno de estos pilares se han definido una serie de indicadores asociados para medir el desempeño de cada pilar. Por ejemplo, en seguridad y salud, se encuentran los indicadores de “número de incidentes de seguridad de alto potencial” y “tasa de entrenamientos en seguridad”.

En la próxima sección profundizaremos sobre la importancia estratégica de incluir indicadores de productividad, no solo laboral, en la medición del desempeño de los pilares de valor sustentables, sobre todo cuando la ambición de la compañía está enfocada declaradamente en el valor a sus accionistas y otros grupos de interés.

CAPITULO 3: COMPONENTE ECONÓMICA-FINANCIERA

El principal objetivo de los accionistas al invertir en una empresa o industria es maximizar la creación de valor. Para ilustrar cómo la productividad impacta a esta máxima de los mercados financieros y se convierte, por lo tanto, en una palanca de valor económico para las compañías mineras, utilizaremos un indicador conocido como *Total Shareholders Return* (TSR) o Retorno Total para el accionista. Este indicador es un porcentaje que es principalmente una tasa interna de retorno de creación de valor económico para el accionista, a partir de las ganancias de capital y el pago de dividendos de una acción.

Utilizaremos este indicador como medida del valor económico creado principalmente porque: es fiable, ya que es muy difícil de manipular y es independiente de la contabilidad; es clave para los fondos de inversión y otras instituciones financieras al momento de tomar decisiones y recomendaciones de inversión; permite comparar el desempeño de distintas acciones entre industrias; nos permite comparar nuestro desempeño contra nuestros pares, por lo que puede ser utilizada para la gestión; y es una medida requerida en el *reporting* de las empresas que transan en las distintas bolsas de valores, por lo que es de fácil acceso.

Si bien el uso de este indicador tiene algunas consideraciones que no hay que perder de vista al momento de analizar resultados, como, por ejemplo, los supuestos de mercados eficientes, inversores informados e igualdad de condiciones de las bolsas de valores donde transan los distintos activos (profundidad, liquidez, etc). Aun así, nos parece un indicador razonable y lo utilizamos para el desarrollo de la idea en este trabajo debido a los siguientes beneficios anteriormente mencionados:

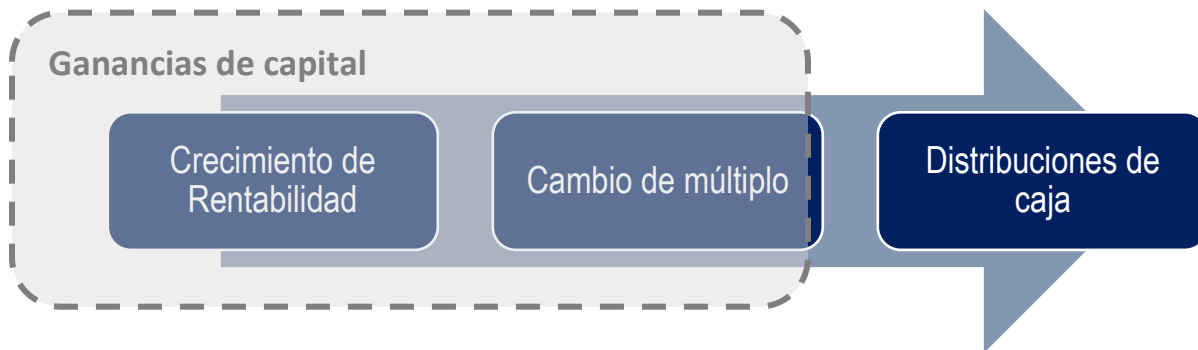


Fuente: elaboración propia con información de Boston Consulting Group (BCG)

Si un accionista quisiera calcular el TSR de una acción que compró a principios de año a un valor de \$10.00, pagó dividendos por \$0.20 en el período y luego vendió a fin de año a \$11.00, la metodología sería la siguiente:

$$\text{TSR} = \text{apreciación de la acción} + \text{dividendos} = (\$1.00 + \$0.20) / \$10.00 = 12.0\%$$

De acuerdo con la metodología utilizada por BCG, el TSR es principalmente una función de las siguientes tres variables:



Fuente: elaboración propia con información de BCG

El crecimiento de la rentabilidad es relevante, ya que refleja de manera directa los flujos de dinero que está recibiendo y puede generar una determinada empresa. Mientras que el cambio de múltiplo, el cual se refiere a la valoración de la compañía en términos de su EBITDA (ej: 20x), refleja muchas veces la confianza que el mercado y el accionista tienen en la continuidad del negocio, para lo cual la productividad, particularmente en la industria minera, es clave. Por último, las distribuciones de caja son de importancia, ya que le dan la libertad al accionista de elegir si es que quiere seguir invirtiendo en la misma compañía o en otra que considere con mayores perspectivas de rentabilidad o calce mejor dentro de su portafolio.

Cada una de estas variables puede ser afectada por la Gerencia a través de distintas palancas de gestión, donde algunos ejemplos son:

Crecimiento de rentabilidad	Cambio de múltiplo	Distribuciones de caja
Aumento de ingresos Disminución de costos Aumento margen de EBITDA (%)	Expectativas de crecimiento y rentabilidad (UPA, innovación, márgenes, ROIC) Consistencia en el desempeño y cumplimiento Confianza en el <i>management</i> de la compañía Cambios en el portafolio Pago de dividendos o recompra de acciones	Inversiones (Capex) Capital de Trabajo Dividendos, recompra de acciones, deuda.

Fuente: elaboración propia con información de BCG

Con esta metodología podemos identificar que las mejoras en productividad pueden generar valor económico directo para el accionista a través de mover las distintas palancas de gestión que impactan al TSR.

Un ejemplo de esto podría ser un plan de productividad con efecto a largo plazo, lo cual impactaría directamente y de manera positiva al margen de EBITDA (%), aumentando la rentabilidad y, por lo tanto, aumentando el valor económico generado a través de mayores ganancias de capital para la acción. Esto podría generar también, de manera indirecta, mayor consistencia en el desempeño y, por lo tanto, incrementar la confianza en el *management*, lo cual podría generar un impacto positivo en el múltiplo de la compañía.

Si la mejora en productividad genera una operación más estable y consistente en sus resultados, esto permite una mejor planificación de repuestos e insumos, afectando directamente al capital de trabajo.

Mayor productividad y eficiencia en las mantenciones podría impactar directamente al nivel de inversión requerido para sostener el negocio (SIB), a través del aumento de la vida útil de los equipos.

La productividad no solamente genera beneficios directos a través del impacto en menores costos, sino que tiene efectos multiplicadores a través de la mayor consistencia y eficiencia, impactando a las distintas variables que afectan al TSR, aumentando el valor económico para el accionista y, por lo tanto, debiera considerarse dentro de las discusiones estratégicas de Angloamerican para poder alcanzar su ambición.

CAPITULO 4: REVISIÓN DE ESTUDIOS ANTERIORES EN EL TEMA

Dada la importancia del sector minero en el desarrollo de nuestro país, el Gobierno de Chile mandató a la Comisión Nacional de Productividad un estudio respecto a la productividad del sector en Chile, con el objetivo de proponer una estrategia que permita al país recuperar su liderazgo internacional, ya no solo en términos de reservas y producción, sino en productividad. Así fue como nació el Informe de Productividad de la Gran Minería del Cobre, el cual fue publicado en el año 2017. Este estudio es un trabajo

único en su género a nivel mundial que compara la productividad de las 12 principales faenas chilenas con siete operaciones mineras de mejor práctica en Australia, Canadá, Estados Unidos y Perú. Además, propone también un conjunto de 53 recomendaciones que se dividen en dos mundos: 34 específicas en los ámbitos de políticas públicas y regulatorias y 19 recomendaciones de políticas sectoriales que requieren la acción conjunta de los actores del sector, incluyendo empresas mineras, contratistas, proveedores y comunidades.

El Informe de Productividad de la Gran Minería del Cobre fue, sin duda, un gran aporte a instalar la discusión acerca de la productividad en el sector a nivel país. Este estudio se basó principalmente en un análisis comparativo detallado (*benchmarking*) con información a nivel de cada operación para los 12 meses del año 2015. La muestra en su conjunto incluyó el 35% de la producción mundial de cobre y el 50% de la producción de yacimientos sobre las 100.000 toneladas anuales. Esta muestra genera confianza sobre la representatividad y el valor del análisis.

Si bien este estudio se hizo a nivel de empresa, el análisis comparativo se realizó a partir de la identificación de brechas en las productividades parciales. Las medidas parciales de productividad, por ejemplo, laboral, son fáciles de interpretar, pero solo establecen una relación entre dos índices (producción y empleo), y por consiguiente podrían presentar sesgos al momento de comparar sistemas complejos que no solo ocupan mano de obra sino también otros factores productivos. De ahí la importancia de realizar una estimación de productividad que considere la incidencia conjunta de los factores, como es la Productividad Total de Factores (PTF), al mismo tiempo que se corrige por los aspectos específicos a la minería ya explicados. El Informe de Productividad de la Gran Minería del Cobre dedica una sección para estudiar este concepto en el sector, pero sólo lo hace a nivel agregado, no profundizando en las diferencias a nivel de empresa.

Aun así, este estudio llegó a varias conclusiones que merecen la pena ser destacadas en esta tesis, ya que apoyan la importancia de llevar la discusión acerca de la productividad a niveles estratégicos en las distintas empresas, donde el cálculo de la productividad factorial a nivel micro podría ser una metodología que sirviera de apoyo para estos propósitos.

Una de ella es que, en términos organizacionales, la rotación de altos ejecutivos ha implicado poca adherencia a un plan estratégico consistente en el mediano plazo. A nivel doméstico existen diferencias en prácticas laborales, pero al comparar con operaciones referentes internacionales se observan mayores capas jerárquicas, escasa movilidad entre niveles, menor amplitud de control, remuneración con énfasis en producción y no productividad, entre otros aspectos que difieren de las mejores prácticas internacionales. Otra de las importantes conclusiones de este estudio, a partir de las entrevistas realizadas a distintos ejecutivos del sector, es que un tema recurrente en éstas, y un pilar en la filosofía operacional de las faenas de mejores prácticas, es la visión de la productividad como un tema central, transversal, y como un proceso continuo y de largo plazo. Si algo caracteriza a esta visión es la maximización en la eficiencia del conjunto del yacimiento en búsqueda de un “óptimo global” y no la visión de “silos” en torno a los procesos productivos que caracteriza varias de las operaciones en Chile, con “óptimos locales” como objetivos que se reflejan en los programas de incentivos a todo nivel.

Otra institución que realiza análisis comparativos detallados (*benchmarking*) es Encare, empresa nacional de ingeniería económica y gestión, con alrededor de 20 años de experiencia. El Estudio Benchmarking Gestión Minera© de Encare es una iniciativa

conjunta, entre las principales compañías mineras de Chile y Perú y Encare, con la finalidad de disponer de un set de Indicadores de Gestión para la alta gerencia, que sean homologables, comparables y permanentes en el tiempo.

El Estudio presenta en forma semestral, desde el año 2009 a la fecha, la evolución de los principales indicadores de productividad, gestión, costos, disponibilidad y eficiencia de las empresas participantes. Este se publica semestralmente, los resultados son confidenciales y sólo se comparten con las empresas que han participado en el estudio en cada semestre. El gran valor de este estudio es su periodicidad y homologación de los KPIs, lo cual permite comparar, analizar tendencias y revisar la evolución de distintas empresas de la Gran Minería a lo largo de un período de tiempo considerable.

En términos de productividad, el análisis de comparativo de las distintas empresas en la industria se realiza a través del cálculo de cocientes o productividades parciales. Encare ha indagado también en cálculo de Productividad Total de Factores y análisis a lo largo del tiempo, pero siempre de manera agregada, no se han visualizado análisis de este tipo a nivel de empresa en sus informes.

A partir de la falta de estudios que analicen la Productividad Total de Factores a nivel microeconómico es que nace la inquietud de desarrollar este tema como motivo de tesis, donde, habiendo aceptado que la productividad es una variable muy relevante en la generación de valor económico para el accionista, es que se quiere explorar el valor que podría agregar la medición de la PTF como KPI que permita analizar las tendencia de productividad de sistemas complejos, como lo es el proceso minero, que no solo ocupan un solo factor, sino que múltiples factores productivos. La Productividad Total de Factores es una estimación de productividad que considera la incidencia conjunta de los factores y, por esta razón, es que se propone utilizarla como base metodológica para las discusiones estratégicas en las distintas empresas mineras de nuestro país.

CAPITULO 5: RESULTADOS EMPIRICOS

5.1 Descripción de las variables

A continuación, se presentan gráficos descriptivos sobre la evolución de la producción y las principales variables que utilizaremos para el análisis de la productividad factorial. Estos datos corresponden a la totalidad consumida en cada período para lograr la producción y se obtuvieron de manera mensual para los años 2009 a 2020, los cuales fueron posteriormente construidos de manera trimestral para otorgarle mayor estabilidad a la muestra. De esta manera, obtuvimos 44 puntos para cada una de las siguientes variables:

- Producción de cobre fino total (ton)
- Ley de mineral alimentado a concentradora (%)
- Mineral tratado (kt)
- Dotación total para efectos de productividad
- Insumos tales como:
 - o Diesel (m3)
 - o Explosivos (ton)
 - o Energía (MWh)
 - o Cal (ton)
 - o Aceros de molienda (ton)
- Propiedad, planta y equipos en millones de dólares (US\$ m)

A continuación, analizaremos cada variable por separado para cada una de las operaciones mineras a analizar en esta tesis.

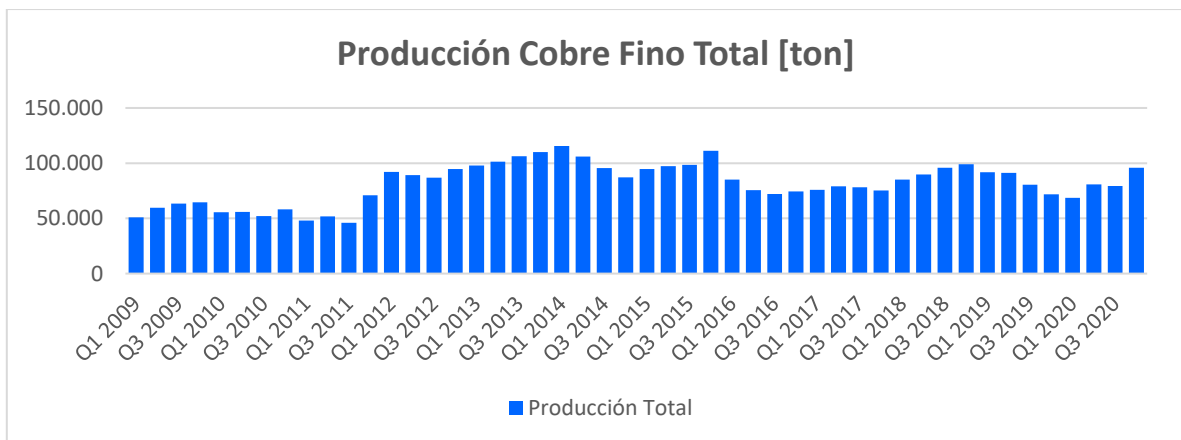
Los Bronces

La primera serie observada se refiere a la producción total de cobre fino, este es el producto de la combinación del resto de los factores mencionados anteriormente en un sistema complejo como es el proceso minero, sin embargo, este producto no es siempre fijo a igual cantidad de factores utilizados, hay una componente adicional que nos permite hacer un uso más o menos eficiente y, por lo tanto, generar más o menos producto en igualdad de factores utilizados, esto es: la productividad.

En la serie trimestral de producción de cobre fino total podemos observar un salto hacia la mitad del año 2012, el cual se produce por la puesta en marcha de una segunda planta de tratamiento de minerales en la operación, la cual prácticamente duplica la capacidad de beneficiar mineral de la operación. Este nivel de producción se mantiene relativamente constante hasta fines del año 2015, donde observamos nuevamente una caída en el nivel de producción, principalmente por una caída en las leyes de mineral tratado (factor minero-metalúrgico), combinado con menores niveles de recuperación hacia el final del período.

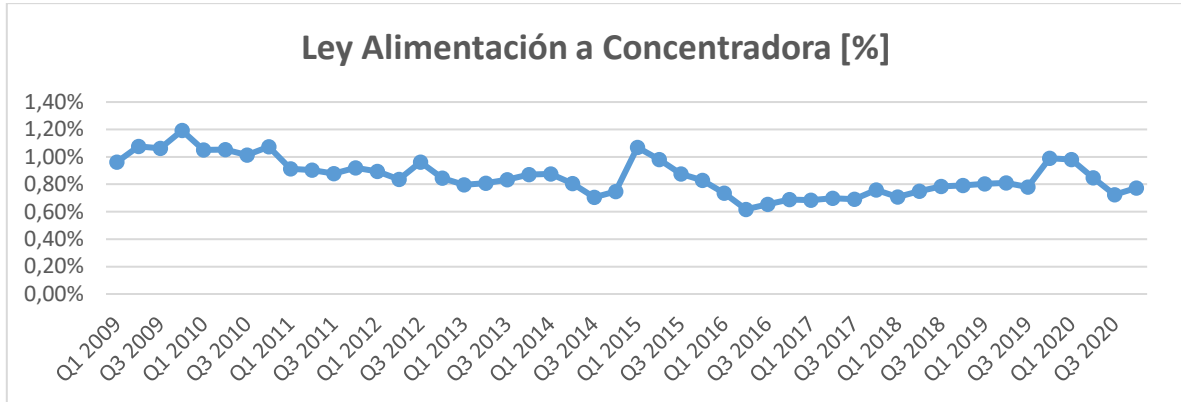
La serie más abajo muestra la producción total de cobre fino de operación Los Bronces, pero cabe destacar que, cerca del 85% de la producción de cobre fino corresponde a concentrados, obtenidos a través del proceso de concentración, mientras que sólo el 15% restante corresponde a cátodos que se obtienen a través del proceso de hidrometalurgia. Por esta razón, en los análisis nos referiremos mayormente al primer proceso, cuyo producto total cumple con la siguiente ecuación:

$$\text{Cobre Fino (ton)} = \text{Mineral Tratado (ton)} * \text{Ley de Mineral (\%)} * \text{Recuperación (\%)}$$



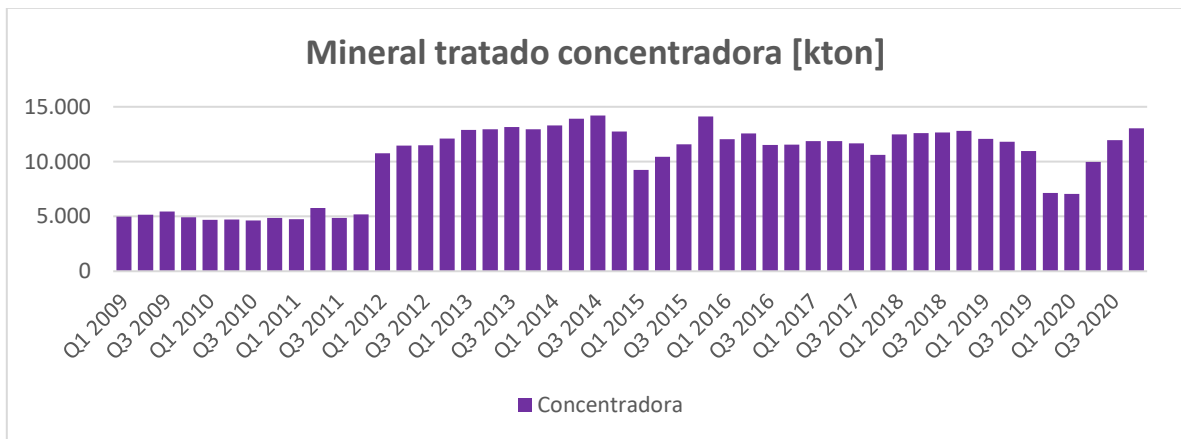
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La ley de alimentación a planta concentradora presenta una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, lo cual es esperable en un yacimiento minero, donde la calidad del recurso mineral va decreciendo a lo largo del tiempo. Se observan algunos *peaks* en la serie a principios de año 2015 y hacia el final de 2019, los cuales responden a períodos donde, producto de la mega-sequía que ha afectado a la zona central de Chile en la última década, hubo restricciones hídricas que obligaron a la operación a detener una de las dos plantas de tratamiento y, por consecuencia, elevar la ley de mineral promedio de acuerdo a la curva tonelaje-ley de las fases en operación en dichos períodos.



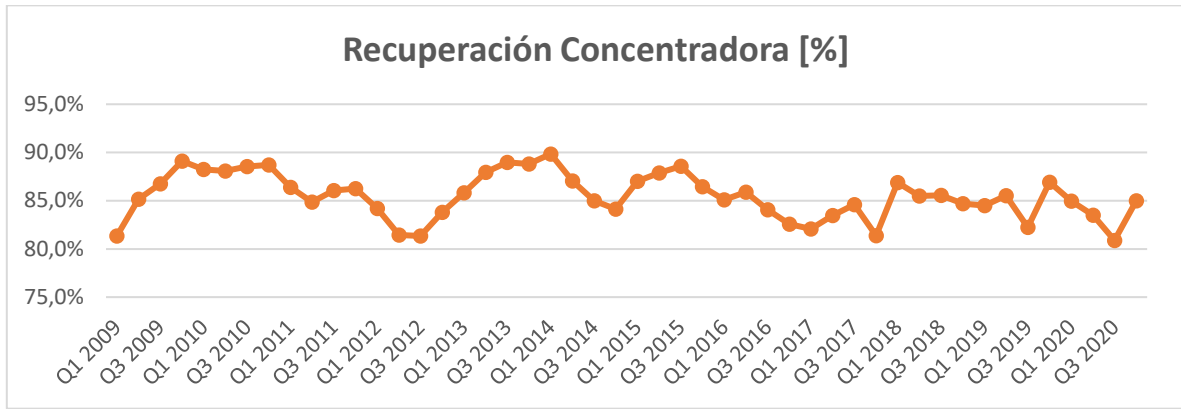
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

En la siguiente serie sobre el mineral tratado en cada trimestre, se pueden observar los hitos mencionados anteriormente sobre la puesta en marcha de la segunda planta de tratamiento, Planta Confluencia, elevando a más del doble la capacidad de tratamiento de la operación y las restricciones hídricas de los años 2015 y 2019. Vale la pena destacar que, Angloamerican, en su permanente búsqueda de optimizar sus procesos, está llevando a cabo una serie de proyectos y medidas para disminuir la dependencia de agua fresca de sus operaciones, generando una menor exposición al riesgo inminente de sequías en la zona central de Chile, además de hacer sus operaciones más sustentables.



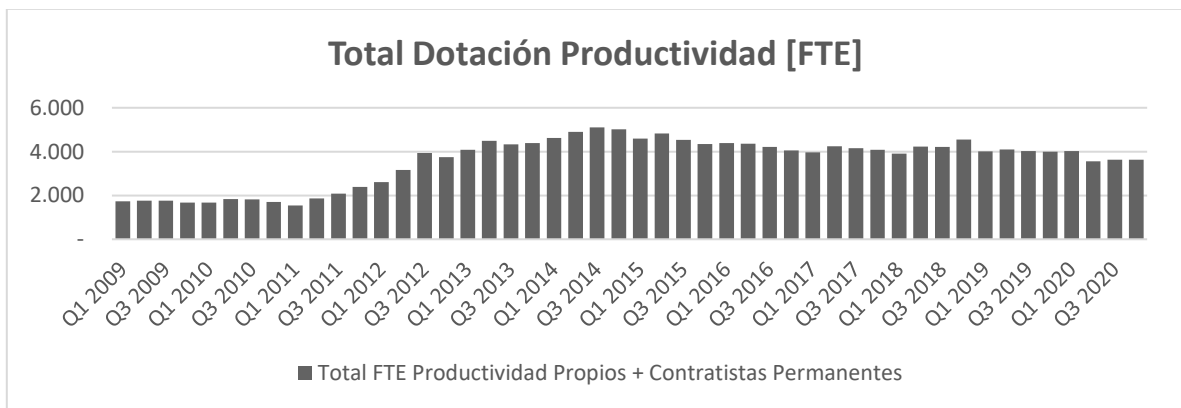
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La recuperación de la planta concentradora es una de las variables controlables de la serie que más genera o destruye valor, ya que, por cada punto porcentual de incremento de esta variable, todo lo demás constante, se genera un aumento de producción correspondiente que no genera un aumento de volumen aguas abajo, es decir, no aumenta los costos variables del proceso. Se puede observar cierta variabilidad en la serie, sin una tendencia clara, por lo que podríamos inferir que, iniciativas que apunten a estabilizar esta variable podrían tener un impacto considerable en las utilidades.



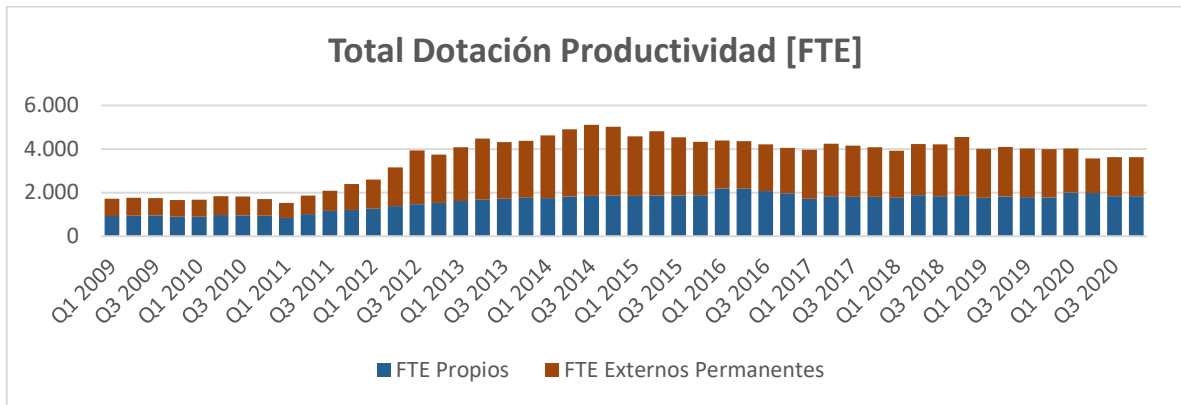
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La dotación es uno de los factores más importantes dentro del proceso productivo minero, estando concentrado en los procesos mina (perforación, carguío y transporte) y en servicios generales y de administración (alimentación, alojamiento, transporte y otras actividades de apoyo), más que en los procesos de concentración o hidrometalurgia. En términos de costos, la dotación propia en operación Los Bronces alcanza cerca del 20% de los costos totales de operación y, adicionando la mano de obra de contratistas, se estima que puede llegar a valores cercanos al 30% de los costos totales de la operación. La dotación que se muestra a continuación considera a trabajadores propios y contratistas permanentes. Es decir, se excluye la dotación contratista de proyectos, por no aportar directamente a la producción en la operación, y a los contratistas esporádicos, que corresponden en su mayoría a la mano de obra que ingresa a la operación para mantenencias o tareas específicas. Tanto la dotación propia como la de terceros se mide en FTE (*full time employee*), donde un FTE corresponde a 180 horas trabajadas por mes. En la serie se puede observar el incremento de dotación que impuso la entrada en operación de la segunda planta en el año 2012, la cual generó un incremento en los procesos: mina, para poder llegar a una extracción tal que permita el incremento de alimentación de mineral requerido por el proceso, para la operación de la segunda planta; y servicios, para poder sostener el aumento de personal en el resto de los procesos (transporte, campamentos, etc).



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

En el siguiente gráfico se muestra se separa la dotación total en dotación propia y contratista, donde se puede observar que, sobre todo en los últimos períodos la relación es casi 1:1.



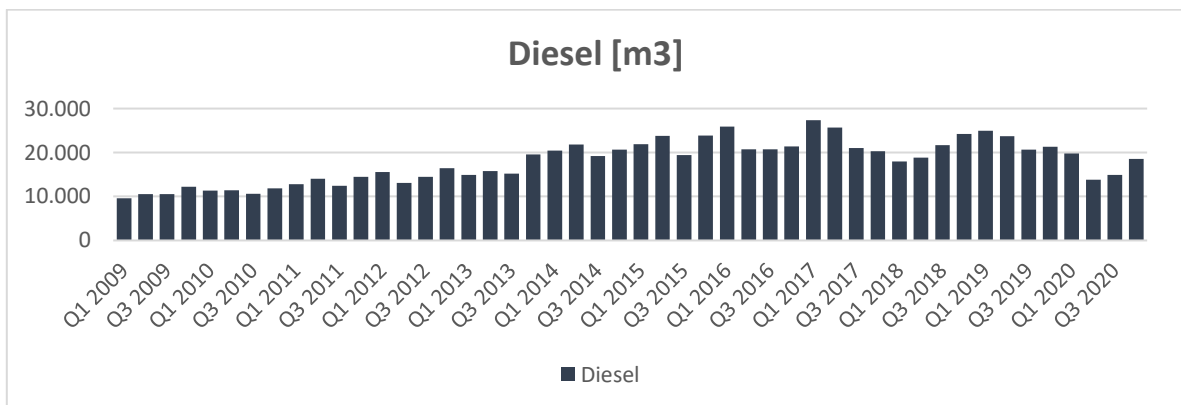
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

A continuación, mostraremos la evolución de los siguientes insumos para el período escogido:

- Diesel (m3)
- Explosivos (ton)
- Energía (MWh)
- Cal (ton)
- Aceros de molienda (ton)

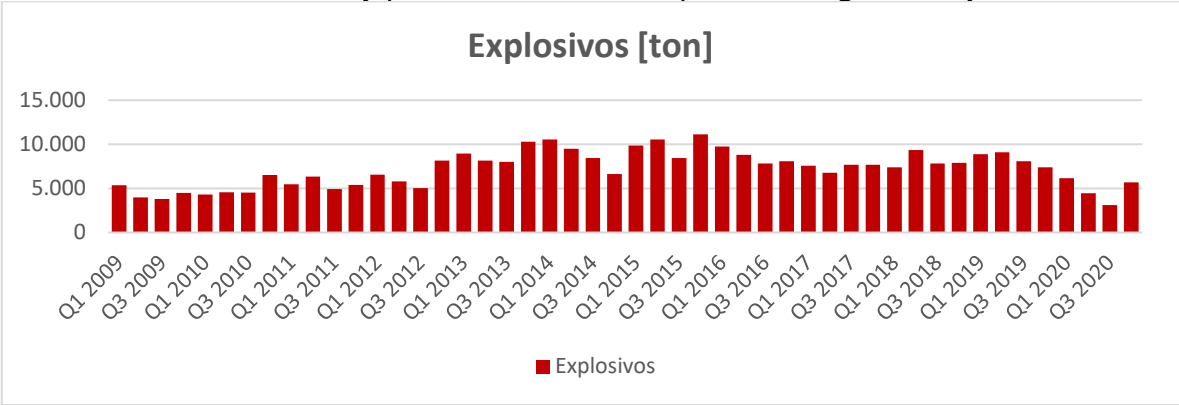
Hemos escogido estos insumos, y no otros, ya que en su conjunto representan alrededor del 30% del gasto operacional de Los Bronces. Así, en conjunto con la dotación, ya estamos considerando alrededor del 60% del costo operacional de esta operación minera. Otros insumos con menor participación dentro del costo operacional para una operación minera son, por ejemplo: lubricantes, revestimientos, ácido sulfúrico, reactivos, neumáticos y otros repuestos.

El diésel es utilizado principalmente en la mina dentro del proceso de transporte, su uso eficiente es muy relevante, ya que, junto con la energía, representa casi la totalidad de las emisiones de CO2 de una operación minera.



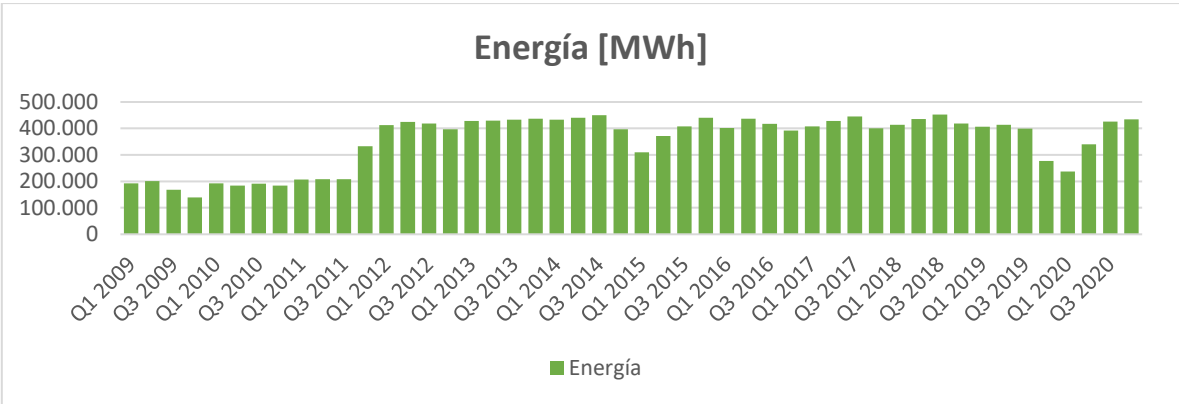
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

Los explosivos son utilizados en el proceso de tronadura, la cual permite generar un producto que los procesos siguientes, carguío y transporte, puedan llevar a las plantas de tratamiento. Un proceso de perforación y tronadura eficiente es relevante, ya que las características del producto generado, principalmente su granulometría, afectan directamente a la eficiencia y productividad de los procesos aguas abajo.



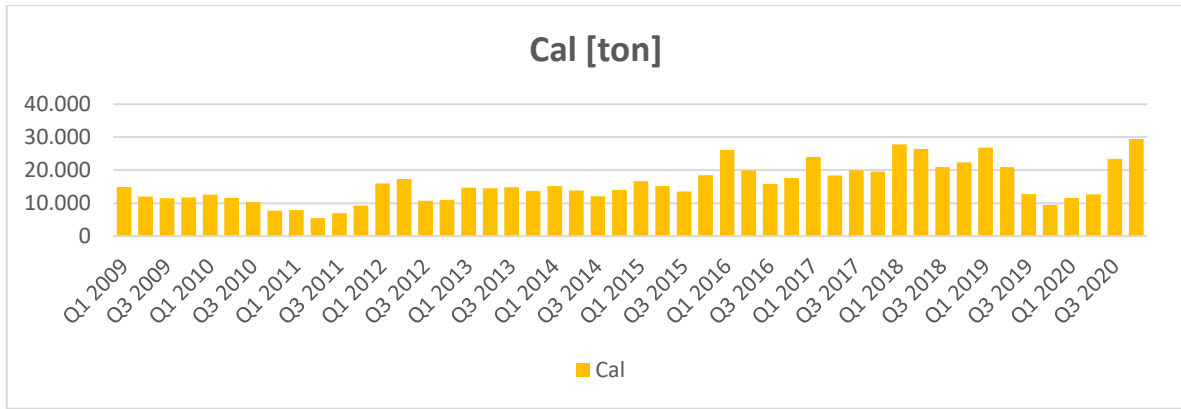
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La energía eléctrica es utilizada principalmente en las plantas de tratamiento, en la concentradora en los procesos de chancado y molienda y, en la hidrometalurgia, en el subproceso de electro-obtención. La eficiencia en el uso de este insumo es relevante, no sólo por ser un componente relevante de la canasta de costos, sino que además porque, junto con el diésel, representa casi la totalidad de las emisiones de CO2 de una operación minera. Cabe destacar que las operaciones operadas por Angloamerican tienen un contrato de energía 100% renovable que comenzó a operar en enero del año 2021, por lo que el foco hacia la meta cero emisiones está puesto ahora en el proceso mina.



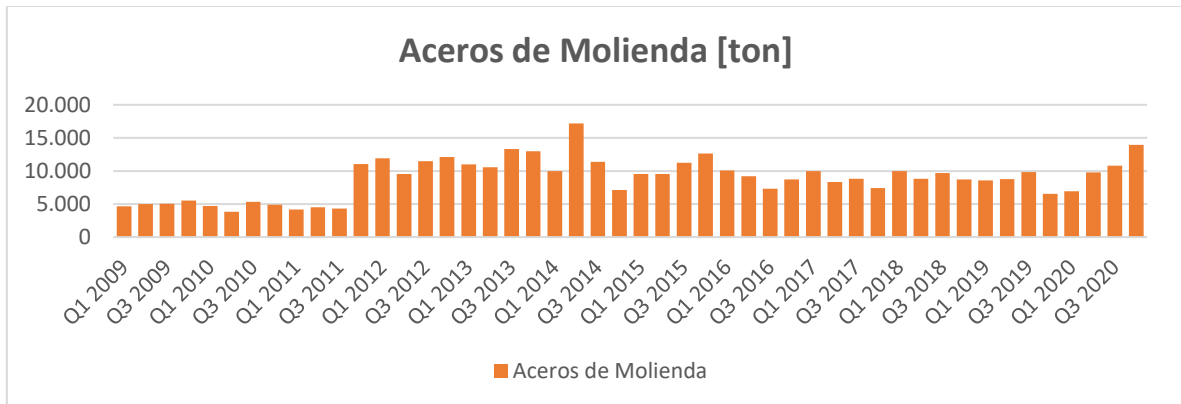
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La cal es utilizada en el proceso de concentración principalmente para la obtención de un pH de agua adecuado para la operación de las plantas:



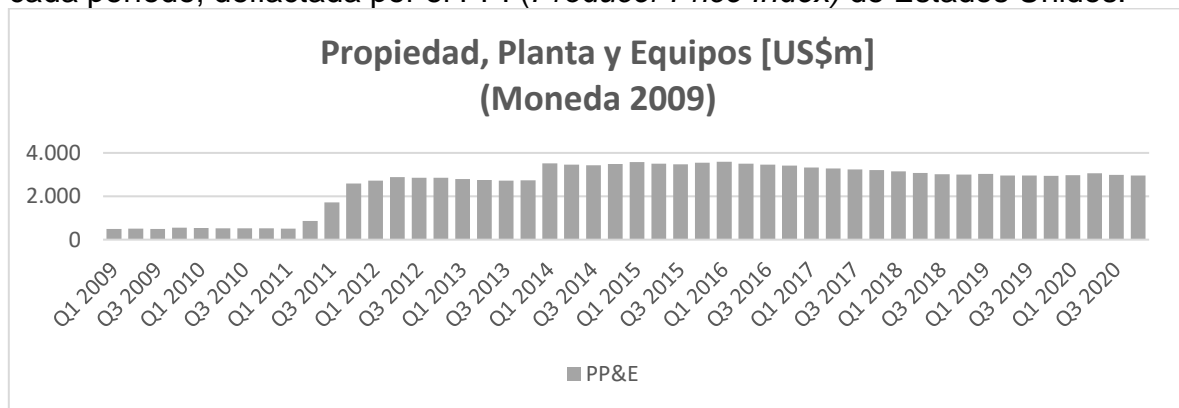
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

Los aceros de molienda se utilizan en la planta de concentración para los procesos de chancado y molienda, en el siguiente gráfico se observa un salto en el año 2012, por la entrada en operación de la segunda planta, para luego mantenerse relativamente estable durante el período observado:



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

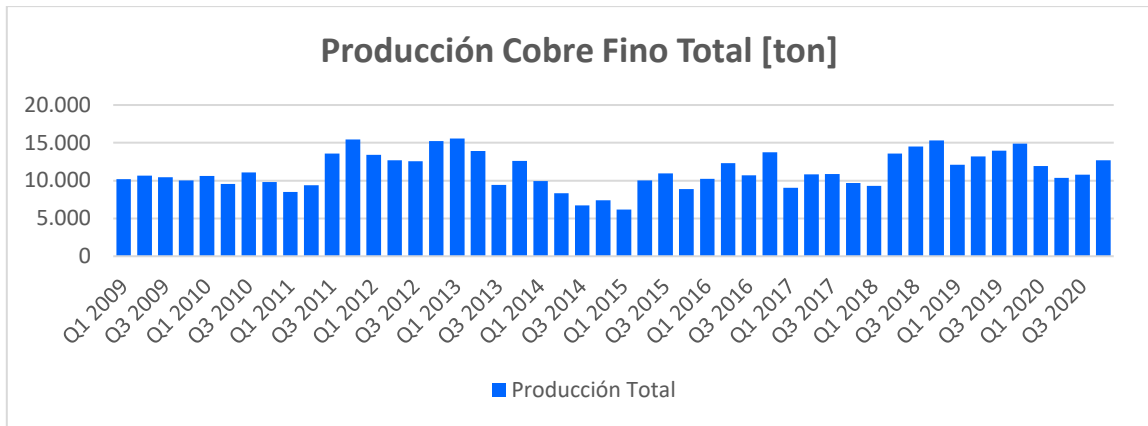
La variable que se utiliza para aproximar el stock de capital físico utilizado en la operación es el monto correspondiente a la cuenta de balance de propiedad, planta y equipos en cada período, deflactada por el PPI (*Producer Price Index*) de Estados Unidos.



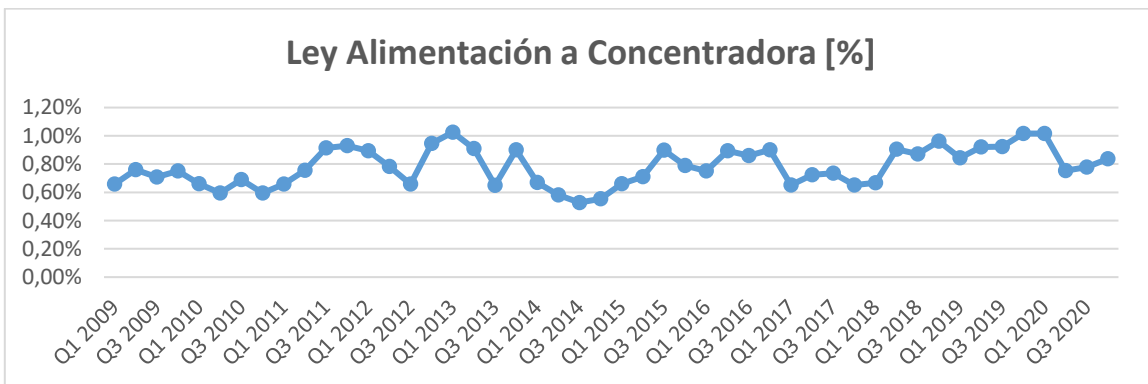
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

El Soldado

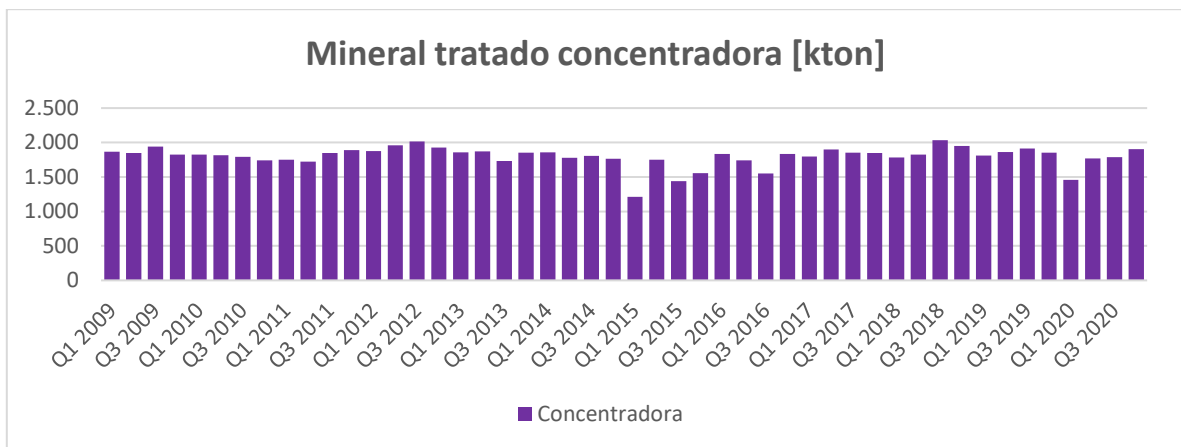
A continuación, se presentan gráficos descriptivos de las principales variables utilizadas para la operación El Soldado. Las cuales no se describirán con el detalle de la operación anterior, ya que su importancia dentro del proceso minero fue presentada en la sección anterior.



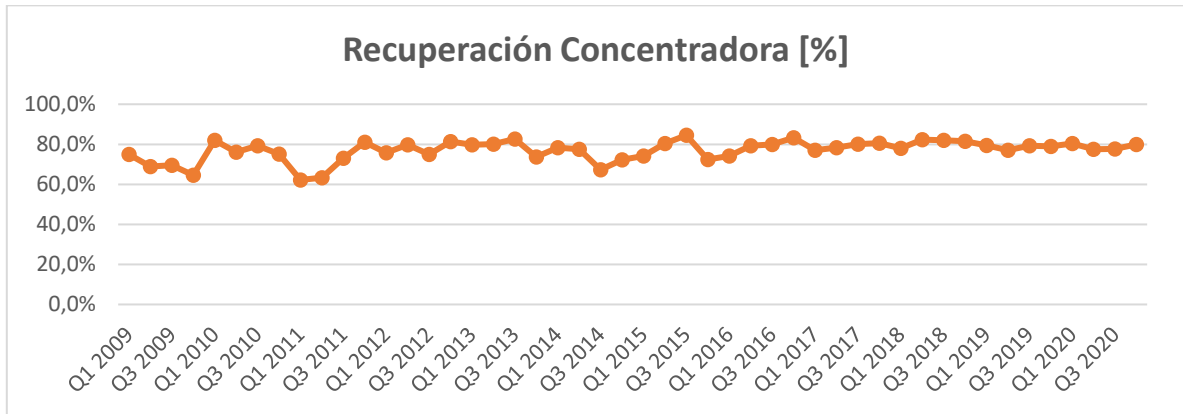
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



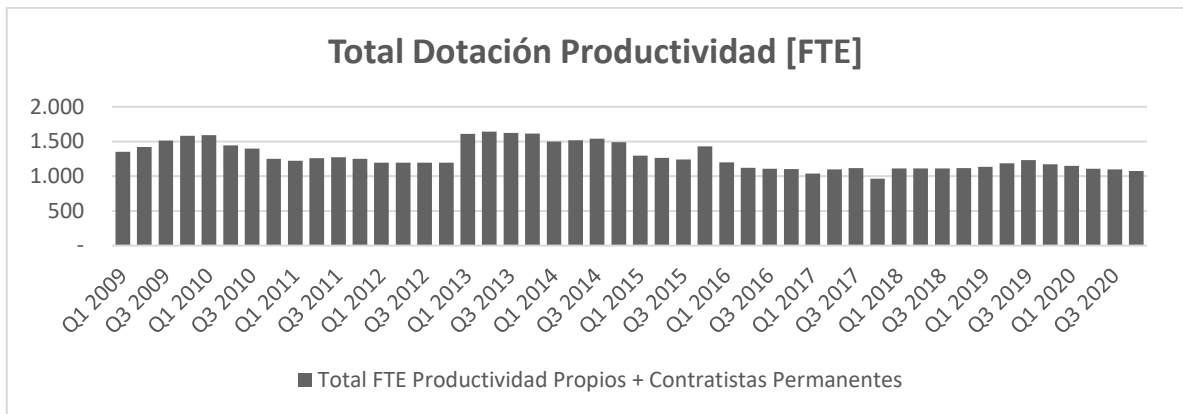
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



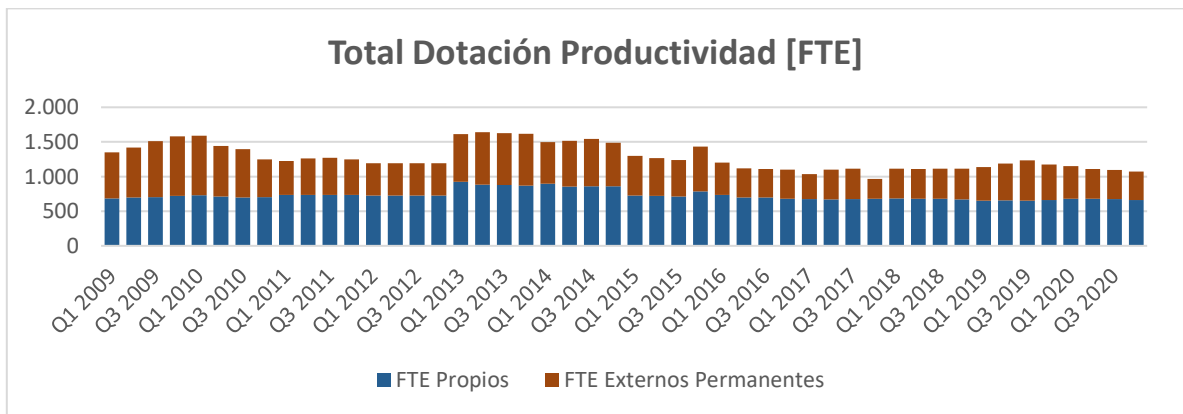
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



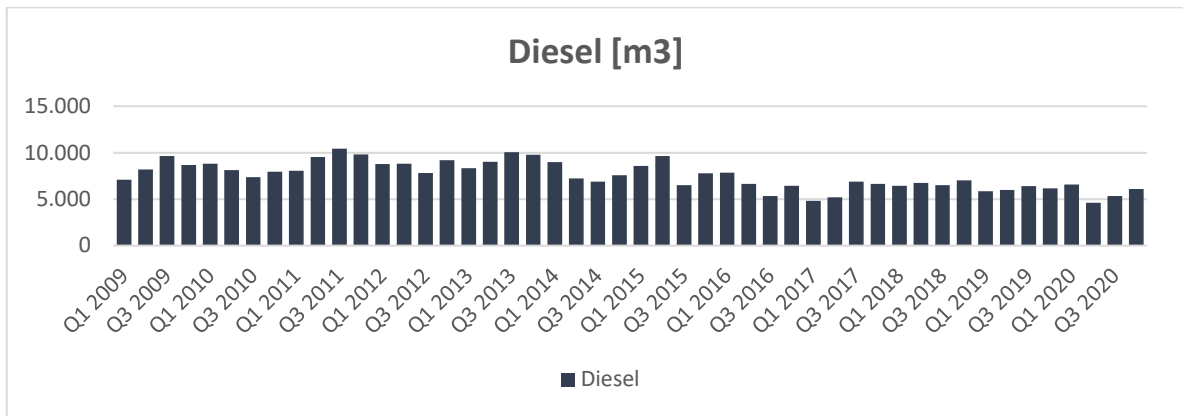
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



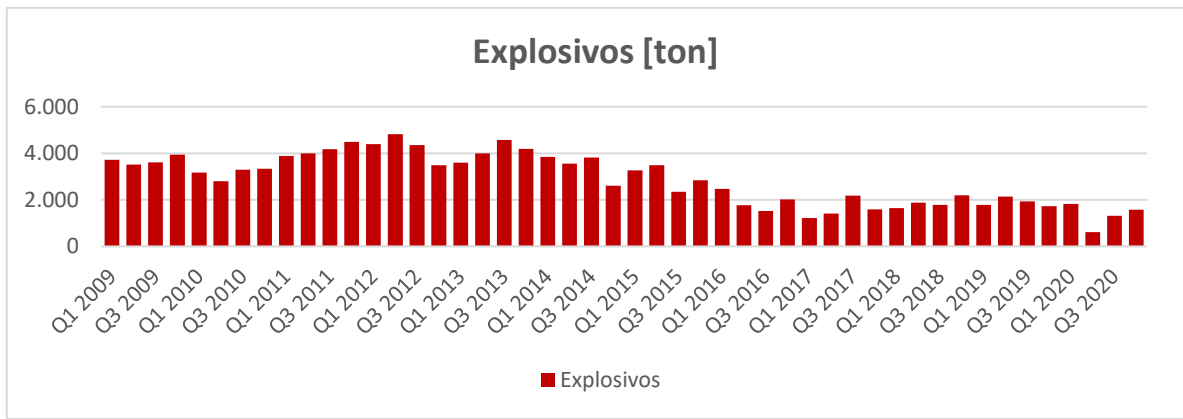
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



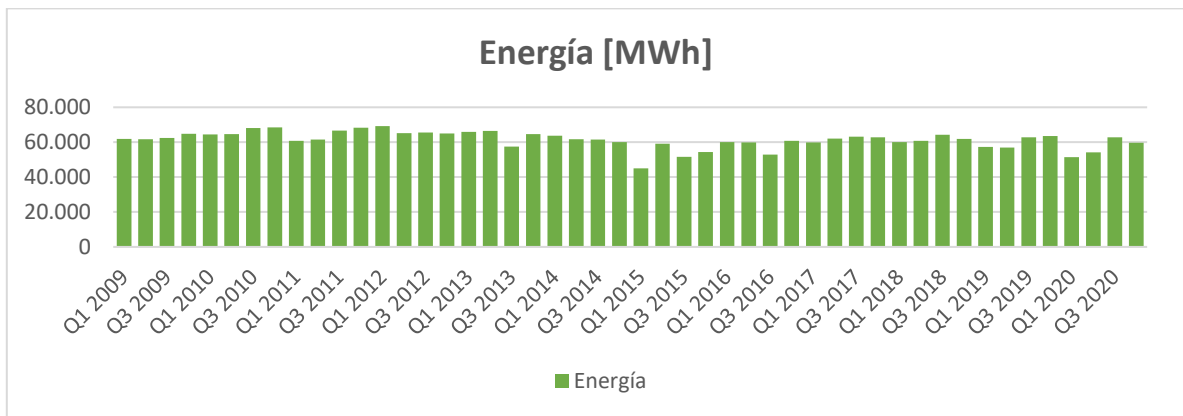
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



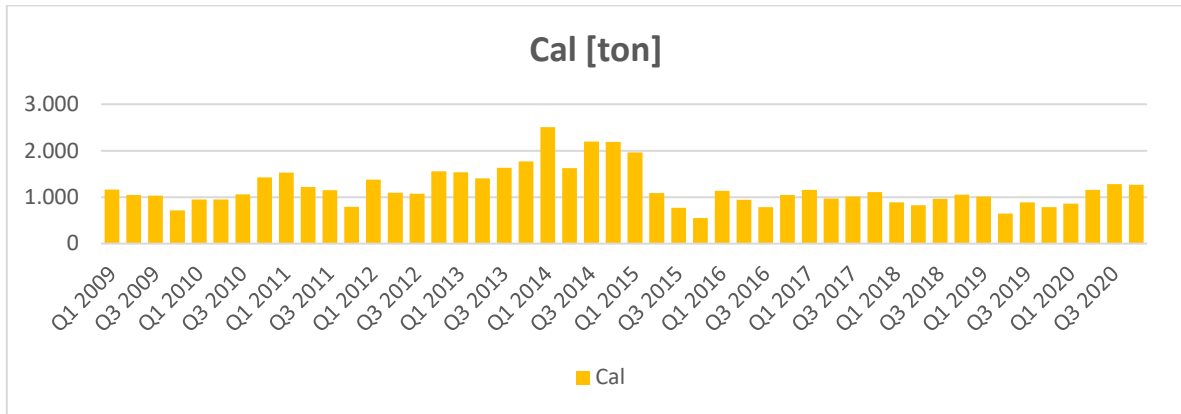
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



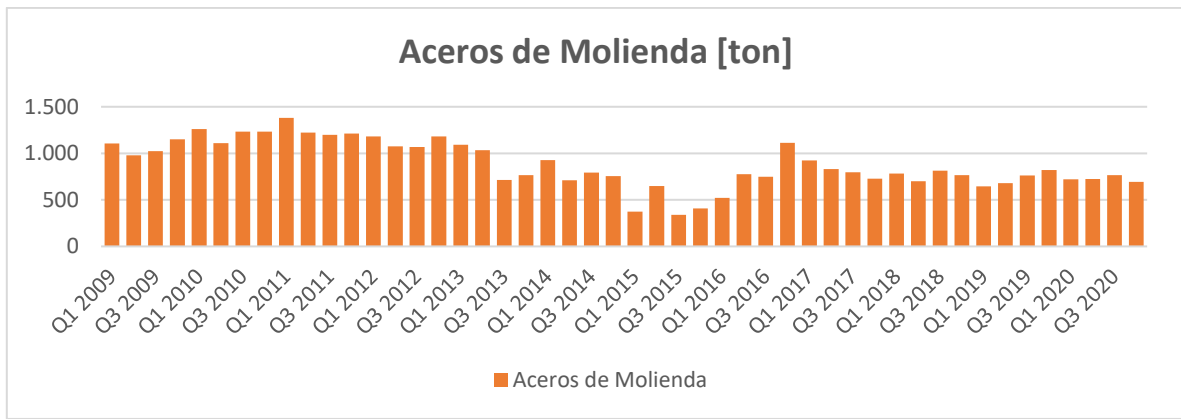
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

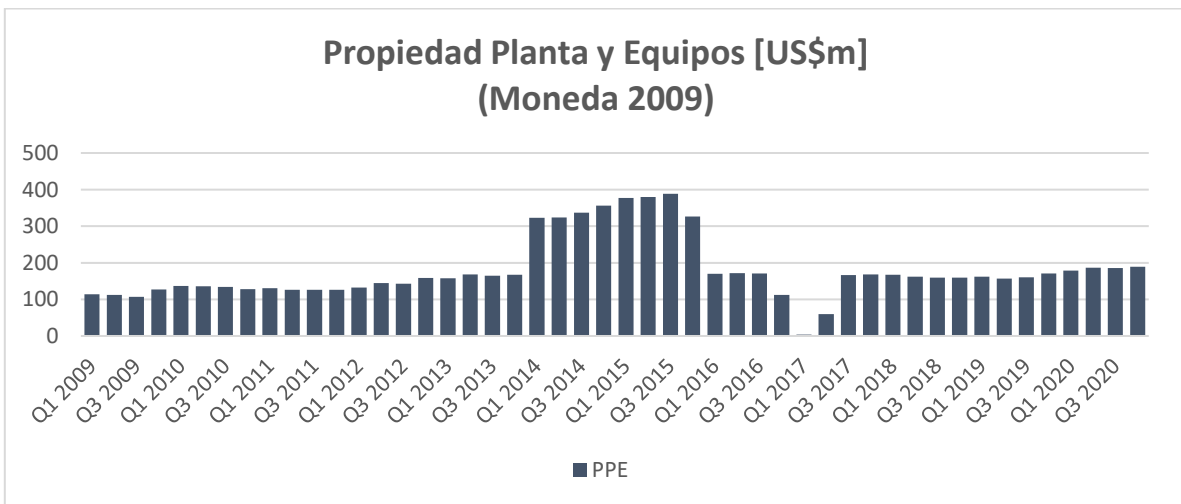


Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La variable que utilizamos como *proxy* del stock físico de capital, propiedad planta y equipos en millones de dólares, al ser una variable no física, sino contable, toma valores cercanos a cero en 2017 producto de un castigo (provisión de *impairment*) que sufrió el valor de la operación en dicho período.



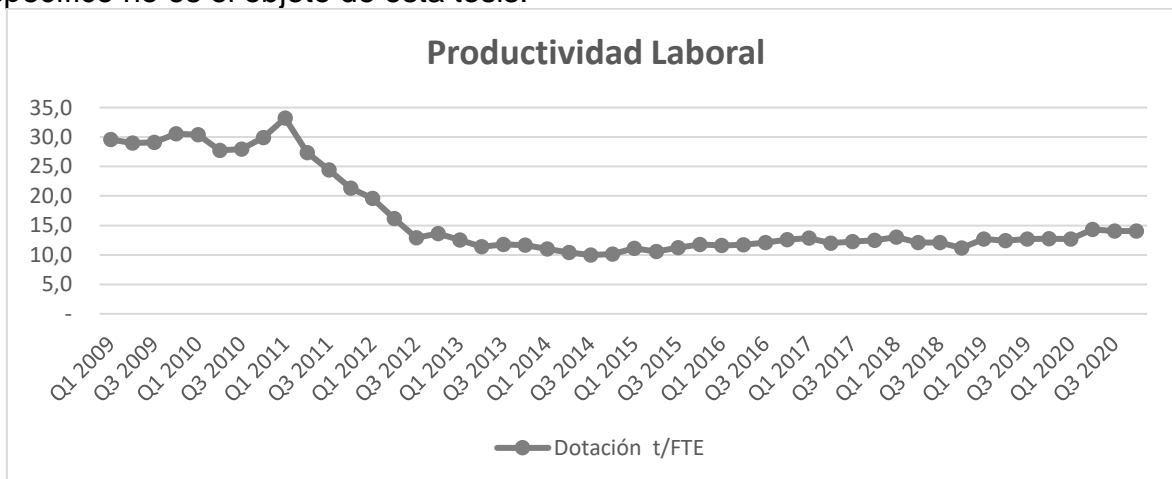
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

5.2 Tendencias de cuocientes – Mediciones tradicionales

Para introducir los resultados, comenzaremos analizando la productividad parcial de cada uno de los factores productivos, la cual se define como el total de cada factor utilizado para lograr una unidad de producción, en nuestro caso, medida como toneladas de cobre fino. Este tipo de medición es en el cual se basan la mayoría de los estudios de productividad destacados en el capítulo 4 de este documento y la cual queremos contrastar con el cálculo de la productividad factorial propiamente tal, para así analizar el valor añadido que este tipo de medición podría otorgar a las discusiones estratégicas. A continuación, se presentan gráficos descriptivos sobre la evolución de la productividad parcial de los factores anteriormente mencionados para cada una de las operaciones mineras a analizar.

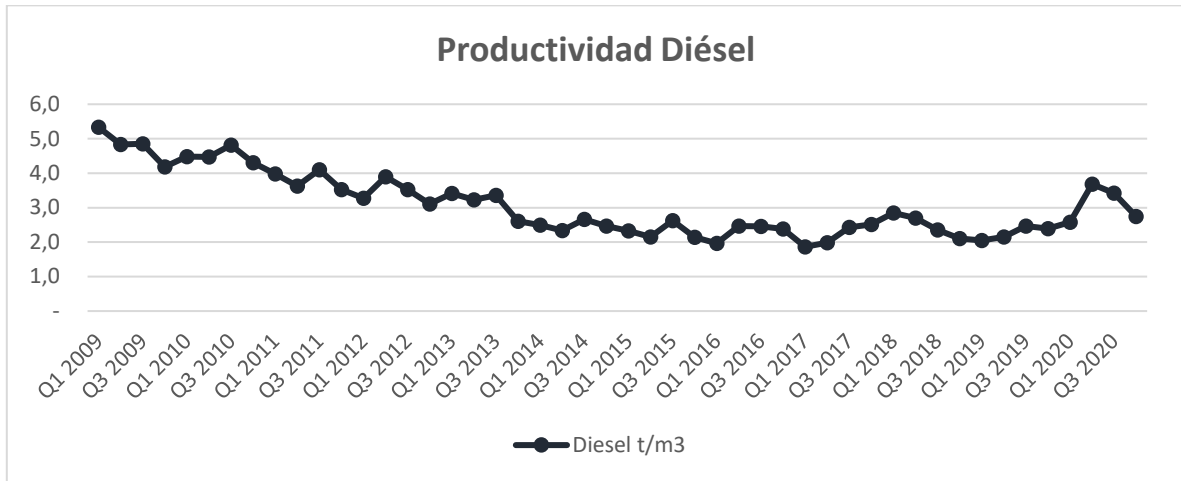
Los Bronces

La productividad laboral, medida como toneladas de cobre fino generadas por cada FTE, muestra una clara caída hacia final del año 2011, para luego mantenerse relativamente estable durante el resto del período con una pequeña tendencia al alza hacia el final. Reconocemos que esta medida de productividad puede estar influenciada por factores minero-metalúrgicos como leyes de mineral, los cuales intentaremos aislar en la siguiente sección. Es importante mencionar que existen también otras medidas de productividad más específicas donde podríamos indagar en cada la evolución de la productividad de cada proceso como toneladas movida por FTE para la mina o toneladas tratadas por FTE para la planta, sobre las cuales no profundizaremos, ya que la productividad laboral en específico no es el objeto de esta tesis.



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

El producto obtenido por cada metro cúbico de diésel muestra una clara tendencia a la baja, tendiendo a estabilizarse hacia el final del período. Esto podría explicarse también por la caída en las leyes de mineral o aumento en las distancias de transporte de mineral a planta a medida que se va profundizando en el rajo, que se ven reflejadas en mayores horas operativas de los camiones de extracción:



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



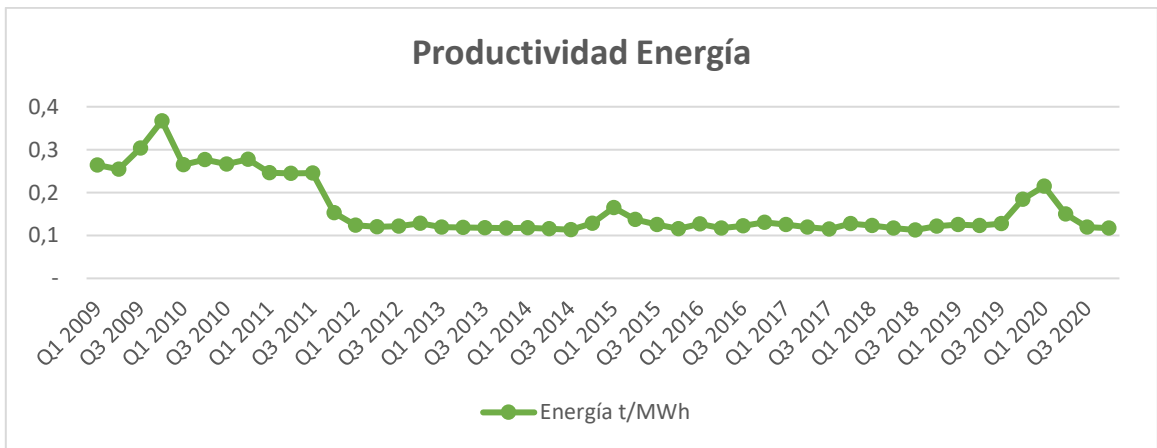
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

La productividad parcial por tonelada de explosivos también muestra una tendencia a la baja, tendiendo a estabilizarse hacia el final del período, con un *peak* observado en Q2 y Q3 de 2020 donde, producto del Covid-19 que tuvo impacto en la cantidad de mano de obra disponible en la mina producto de las medidas de distanciamiento social aplicadas, se priorizó la extracción desde fases de mineral, las que aportan directamente a la producción actual de cobre fino, más que de desarrollo, las cuales son una inversión para la producción futura:

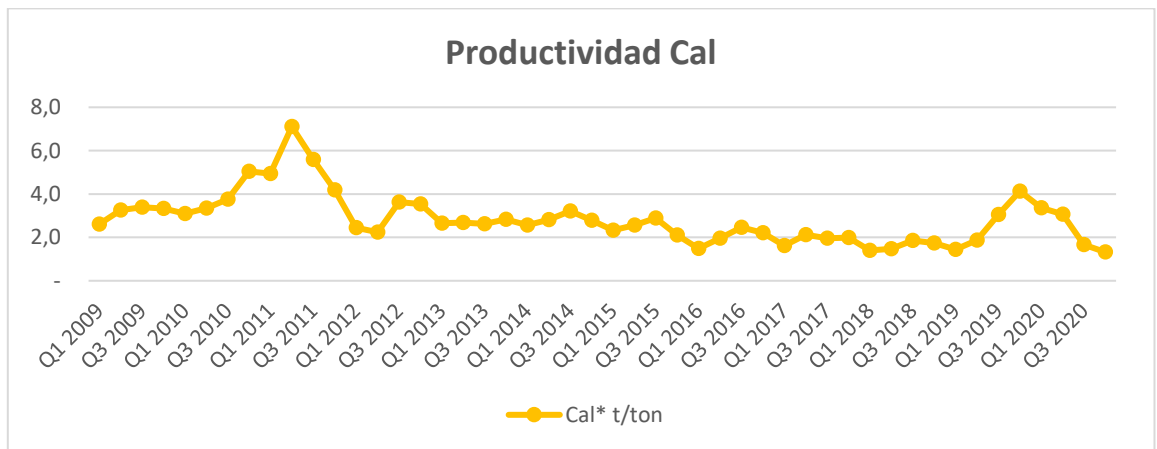


Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

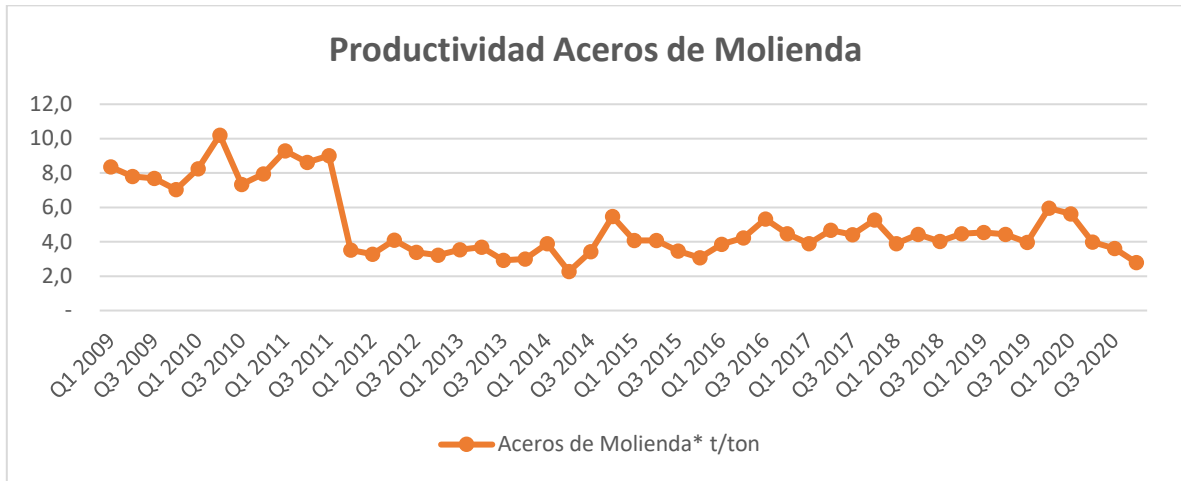
El producto obtenido por cada unidad de energía, al igual que la productividad laboral, muestra una clara caída en el año 2012, para luego mantenerse relativamente estable el resto del período, lo mismo ocurre con el resto de los insumos específicos para la planta concentradora como los aceros de molienda y la cal:



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

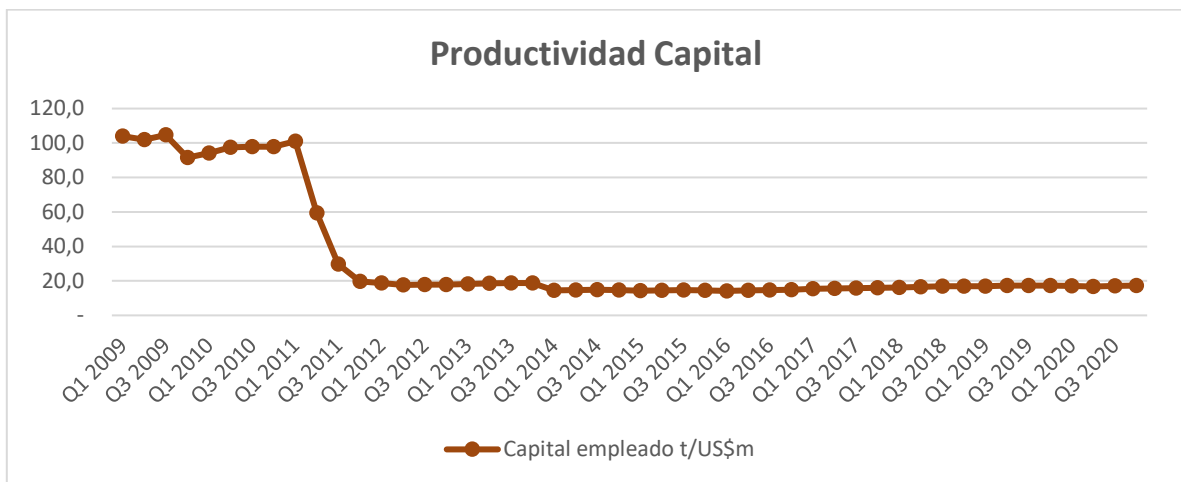


Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

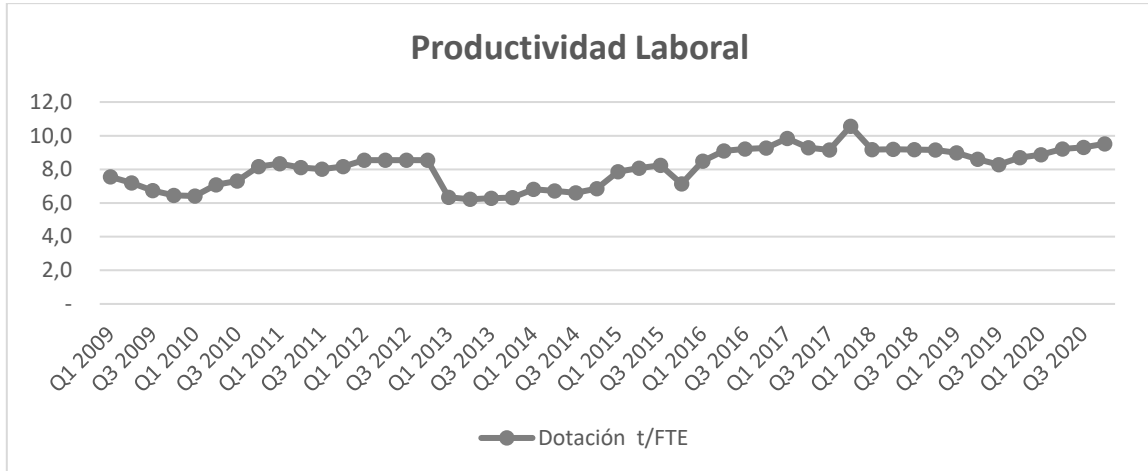
El producto obtenido por capital empleado muestra una fuerte tendencia a la baja a partir del inicio de la serie, lo cual es consecuente con el comienzo de la ejecución del proyecto, aumento de obras en curso, del proyecto de expansión para poner en operación la segunda planta de tratamiento de concentrados. A partir del año 2012, la productividad parcial del capital empleado se mantiene estable por el resto del período:



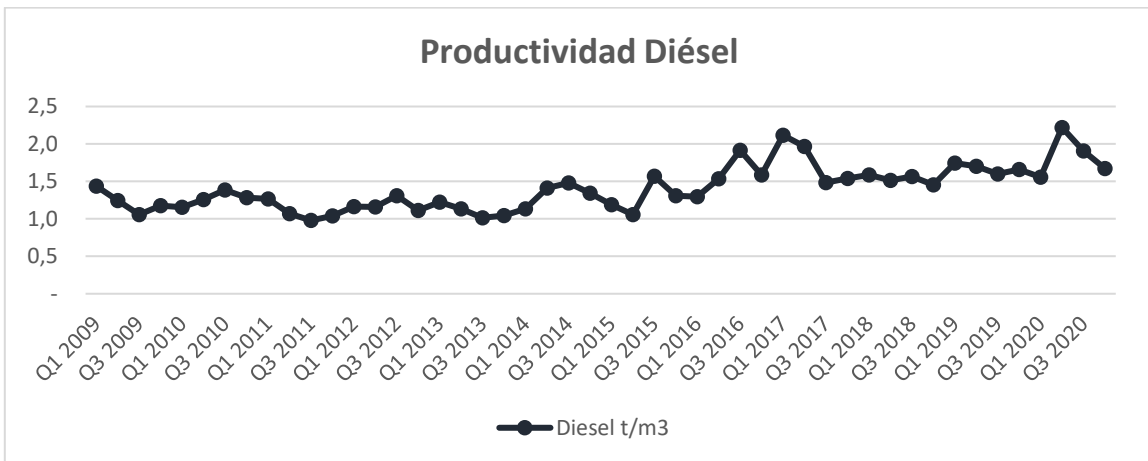
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

Lo observado anteriormente en los gráficos de productividades parciales, sobre todo de los insumos que están más relacionados directamente con las plantas concentradoras no dejan de plantear algunas interrogantes. Se observa una notoria caída en el año 2012, cuando entra en operación la segunda planta de tratamiento en la operación, proyecto que aumenta a más del doble la capacidad de tratamiento de la operación, algunas de las interrogantes son, mirando hacia el pasado y, como lección aprendida, ¿por qué no se logran capturar economías de escala al aumentar la capacidad de producción? Con una mirada más hacia futuro, ¿no convendría ajustar la operación para operar solamente con una planta de tratamiento (la más productiva)? Sobre todo, en escenarios de precios bajos. ¿qué efectos tendría esto sobre la rentabilidad del activo?

El Soldado



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



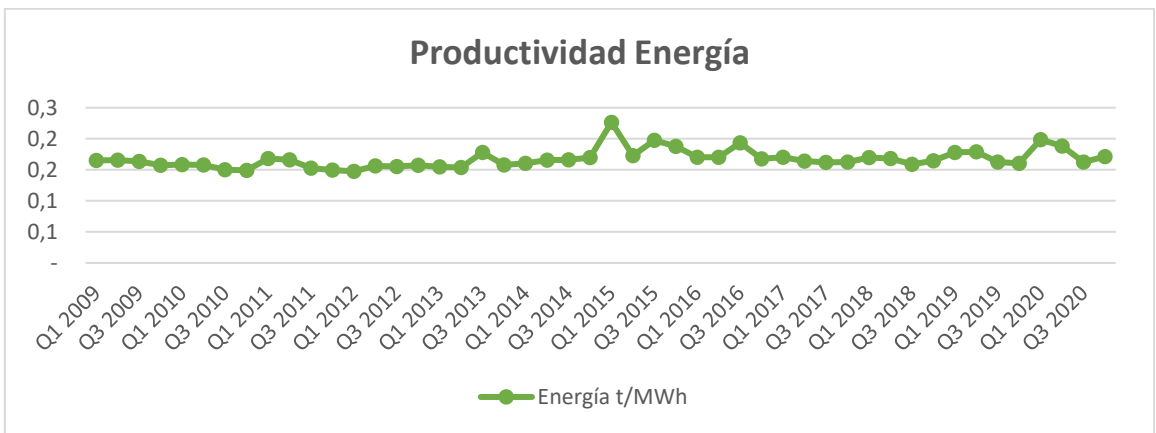
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



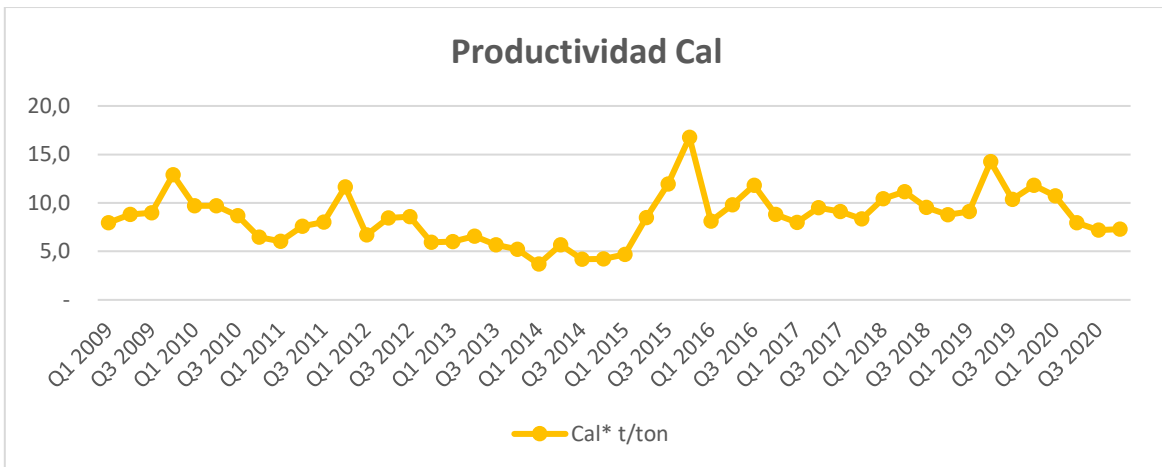
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



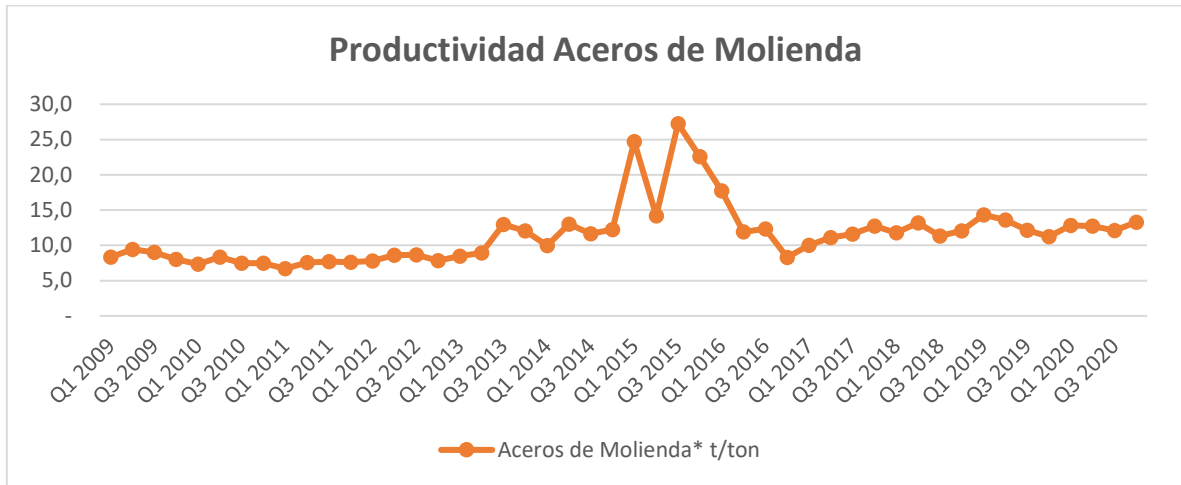
Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

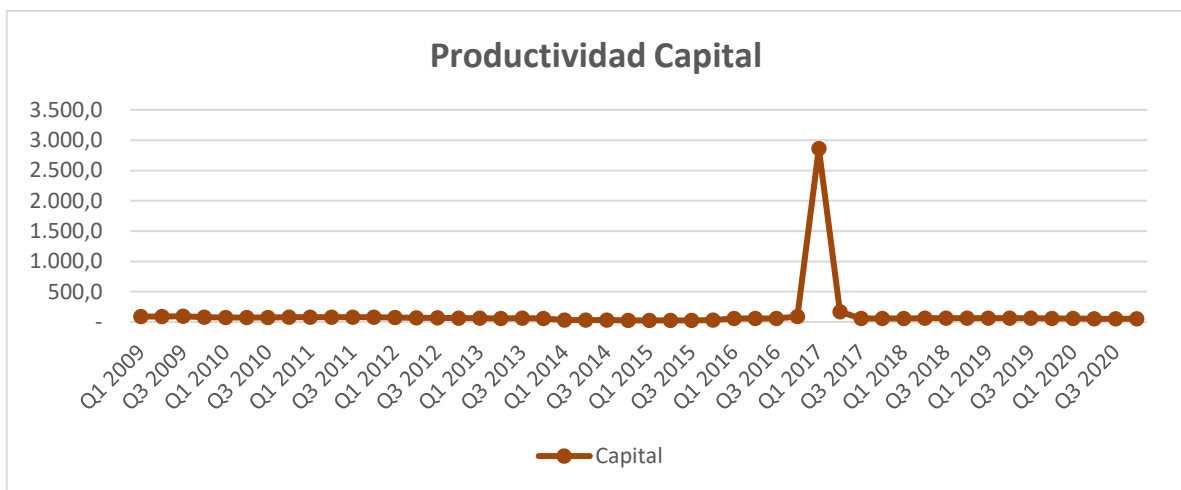


Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

El *peak* de productividad de capital que se observa en el año 2017 en el siguiente gráfico, obedece al efecto del castigo contable mencionado en la sección anterior y no a un incremento real de productividad:



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

5.3 Presentación de la productividad factorial propiamente tal

Finalmente, llegamos a la parte medular de esta tesis, donde nuestro objetivo es proponer e implementar una metodología para calcular la productividad total de factores para las operaciones mencionadas anteriormente, las cuales analizaremos de manera separada, comentando los hallazgos.

Los Bronces

Para operación Los Bronces, proponemos una metodología de cálculo de la productividad factorial a partir de una función de producción de la siguiente forma:

$$\text{Log}(Y) = \text{log}(A) + \beta_1 * \text{log}(\text{ENERGIA}) + \beta_2 * \text{log}(\text{ACEROS}) + \beta_3 * \text{log}(\text{CAL}) + \beta_4 * \text{log}(\text{ACIDO}) + \beta_5 * \text{log}(\text{FTE}) + \beta_6 * \text{log}(\text{K}) + \beta_7 * \text{log}(\text{ORE_TREATED}) + \beta_8 * \text{log}(\text{R}) + \beta_9 * \text{log}(\text{REC}) + \beta_{10} * \text{log}(\text{G}) + \varepsilon$$

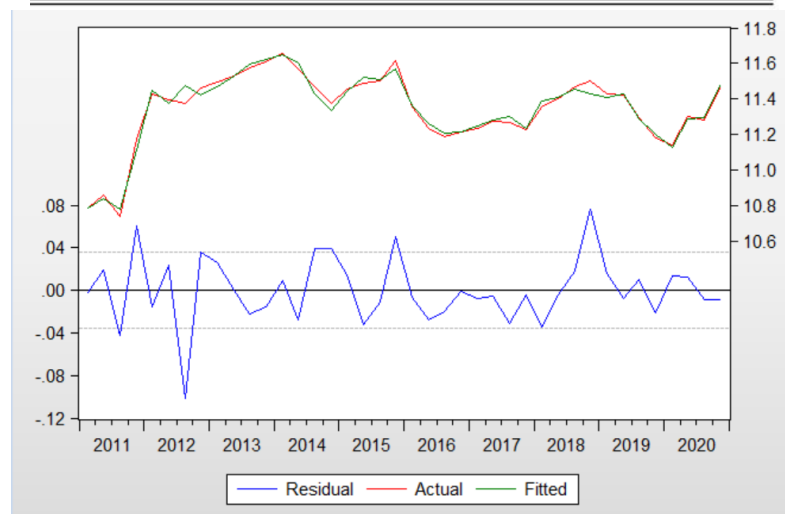
Donde la variable de mineral tratado corresponde al mineral tratado en la planta concentradora por ser el concentrado de cobre el producto principal de esta operación (~90%). Es importante destacar también que la variable representativa del stock de capital físico corresponde al concepto de Propiedad, Planta y Equipos dentro de los activos fijos deflactado por el PPI (*Producer Price Index*) de Estados Unidos y con un rezago de 8 períodos trimestrales (~2 años).

Así, obtenemos un modelo con las siguientes características:

Dependent Variable: LOG(PROD)
 Method: Least Squares
 Date: 02/27/21 Time: 16:56
 Sample (adjusted): 2011Q1 2020Q4
 Included observations: 40 after adjustments
 White heteroskedasticity-consistent standard errors & covariance

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	5.248065	0.586466	8.948619	0.0000
LOG(ENERG)	0.366600	0.098065	3.738345	0.0008
LOG(ACEROS)	0.072703	0.035436	2.051689	0.0490
LOG(CAL)	0.026357	0.023484	1.122335	0.2706
LOG(ACIDO)	0.021874	0.011080	1.974174	0.0576
LOG(FTE)	0.057499	0.048480	1.186046	0.2449
LOG(PPE_DEF(-8))	0.017244	0.015639	1.102577	0.2790
LOG(ORE_TREATED)	0.392108	0.104042	3.768738	0.0007
LOG(LEY)	0.776071	0.086958	8.924623	0.0000
LOG(REC)	1.367260	0.318123	4.297896	0.0002

R-squared	0.977375	Mean dependent var	11.34449
Adjusted R-squared	0.970587	S.D. dependent var	0.208275
S.E. of regression	0.035720	Akaike info criterion	-3.613922
Sum squared resid	0.038276	Schwarz criterion	-3.191702
Log likelihood	82.27844	Hannan-Quinn criter.	-3.461261
F-statistic	143.9953	Durbin-Watson stat	2.332941
Prob(F-statistic)	0.000000		



Adicionalmente, comprobamos que los residuos de este modelo fueran bien comportados, es decir, que cumplan con los criterios de no autocorrelación, lo cual podemos observar en el siguiente gráfico donde tanto los criterios de autocorrelación y correlación parcial se encuentran dentro del rango aceptable:

Date: 02/27/21 Time: 16:58
Sample: 2011Q1 2020Q4
Included observations: 40

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.167	-0.167	1.2084	0.272
		2	-0.038	-0.068	1.2728	0.529
		3	-0.310	-0.339	5.6346	0.131
		4	0.238	0.132	8.2730	0.082
		5	-0.032	-0.023	8.3235	0.139
		6	-0.091	-0.196	8.7354	0.189
		7	0.100	0.210	9.2411	0.236
		8	-0.133	-0.217	10.173	0.253
		9	-0.155	-0.324	11.468	0.245
		10	-0.205	-0.178	13.827	0.181
		11	0.226	-0.081	16.786	0.114
		12	0.119	0.013	17.633	0.127
		13	-0.172	-0.240	19.479	0.109
		14	-0.140	-0.226	20.737	0.109
		15	0.125	0.017	21.794	0.113
		16	0.196	-0.041	24.486	0.079
		17	0.038	0.057	24.590	0.104
		18	0.013	0.033	24.603	0.136
		19	-0.058	-0.228	24.870	0.165
		20	0.005	0.034	24.872	0.206

Por último, realizamos el test de heterocedasticidad de White, para verificar que los residuos cumplan con el criterio de homocedasticidad, en el cual se obtiene un valor de observaciones por R cuadrado de 12.36, el cual es significativo al contrastarlo con un Chi-cuadrado con 9 grados de libertad (<0.05), por lo que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad de los residuos:

Heteroskedasticity Test: White

F-statistic	1.490672	Prob. F(9,30)	0.1965
Obs*R-squared	12.36045	Prob. Chi-Square(9)	0.1937
Scaled explained SS	12.98959	Prob. Chi-Square(9)	0.1631

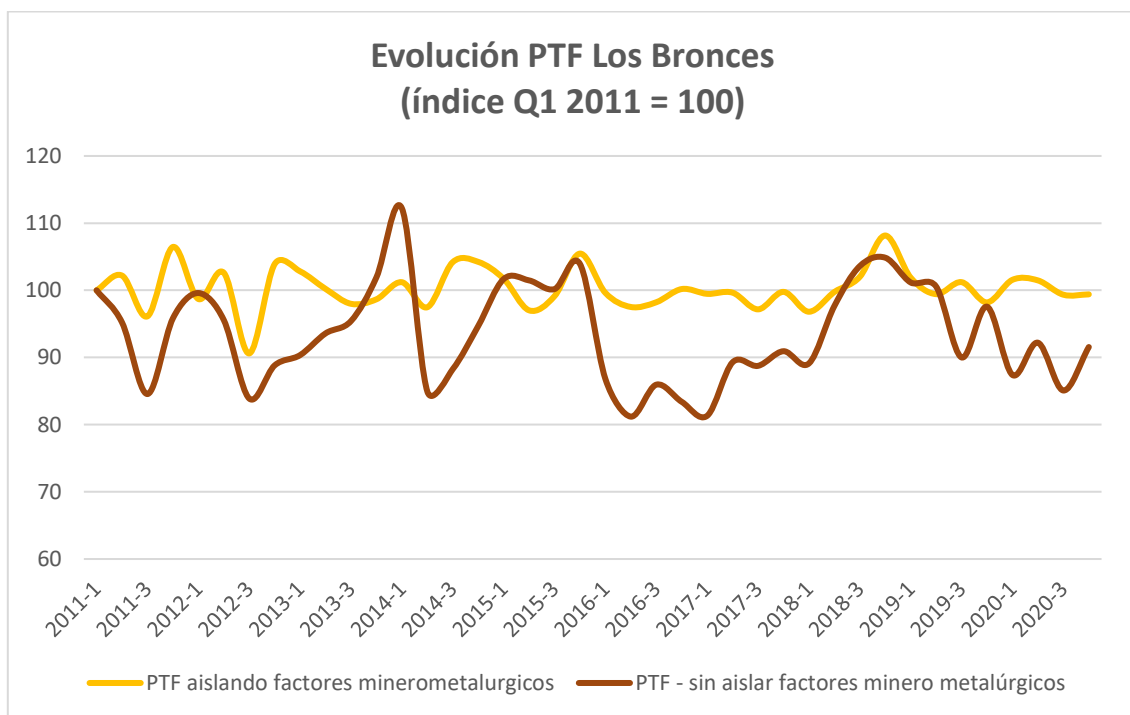
Test Equation:
Dependent Variable: RESID^2
Method: Least Squares
Date: 02/27/21 Time: 16:57
Sample: 2011Q1 2020Q4
Included observations: 40

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.010446	0.014191	-0.736096	0.4674
(LOG(ENERG))^2	0.000208	0.000180	1.156939	0.2564
(LOG(ACEROS))^2	6.15E-06	0.000108	0.056790	0.9551
(LOG(CAL))^2	-3.54E-05	7.30E-05	-0.484652	0.6314
(LOG(ACIDO))^2	-4.42E-05	4.36E-05	-1.013643	0.3189
(LOG(FTE))^2	0.000160	0.000189	0.844830	0.4049
(LOG(PPE_DEF(-8)))^2	-0.000107	6.35E-05	-1.679244	0.1035
(LOG(ORE_TREATED))^2	-0.000183	0.000182	-1.006359	0.3223
(LOG(LEY))^2	-0.000323	0.000400	-0.806967	0.4260
(LOG(REC))^2	0.053422	0.037915	1.408989	0.1691
R-squared	0.309011	Mean dependent var		0.000957
Adjusted R-squared	0.101715	S.D. dependent var		0.001873
S.E. of regression	0.001775	Akaike info criterion		-9.617195
Sum squared resid	9.46E-05	Schwarz criterion		-9.194975
Log likelihood	202.3439	Hannan-Quinn criter.		-9.464533
F-statistic	1.490672	Durbin-Watson stat		2.385285
Prob(F-statistic)	0.196530			

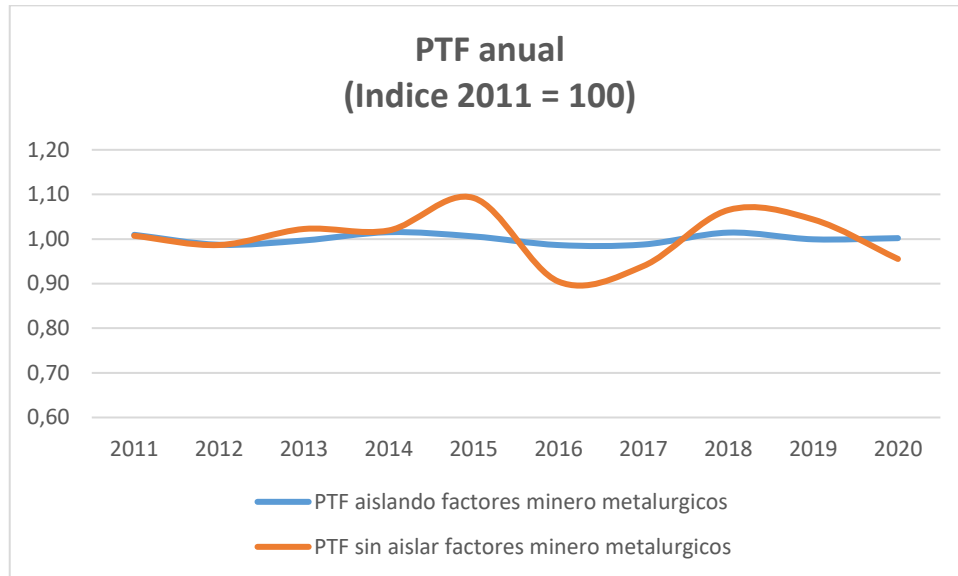
Procedemos a realizar el cálculo de la productividad total de factores tanto aislando como sin aislar los factores minero-metalúrgicos, donde los resultados son interesantes de analizar en comparación a las productividades parciales.

Primero que nada, podemos observar que la PTF sin aislar factores minero-metalúrgicos tiene una alta volatilidad y sigue una leve tendencia a la baja en el período analizado, en concordancia con la tendencia de las productividades parciales. Sin embargo, al incorporar los factores de relación estéril mineral, ley y recuperación la tendencia es menos clara mostrando una tendencia estable, con menor variabilidad, para luego, comenzar una tendencia al alza a partir de Q4 2019, lo cual sugiere que durante el período analizado sí se han realizado fructíferos esfuerzos de gestión para hacer frente a las características minero-metalúrgicas no controlables propias del yacimiento.

De aquí proviene la importancia de analizar la productividad del proceso productivo minero en su totalidad como lo que es, un sistema complejo, y no de manera aislada factor a factor, ya que, si bien esta información puede ser útil para compararnos en algún ítem en específico, cuando ya hayamos determinado que esa es el área clave a mejorar, la productividad total de factores nos permite analizar el sistema completo y dejar de lado por un momento la mirada del trabajo en silos.



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican

Lo interesante de este indicador es que nos ayuda ,además, a determinar el efecto de la gestión en el uso de los recursos, al aislar factores no controlables como la ley y la razón estéril mineral que son inherentes a la naturaleza del recurso y que no es tan fácil aislar al utilizar productividades parciales, por lo cual podría ser de gran utilidad para medir el éxito de programas de mejora que se instalen en la organización, así como también parte fundamental de los programas de incentivos para poder darles una mirada más integral del negocio.

El Soldado

Para operación El Soldado, proponemos una metodología de cálculo de la productividad factorial a partir de una función de producción de la siguiente forma:

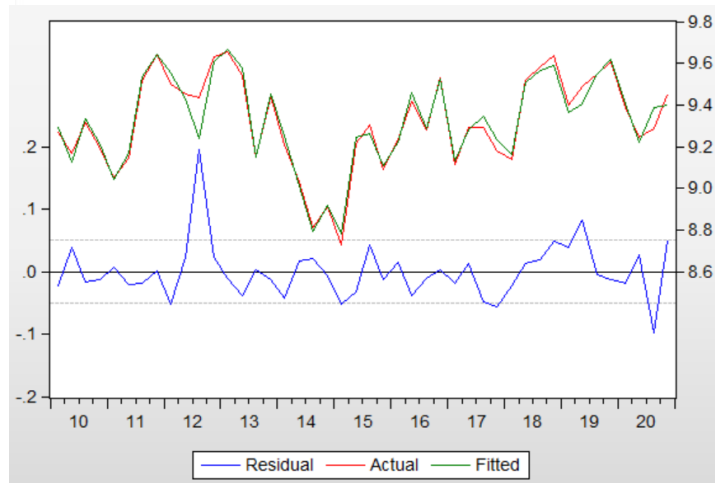
$$\text{Log}(Y) = \text{log}(A) + \beta_1 * \text{log}(\text{ENERGIA}) + \beta_2 * \text{log}(\text{HH_CAEX}) + \beta_3 * \text{log}(\text{ACEROS}) + \beta_4 * \text{log}(K) + \beta_5 * \text{log}(R) + \beta_6 * \text{log}(REC) + \beta_7 * \text{log}(G) + \text{SUBTE} + \varepsilon$$

Este modelo contiene dos variables para el apoyo de la estimación econométrica, la primera son las horas operativas de los camiones de extracción en la mina (HH_CAEX) y una variable *dummy* (SUBTE). La primera variable la estamos introduciendo en el modelo como *proxy* del número de trabajadores bajo el entendido de que la mina es el proceso que más mano de obra utiliza, cuyo efecto se ve amplificado también en servicios al personal (alimentación, alojamiento, transporte), mientras que la variable *dummy* indica los períodos en que la mina subterránea de esta operación estuvo activa, la cual dejó de operar en el último trimestre del año 2010. Es importante destacar también que la variable representativa del stock de capital físico corresponde al capital empleado deflactado por el PPI (*Producer Price Index*) de Estados Unidos y con un rezago de 4 períodos trimestrales (~1 año).

Con todo lo anterior, obtenemos un modelo con las siguientes características, donde todos los estadísticos son significativos:

Dependent Variable: LOG(PROD)
 Method: Least Squares
 Date: 03/06/21 Time: 19:49
 Sample (adjusted): 2010Q1 2020Q4
 Included observations: 44 after adjustments
 White heteroskedasticity-consistent standard errors & covariance

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.995207	1.493139	0.666520	0.5094
LOG(ENERG)	1.047436	0.118083	8.870337	0.0000
LOG(ACEROS)	0.047649	0.023341	2.041437	0.0488
LOG(HH_CAEX)	0.060534	0.039519	1.531763	0.1346
LOG(PPE_DEF(-4))	0.008198	0.006759	1.212837	0.2333
LOG(LEY)	0.810420	0.068446	11.84027	0.0000
LOG(REC)	0.808859	0.092888	8.707912	0.0000
LOG(REM)	-0.041860	0.012128	-3.451536	0.0015
SUBTE	0.005512	0.027340	0.201609	0.8414
R-squared	0.959066	Mean dependent var	9.318778	
Adjusted R-squared	0.949710	S.D. dependent var	0.224099	
S.E. of regression	0.050255	Akaike info criterion	-2.963157	
Sum squared resid	0.088395	Schwarz criterion	-2.598209	
Log likelihood	74.18946	Hannan-Quinn criter.	-2.827817	
F-statistic	102.5046	Durbin-Watson stat	1.801058	
Prob(F-statistic)	0.000000			



Adicionalmente, comprobamos que los residuos de este modelo fueran bien comportados, es decir, que cumplan con los criterios de no autocorrelación, lo cual podemos observar en el siguiente gráfico

Date: 03/06/21 Time: 19:58
 Sample: 2010Q1 2020Q4
 Included observations: 44

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.083	0.083	0.3212	0.571
		2	-0.078	-0.085	0.6123	0.736
		3	-0.110	-0.097	1.2089	0.751
		4	-0.062	-0.053	1.4054	0.843
		5	-0.149	-0.160	2.5543	0.768
		6	-0.130	-0.134	3.4511	0.750
		7	-0.043	-0.071	3.5524	0.830
		8	0.080	0.025	3.9117	0.865
		9	0.011	-0.057	3.9183	0.917
		10	-0.107	-0.158	4.5971	0.916
		11	-0.012	-0.046	4.6055	0.949
		12	0.119	0.066	5.5075	0.939
		13	-0.021	-0.078	5.5374	0.961
		14	0.026	0.027	5.5847	0.976
		15	-0.054	-0.095	5.7897	0.983
		16	-0.071	-0.119	6.1552	0.986
		17	0.047	0.054	6.3182	0.991
		18	-0.034	-0.059	6.4097	0.994
		19	0.058	0.049	6.6850	0.996
		20	-0.172	-0.269	9.1784	0.981

Por último, realizamos el test de heterocedasticidad de White, para verificar que los residuos cumplan con el criterio de homocedasticidad, en el cual se obtiene un valor de observaciones por R cuadrado de 2,95, el cual es significativo al contrastarlo con un Chi-cuadrado con 8 grados de libertad (<0.05), por lo que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad de los residuos.

Heteroskedasticity Test: White

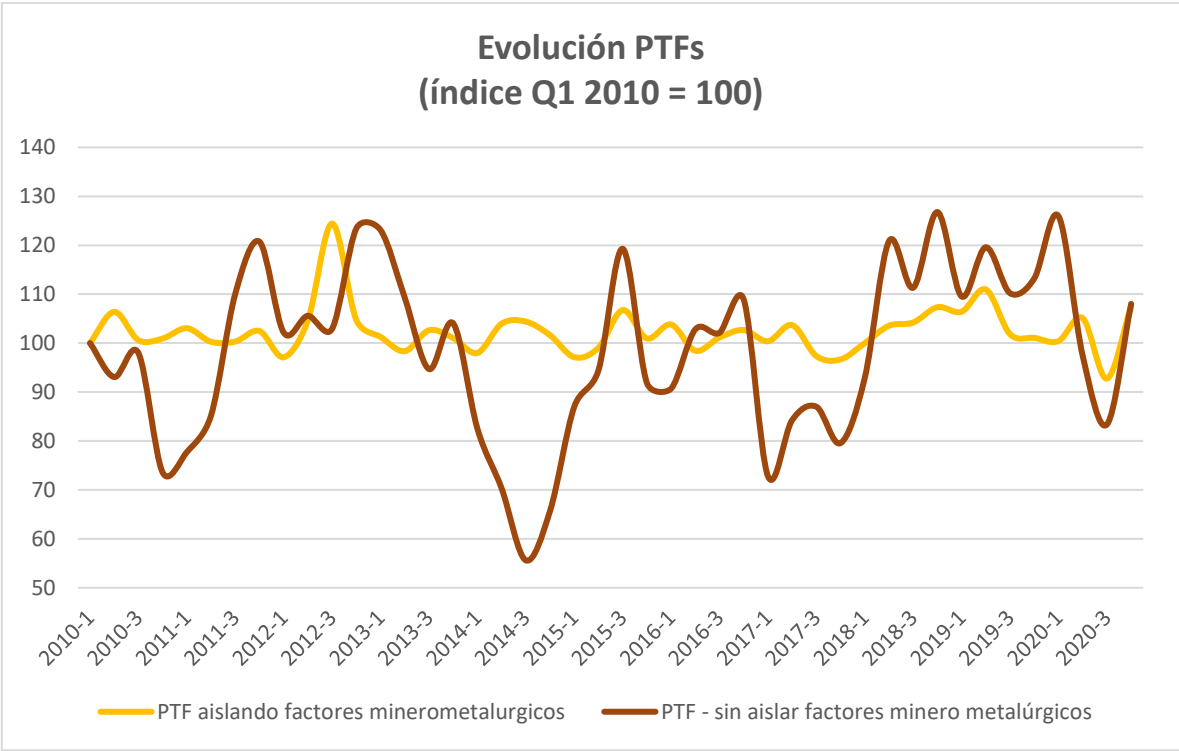
F-statistic	0.314381	Prob. F(8,35)	0.9553
Obs*R-squared	2.949805	Prob. Chi-Square(8)	0.9375
Scaled explained SS	7.855842	Prob. Chi-Square(8)	0.4477

Test Equation:
 Dependent Variable: RESID^2
 Method: Least Squares
 Date: 03/06/21 Time: 19:58
 Sample: 2010Q1 2020Q4
 Included observations: 44

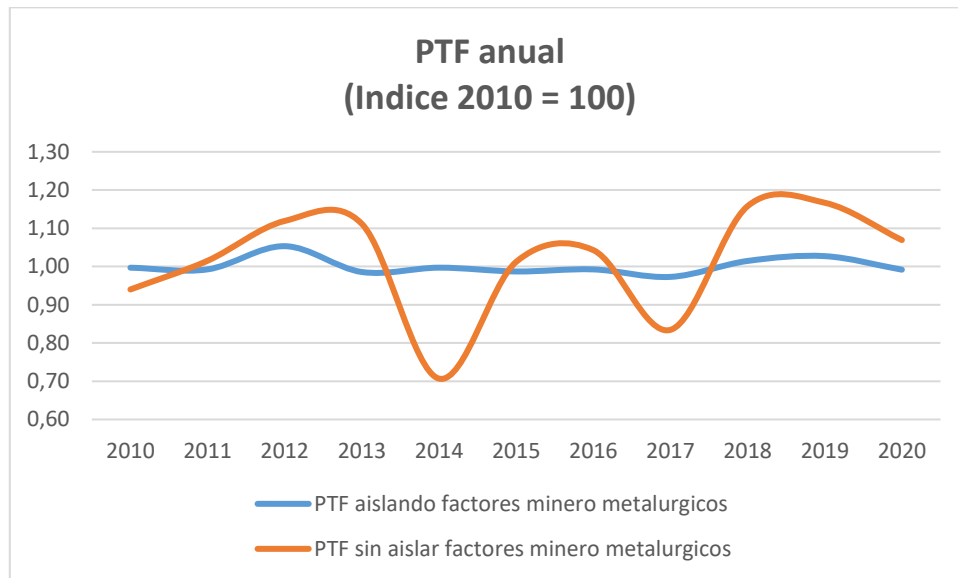
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.086811	0.099464	-0.872788	0.3887
(LOG(ENERG))^2	0.000420	0.000880	0.476899	0.6364
(LOG(ACEROS))^2	-7.84E-05	0.000422	-0.185663	0.8538
(LOG(HH_CAEX))^2	0.000180	0.000222	0.809253	0.4238
(LOG(PPE_DEF(-4)))^2	2.38E-05	0.000202	0.117820	0.9069
(LOG(LEY))^2	0.001003	0.000801	1.252473	0.2187
(LOG(REC))^2	-0.010273	0.030644	-0.335231	0.7395
(LOG(REM))^2	-0.000433	0.000490	-0.882125	0.3837
SUBTE^2	-0.002527	0.004495	-0.562026	0.5777
R-squared	0.067041	Mean dependent var		0.002009
Adjusted R-squared	-0.146207	S.D. dependent var		0.005896
S.E. of regression	0.006312	Akaike info criterion		-7.112328
Sum squared resid	0.001395	Schwarz criterion		-6.747380
Log likelihood	165.4712	Hannan-Quinn criter.		-6.976987
F-statistic	0.314381	Durbin-Watson stat		2.132374
Prob(F-statistic)	0.955332			

Procedemos a realizar el cálculo de la productividad total de factores tanto aislando como sin aislar los factores minero-metalúrgicos, donde los resultados son interesantes de analizar en comparación a las productividades parciales y a los resultados de la operación analizada anteriormente.

Primero que nada, podemos observar que la PTF sin aislar factores minero-metalúrgicos tiene una alta volatilidad sin una tendencia clara en la mayor parte del período analizado para, finalmente, mostrar una leve tendencia al alza hacia el final, en concordancia con la tendencia de las productividades parciales. Sin embargo, al incorporar los factores de relación estéril mineral, ley y recuperación la volatilidad disminuye considerablemente en comparación, además de presentar una tendencia relativamente estable a lo largo de todo el período.



Fuente: elaboración propia con datos de Angloamerican



El hecho de que ambas operaciones muestren una tendencia estable en cuanto a su productividad total de factores en el período analizado no permite concluir inmediatamente que se ha dejado de lado este punto en la organización, primero que nada, la productividad total de factores se ha mantenido estable a lo largo de una década a pesar de los vaivenes del recurso natural y del mercado y, por otra parte, podríamos argumentar que ambos activos están cerca de su máximo potencial físico, en la frontera de posibilidades de producción, por lo cual se requerirían grandes cambios tecnológicos para saltar al siguiente nivel, lo cual no sería una mala noticia. Pero la determinación de dicha frontera no es objeto de este trabajo.

CAPITULO 6: CONCLUSION

6.1 Resumen histórico y mirada hacia el futuro

En los resultados observados para ambas operaciones, los factores productivos para los cuales la producción presenta una mayor elasticidad son, en ambos casos, energía, ley y recuperación, lo cual nos lleva a sugerir que iniciativas que apunten a optimizar estas variables podrían llevar a mejoras significativas en la productividad de las empresas mineras. Algunas iniciativas que está tomando la industria en esta línea son:

- **Optimizaciones de la ley del mineral alimentado a planta.** Si bien la ley de mineral de un recurso geológico es una variable no controlable por el productor y que se espera que vaya decayendo en el tiempo, aun así existen formas de optimizarla. En enero de 2019, El Soldado puso en marcha la planta Bulk Ore Sorting, proyecto de innovación que permite hacer más eficiente el proceso minero, al detectar la composición del mineral y separarlo de acuerdo a la ley de cobre, con el fin de disminuir el ingreso de material estéril a la planta y reducir así el consumo de agua y energía en el proceso. El proceso se realiza mediante un chancador primario (*sizer*) y un seleccionador móvil, el cual está compuesto de correas transportadoras y un sensor capaz de

detectar la composición del mineral y separarlo de acuerdo a la ley de cobre. La planta Bulk Ore Sorting cuenta además con analizadores de composición de material en tiempo real, que incorporan un sistema de medición de rayos gamma producidos por la absorción de neutrones en el material.

- **Iniciativas de eficiencia energética como la implementación de sistemas de gestión de la energía** en línea con la norma ISO 50001, incluyendo la capacitación de personal de primera línea para tomar mejores decisiones en este aspecto y procedimientos de medición, verificación y reporte que permitan establecer un ciclo de mejora continua del desempeño energético en la organización. Si la eficiencia energética tiene una relación directa con los niveles de productividad, entonces el cumplimiento de la Ley de Eficiencia Energética recientemente promulgada en Chile no debiera tomarse por los productores como una tarea meramente de cumplimiento, sino también como una oportunidad también para alcanzar mayores niveles de productividad.
- **Iniciativas que apunten a optimizar la recuperación en las plantas de flotación** como, por ejemplo, a través del uso de data analítica. Los procesos de planta requieren de constantes ajustes operacionales para mantener un desempeño y calidad del producto estable dada una serie de variables de entrada. Por esta razón, algunos consultores internacionales ya están trabajando con sus clientes para optimizar los procesos de planta a través de modelos prescriptivos que permiten optimizar una variedad de actividades a través de la predicción de la calidad del mineral de entrada, selección de la receta metalúrgica, y optimización de parámetros operacionales estabilizando así el producto final.
- **Centros de operaciones remotas.** Los centros de operaciones remotas que están implementando empresas como Codelco, Teck y Angloamerican, entre otras, permiten operar a distancia, ya sea desde Santiago u otro centro urbano, las principales áreas de la operación como planta y equipos mineros. Esta transformación permite coordinar mejor el trabajo de las plantas, optimizar procesos y mejorar la producción, pues el monitoreo constante permite tomar mejores decisiones y en menores plazos, además de mejorar la seguridad y calidad de vida de los trabajadores a través de menor exposición al riesgo y menores tiempos de traslado.

Otro punto que no podemos dejar de mencionar al mirar la evolución de la productividad hacia el futuro es el impacto que puedan tener mega tendencias que se vengán a partir de demandas sociales. La descarbonización, la disminución de las emisiones de carbono, demandas sociales, regulaciones más estrictas y, en general todo lo relacionado a ESG (*Environmental, Social and Governance*), sin el ánimo de emitir un juicio de valor, podría tener un impacto importante en la productividad de los distintos activos si es que no se aborda adecuadamente. Por lo que la relación que tenga cada empresa con sus comunidades se convertirá en un gran activo a la hora de mitigar los impactos.

Si bien estamos viendo en la industria una serie de iniciativas que apuntan a mejorar la productividad y la rápida adopción que éstas han tenido, sobre todo en tiempos de Covid-

19, vale la pena destacar que, al momento de terminar esta tesis, el precio del cobre sube rápidamente e inesperadamente, abriendo la pregunta de si es que este sería un nuevo súper ciclo y, en caso de que lo fuera, si es que volveríamos a observar los comportamientos del súper ciclo anterior, donde se presencié un menor énfasis relativo en cuanto a la productividad dando prioridad al volumen de producción.



Fuente: elaboración propia con datos de Cochilco

Al respecto, vale recordar algunas de las lecciones aprendidas del último super ciclo, que fueron publicadas en el libro *“Mining for Value: Industry Leaders disclose Lessons Learned from the supercycle”* editado por CESCO, junto con Spencer Stuart, sobre todo las relacionadas a no perder de vista la productividad en tiempos de bonanza:

- **Más grande no siempre es mejor.** Las compañías, en muchos casos, pagaron mucho por activos que no fueron capaces de rentar en forma adecuada cuando el mercado cambió. Este frenesí para incrementar la producción a cualquier costo mermó la rentabilidad, incrementó los niveles de deuda y puso a muchas firmas en graves dificultades financieras.

“La búsqueda del gigantismo fue vista como la respuesta correcta”, dice Iván Arriagada, director ejecutivo de Antofagasta plc, quien añade que esto se basó en estimaciones de precio que auguraban una estabilidad más prolongada de lo que realmente fue. Los proyectos se estaban desarrollando asumiendo la libra de cobre a US\$ 3,50, tres veces más del supuesto que se usó durante las tres décadas anteriores. “Hubo muchos errores aquí”, asegura el máximo ejecutivo del brazo minero del grupo Luksic.

El presidente de la Sonami, Diego Hernández, plantea que otro de los aprendizajes fue la ventaja de asociar proyectos o compartir infraestructura para mitigar el riesgo. En la región ya son varios los ejemplos de este tipo de iniciativas conjuntas.

- **Márgenes cayeron.** Un estudio de Boston Consulting Group mostró que, en medio del boom de precios, los márgenes de la industria cayeron del 42% en 2010 y 2011, al 33% en 2013, con mano de obra, insumos y servicios como las áreas que lideraron los aumentos de costos. Frente a la brusca alza en el precio, las

empresas aumentaron la producción, para lo cual elevaron la dotación, incorporaron equipos móviles y en muchos casos diferieron las mantenciones. “La lección más importante es que la industria perdió su enfoque principal: sobre todo seguir siendo competitiva”, reflexiona Daniel Malchuk, presidente de Minerals Américas de BHP.

- **Uso eficiente de contratistas.** Una de las consecuencias del súper ciclo fue el aumento significativo del empleo directo e indirecto en la minería, a medida que las compañías buscaban aumentar su producción. Iván Arriagada asegura que la cuestión de la inflación salarial durante el súper ciclo sigue sin resolverse. El punto crucial, apunta, es garantizar que los cambios salariales reflejen los aumentos sostenibles de la productividad y que la estructura de compensación proporcione los incentivos correctos. La automatización emerge como el factor que conducirá a cambios decisivos en la composición de la fuerza laboral y sacará del centro los millonarios bonos al cierre de las negociaciones colectivas. Otro eje es incorporar la diversidad en la dotación de las empresas. “Como industria necesitamos ser más diversos”, comenta el CEO de Anglo American, Mark Cutifani.
- **No demorar la innovación.** La automatización puede aliviar el flujo y reflujo de las alzas de personal cuando los precios de las materias primas aumentan, y los despidos a gran escala cuando caen. Pese a estos avances, la industria ha sido renuente a incorporar estas innovaciones, dice el presidente de la Sociedad Nacional de Minería, Diego Hernández.

En síntesis, el título del libro, *Mining for Value*, encapsula las dos lecciones más importantes: que los líderes se focalicen en la creación de valor en el largo plazo y que sean guiados por sólidos valores empresariales. El resultado serán organizaciones más estratégicas, disciplinadas, diversas e innovadoras, capaces de responder a las expectativas de cada vez más exigentes de sus accionistas y demás *stakeholders*.

A modo de conclusión, vale la pena recordar que los conceptos de productividad y costos son claves para los productores en la industria minera y, si bien históricamente se han analizado principalmente productividades parciales con datos microeconómicos, el concepto de la productividad total de factores que se desarrolla en este trabajo pensamos que es una herramienta más integradora. Este trabajo no es un estudio completamente acabado, sino una propuesta metodológica, donde sobre todo el número de datos utilizados puede llevar a alguna distorsión, sin embargo, se aprecian resultados consistentes en ambas operaciones con los datos utilizados.

Así, una de las aplicaciones que podría tener esta metodología en las distintas empresas mineras, es que innovaciones como las mencionadas al inicio de este capítulo, sobre todo las que no tienen un impacto tan directo en los resultados financieros, como las de eficiencia energética o centros de operaciones remotas, podrían tener un sustento adicional para su financiación si es que se justifica el mayor valor que otorgan al accionista a través del aumento en productividad que generan si es que existe una metodología adecuada para su medición

CAPITULO 7: BIBLIOGRAFIA

- 1) ¿Por qué es importante la productividad?. Institución Futuro – Think Tank Independiente: <https://ifuturo.org/por-que-es-importante-la-productividad/>
- 2) Informe de Productividad de la Gran Minería de Cobre (Comisión Nacional de Productividad): <https://www.comisiondeproductividad.cl/estudios/informe-de-productividad-de-la-gran-mineria-del-cobre/>
- 3) Estimaciones econométricas de la productividad total de factores de Codelco Gerencia de Estudios y Diseño Estratégico – Codelco 2016.
- 4) Cómo la minería continúa contribuyendo al desarrollo de Chile – Sonami Marzo 2020
- 5) Productivity in the Australian Mining Sector. Bureau of Resources and Energy Economics, marzo 2013.
- 6) Una Mirada Desagregada al Deterioro de la Productividad en Chile: ¿Existe un Cambio Estructural? Banco Central de Chile, abril 2014.
- 7) Una Mirada a la Productividad del Sector Minero en Chile. Cochilco, diciembre 2013.
- 8) Total Factor Productivity Estimation: a Practical Review, Van Beveren
- 9) El Fin del Ciclo de Commodities: Efectos para Chile. Libertad y Desarrollo: <https://lyd.org/wp-content/uploads/2016/07/SIE-257-El-fin-del-ciclo-de-Commodities-efectos-para-Chile-Junio2016.pdf>
- 10) Clase Tecnologías de la Información – Agustín Costa. MBA Minero 2021.
- 11) Memoria Anual 2019 Angloamerican plc - <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/PLC/investors/annual-reporting/2020/aa-annual-report-2019.pdf>
- 12) CRU Insight 2014. Labour Productivity: Could Chile lose its competitiveness?
- 13) <https://www.guiaiso50001.cl/>
- 14) <https://www.mch.cl/2021/01/26/ley-de-eficiencia-energetica-ultimos-detalles-y-su-relacion-con-la-mineria/>
- 15) <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Energy-and-Resources/gx-er-tracking-the-trends-2019.pdf>
- 16) <https://chile.angloamerican.com/innovacion.aspx>
- 17) <https://www.cesco.cl/2018/09/25/lecciones-aprendidas-tras-el-super-ciclo/>
- 18) <http://www.latinomineria.cl/blog/2018/10/08/lideres-la-industria-minera-plasman-descarnado-libro-las-lecciones-tras-fin-del-superciclo-del-cobre/#>
- 19) <https://www.mch.cl/2020/09/23/automatizacion-de-aqui-a-2028-el-100-de-las-plantas-mineras-sera-operada-remotamente/>
- 20) Productividad en la Industria Minera en Chile. Cochilco, diciembre 2014. https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe_de_productividad_en_mineria_V_F.pdf