



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

Los ciclos de inversión y desinversión en la industria minera desde un razonamiento económico y un análisis cuantitativo: la reversión a la media de los márgenes de Ebitda

Autor: Erik Valverde

Director: Isabel Catalina Figuerola Ferretti

Índices

Índice de temas

- Objetivos
- Metodología
- Estado de la cuestión
- Partes principales del TFG
- Historia económica del sector minero mundial a través de los precios del cobre
 - Breve explicación de la historia de la industria entre 1900 y 2008
 - Explicación de los ciclos de inversión de la industria focalizándonos en la crisis de 2008
- Análisis de la demanda
 - Crecimiento del producto interior bruto
 - Crecimiento de la población
 - Crecimiento de la intensidad del cobre
- Análisis de la oferta
 - Problema estructural
 - Avances tecnológicos
 - Costes
- Márgenes de beneficio y rentabilidad
- Validación del modelo y adaptación para crear un modelo de trading para el cobre.
- Estrategia de trading basada en la reversión a la media de los márgenes de ebitda y otros indicadores que lideran al precio.
- Resultados
- Conclusiones

Índice de tablas y gráficos

Figura i: los precios nominales del cobre crecen a una tasa de crecimiento anual compuesto del 3,36% entre 1928 y 2018.

Figura ii: porcentaje de producción por país en 1936.

Figura iii: gastos de exploración en la industria minera.

Figura iv: podemos ver un ejemplo de periodos en los que la industria opera con rentabilidades negativas. Pero esta situación no es sostenible en el largo plazo.

Figura v: aunque es lógico que dos series de datos crecientes tengan correlación positiva con esto mostramos la importancia de China en la formación de los precios del cobre.

Figura vi: demanda global de cobre medida por la producción de cobre mundial.

Figura vii: el crecimiento de la economía es sinónimo de acumulación de materias primas.

Figura viii: PIB Mundial y Población Mundial entre 1900 y 2016.

Figura ix: el crecimiento del PIB, el crecimiento de la población y el crecimiento de la intensidad de los metales son significativas al 1% para explicar el crecimiento de la demanda del cobre.

Figura x: comparamos el incremento de la demanda real contra el crecimiento de la demanda sintético calculado mediante la función multivariable.

Figura xi: intensidad del cobre desde 1900.

Figura xii: 20 mayores minas de cobre por producción anual y mostrando sus años de descubrimiento.

Figura xiii: así es el tamaño de un camión empleado en la industria minera actual comparado con el tamaño de una persona.

Figura xiv: evolución del 90 percentil de la curva de costes de la industria del cobre desde 1928.

Figura xv: precio y coste de caja del cobre desde 1928 hasta 2018.

Figura xvi: curva de costes del cobre en 2015.

Figura xvii: el precio del cobre se mantiene en media un 29% por encima del 90 percentil de la curva de costes.

Figura xviii: augmented Dickey Fuller Test que demuestra que el precio no es estacionario.

Figura xix: augmented Dickey Fuller Test que demuestra que el coste no es estacionario.

Figura xx: augmented Dickey Fuller Test que demuestra que coste y precio están cointegrado y que el error es estacionario.

Figura xxi: reversión a la media de los márgenes de ebitda de manera gráfica.

Figura xxii: diagrama de dispersión del precio del cobre contra el precio del Brent.

Figura xxiii: diagrama de dispersión del precio del cobre contra el índice DXY.

Figura xxiv: diagrama de dispersión del precio del cobre contra los inventarios del London Metal Exchange.

Figura xxv: los resultados de la regresión lineal del coste marginal, volumen de trading de futuros no comerciales y PIB global contra el precio muestran como las variables son significativas.

Figura xxvi: precio del cobre calculado mediante la regresión del coste marginal, volumen de trading de futuros no comerciales y evolución del PIB global vs precio actual del cobre.

Índice de abreviaturas

- Ebitda. Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization
- LME. London Metal Exchange
- COMEX. Commodity Exchange
- TCAC. Tasa de Crecimiento Anual Compuesto
- PIB. Producto Interior Bruto
- OPEP. Organización de Países Exportadores de Petróleo
- SxEw. Solvent extraction and electrowinning
- ROCE. Retorno sobre el capital empleado
- VECM: Vector Error Correction Model

Glosario de términos

- Coste de caja: suma de los costes de transporte, refino, administración y los royalties pagados por las compañías mineras al explotar yacimientos.
- Cobre electrolítico: es el cobre estándar que cotiza en las principales bolsas de materias primas, es decir, en el LME y el COMEX. Tiene una pureza del 99,99%.
- Commodity: producto o bien por el que existe una demanda en el mercado y se comercian sin diferenciación cualitativa en operaciones de compra y venta. Commodity es un término que generalmente se refiere a bienes físicos que constituyen componentes básicos de productos más complejos (wiki-finanzas, 2019).
- Cost-of-carry: es el coste de adquirir la materia prima, almacenarla y venderla en el futuro incluyendo el coste financiero de financiar la inversión. Este concepto tiene gran relevancia a la hora de demostrar que los futuros pueden ser empleados para estimar el precio de un metal en el futuro.
- Coste marginal: 90 percentil de la curva de costes de una industria metalúrgica.
- Curva de costes: Representación gráfica de los costes por tonelada producida en el eje “Y” y la cantidad acumulada de producción en el eje “X”. El ancho de las columnas indica la cantidad producida por mina o compañía. La altura de la barra representa el coste de producción por tonelada y esta ordenado de menor a mayor coste de izquierda a derecha.
- Descarbonización: Proceso por el que evolucionamos de una economía con altos grados de contaminación a otra en la que se reduce las emisiones de dióxido de carbono al medioambiente.
- Ebitda: Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización. Es una medida contable que indica la generación de recursos ordinarios antes de impuestos por parte de la empresa independientemente de su estructura de capital. Se diferencia del “beneficio antes de impuestos” en que no incluye costes que no son una salida de caja como las amortizaciones. No incluye impuestos ni extraordinarios. Tampoco incluye gastos financieros para poder analizar la rentabilidad de empresas independientemente de su nivel de endeudamiento.
- Financiarización de la commodities: Pérdida de interés por las materias físicas subyacentes y crecimiento de la especulación en un mercado que ya no se centra

en los fundamentales de la industria. El empleo de las materias primas como un nuevo bien que aporta diversificación a una cartera de inversión ha apoyado en la migración a un mercado financierizado.

- Generar alfa: Entendemos por Alpha o Alfa como el coeficiente que compara su rentabilidad con el índice de referencia o Benchmark. El exceso de rentabilidad del fondo respecto a la rentabilidad del índice de referencia es el alfa de un fondo de inversión.
- Grado de mineralización: Cantidad de cobre contenido en un mineral. Se expresa en porcentaje.
- Insumo: Bien empleado en la producción de otros bienes.
- Intensidad de un metal: Es el incremental de cantidad de metal necesario para aumentar una unidad de PIB. La intensidad mundial se obtiene dividiendo la producción anual de un metal entre el PIB mundial.
- Mina madura: Es una mina que puede producir a su capacidad máxima. El proceso de alcanzar la madurez puede llevar desde dos hasta ocho años desde que el depósito es descubierto.
- Minería selectiva: explotar yacimientos de mayor calidad (menor coste) cuando los precios de los metales son bajos. Cuando los precios son altos se comienza a explotar yacimientos de peor calidad (mayor coste). La minería selectiva se justifica porque lo mejor desde un punto de vista económico es recibir el mayor flujo de caja lo antes posible.
- Precio justo: Precio real de un metal en el largo plazo.
- Precios nominales: Precio no ajustado a la inflación. Al contrario que los precios reales que se ajustan con la inflación.
- Reservas minerales: Recursos de un mineral que son viables económicamente a los precios actuales de un metal. Se expresa en toneladas.
- ROCE: es la rentabilidad exigida a los capitales empleados en un negocio (en inglés, Return On Capital Employed). Fundamentalmente se utiliza para valorar y comparar las rentabilidades de las empresas, puesto que permite tener en cuenta el capital utilizado, no solo el patrimonio o deuda como en otros ratios. Se calcula dividiendo en EBIT después de impuestos entre el capital empleado (Self Bank, 2019).

- Royalties: Pago realizado al Estado donde se encuentra la mina por la empresa minera que explota la mina para compensarle por la extracción de sus recursos naturales.
- SxEw: La tecnología SX-EW consiste en la lixiviación (proceso de disolución de componentes provechosos bajo el efecto de una disolución) y en condiciones atmosféricas adecuadas el mineral de cobre se apila por medio de ácido sulfúrico diluido (KGHM Polska Miedz, 2019).
- Teoría económica austriaca: Se trata de una posición heterodoxa basada principalmente en el individualismo metodológico y en el subjetivismo. Sus recomendaciones de política económica suelen ser anti-intervencionista y suelen promover el liberalismo económico (Economipedia, 2019).
- Vida útil de las reservas de cobre: Número de años que podríamos seguir extrayendo cobre al ritmo de producción anual actual en el caso que no se descubrieran nuevas reservas. Las compañías mineras intentan mantener unos 30 años de vida útil de sus reservas.
- Volatilidad: medida de la variabilidad de los precios en el tiempo. Se mide estadísticamente con la varianza. Una alta varianza refleja una gran volatilidad en el precio de una materia prima. La volatilidad es empleada para medir el riesgo de una inversión. Para medir la volatilidad de los mercados financieros generalmente se emplea el índice VIX.

Resumen

El **objetivo** del presente trabajo es racionalizar la formación de precios del cobre y los ciclos de inversión y desinversión de la industria minera. Para ello tratamos de demostrar que los márgenes de Ebitda revierten a la media en el medio y largo plazo. **El objetivo final** es proponer una estrategia de inversión en cobre, con posiciones cortas y largas, que logre generar una rentabilidad positiva después de deducir costes de transacción.

El cobre es una **materia prima fundamental** para el desarrollo de infraestructuras, la urbanización y la “revolución eléctrica”. Sin cobre no podría continuar el desarrollo económico de los países emergentes, ni la descarbonización de la economía a través de los coches eléctricos y el almacenamiento de energía eléctrica. Esto se debe a que el cobre es el mejor conductor de electricidad después del platino, que no es una alternativa válida debido a su coste.

La **metodología** empleada se basa en analizar de forma cualitativa y cuantitativa la demanda y la oferta de cobre para posteriormente demostrar empíricamente, mediante un modelo de cointegración, que los márgenes de Ebitda han tendido a revertir a la media históricamente. Para ello analizamos datos mensuales desde 1928 hasta la actualidad. En base a esto, proponemos un modelo predictivo del precio del cobre en base a variables fundamentales como el crecimiento del Producto Interior Bruto Mundial, los costes marginales de producción, los futuros de cobre no comerciales y los inventarios mundiales de cobre del London Metal Exchange.

Alcanzamos tres **conclusiones** significativas: la industria minera está dominada por los fundamentales en el largo plazo ya que el coste marginal de producción es un buen indicador del precio y los márgenes de Ebitda revierten a la media. En segundo lugar, al desagregar la función del crecimiento de la demanda de cobre en crecimiento de la población, más crecimiento del PIB más crecimiento de la intensidad del cobre concluimos que la demanda de cobre debe crecer en el largo plazo. Por último, observamos un problema estructural de falta de reservas de cobre explotables rentablemente a los precios actuales que permita hacer frente a las ambiciones de descarbonización de la economía, “revolución eléctrica”, urbanización y crecimiento de la población mundial. La conclusión final es que el precio del cobre debe subir a medio

y largo plazo para que las mineras tengan un incentivo de descubrir nuevos yacimientos de cobre que permitan satisfacer las expectativas de mayor demanda futura.

Palabras clave: trading, cobre, Ebitda, revolución eléctrica, descarbonización, coche eléctrico, urbanización, China, precio, coste marginal, competencia, oferta, demanda.

Abstract

The **objective** of the current paper is to rationalize the price discovery process in the copper industry as well as to explain how the metals cycle works. This helps us explain why Ebitda margins mean-revert in the copper industry. After we take advantage of the Ebitda-margin mean reversion to propose a trading strategy.

Copper is a **key natural resource** for the development of infrastructures, for urbanization and for the “electric revolution”. Without copper, economic growth would not be achievable in emerging countries, nor the decarbonization of the economy by increasing our usage of electric vehicles. The reason for this is that copper is the best electrical conductor after platinum, which is not a valid alternative due to its high costs.

The **methodology** employed focuses on a qualitative and quantitative analysis of the demand and supply function of the mining industry over a period of over 90 years. Applying the Augmented Dickey Fuller test to prove cointegration between the variables proposed, we are able to demonstrate that Ebitda margins mean-revert in the copper industry. We integrate this into a regression to predict the copper price and build a trading strategy.

We arrive to three significant **conclusions**: First, being able to demonstrate that the marginal cash cost is a good predictor of the price in the long-term allows us to state that the long-term outlook of the copper industry is dominated by its fundamentals. Second, by disaggregating the copper demand growth function into population growth plus GDP growth plus growth in copper intensity we conclude that copper demand must grow in the long term. Lastly, we spot a structural problem due to the lack of copper reserves that could be exploited at today’s copper price. This threatens our ambitions of decarbonizing the economy, the “electric revolution”, urbanization and world’s

population growth. Therefore, we conclude that the copper price must rise in the long-term to enhance mining companies search for new copper deposits that could satisfy our future demand for copper.

Keywords: trading, copper, Ebitda, electric revolution, decarbonisation, electric vehicle, urbanization, China, price, marginal cost, competition, supply, demand.

1. Introducción

Objetivo

Los objetivos del presente trabajo es racionalizar la formación de precios del cobre, entender los ciclos de la industria de cobre, demostrar la cointegración entre el precio y el coste marginal y, finalmente, proponer una estrategia de trading para el cobre. Con ello, tratamos de ir en contra de la reciente financiarización de las commodities y proponemos una vuelta a los fundamentales de la industria.

Esto es importante dado que el cobre es probablemente la materia prima más crítica para que tendencias a largo plazo que pensamos que son positivas para la humanidad sean alcanzables. El cobre es imprescindible para el desarrollo de infraestructuras y para la modernización de los países emergentes en sus primeras fases de desarrollo que son muy intensivas en capital. También es clave para la urbanización del mundo y en especial de los países en vías de desarrollo. Y es imprescindible para la descarbonización progresiva de la economía mundial. La revolución del coche eléctrico y de las energías renovables, y su posterior almacenamiento, constituyen la “revolución eléctrica” que nos debería permitir reducir los niveles de contaminación en las grandes ciudades y aliviar el cambio climático.

Nada de todo esto será posible si las compañías mineras no descubren muchas más reservas de cobre que las actuales. No lo harán si los precios del cobre no les asegura una rentabilidad adecuada de su capital teniendo en cuenta los riesgos a los que se exponen por la localización de las minas y por los largos plazos de recuperación de las inversiones a realizar. Por este motivo, mejorar el funcionamiento de los mercados organizados de cobre y su formación de precios es clave.

Este trabajo intenta avanzar en esta línea proponiendo una estrategia de trading que ayude a que los precios del cobre a corto y medio plazo reflejen de forma transparente los fundamentales y las expectativas de futuro sobre el cobre. Esto es importante ya que la alta volatilidad de los precios en el corto plazo desincentiva la inversión de las mineras y el consumo del cobre de los demandantes.

Adicionalmente, propongo una estrategia de trading a corto-medio plazo identificando los principales factores de la cadena de valor y creando una regresión multivariable.

Metodología

En primer lugar, analizamos cómo funciona la industria minera del cobre de manera cualitativa y la diferencia con otras industrias. Estudiamos la evolución histórica de la demanda, la oferta, las reservas, los precios, los costes, la rentabilidad, las inversiones, los retornos y la tecnología. Analizamos 90 años de historia de la industria del cobre para entender de manera cualitativa los factores clave en la evolución de los precios y de la rentabilidad. Nos concentramos en especial en entender las épocas de crisis y de bonanza del precio del cobre para intentar validar con lógica económica el esquema propuesto para el análisis de la industria del cobre. El objetivo es racionalizar que variables son las más relevantes para explicar y predecir la evolución de precios.

En segundo lugar, realizamos un análisis cuantitativo de las variables que influyen en la demanda, en la oferta, en los costes y en los precios en base a datos de los últimos 90 años. Empleamos diversos métodos econométricos incluyendo métodos simples de correlación, análisis multivariable de correlaciones y modelos de cointegración como el Augmented Dickey-Fuller test o la prueba de Engle-Granger- empleados para contrastar si hay reversión a la media.

Datos

Para estos análisis hemos empleado fuentes públicas de datos y otras exclusivas y privadas que requieren un permiso de acceso.

En primer lugar, hemos obtenido datos de commodities del Banco Mundial que reporta los precios del cobre desde 1960 hasta el presente. También hemos empleado series de datos obtenidas de EuroStat, Bloomberg y el Fondo Monetario Internacional. Nos apoyamos en el proyecto *Maddison de la Universidad de Groningen* para recopilar datos históricos por países de PIB y población desde 1900 a 1960 ya que estos datos no son publicados por organismos públicos.

Hemos consultado libros especializados en la industria minera que algunos expertos nos han citado como los claves para entender el sector como “Making the Modern World” (Smil, 2004), “The structure of production” (Skousen, 1990), “Energy and civilization: a history” (Smil, 1994), “Natural Resources Economics: Notes and Problems” (Conrad & Clark, 1987) entre otros.

Hemos consultado memorias anuales y páginas web de las principales mineras cotizadas. Entre ellas se encuentran Rio Tinto, Glencore, Vale, Antofagasta, Anglo American y BHP Billiton. Y de mineras de menor capitalización bursátil especializadas en cobre como Ivanhoe y Grupo México.

Para obtener larga historia de fuente de datos de precios hemos utilizado bases de datos exclusivas. Se ha recurrido a conversaciones con expertos del sector minero como Paul Gait (analista del sector minero en Bernstein clasificado número dos del mundo en Thomson Extel Reuters en 2017) y Fernando Rambaud (ex director de minería en Ercros y Rio Tinto Minera). Además, he accedido a artículos y libros no disponibles en Internet sino únicamente en bibliotecas especializadas de Estados Unidos y Escocia. Entre estos libros se encuentran los anuarios de estadística de los Estados Unidos que reportan los precios del cobre previos a 1930. Para acceder a los precios mensuales del cobre entre 1928 y 1960 empleamos los anuarios del cobre de “Ecology and Natural Resources Collection” y del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Estas mismas fuentes las utilizamos para entender los principales hitos de la industria desde 1928 hasta la actualidad. Para acceder a las curvas de costes de la industria del cobre he recurrido a bases de datos especializadas como CRU, Wood Mackenzie, AME Group y MineSpans.

Estado de la cuestión

La metodología de este trabajo se basa en la literatura de reversión a la media. Una creencia muy común en la economía es que lo que crece debe decrecer eventualmente. Esto se traduce en el mercado de valores en el concepto de reversión a la media. Es decir, los precios eventualmente vuelven a su media histórica pero no se desvían de esta durante largos periodos de tiempo.

La presencia o ausencia de reversión a la media tiene importantes efectos económicos. La relativa baja volatilidad de los retornos a largo plazo incrementa el atractivo del mercado de valores en el largo plazo. De hecho, hay algunos estudios que proponen estrategias de trading basadas en la reversión a la media en los precios de valores bursátiles para generar alfa en el mercado (Balvers, Gilliland, & Wu, 2000). En este contexto son también relevantes las estrategias de “pair trading” que explotan la reversión de la media de malas valoraciones en pares de acciones (Rouwenhorst, Gatev, & Goetzmann, 2006).

Existen diversas teorías que apoyan la reversión de los precios a su media histórica ajustada por inflación. Estos estudios ponen en duda la hipótesis de un mercado eficiente. La hipótesis de un mercado eficiente establece que el precio de mercado recoge toda la información disponible en el mercado (Body, Kane, & Marcus, 2017). En este caso, los precios se ajustarían directamente a la información disponible y por lo tanto no existiría reversión a la media. Por ello, solo podría existir reversión a la media en los niveles de precios si el mercado no fuese perfectamente eficiente.

Aunque sólo hay limitados estudios académicos sobre este tema, hemos identificado algunos autores que han tratado el tema de la reversión a la media en los precios del mercado de valores. Los estudios académicos de Fama y French (1988), Poterba y Summers (1987) y Sweeney (2006) han provocado un debate sobre si los precios de los valores bursátiles y los retornos revierten a la media o no. Sus análisis concluyen que los precios revierten a la media, pero sólo de manera consistente en el largo plazo. Pero ninguno de estos autores analiza los márgenes generados por cada industria para intentar predecir la dirección futura de los precios. Sin embargo, Balvers et al. (2002) concluye que la reversión durante largos periodos de tiempo es difícil de estudiar debido a la falta de confianza en los datos de precios previos a 1970.

Fama y French (1988) sugieren que algunos componentes del precio revierten en el largo plazo y que la complicación para demostrar la reversión a la media reside en encontrar series de datos que cubran un largo periodo de tiempo. De ahí la importancia de realizar nuestro análisis de los márgenes de Ebitda del cobre en un extenso periodo de tiempo, ya que estos componentes que revierten a la media parecen invisibles en el corto plazo. Wang (2007) también sugiere que hay una gran evidencia de reversión a la media en los

precios de valores cotizados. Ambos autores coinciden en la importancia de encontrar datos cubriendo extensos periodos de tiempo y concluyen que debido a la falta de datos no hay tanta evidencia de reversión a la media en activos físicos como las materias primas. De ahí nuestra prioridad de lograr obtener una serie de datos del precio del cobre y de las variables que lo determinan de casi 100 años.

Por un lado, encontramos autores (Fama & French, 1988; Poterba & Summers, 1987) que han probado que existe cierta reversión a la media en valores cotizados. Fama y French (1988) sugieren que la reversión respecto a la media en la industria minera y de los metales es significativa en un periodo de entre dos y seis años. Poterba y Summers (1987) sugieren que los precios de algunos valores bursátiles se pueden desviar de su valor fundamental durante varios años pero que con el tiempo acaban revirtiendo a la media. Sin embargo, concluyen que es muy difícil predecir cuanto tiempo van a tardar en volver a revertir a la media.

Sin embargo, hay estudios académicos (Geman, 2005) que cuestionan la reversión a la media de los precios nominales de las commodities debido a que la economía está en constante crecimiento y ello provoca que el precio de los metales aumente de forma recurrente en el largo plazo.

Como conclusión, hay un gran número de publicaciones académicas que analizan la reversión de los precios a la media, pero no hay conclusiones unánimes. El motivo es que es difícil probar de manera concluyente la reversión a la media de los precios debido a la falta de series largas fiables y comparables de datos históricos de precios. Para poder probar con un elevado grado de confianza estadística que los precios revierten a la media se requerirían bases de datos históricos muy extensas que no están hoy disponibles de manera fiable (Spierdijk & Bikker, 2012) en muchos mercados. Estiman que si los precios revirtieran a su valor fundamental cada 10 años se precisarían al menos 1000 años de datos anuales para lograr resultados concluyentes y definitivos de reversión a la media. Estas dificultades metodológicas explican el motivo por el que la reversión a la media sigue siendo un tema controvertido a nivel académico y profesional en el ámbito de la minería y de la inversión.

En este trabajo utilizamos el concepto de cointegración de precio y coste para probar que los precios acaban revirtiendo al nivel de coste marginal de tal forma que los márgenes son estacionarios. Encontramos autores como Leung T. et al. (2015) y Bessembinder et al. (1995) que estudian la reversión a la media en metales como el aluminio, cobre, níquel, plomo o el zinc. Como el resto de los autores, Fama & French, 1988 y Poterba & Summers (1987) tratan de demostrar la reversión a la media empleando los datos de precios de futuros con fechas de entrega de uno a veintisiete meses. El problema de todos estos estudios es que asumen que la relación “cost-of-carry” se mantiene en el tiempo, algo que no ha podido ser demostrado empíricamente.

En este trabajo inicialmente se analiza el fenómeno de reversión a la media en los márgenes de Ebitda de la industria mediante un análisis cualitativo. Posteriormente, haremos uso de técnicas de modelización para demostrar que estos hechos realmente ocurren de una forma cuantitativa. Una contribución importante radica en la utilización de series históricas de más de 90 años de precios de cobre y costes marginales para intentar obviar las limitaciones de estudios previos mencionadas anteriormente.

Partes principales del TFG

El TFG se compone de cuatro partes principales. En primer lugar, estudiaremos las características de la industria minera, el papel clave que este sector juega en la sociedad y porqué hemos elegido el cobre como la materia prima a analizar.

Posteriormente realizaremos un análisis breve de la historia de la industria minera desde 1930 que nos ayudará a entender las variables clave de sector e intentar predecir su comportamiento futuro. A continuación, realizaremos un análisis cualitativo de causa-efecto para entender cómo llegamos a la crisis de las materias primas de 2009 a 2015.

Una vez entendido todo lo anterior, podremos analizar por qué los márgenes de Ebitda deben revertir a la media de modo cualitativo desde la lógica económica. A continuación probaremos cuantitativamente que los márgenes de Ebitda de la industria del cobre acaban revirtiendo a la media históricamente. Analizaremos la evolución de la demanda y la oferta y las variables que las condicionan.

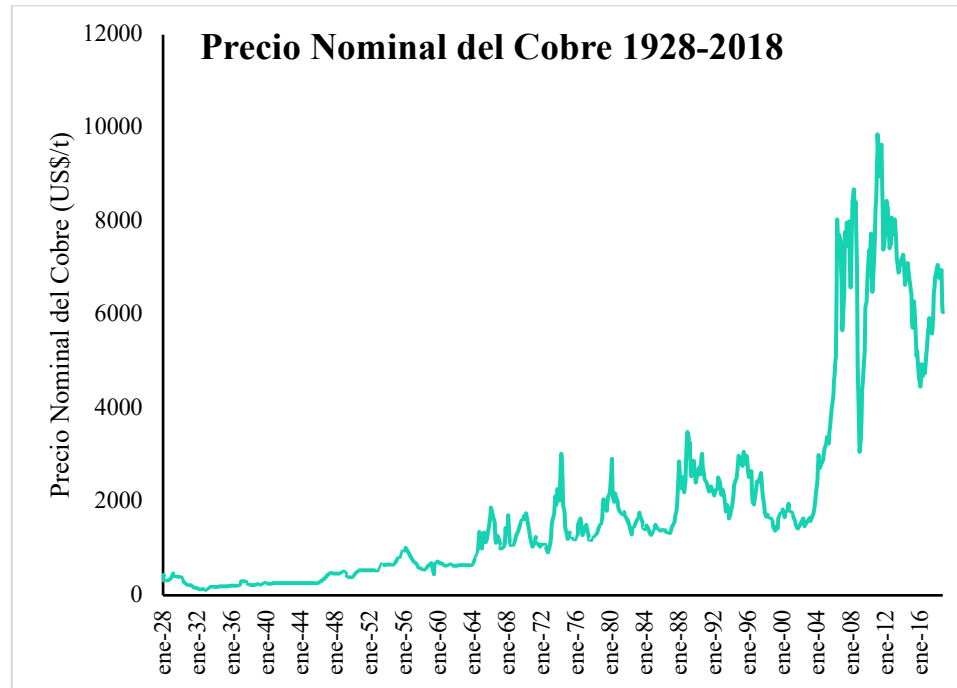
Historia económica del sector minero mundial a través de los precios del cobre

La historia de la minería se remonta a la prehistoria con la era del cobre. El cobre fue uno de los primeros metales que usó el hombre. La explotación de este material a lo largo de la historia está registrada en numerosos objetos. Fue empleado para sistemas de tuberías en las pirámides egipcias y para reforzar barcos como los que empleó Cristóbal Colón para descubrir América. Pero su gran desarrollo se dio con la electrificación del siglo XX. Por ello centramos la mayor parte de nuestra atención en la evolución de los precios desde el siglo pasado hasta 2018.

La formación del London Metal Exchange (LME) en 1877 suponía un evento clave para la industria ya que se fundaba la primera bolsa donde se podía operar con futuros y opciones de metales. De hecho, inicialmente solo se operaba el cobre ya que era el metal que más volúmenes generaba (London Metal Exchange, 2019). El LME aún se mantiene como la bolsa del mundo donde más volumen de metales se opera.

Los precios nominales del cobre, dentro de su gran volatilidad, han crecido a una tasa de crecimiento anual compuesto del 3,36% entre 1928 y 2018. La evolución histórica del precio del cobre de los últimos 90 años ha seguido en cierto modo los ciclos expansivos y depresivos de la economía mundial y de la población mundial con distorsiones provocadas por los ciclos de inversión de la industria, los costes, la productividad y la conflictividad laboral. Como Skousen (1990) indica en su libro “Estructura de la producción” los precios de las materias primas son los más volátiles comparado con otras industrias porque cuanto más lejos se encuentre la fase de producción del momento de consumo final, más volátiles serán los precios, las tasas de empleo, los inventarios, la producción debido a la parcial inelasticidad de la oferta en una industria que requiere altas inversiones en capital. El siguiente gráfico refleja la evolución del precio nominal del cobre en los últimos 90 años que explicaremos en más detalle en los párrafos siguientes.

Figura i: Los precios nominales del cobre crecen a una tasa de crecimiento anual compuesto del 3,36% entre 1928 y 2018

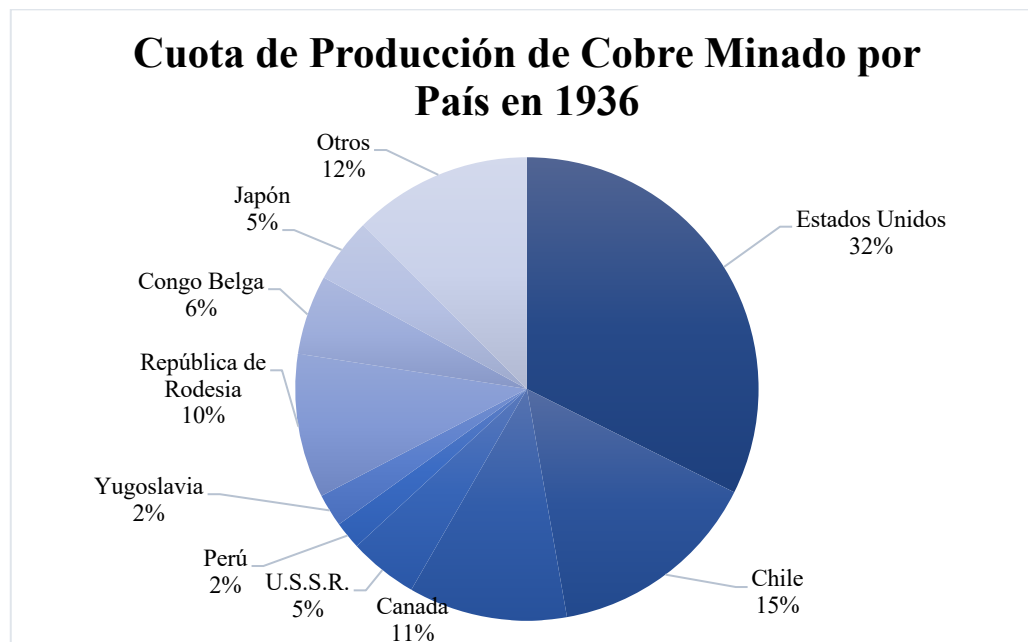


Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); World Bank (2019)

La primera gran crisis minera de los últimos 250 años se produjo en 1917 a raíz de la crisis económica provocada por la Primera Guerra Mundial. La segunda crisis más grave se produjo con la gran depresión de 1930. El precio del cobre justo antes del comienzo de esta crisis era de \$405 por tonelada y tras tres años el precio alcanzó mínimos de 128 dólares por tonelada. Una caída del 78% del precio. En los años previos a la crisis los márgenes de Ebitda generados por el cobre llegaron a estar más de un 300% por encima de la media histórica. En enero de 1933 los márgenes tocaban suelo en mínimos jamás vistos, un 659% por debajo de los márgenes medios históricos.

En la década de los años 30, Estados Unidos se posicionaba como el mayor productor de cobre en el mundo controlando el 17% de la producción mundial.

Figura ii: Porcentaje de producción por país en 1936



Fuente: Elaboración propia en base a Herbert (1938) de Ecology and Natural Resources Collection (2019)

En 1934, aunque el consumo de cobre fuera de Estados Unidos alcanzaba records históricos, el incremento de la producción y el incremento de las exportaciones de algunos países africanos, Chile y Canadá provocó una venta masiva en el LME (Kiessling, 1934). Esto llevó a la creación de un organismo que controlaría la producción del cobre de los mayores países productores excluyendo a Estados Unidos. Las decisiones de este organismo tendrían un gran efecto en la situación actual de la industria del cobre ya que sus decisiones provocaron con el tiempo se fuera reduciendo el contenido medio de cobre de las reservas minerales. De hecho, aquí se acordó establecer una cuota de producción que intensificó la tendencia de “minería selectiva”.

Las bases de la “minería selectiva” establecen que conforme los precios bajaran, el grado de mineral minado mejoraría para reducir los costes y, de tal manera, aumentar los márgenes generados. Por lo contrario, conforme el precio subiera, el grado de mineralización minado empeoraría ya que se abrirían minas de peor calidad que tendrían mayores costes de producción. De esta manera conforme pasara la historia las reservas minerales serían cada vez de peor calidad, y el coste de extraer los minerales sería mayor

salvo que la productividad fuera de capaz de aumentar más rápido. Pero como sugiere Gait (2018) los incrementos de productividad en el presente son insuficientes como para compensar la deceleración de la calidad de la unidad incremental de oferta. Como explicaremos en el presente trabajo, el problema es que en la industria minera el incentivo para la investigación de nuevos métodos no es rentable ya que, mientras que el coste lo soporta un solo actor, los beneficios se reparten entre todos los actores. Por lo tanto, el innovador no logra una ventaja competitiva sostenible frente a sus rivales.

El año 1936 estuvo caracterizado por un gran crecimiento de la demanda del cobre empujada por los proyectos de electrificación, construcción y la recuperación económica de Europa tras la depresión (Kiessling & Hughes, 1936). Tres años más tarde la industria minera se preparaba para un gran crecimiento de demanda con el comienzo de la Segunda Guerra Mundial.

La década de los 50 y 60 estuvo marcada por el fuerte crecimiento de la demanda de cobre a raíz de la reconstrucción de las infraestructuras dañadas por la guerra, el fuerte crecimiento económico de la posguerra y, posteriormente, por la demanda derivada de la guerra de Corea. Este crecimiento de la demanda no fue acompañado en la misma medida por la oferta debido a la fuerte conflictividad laboral y la falta de descubrimientos relevantes de reservas. Las principales minas del mundo estuvieron en huelgas intermitentes durante casi 20 años (Bureau of Mines, 1959). Esto provocó fuertes subidas del precio del cobre que se extendieron hasta la crisis económica de 1973 iniciada con la fuerte alza del precio del petróleo. Entre medias encontramos periodos en los que los gobiernos establecieron precios máximos del cobre para evitar la escalada de precios (Bureau of Mines, 1950).

La crisis de principios de los años 70 provocó una fuerte contracción de la demanda mundial de cobre en un momento en que la industria había ampliado mucho su capacidad productiva. Como consecuencia los precios se desplomaron.

Los precios del cobre se recuperaron en 1978 con la recuperación del crecimiento económico para caer de nuevo alrededor de 1981 ante el inicio de una nueva etapa de desaceleración económica mundial. Los precios volvieron a recuperarse al acelerarse el crecimiento económico mundial a partir de 1986 y hasta 1989 (Bureau of Mines, 1988).

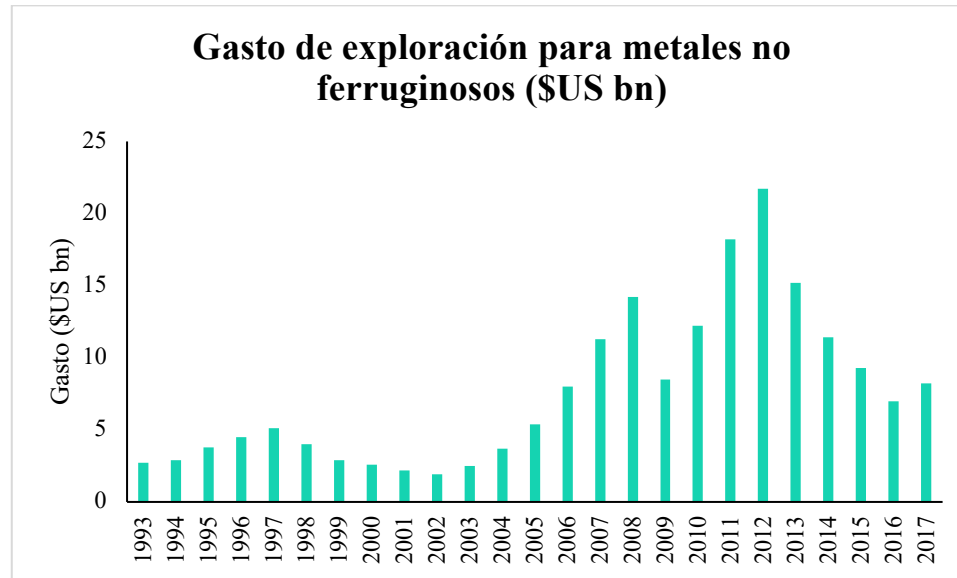
Desde el comienzo de siglo la evolución de la tecnología ayudó a alejarnos de una minería de pequeños depósitos de alto contenido mineral usando mucha mano de obra. Esta tecnología ayudó a reducir los costes y poder explotar depósitos de mucha menor calidad de forma rentable. Además, el uso del cobre para electrificación pasó de consumir el 52% del cobre producido en 1960 al 72% del cobre producido en 1990 (Bureau of Mines, 1990).

Desde 1989 y hasta 1992 los precios se derrumbaron por un exceso de oferta derivado de excesivas inversiones en el aumento de la capacidad productiva. Este exceso de oferta se tradujo en una caída continuada de los precios hasta 2003 solo interrumpida por una breve recuperación derivada del fuerte crecimiento económico entre 1996 y 1997.

El exceso de inversión en aumentar la capacidad de la industria combinado con grandes descubrimientos de yacimientos en Sudamérica y África produjeron un crecimiento fuerte de la oferta de cobre que la economía mundial no fue capaz de absorber hasta el año 2003.

El fuerte crecimiento económico mundial y la apertura económica de China junto con el despegue económico y electrificación en otros países emergentes provocaron un fuerte aumento de la demanda que hizo que el precio del cobre se multiplicara por cuatro entre 2003 y 2008. De esta manera el precio pasaba desde los 2.000 dólares por tonelada hasta los 8.000. Durante estos años de bonanza se produce un fuerte aumento de las inversiones en ampliación de capacidad en especial entre 2005 y 2008.

Figura iii: Gastos de exploración en la industria minera. Observamos como los ciclos de alto gasto coinciden con los momentos en los que los precios son más altos.



Fuente: Elaboración propia en base a S&P Global Market Intelligence (2018).

La crisis financiera de 2008 provocó un desplome de la economía mundial, de la demanda de cobre y, como consecuencia, el precio del cobre se desplomó desde los 8.000 dólares por tonelada en julio de 2008 hasta 3.200 dólares por tonelada en diciembre de 2008.

Sin embargo, en cuanto se recuperó levemente la confianza con los rescates financieros y bancarios en Estados Unidos los precios se recuperaron rápidamente hasta alcanzar un nuevo record histórico de 10.000 dólares por tonelada en 2010. Este periodo de gran crecimiento en la industria del cobre estuvo marcado por un crecimiento similar en los gastos de exploración de nuevos yacimientos.

A partir de 2010 y hasta 2015 se produce la tercera mayor crisis histórica de la industria del cobre después de la de 1918 y la de 1930. El precio del cobre se desploma un 55% desde los 10.000 dólares por tonelada de 2010 hasta los 4.500 de 2015. Es la mayor caída histórica en términos absolutos. Este desplome fue en gran parte provocado por la entrada en producción iniciados durante el ciclo expansivo de 2003 a 2008 y sería acentuado por los gastos en exploración de 2009 y 2010. Para explicar esta caída me he de detener a

explicar una particularidad de esta industria que hace que los precios sean especialmente volátiles que es su intensidad en capital y la larga duración de los ciclos de inversión.

La industria minera en general es intensiva en inversión y en costes fijos. Desde que se decide acometer una inversión en un proyecto hasta que se empieza a vender mineral se tarda como media alrededor de 4 años. Pero en las grandes minas de cobre como Tuangouff en Mongolia o Katanga en República Democrática del Congo este lapso puede extenderse hasta 15 años (Stratfor Analysis, 2013). Esto se debe a la necesidad de la construcción de infraestructuras para poder transportar el mineral desde la mina hasta puertos donde son embarcados para su exportación.

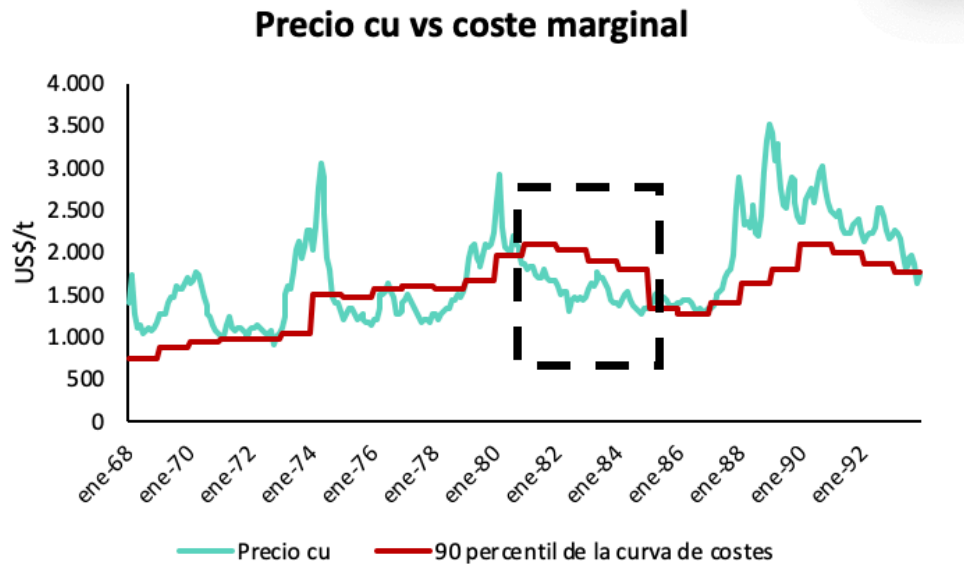
El problema radica en que desde que se decide invertir hasta que se produce, el ciclo económico puede cambiar y la demanda reducirse. Este fenómeno provoca momentos de sobreoptimismo inversor seguidos de ciclos de infrainversión por excesivo pesimismo sobre la demanda futura.

Como predice la teoría económica austriaca, la volatilidad del precio, empleo, inventarios y producción de los sectores es mayor cuanto más lejos en el tiempo se encuentre el proceso de producción del consumo final (Skousen, 1990). El efecto de los ciclos de sobreinversión seguidos de contracción de la demanda puede ser devastador para la industria debido al desplome de los precios y el efecto negativo en las rentabilidades. El problema se ve agravado por otro factor: el fuerte componente de costes fijos. En teoría, una empresa minera solo debería explotar y vender los recursos minerales que ha descubierto cuando logra obtener un precio que cubre todos sus costes de explotación y que después de pagar impuestos y royalties le permite obtener un retorno de capital suficiente, que se estima en el 14% (Gait, Megel, & Absolon, 2015). Sin embargo, las empresas mineras en algunas ocasiones venden por debajo de este precio racional porque necesitan generar caja para hacer frente a las deudas contraídas con sus acreedores financieros e incluso pagar dividendos a sus accionistas.

En ocasiones, debido a su fuerte estructura de costes fijos venden a precios que solo cubren sus costes variables pero que no cubren todos sus costes fijos, o si los cubren no lo hacen cubriendo el retorno de capital adecuado. Estos periodos pueden durar hasta una

década y distorsionar los fundamentales del mercado como podemos observar en la figura iv.

Figura iv: La industria minera puede operar con rentabilidades negativas, pero esta situación no es sostenible en el largo plazo.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019)

Cuando esto se produce la industria reacciona paralizando sus inversiones o minimizándolas durante años con la esperanza de que el crecimiento de la demanda y la población aumenten la demanda y absorban el exceso de oferta y con esto suban los precios. Este proceso puede durar años. Son lo que se denomina ciclos de infrainversión en los que prácticamente no se invierte para descubrir nuevas minas o ampliar la producción en minas ya descubiertas.

Cuando el ciclo de infrainversión lleva varios años los precios suben como reacción a la escasez de oferta. La subida de los precios mejora los beneficios de la industria y su rentabilidad sobre el capital. Pero vuelve a hacer más atractivo la inversión en ampliar la capacidad de las minas y explorar nuevas áreas en busca de nuevos yacimientos. De este modo empieza a germinar el próximo ciclo de sobreinversión en la industria.

Lo paradójico es que pese al conocimiento por parte de la industria y de parte de los mercados financieros de estos ciclos de sobreinversión e infrainversión no se ha logrado todavía que la industria se comporte de una manera adecuadamente racional. Si la industria se comportara en régimen de oligopolio imperfecto como la OPEP, sería más fácil controlar de manera racional la inversión agregada de la industria y, por tanto, la oferta y los precios (Fattouh, 2007). Sin embargo, hay varios factores que hacen esto muy difícil (Barker & Page, 1974). En primer lugar, el gran número de productores dificulta la creación de un oligopolio. En segundo lugar, el ciclo de inversión es mucho más largo en el sector minero que en el sector petrolero. Y, en tercer lugar, al igual que sucede en la industria de petróleo se produce el “dilema del prisionero”.

El “dilema del prisionero” establece que la existencia de información asimétrica entre competidores puede generar la cooperación (Kreps, Milgrom, Robert, & Wilson, 1982). Pero el riesgo de que, acordando un pacto, uno de los actores del mercado no lo cumpla supondría una pérdida competitiva por parte del resto de actores mayor que en el caso de que todos los actores incumplieran el acuerdo. Si todos los actores cumplieran el acuerdo se alcanzaría un equilibrio conocido como equilibrio de Nash (Von Neumann & Morgenstern, 1967). Lo lógico sería que las empresas mineras quisieran moderar las inversiones en el ciclo expansivo, pero siempre existe la tentación de una minera de intentar convencer a los demás de no invertir y sin embargo ella acometer inversiones expansivas. Por lo tanto, nos enfrentamos a un tipo de “dilema del prisionero”. De tal manera la compañía minera que llevara a cabo esta acción obtendría beneficios por encima de lo normal ya que aumentaría la producción para beneficiarse de los precios altos (Hui & Xi-huai, 2009). El resto de las compañías mineras que no acometieran inversiones se encontrarían con un mercado en el que ha crecido la oferta total pero su oferta relativa ha disminuido respecto al mercado. Esto supondría una pérdida competitiva.

No obstante, hay factores que permiten augurar que la industria pueda comportarse en el futuro de una manera más racional. De un lado, la presión de los accionistas y de los mercados para asegurar que las empresas maximizan el valor de las reservas limitadas que tienen en el subsuelo. Por otro lado, la remuneración de los máximos ejecutivos de las empresas mineras está crecientemente correlacionada con el retorno sobre capital empleado y la remuneración total a los accionistas vía dividendos, recompra de acciones

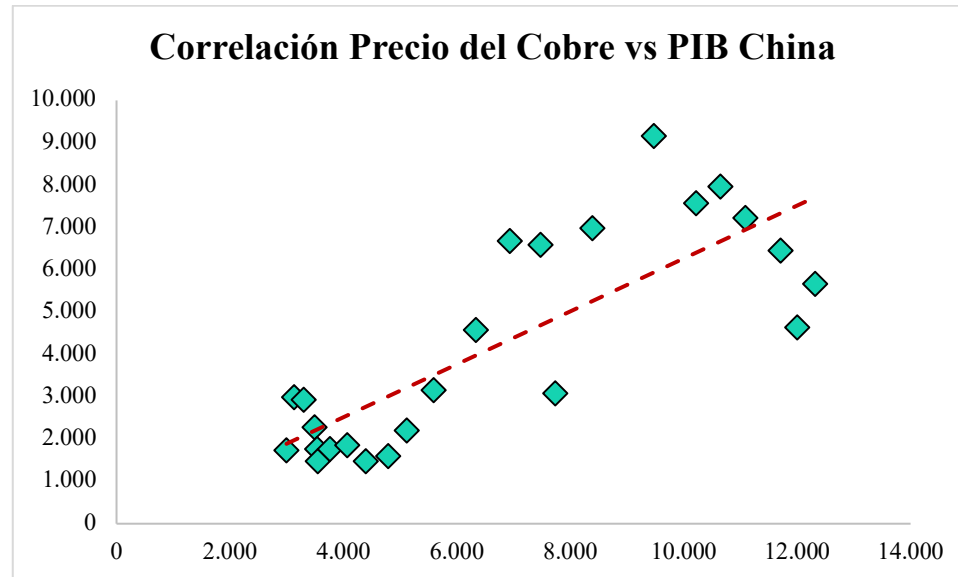
y revalorización de las acciones. En los últimos cuatro años la fuerte subida del precio de las materias primas no ha venido acompañada del inicio de un ciclo de sobreinversión, sino que los máximos ejecutivos de las empresas han sido disciplinados. Las compañías mineras de cobre han dedicado los grandes flujos de caja generados a aumentar los dividendos y, sobre todo, a recomprar acciones en vez de iniciar uno de los clásicos y perniciosos ciclos de sobreinversión. Por ejemplo, Iván Arriagada, el presidente de una de las grandes mineras de cobre comentaba en la publicación de los resultados de 2017: “Solo acometeremos crecimiento que cree valor a los inversores y devolveremos la caja que sobre a los accionistas [a través de dividendos]” (Antofagasta PLC, 2018). La tendencia de “valor sobre volumen” es muy latente en la industria del cobre y de otros metales desde el final de la crisis (Wood Mackenzie, 2017).

En efecto, desde 2014 hasta ahora el precio de las materias primas ha subido más de un 30% desde los 4.500 dólares por tonelada hasta los 6.000 en diciembre de 2018. Esta fuerte subida de precios no ha venido acompañada del clásico aumento desmesurado de las inversiones en nueva capacidad. El aumento de los flujos de caja se ha dedicado a aumentar los dividendos (Antofagasta PLC, 2018) y a recomprar acciones. Los retornos sobre el capital empleado (ROCEs) de la industria entorno al 11% no justifican aumentar las inversiones. La industria en agregado no debería invertir si no logra un margen de por encima del 14% de media histórica. Este nivel es el que consideramos que remunera adecuadamente el capital dado los riesgos que se han de asumir tanto por la larga duración de los proyectos, como la probabilidad de que entre medias surjan crisis económicas, y por el riesgo derivado de operar en muchos casos en países con inestabilidad política y tributaria.

El precio del cobre tiene una fuerte correlación de facto con el crecimiento del PIB de China. China consume (directa e indirectamente) más del 40% del cobre mundial debido a que se encuentra en un estado intermedio de su conversión en una economía desarrollada (ver anexo ii). Además, China se ha convertido en una potencia productora de aparatos tecnológicos para la posterior exportación, lo que ha disparado aún más su importancia para la industria del cobre. En la fase de desarrollo en la que se encuentra China se produce mucha más demanda de materias primas por la necesidad de construir ciudades para la población que emigra desde el campo a la ciudad y para electrificar el país. Por este motivo, pequeñas variaciones sobre las perspectivas de crecimiento del PIB

de China tienen un impacto muy relevante en las perspectivas de demanda futura del cobre y en su precio.

Figura v: Relación entre el precio del cobre y el PIB de China. Aunque es lógico que dos series de datos crecientes tengan correlación positiva



Fuente: Elaboración propia con datos de IMF (2019); World Bank (2019)

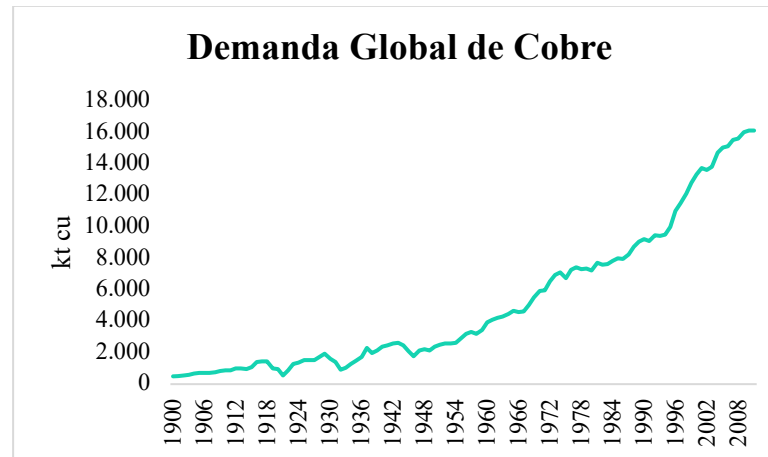
Adicionalmente hay otro factor que se ha vuelto muy relevante en el último año en la formación de los precios del cobre. Es la guerra comercial entre Estados Unidos y China. Esta guerra se ha manifestado a partir de mayo de 2018 y se ha materializado con la imposición de aranceles a la importación de productos chinos en Estados Unidos y viceversa en el otoño de 2018. Esta guerra comercial afecta directa e indirectamente al precio del cobre a través de varios canales. En primer lugar, puede ralentizar el crecimiento económico de China y su demanda de cobre ya que China exporta muchos productos a los Estados Unidos. En segundo lugar, porque la guerra comercial puede ralentizar el comercio mundial y existe una fuerte correlación entre las variaciones del comercio mundial y las variaciones del PIB mundial. En tercer lugar, la imposición de aranceles puede incrementar el coste de insumos en muchos productos y alterar cadenas de producción traduciéndose en crecimiento de precios de los productos terminados que pueden provocar un descenso de la demanda de éstos.

A continuación, voy a profundizar en un análisis más detallado de la demanda mundial de cobre, de la oferta, los costes, los avances tecnológicos y la rentabilidad. Todos ellos son factores que influyen en la formación de precios del cobre.

Demanda

La demanda de cobre ha crecido históricamente salvo en periodos de fuerte recesión económica, como se puede apreciar en la figura vi.

Figura vi: Demanda global de cobre medida por la producción de cobre mundial.



Fuente: Elaboración propia en base a USGS (2019); Strishkov (1984)

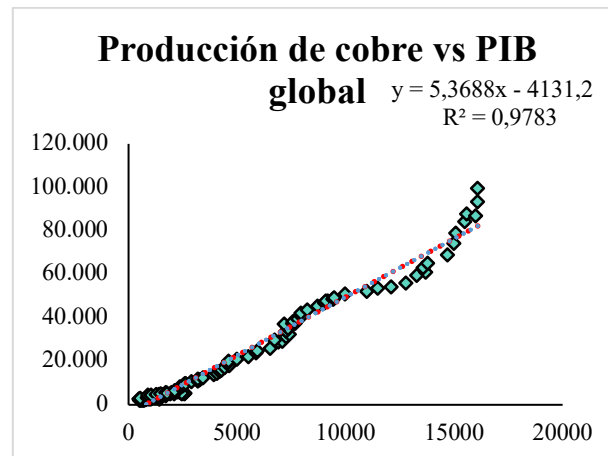
Este crecimiento se debe a que existe una fuerte correlación entre la variación de la demanda de cobre y la variación del PIB mundial y de la población mundial. La correlación con el crecimiento del PIB mundial es muy elevada (R-cuadrado del 98%). La correlación con el crecimiento de la población es también muy elevada. Como el PIB mundial y la población mundial llevan creciendo casi sin interrupciones desde 1900 se puede afirmar que la demanda de cobre crece con el tiempo.

Esto se debe a que el crecimiento de la economía global es sinónimo de la acumulación de materias primas (ver figura vii). Las materias primas representan el principio del proceso de producción que culmina con la provisión de bienes y servicios de consumo¹. Por lo tanto, el no crecimiento del volumen de producción de las materias primas implica que la provisión de bienes y servicios de consumo tampoco puede crecer. Este efecto que se asemeja a la trampa maltusiana que se conoce como “efecto cuello de botella”.

¹ Ver anexo i. Representación gráfica de la cadena de valor de la economía de un país.

La trampa maltusiana proponía que el crecimiento de la población sobrepasaría el crecimiento agrícola y resultaría en hambrunas (Malthus, 1798). Aplicando esta tesis al ámbito del cobre, podemos sugerir que la economía no puede crecer más rápido de lo que crecen los insumos claves para hacerla posible. La pregunta no debe focalizarse en si existe suficiente cobre en el planeta como para que la economía crezca al ritmo actual, ya que los recursos minerales deberían en teoría ser suficientes para posibilitar el crecimiento durante décadas. La cuestión es más bien si vamos a poder extraer suficiente cobre a los precios actuales del cobre, ya que muchos no pueden ser explotados de modo rentable. Lo importante es determinar el nivel de precios que permita encontrar un equilibrio entre la aceleración de la oferta que sería necesaria para satisfacer las elevadas expectativas de crecimiento de la demanda. En definitiva, con los precios actuales de cobre es probable que se produzca un déficit de oferta de cobre, que supondría un “cuello de botella” que limitaría el crecimiento económico global.

Figura vii: El crecimiento de la economía es sinónimo de acumulación de materias primas. El gráfico representa la relación entre el precio y el PIB en niveles y la línea muestra la recta que mejor ajusta esa relación mediante una estimación por mínimos cuadrados donde la R-cuadrado es 98%.

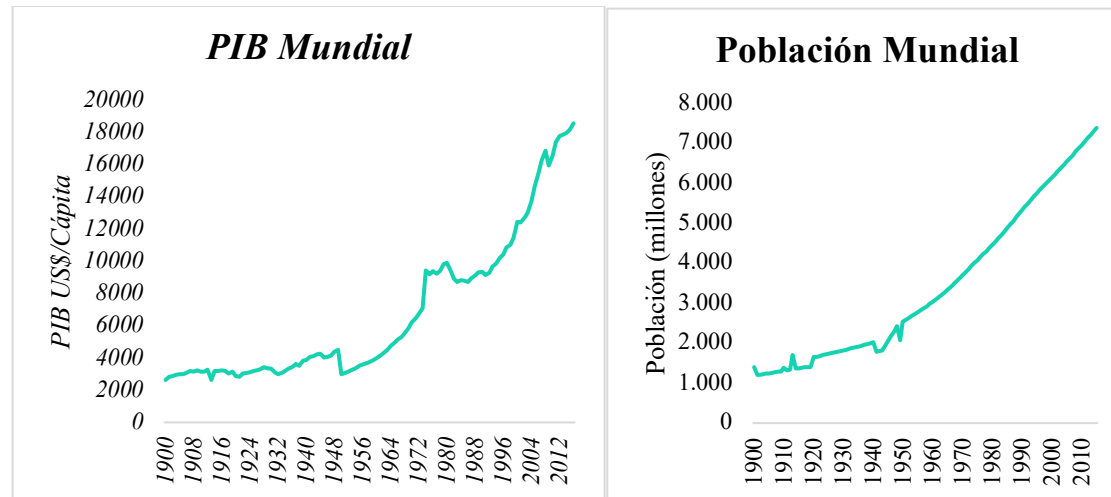


Fuente: Elaboración propia en base a Maddison (2018); IMF (2019); World Bank (2019)

La cadena de valor de casi todos los productos comienza con la minería de algún tipo de metal u otro tipo de materia prima (Skousen, 1990). Por ejemplo, la cadena de producción de los productos electrónicos comienza con la extracción de metales como el cobre y el oro entre otros. Los metales producidos son vendidos a las casas de trading de metales y materias primas, que a su vez los venden a empresas exportadoras para que el metal sea refinado posteriormente. Tras este proceso el metal llega a las empresas electrónicas que

emplean el metal para producir teléfonos móviles, lavadoras u otros productos. Si las mineras no producen suficientes metales, los fabricantes que los emplean es sus productos no podrían producirlos. El crecimiento del PIB mundial y de la población mundial precisan cada vez más materias primas.

Figura viii: PIB Mundial y Población Mundial entre 1900 y 2016



Fuente: Elaboración propia en base a Maddison (2018); IMF (2019); World Bank (2019)

De hecho, la demanda del cobre se puede explicar a través una regresión multivariable en la que el crecimiento proporcional de la demanda del cobre tiene que ser igual al crecimiento proporcional de la población, más el crecimiento proporcional de la economía por habitante (PIB per cápita), más el crecimiento proporcional de la intensidad del cobre. Para demostrar esta realidad empleamos datos anuales desde 1900 hasta 2011.

$$\Delta \text{Demanda cobre}\% = \Delta \text{Población}\% + \Delta \text{PIB per cápita}\% + \Delta \text{Intensidad cobre}\%$$

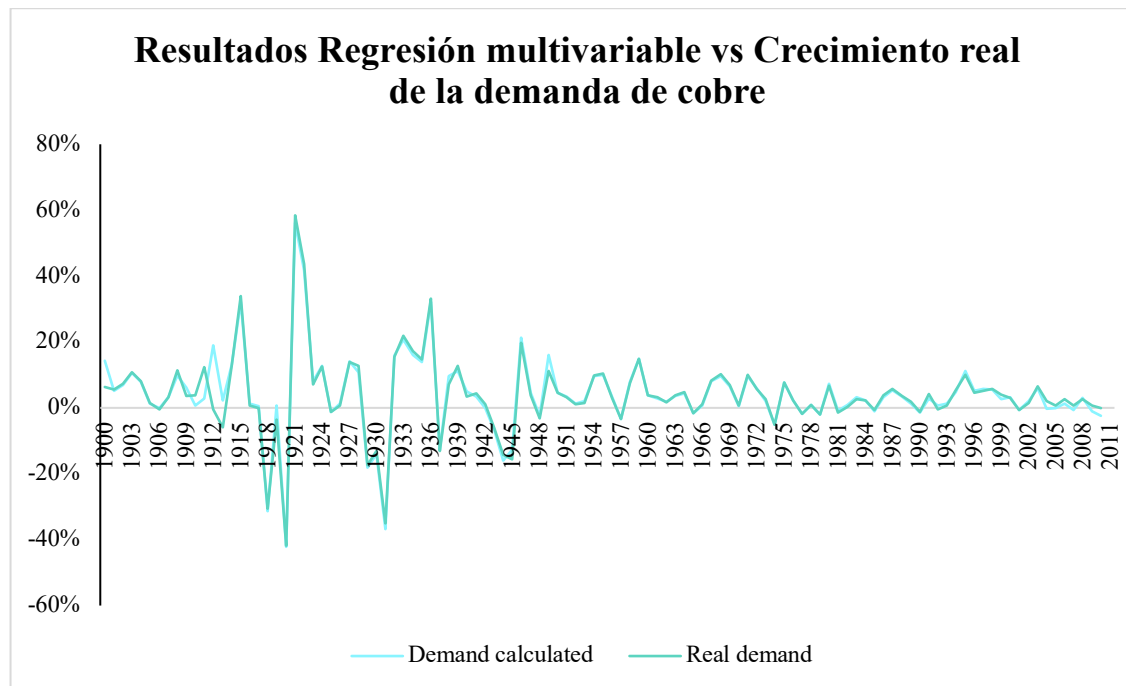
Comprobamos que todas estas variables son significativas para explicar el incremento de la demanda cobre a través de una regresión lineal simple que presentamos en la figura ix.

Figura ix: El crecimiento del PIB, el crecimiento de la población y el crecimiento de la intensidad de los metales son significativas para explicar el crecimiento de la demanda del cobre con un grado de error inferior al 1%.

R ² = 95,90%			
	<i>Coefficientes</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-valor</i>
Intercept	0,000	0,2	
Δ PIB %	1,092	18,7	***
Δ Población %	0,790	15,2	***
ΔIntensidad del cobre%	0,969	46,3	***

*Nota: *** indica que la variable es significativa al 1%*

Figura x: Comparamos el incremento de la demanda real con el crecimiento de la demanda sintética calculado mediante la función multivariable propuesta arriba. Como podemos observar ambas siguen un recorrido muy parecido y el error es tan solo del 0,12% en media.



Fuente: Elaboración propia en base a USGS (2019); Strishkov (1984); Maddison (2018)

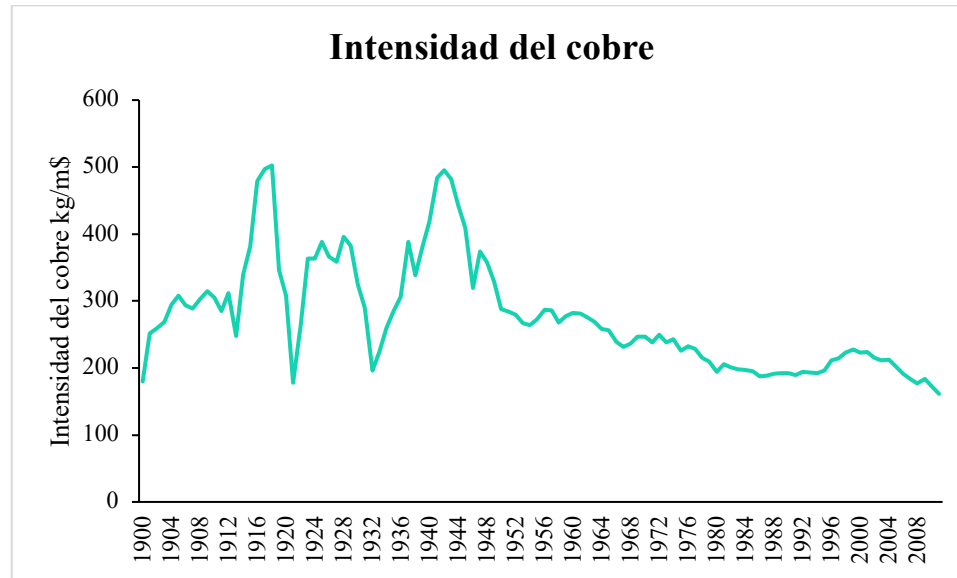
Entendemos por intensidad del cobre el consumo anual de metal por unidad de PIB. En primera instancia, la evolución de la intensidad del cobre varía con el PIB per cápita. EN

los inicios del desarrollo económico de un país, la intensidad del cobre aumenta rápidamente debido a que el proceso de electrificación y construcción de infraestructuras es muy intenso en el empleo del cobre (Crowson, 2018). Por ejemplo, China tiene aún una alta intensidad de cobre comparado con otros países ya desarrollados porque aún se está produciendo una significativa emigración del campo a la ciudad. Este proceso impulsa la construcción de nuevas ciudades y extensión de las existentes y con ello la instalación de cables que conduzcan la electricidad y otras infraestructuras².

Conforme la economía de un país se desarrolla, la intensidad del consumo de cobre tiende a reducirse hasta acabar estancándose. Posteriormente, cuando el país se desarrolla y deja de considerarse emergente la intensidad de consumo de cobre por unidad de PIB disminuye. Esto se debe a que la economía pasa a depender más del consumo y los servicios y menos de la industrialización. Además, este proceso suele ser acompañado con una reducción de la urbanización, es decir, del desarrollo de ciudades para acoger a la población que emigra del campo a la ciudad. En esta situación encontramos países como Estados Unidos o Reino Unido que tienen una mayor dependencia del sector servicios y ya están muy urbanizados.

² Anexo ii. Gráfico que muestra la evolución de la intensidad del cobre en naciones que se encuentran en diferentes fases del proceso de desarrollo. Inicialmente la intensidad aumenta exponencialmente para después comenzar a aplanarse conforme la economía entra en una fase de madurez.

Figura xi: Intensidad del cobre en el mundo desde 1900. La intensidad del cobre se define como la cantidad de cobre empleada para aumentar una unidad de PIB



Fuente: Elaboración propia en base a USGS (2019); Strishkov (1984); Maddison (2018)

No obstante, es posible que el modelo anterior se vea alterado por la “revolución eléctrica”. La demanda de cobre es probable que repunte incluso en los países más desarrollados debido a la adopción de coches eléctricos, el gran almacenamiento de datos y la “energía verde”. La contaminación en las grandes ciudades ha provocado que algunos países hayan adoptado compromisos de descarbonización de la economía y fijado mínimos de ventas de coches eléctricos. Por ejemplo, China ha legislado que en 2020 el 10% de las ventas de coches sean eléctricos y el 30% en 2030. Países de la Unión Europea también se han fijado como objetivo el fin de la venta de coches de combustión tradicional en Europa en 2040. Por su parte, Francia ha declarado que en 2030 prohibirá la venta de vehículos de combustión interna (Minister for the Ecological and Inclusive Transition of France, 2017) mientras que Gran Bretaña prohibirá la venta de vehículos personales y furgonetas de combustión interna en 2040 (Financial Times, 2018). Algunas ciudades alemanas y españolas también han fijado fechas en las que estará prohibido circular en el centro de la ciudad con vehículos muy contaminantes e incluso a largo plazo con vehículos de combustión tradicional.

Adicionalmente, los principales países desarrollados con la excepción de los Estados Unidos han asumido compromisos para la reducción de emisiones para reducir el impacto medioambiental y ralentizar el calentamiento global. Por ejemplo, la Unión Europea ha fijado máximos de generación de emisiones por el parque de automóviles vendido en Europa por los principales fabricantes de automóviles. Asimismo, la mayor parte de países desarrollados se han marcado objetivos de generación eléctrica con fuentes renovables. El problema es que el sol y el viento no permiten generar energía renovable durante la noche y a veces no están disponibles tampoco durante el día. Por este motivo son necesarios mecanismos de almacenamiento de la energía renovable generada que son muy intensivos en cobre.

La descarbonización de la economía y la revolución eléctrica van a aumentar significativamente la demanda de cobre. Un vehículo eléctrico requiere 2,5 veces más cobre en su producción que un vehículo convencional (Copper Development Association, 2017). La generación de electricidad con fuentes renovables y su almacenamiento requiere cinco veces más cobre que una planta de generación convencional con combustibles fósiles (Garcia-Oliveres, Ballabrera-Poy, Garcia-Ladona, & Turiel, 2012). Además, para las pandemias como la gripe aviar se aconseja la mayor utilización de cobre en los hospitales. El cobre es el material más aséptico de todas las materias primas. Como el presidente de Ivanhoe remarcaba en 2017, es previsible un gran crecimiento del uso del cobre en hospitales porque reduce significativamente la transmisión de enfermedades (Mining Weekly, 2017). Por todos estos motivos es posible que en las próximas décadas veamos un repunte de la intensidad de cobre en los países desarrollados y en el mundo en general.

Desde 1970 hasta el presente el crecimiento de la demanda del cobre ha sido del 2,4% anual. Este crecimiento ha sido inferior a la suma del crecimiento del PIB per cápita mundial (2,1%) y del crecimiento de la población mundial (1,4%). Esto se ha debido a la caída de la intensidad de consumo de cobre por unidad de PIB (-0,1%).

A futuro, estimamos que la demanda de cobre crecerá en torno al 3,5% (Escenario Base). Esto se debe a que el crecimiento del PIB mundial per cápita será entre el 3,6% (Fondo Monetario Internacional, 2018) y el 2,8% (Banco Mundial, 2019). El crecimiento de la población se estima en un 0,6% por año hasta 2050 (Naciones Unidas, 2017). Asumimos

una que la intensidad de consumo de cobre por unidad de PIB sigue cayendo al mismo ritmo que en los últimos 48 años.

Es posible un escenario mucho más optimista de crecimiento de la demanda de cobre si realmente la “revolución eléctrica” se acelera a un ritmo más alto del esperado. En este escenario optimista la intensidad de consumo de cobre por unidad de PIB crecería un 0,5% anual. Por tanto, la demanda de cobre a largo plazo debería crecer un 4,1% anual.

Oferta

Mientras que en la demanda de cobre crece estructuralmente, la oferta no lo hace. Esto se debe a un problema estructural que ha asediado a la industria desde hace más de una década: la menor productividad de las minas existentes. Después de ocho mil años de explotación del cobre, las minas más ricas y fácilmente accesibles ya han sido explotadas. Además, dentro de las minas existentes, las partes de los yacimientos que pueden explotarse a menor coste también han sido ya extraídas.

La industria minera en general siempre se ha enfrentado a la necesidad de reponer las reservas minerales para compensar el efecto de su caída por la producción. Una minera que no descubre nuevas reservas y solo se dedica a producir las existentes se quedará sin reservas al cabo de un número de años. Las reservas actuales permiten producir al ritmo actual aproximadamente 30 años. Esta es la denominada vida útil de las reservas. Por este motivo es necesario descubrir nuevas reservas o mejorar la tecnología para expandir las reservas económicamente viables. Generalmente las minas maduras comienzan a producir menos a medida que es más complicado explotar los yacimientos de manera rentable. Es el denominado declino de producción de una mina.

Históricamente el aumento en la base de reservas y los avances tecnológicos han sido suficientes para equilibrar el declino de la producción y del grado de mineralización. Pero actualmente nos enfrentamos a una situación en la que las reservas no están aumentando lo suficiente como para equilibrar este declino.

El problema es que desde el comienzo del siglo XXI no ha sido descubierto ningún gran yacimiento de cobre. Fueron nuestros bisabuelos los que construyeron la industria del cobre actual. Para encontrar un gran descubrimiento tenemos que remontarnos más de veinte años atrás.

Figura xii: 20 mayores minas de cobre por producción anual y mostrando sus años de descubrimiento. El año medio de descubrimiento es 1928 demostrando que la industria del cobre actual se sustenta en minas descubiertas hace 90 años.

Mina	Producción anual	Año Descubrimiento
Escondida	1090	1981
Freeport Indonesia	645	1988
Cerro Verde	515	1860
Morenci	509	1870
Collahuasi	496	1880
Buenavista del Cobre	444	1926
El Teniente	436	1910
Antamina	430	1873
Chuquicamata	397	1910
Los Pelambres	371	1996
Los Bronces	363	1864
Norilsk	312	1930
Las Bambas	250	1966
Kansanshi	235	1905
Centinela	231	1983
Tenke Fungurume		
SxEw	220	1890
Radomiro Tomic	215	1911
Andina	215	1966
Mutanda	212	1950
Mina Ministro Hales	199	1991

Fuente: Elaboración propia en base a reportes anuales de compañías mineras

Además, no se ha producido ningún gran avance tecnológico que permita explotar de manera más rentable las minas existentes. Desde 1900 la industria minera ha experimentado tres avances tecnológicos que produjeron una gran caída en los costes del cobre.

En primer lugar, tras la Primera guerra mundial se producía la electrificación de la industria minera. En 1884 Parsons inventó la turbina de vapor que originalmente tenía una potencia de 7,5kw. Pero para el final de la Primera Guerra Mundial encontrábamos turbinas de 25 Mw, es decir, la potencia se multiplicaba por 3.000 en tan solo treinta años. Tras la Primera Guerra mundial la electricidad se abarató y expandió mientras que los

salarios de los obreros empezaban a crecer. Esto produjo una sustitución masiva de mano de obra por capital (Piketty, 2013).

En segundo lugar, la revolución de la escala comenzaba en 1980. De forma simple, esta revolución supuso el empleo de camiones cada vez más grandes para el transporte del cobre desde la mina. Mientras la escala de la infraestructura y maquinaria crecía, la necesidad de mano de obra era cada vez menor. En definitiva, si Caterpillar duplicaba el tamaño de los camiones que vendía a las compañías mineras para que estos pudieran transportar más minerales por trayecto se conseguiría reducir a la mitad el número de conductores de camiones por tonelada de mineral. De tal manera se conseguía reducir los costes de la mano de obra. De nuevo, vemos como el capital sustituye a la mano de obra como factor de la producción.

Por último, la revolución SxEw (un nuevo proceso más eficiente para refinar el cobre) ayudó a reducir a la intensidad del capital en torno a 1980. Originalmente el proceso SxEw era un 66% más barato que los métodos de refinado empleados hasta entonces. Pero actualmente es tan solo un 25% más barato que los métodos tradicionales de refinado actuales. Este shock tecnológico ya se encuentra exhausto.

Costes

La industria minera ha sido históricamente muy intensiva en mano de obra. El coste de la mano de obra se ha incrementado mucho en algunos periodos, normalmente impulsados por conflictos laborales e incluso por interrupciones de la producción. La industria ha logrado neutralizar en parte el incremento de sus costes laborales con la introducción de maquinaria y tecnología. En años recientes este aumento de los costes se ha conseguido contrarrestar mediante el aumento del tamaño de la maquinaria y tractores. Pero de nuevo estos remedios ya han sido en buena medida explotados al máximo.

Un ejemplo en el que la tecnología está ayudando a aumentar la eficiencia está siendo promovido actualmente por Rio Tinto en la región de Pilbara (Australia) mediante el empleo de tractores autónomos (Rio Tinto, 2018). El empleo de tractores autónomos, que comenzó en 2008, ha probado ser más eficiente que el empleo de camiones dirigidos por conductores humanos. Han conseguido aumentar las horas operativas de los camiones en

700 horas por año y reducir los costes unitarios un 15%, según Rio Tinto (Jamasmie, 2018).

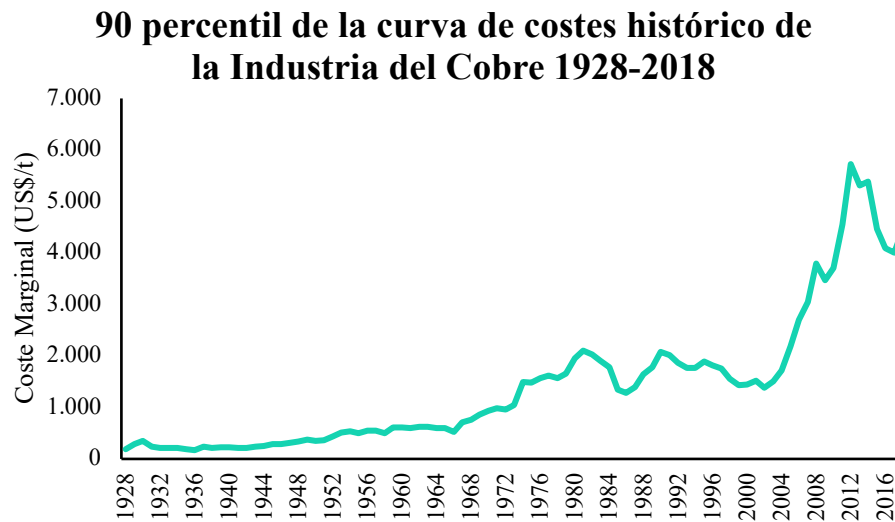
Figura xiii: Camión Caterpillar de última generación empleado en la industria minera actual comparado con el tamaño de una persona.



Fuente: Fleet (2007)

Sin embargo, la falta de avance tecnológicos y de grandes descubrimientos se ha traducido en un aumento significativo de los costes marginales de producción de la industria. Los costes marginales han subido en a una tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC) del 3,5% desde el año 2002.

Figura xiv: Evolución del 90 percentil de la curva de costes de la industria del cobre desde 1928. Este baremo es el que la industria toma como coste marginal de caja.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019)

Este aumento en los costes desde 2002 explica en parte el gran incremento de los precios del cobre desde 2003 hasta 2012. Las mineras de cobre no quisieron renunciar a reducir sus márgenes ni su rentabilidad, y el fuerte crecimiento de la demanda les permitió subir los precios del cobre.

A futuro, si los costes siguen creciendo la industria del cobre tiene dos opciones. Aumentar su inversión en investigación para encontrar métodos más económicos de explotación. O ralentizar las inversiones para evitar que crezca la oferta y esperar que el crecimiento estructural de la demanda genere tensiones en precios que les permitan mantener su rentabilidad sobre capital empleado en sus niveles históricos del 14%.

Nosotros creemos que la opción más probable es la segunda ya que la industria minera no está incentivada a invertir significativamente en investigación y desarrollo salvo que sea una investigación conjunta de toda la industria. Esto se debe a que descubrir nuevas tecnologías supone un gran coste que no se compensa debido a la falta de ventajas competitivas de la industria. Mientras que el coste de investigación es soportado por una sola compañía, los beneficios en productividad se reparten de igual forma entre todos los

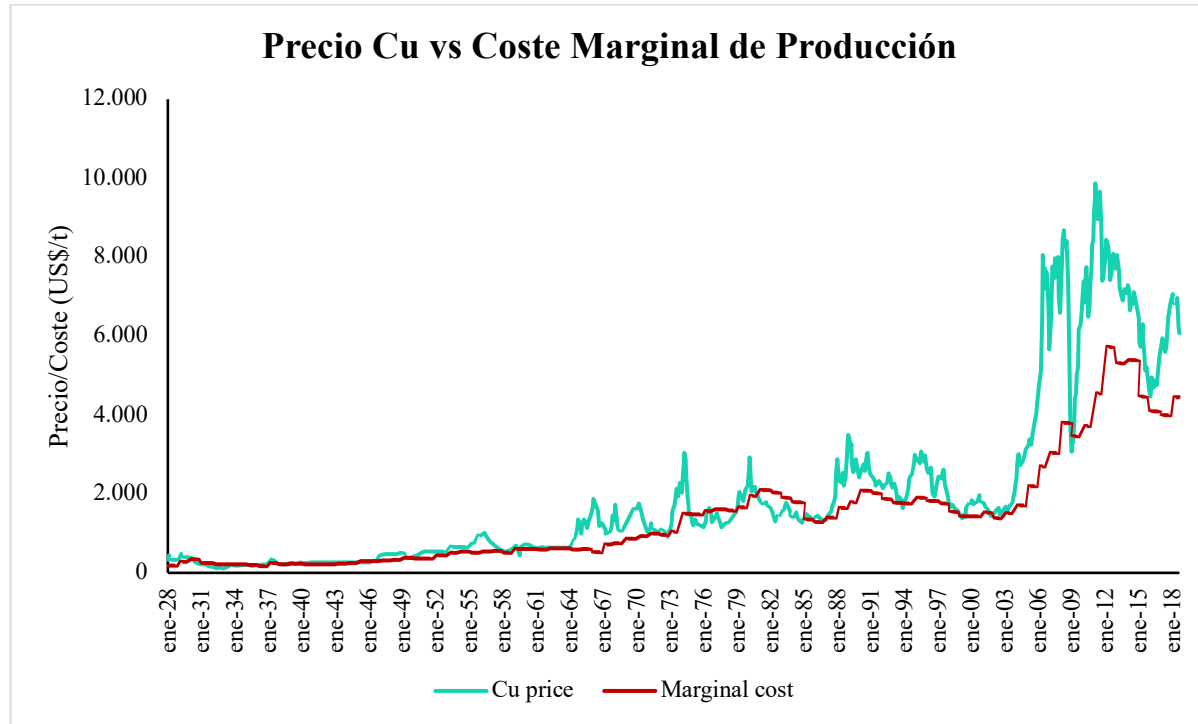
competidores por la falta de propiedad intelectual. Debido a ellos la probabilidad de que la industria escoja este camino es muy reducida.

La opción más probable es que las compañías ralenticen sus inversiones para limitar la oferta. De este modo, el crecimiento natural de la demanda produciría un déficit que se traducirá en incrementos de precios. Esto permitirá que aumenten su margen de ebitda y retornos sobre capital hasta su media histórica. Por encima de esos niveles volverá a ser rentable invertir para explorar nuevos yacimientos y ampliar los actuales.

De hecho, existe una fuerte relación entre la evolución del precio del cobre y la evolución de los costes marginales de producirlo. Intuitivamente, ninguna minera está dispuesta a producir cobre si el precio no es suficiente para cubrir todos los costes incluidos los impuestos, royalties y una adecuada remuneración al capital. Como se puede observar en la figura xv los precios tienden a estar por encima del coste marginal de producción y suelen evolucionar de forma paralela. Puede haber periodos de tiempo, que pueden durar años, en los que un exceso de inversiones o/y una fuerte desaceleración de la demanda pueden provocar que temporalmente las mineras vendan el cobre por debajo de su coste marginal de producción. Esto es excepcional, pero ha sucedido históricamente en periodos que suelen coincidir con crisis económicas o guerras: 1930-1935, 1938-1939, 1945-1946; 1959, 1974-1979, 1980-1984, 2001 y 2008. Como podemos observar en la mayor parte de los casos ocurre en cortos periodos de tiempo debido a que la industria del cobre reajusta su producción para evitar vender con pérdidas.

Por otra parte, puede haber periodos en los que el precio del cobre esté muy por encima de los costes de producción. Esto suele incentivar las inversiones en aumento de la producción. Pero como existe un retardo de años desde que se invierte hasta que se produce, el ciclo de beneficios normalmente altos puede durar varios años.

Figura xv: Precio y coste de caja del cobre desde 1928 hasta 2018. Los precios suelen ser superiores a los costes de producción marginales de caja, salvo en periodos puntuales.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019)

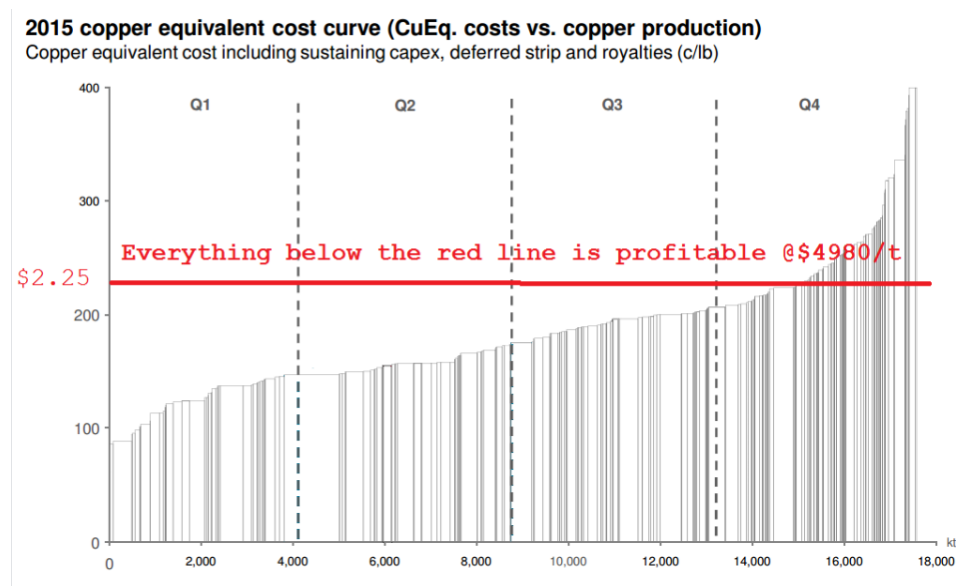
La cointegración entre el precio del cobre y el coste marginal de la curva de costes constituirá la base de una de nuestras herramientas para predecir el precio del cobre. Pero antes de profundizar más es necesario analizar la curva de costes.

La curva de costes es una gráfica microeconómica que mapea la capacidad de la industria del cobre en orden creciente de sus costes (McKinsey, 2009). La gráfica de la curva de costes representa la capacidad de producción y los costes de todas las minas de la industria. Comúnmente, se emplea el 90 percentil de la curva de costes para estimar el coste marginal y el coste de caja. Por encima del 90 percentil de costes se encuentran los proyectos que producen el 10% de la producción mundial de mayor coste. Estos productores son generalmente conocidos como los “productores marginales” (Financial Times, 2015). Si los precios se mantienen debajo del coste de producción de estos productores de alto coste durante un largo periodo de tiempo, en teoría estos

deberían de dejar de producir. De esta manera, el 90 percentil de la curva de costes es comúnmente reconocido como el umbral de rentabilidad de la industria minera en el que las compañías deberían reducir su producción para reestablecer el equilibrio entre la demanda y la oferta. Por ello, el 90 percentil de la curva de costes es entendido como un soporte del precio del cobre y otras materias primas.

En realidad, los precios de los metales pueden mantenerse por debajo de estos niveles de soporte durante largos periodos de tiempo. Por ejemplo, como mencionábamos previamente en este trabajo, el cobre estuvo por debajo del 90 percentil de la curva de costes durante más de cinco años durante los años 80. Tras cinco años, los balances de los productores de cobre no rentables empezaron a sufrir y comenzaron a cerrar centros de producción y minas. Otro de los problemas del 90 percentil de la curva de costes es que el cálculo de los costes puede variar y puede ser difícil de capturar la capacidad de producción de la industria, especialmente si hay un gran número de pequeñas minas en espacios rurales (Financial Times, 2015).

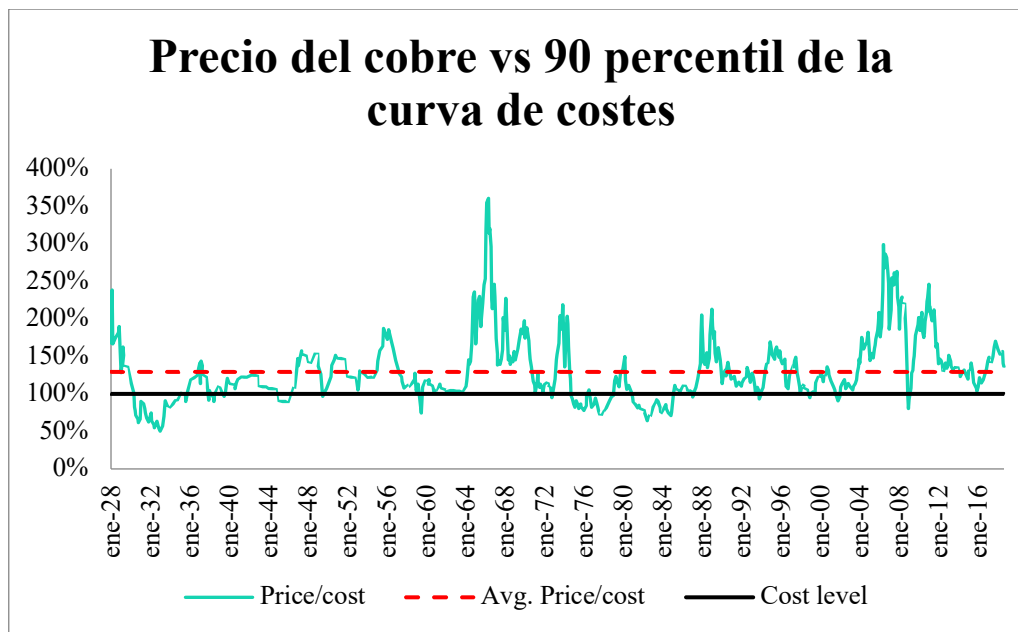
Figura xvi: Curva de costes del cobre en 2015. Observamos como todas las minas por encima de la línea roja (indica el precio) no son rentables, pero siguen operando en el corto plazo a la espera de que los precios aumenten. El grosor de las barras indica la producción mientras que la altura indica el coste de la operación.



Fuente: Wood Mackenzie (2019)

Aunque no todas las commodities cumplen este baremo de forma estricta, opinamos que es de utilidad emplearlo en el caso del cobre. Para estudiar el caso concreto del cobre es importante estudiar el nivel precios por encima de coste marginal. Nos damos cuenta de que el precio del cobre casi nunca se sitúa por debajo de la curva de los costes marginales. De hecho, históricamente el precio suele superar como media en un 29% por encima de la curva de costes marginales de caja. Por ello, hemos de aplicar este ajuste a la curva de costes para determinar el Ebitda real generado por la industria entre 1928 y 2018. Este ajuste simplemente desplaza la curva hacia arriba pero no afecta a los resultados del estudio empírico de la reversión a la media de los márgenes de Ebitda.

Figura xvii: El precio del cobre se mantiene en media un 29% por encima del 90 percentil de la curva de costes.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019)

Márgenes de Beneficio y Rentabilidad

Como hemos estudiado cualitativamente, tendría sentido que los márgenes ebitda tendieran a revertir a la media debido a los ciclos de sobreinversión e infrainversión de la industria minera. Los periodos en los que los precios superan ampliamente la oferta y, por tanto, los márgenes de Ebitda están por encima de la media tienden acabarse como consecuencia del excesivo aumento de las inversiones para aumentar capacidad. Cuando estas inversiones entran en producción se produce un aumento de capacidad que reduce los precios y, por tanto, estrecha los márgenes de ebitda. Esto es lo que sucedió recientemente en el año posterior a la crisis de 2008.

Por otro lado, cuando los márgenes de ebitda se encuentran por debajo de la media histórica las mineras reaccionan ralentizando sus inversiones para que el crecimiento natural de la demanda acabe absorbiendo el exceso de oferta. Con el tiempo los precios se recuperan y los márgenes se amplían dando comienzo a un nuevo ciclo.

Pero en este apartado vamos a tratar de demostrar empíricamente que los márgenes realmente han tendido a revertir a la media históricamente. Para realizar este análisis emplearemos la prueba de raíz unitaria a los márgenes generados mensualmente entre 1928 y 2018. Para realizar este estudio aplicamos el procedimiento de dos pasos de Engle y Granger que establece que si dos variables p_t y c_t son no estacionarias y cointegradas, entonces una combinación lineal de ambas $p_t - \beta c_t = u_t$ donde u_t es estacionaria.

Primero comprobamos que el precio no es estacionario de forma individual empleado un Augmented Dickey Fuller Test con dos retardos. Para ello en la ecuación

$$\begin{aligned}\Delta p_t &= \alpha + (\beta - 1)p_{t-1} + \theta \Delta p_{t-1} + \varepsilon_t \\ \Delta p_t &= \alpha + (\delta)p_{t-1} + \theta \Delta p_{t-1} + \varepsilon_t\end{aligned}$$

la β debe ser igual a 1. Esto es lo mismo que decir que δ tiene que ser igual a 0. Por lo tanto, la hipótesis nula (H_0) es que $\beta = 1$ y la hipótesis alternativa (H_1) es que $\beta < 1$. En la ecuación, entendemos Δp_t como el incremento proporcional mensual del precio del cobre.

Si se confirmara la hipótesis alternativa los precios serían estacionarios. Pero como podemos observar en la tabla 1 el precio no es estacionario ya que la $t \text{ Stat} < |-2.90|$. Por lo tanto, sería correcto afirmar que los precios no son estacionarios.

Figura xviii: La tabla muestra las estadísticas del Augmented Dickey Fuller Test para la hipótesis nula de raíz unitaria en las series: p_{t-1} ; Δp_{t-1} ; para datos mensuales durante el periodo 1928-2018. Para ello empleamos los valores unilaterales de Mackinnon (1990)³. Los resultados muestran que no podemos rechazar la hipótesis nula y que, por tanto, el precio no es estacionario.

<i>Estadísticas de la regresión del precio</i>			
Observaciones	1086		
	<i>Coefficiente</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-valor</i>
Intercept	0,0	1,0	
p_{t-1}	0,0	-0,9	
Δp_{t-1}	0,2	8,3	***

*Nota: *** indica que la variable es significativa al 1%; ** indica que la variable es significativa al 5%; * indica que la variable es significativa al 10%*

En segundo lugar, comprobamos que el coste marginal no es estacionario de forma individual. Para ello en la ecuación

$$\Delta c_t = \alpha + (\beta - 1)c_{t-1} + \theta \Delta c_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$\Delta c_t = \alpha + (\delta)c_{t-1} + \theta \Delta c_{t-1} + \varepsilon_t$$

la β debe ser igual a 1. Esto es lo mismo que decir que δ tiene que ser igual a 0. Por lo tanto, la hipótesis nula (H_0) es que $\beta = 1$ y la hipótesis alternativa (H_1) es que $\beta < 1$. En la ecuación, entendemos Δc_t como el incremento proporcional mensual del coste marginal del cobre.

Si se confirmara la hipótesis alternativa los costes marginales serían estacionarios. Pero como podemos observar en la tabla 2 el coste marginal no es estacionario ya que la $t \text{ Stat}$

³ Ir a anexo 3. Tabla de valores críticos de Mackinnon (1990) del Dickey Fuller Test.

$< |-2.90|$. Por lo tanto, sería correcto afirmar que los costes marginales no son estacionarios.

Figura xix: La tabla muestra las estadísticas del Augmented Dickey Fuller Test para la hipótesis nula de raíz unitaria en las series: c_{t-1} ; $(c_{t-1} - c_{t-2})$; para datos anuales durante el periodo 1928-2018. Para ello empleamos los valores unilaterales de Mackinnon (1990)⁴. Los resultados muestran que no podemos rechazar la hipótesis nula y que, por tanto, el coste no es estacionario.

<i>Estadísticas de la regresión del coste marginal</i>			
Observaciones	89		
	<i>Coefficiente</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-valor</i>
Intercept	0,07	1,58	
c_{t-1}	-0,03	-1,68	
Δc_{t-1}	0,05	0,48	

*Nota: *** indica que la variable es significativa al 1%; ** indica que la variable es significativa al 5%; * indica que la variable es significativa al 10%*

Posteriormente realizamos este análisis para una función que cointegra el precio y los costes marginales. Los resultados del Augmented Dickey Fuller test están representados en la tabla 3. Siguiendo el procedimiento de Engle y Granger (1987) estudiamos si quedan raíces unitarias en los errores. Los resultados del Augmented Dickey Fuller Test muestran que el error es estacionario indicando que los precios y los costes están cointegrados en el periodo 1928-2018.

Esta tabla muestra los resultados Augmented Dickey Fuller test en los residuos

$$\Delta m_t = \alpha + (\beta - 1)m_{t-1} + \theta \Delta m_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$\Delta m_t = \alpha + (\delta)m_{t-1} + \theta \Delta m_{t-1} + \varepsilon_t$$

⁴ Ir a anexo 3. Tabla de valores críticos del Dickey Fuller Test.

para datos mensuales durante el periodo 1928-2018. El p-valor indica que es significativo al 1%. En la ecuación, entendemos Δm_t como el incremento proporcional mensual del margen de Ebitda generado por la industria del cobre.

Figura xx: La tabla muestra las estadísticas del Augmented Dickey Fuller Test para la hipótesis nula de raíz unitaria en las series: m_{t-1} ; $(m_{t-1} - m_{t-2})$ para datos mensuales durante el periodo 1928-2018. Entendemos el margen de ebitda (m) como la diferencia entre el precio y el coste marginal: $m_t = p_t - c_t$. Para ello empleamos los valores unilaterales de Mackinnon (1990)⁵. Los resultados demuestran que coste y precio están cointegrado y que el error es estacionario. Los márgenes permiten rechazar la hipótesis nula y afirmar que los márgenes de ebitda revierten a la media con una probabilidad superior al 99,9%.

<i>Estadísticas de la regresión de los márgenes</i>			
Observaciones	1086		
	<i>Coefficiente</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-valor</i>
Intercept	0,00	-0,3	
m_{t-1}	-0,04	-5,0	***
Δm_{t-1}	0,13	4,3	***

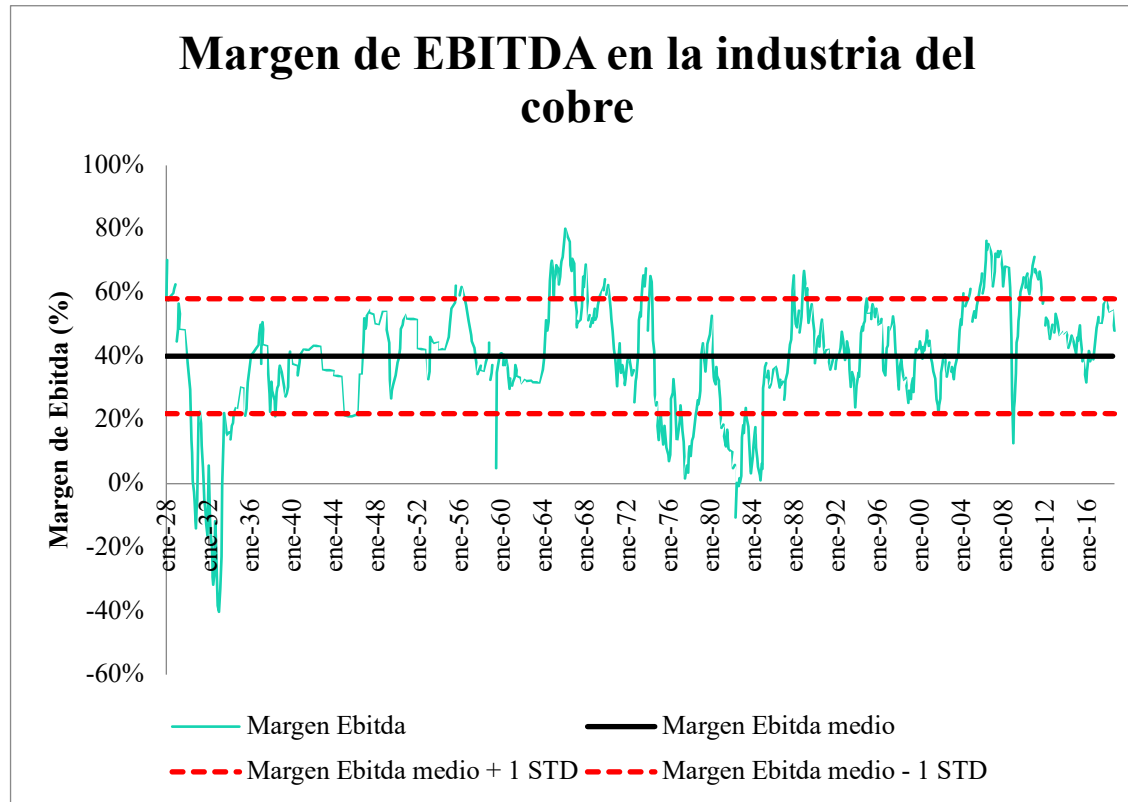
*Nota: *** indica que la variable es significativa al 1%; ** indica que la variable es significativa al 5%; * indica que la variable es significativa al 10%*

Los márgenes de ebitda solo tienen en cuenta parcialmente la rentabilidad de las inversiones. Por este motivo, tendría sentido analizar en un estudio en el futuro la evolución del retorno sobre capital empleado (ROCE).

Realizado este análisis debemos de entender una de las debilidades de este modelo. Puede ocurrir que este modelo de una señal de compra cuando se encuentre por debajo del margen de ebitda pero que el precio del cobre continúe a la baja durante años. El coste de financiación en una industria de tanto riesgo gira en torno al 11% por lo que una caída de precios durante tres años puede resultar en un retorno de -40% aproximadamente. Además, el volver a los márgenes medios no sería suficiente ya que toda inversión exige un retorno. Por ello, para intentar reducir las limitaciones de este modelo tratamos de generar una regresión para predecir cuando el precio del cobre está cerca de tocar fondo.

⁵ Ir a anexo 3. Tabla de valores críticos del Dickey Fuller Test.

Figura xxi: Reversión a la media de los márgenes de ebitda de manera gráfica. Se puede observar sin la necesidad de demostrarlo matemáticamente que los márgenes de ebitda parecen revertir a la media en el largo plazo en los últimos 90 años.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019)

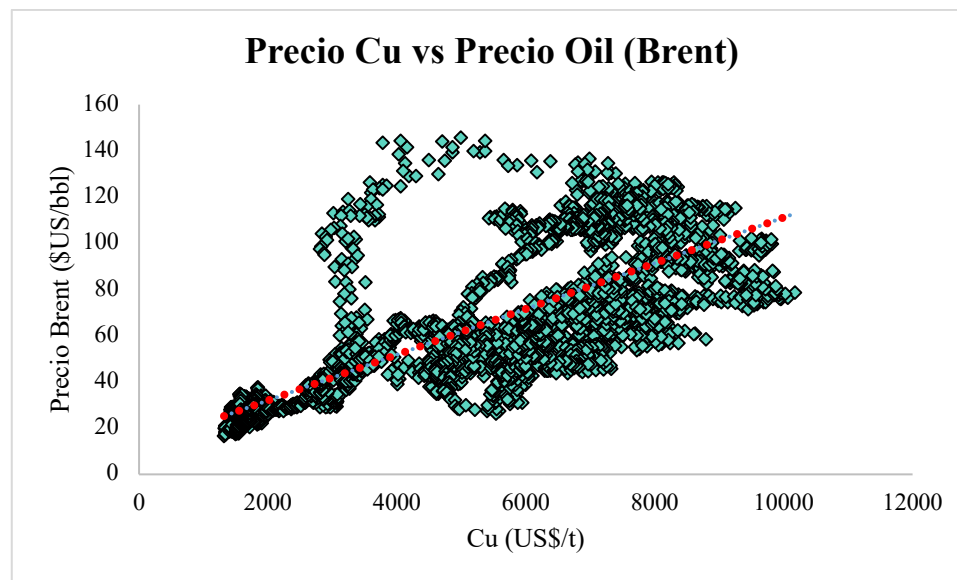
Para tratar de reducir las limitaciones del modelo empleamos un modelo econométrico para predecir cuando el precio se encuentra cerca de un cambio de su tendencia. Para ello realizamos las correlaciones con un retardo óptimo que depende de la variable empleada.

En primer lugar, estudiamos las correlaciones del precio con factores de producción empleados en la cadena de valor del cobre como, por ejemplo, el precio del crudo o el índice DXY. También estudiamos la correlación con los futuros no comerciales para estudiar el nivel de especulación en el mercado. A parte, buscamos la correlación del precio con los inventarios que nos sirven como un indicador de la demanda. A

continuación, explicamos la importancia de cada una de las variables para predecir el precio del cobre.

Los precios de la energía empleada en la maquinaria se pueden utilizar como un proxy del coste de la mano de obra. Para ello realizamos una prueba de la correlación del precio del crudo con el cobre aplicando un retardo al precio del Brent. Como podemos ver en los resultados la correlación entre el combustible empleado y el precio del cobre es alta. La correlación entre el precio del cobre y el crudo retardado un día es de 0,77. Al fin y al cabo, los inputs energéticos son un componente muy importante en explicar los costes del cobre.

Figura xxii: Diagrama de dispersión del precio del cobre contra el precio del Brent.



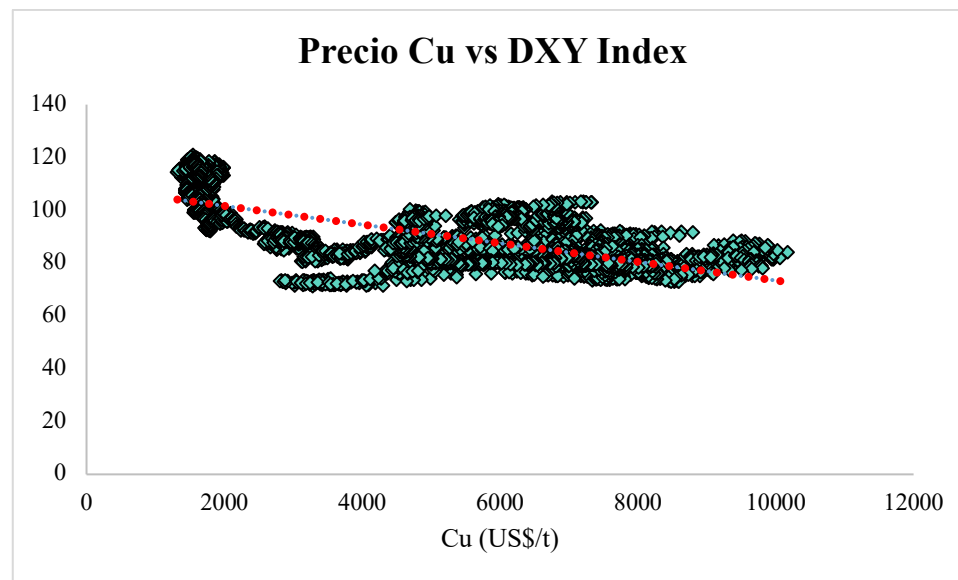
Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bloomberg Energy (2019)

Los resultados tienen sentido ya que cuanto mayor es el precio del crudo mayor serán los costes de producción del cobre en el futuro.

Los futuros no comerciales son empleados para medir las expectativas del mercado y tener en cuenta la especulación en el mercado de metales como el cobre. Para tener en cuenta el factor especulativo empleamos los futuros no comerciales.

El DXY es un índice que compara el comportamiento del dólar americano frente a las monedas más importantes. En concreto se compara contra el euro, el yen japonés, la libra esterlina, el dólar canadiense, la corona sueca y el franco suizo. Históricamente los precios de las commodities han tendido a caer cuando el dólar estadounidense se fortalecía y viceversa. La razón por la que explica este movimiento es que la mayoría de las materias primas están denominadas y se comercializan en dólares (Kowalski, 2019). Por lo tanto, cuando el dólar americano se devalúe costará más dólares comprar metales. Adicionalmente el dólar se suele comportar como moneda refugio en épocas de incertidumbre o de crisis económica, en las que se fortalece coincidiendo con periodos de debilidad de las commodities.

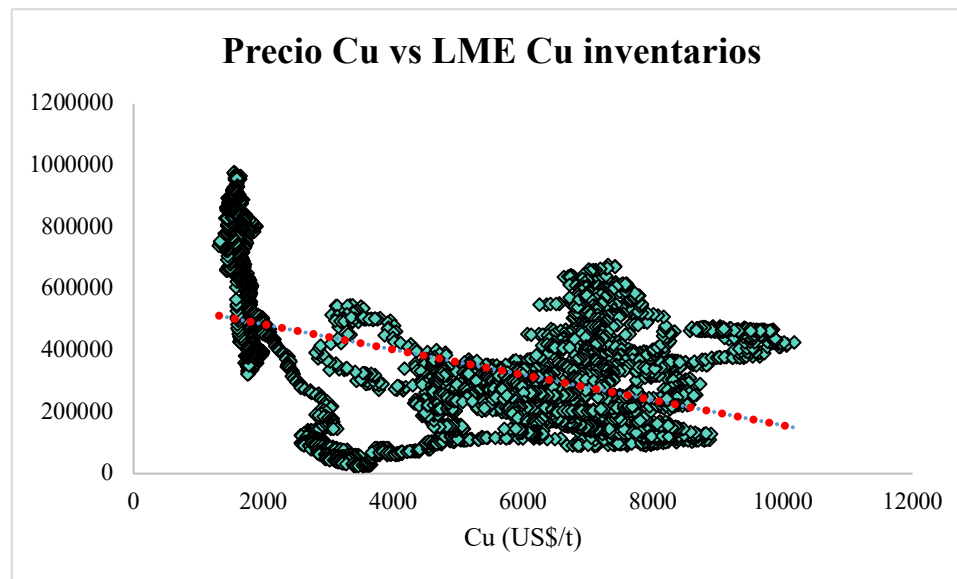
Figura xxiii: Diagrama de dispersión del precio del cobre contra el índice DXY.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bloomberg Energy (2019)

Los inventarios en el LME suelen tener una correlación inversa con el precio del cobre. La lógica económica detrás de este efecto es que conforme aumenta la demanda del cobre los inventarios disminuyen provocando que se produzca un exceso de demanda y que los precios tiendan al alza. Por lo contrario, si el LME comienza a acumular inventarios el mercado estaría experimentando un exceso de oferta que empujaría los precios a la baja. Esto se puede observar en la correlación negativa de la figura xxiv.

Figura xxiv: Diagrama de dispersión del precio del cobre contra los inventarios de London Metal Exchange.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); World Bureau of Metal Statistics (2019)

Estos resultados tienen sentido ya que una reducción en inventarios en un metal empleado para la producción de bienes de consumo se equipara a un aumento en la demanda (Lutz, 2010) que produce un incremento de los precios del cobre.

El Purchasing Managers Index (PMI) se emplea como un indicador de salud del sector manufacturero de una economía. En concreto, nos focalizamos en el PMI de China, debido a su gran importancia en la industria manufacturera de productos electrónicos que requieren un alto uso de cobre. Un sector manufacturero chino saludable debería provocar un aumento en el precio del cobre ya que acarrearía un mayor consumo de este metal para la producción de productos que, posteriormente, se exportan a otros países y/o se quedan en el país.

Como ya hemos podido percibir, predecir el precio de los metales conlleva enormes dificultades. Ni los precios establecidos por los analistas, ni los establecidos por las empresas mineras pueden dar las bases para una estrategia de inversión de suficiente confianza en la industria del cobre. Nuestro objetivo, no es encontrar la piedra filosofal, sino publicar una estrategia de inversión en cobre que genere un alfa significativa y que ayude a entender los fundamentales de la industria.

A continuación, realizamos dos modelos multivariados aplicando un retardo para tratar de predecir el precio del cobre y realizar una estrategia de trading en base a los resultados modelados.

Para formar las estrategias de trading hemos optado por utilizar el modelo estructural explotando el análisis de los fundamentales. Una natural extensión de este trabajo incluiría la estimación del VECM y la creación de estrategias de trading en base a este modelo. Este es un tipo de modelo de series temporales multivariados que se emplea cuando las variables explicativas tienen una tendencia a revertir a la media como ocurre en el caso del coste marginal y el precio del cobre. En el modelo que presentamos posteriormente empleamos un modelo estructural por simplicidad y con la misión de demostrar la importancia de los fundamentales.

El método empleado para calcular los retardos óptimos es el criterio de información de Akaike (1974). Este criterio sirve para comparar modelos teniendo en cuenta el ajuste de modelo y la complejidad de este.

Somos conscientes de las dificultades inherentes de construir una estrategia de trading que funcione en el mundo real y que no sufra de las debilidades que Richard Bookstaber (2017) remarcaba en su libro “The end of theory”. Richard Bookstaber ofrecía cuatro críticas al estado de la actual de la teoría macroeconómica, y en concreto, criticaba la aplicación de esa teoría a los ciclos económicos reales. En líneas generales concluye que la teoría actual es deficiente en tener en cuenta cuatro características claves del mundo real: reducción computacional, fenómeno emergente, incertidumbre radical y no ergodicidad.

En primer lugar, la característica de reducción computacional remarca que el mundo real está caracterizado por problemas en los que no hay un “atajo” para calcular lo que ocurrirá antes de experimentar lo que realmente ocurre.

En segundo lugar, el fenómeno emergente se refiere a que el total no es generalmente reducible a la suma de las partes. Los sistemas poseen propiedades que sus componentes

aislados no contienen. Por ejemplo, un individuo puede pensar, pero ninguno de los átomos de los que está compuesto puede pensar.

La tercera característica, la de incertidumbre radical, se refiere a la predominancia de no conocidos no conocidos sobre los conocidos no conocidos. Por ejemplo, el mundo no es solo más complejo de lo que podemos imaginar, sino que es más complejo de lo que podemos llegar a imaginar, para citar a Haldane y Price (1928).

Por último, el principio de no ergodicidad se basa en la ausencia de leyes temporales invariables que gobiernen el sistema de comportamiento del mundo. Es decir, que las estimaciones de una relación entre valores de diferentes activos durante un periodo de tiempo concreto no son necesariamente representativas de esa relación en otro periodo de tiempo distinto.

Sus comentarios sobre la no ergodicidad son particularmente pertinentes en el caso de las estrategias de trading:

“He experimentado esto de primera mano cuando estaba al mando de un short-long Hedge fund...Leía la literatura académica en busca de posibles estrategias que pudieran generar un alfa significativa, y en todos los casos cuando trataba de aplicar esas estrategias a un periodo más reciente, uno que estaba fuera de la muestra propuesta, la estrategia fracasaba” (Bookstaber, The End of Theory: Financial Crises, the Failure of Economics, and the Sweep of Human Interaction, 2017)

Posteriormente comentaba:

“La inestabilidad temporal es la pesadilla de algunos de los modelos financieros más fundamentales... En física puede que modelar procesos ergódicos no restrinja la credibilidad, pero en las ciencias sociales es ridículo” (Bookstaber, The End of Theory: Financial Crises, the Failure of Economics, and the Sweep of Human Interaction, 2017)

Compartimos la frustración de Bookstaber con la ineficacia de las estrategias de trading dentro y fuera de la muestra propuesta. Este no es el único problema, sino que las estrategias de trading suelen destruir valor debido a que no funcionan fuera de la muestra

escogida (Bookstaber & Roger, Option Portfolio Strategies: Measurement and Evaluation, 1984). Si alguien quiere valorar acciones de compañías mineras, en el sentido de entender su labor en generar riqueza, la única forma de conseguirlo es mediante el análisis del precio del metal en el largo plazo y el estudio de la cadena de valor de la industria. Por ello, para calibrar nuestro modelo empleamos dos metodologías de calibración: un modelo que incluya todos los datos de la muestra y mire al futuro, y otro modelo que comprenda un enfoque retrospectivo.

En cuanto al primer modelo, somos conscientes del “look-ahead bias” de los resultados. Por ello empleamos un segundo modelo que emplea una ventana rodante que estima los parámetros que informan instantáneamente la decisión de trading. Por tanto, toda la actividad de trading generada por el modelo de back-testing hubiera empleado solo los datos disponibles en el momento en el que se iba a dar la orden de operación.

Entre las variables del modelo que incluye toda la muestra incluimos el coste marginal ya que, como hemos demostrado a lo largo de este trabajo, el coste marginal está cointegrado con el precio en el largo plazo. Al solo tener datos mensuales durante 10 años para estas variables el estudio queda muy limitado. Para calcular el retamar óptimo empleamos el método de Akaike (1974). La regresión para explicar el precio del cobre es:

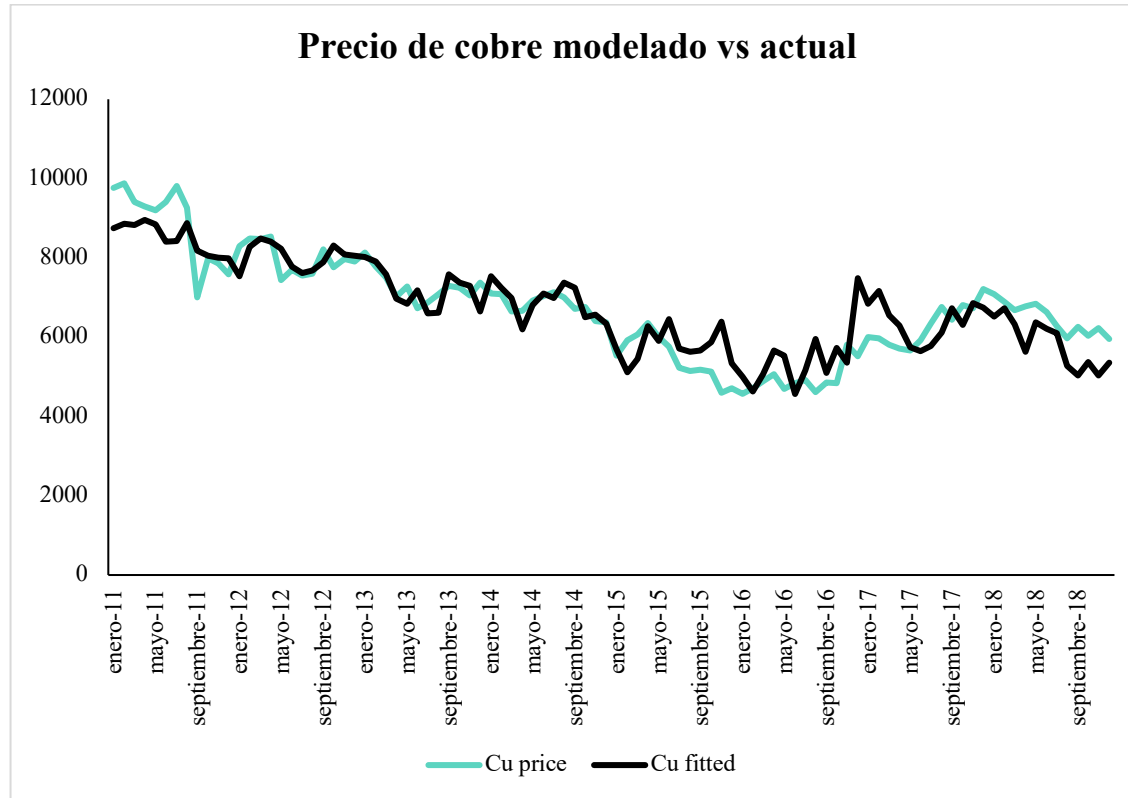
$$P_t = \alpha + \beta \text{coste marginal}_{t-1} + \beta \text{NCF}_{t-1} + \beta \text{PIB global}_{t-1} + \varepsilon$$

Figura xxv: Los resultados de la regresión lineal del coste marginal, volumen de trading de futuros no comerciales y PIB global contra el precio son las variables significativas.

<i>Regression Statistics</i>			
R-cuadrado	77%		
	<i>Coefficientes</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-valor</i>
Intercept	20363	11,8	***
c_{t-1}	0,42	3,1	***
$CFTC_{t-1}$	0,03	10,8	***

PIB_{t-1}	-0,21	-12,2	***
-------------	-------	-------	-----

Figura xxvi: Precio del cobre calculado mediante la regresión del coste marginal, volumen de trading de futuros no comerciales y evolución del PIB global vs precio actual del cobre.



Fuente: Elaboración propia con datos de USGS (2019); Ecology and Natural Resources Collection (2019); Bureau of the Census (1949); CRU (2018); Wood Mackenzie (2019); Bloomberg Energy (2019); World Bureau of Metal Statistics (2019)

Posteriormente realizamos un modelo de back-testing y comprobamos que la estrategia funciona en el pasado. Siguiendo lo establecido por la metodología de Box-Jenkins (Harvey & Todd, 1983) una ventana rodante sobre un tamaño de muestra de 30 meses para comprobar que el modelo funciona fuera de la muestra. Los parámetros obtenidos por esa regresión emplean los datos del coste marginal, futuros y PIB disponibles en el momento para informar la decisión de trading que se debe tomar. No nos interesa aplicar una ventana de mayor tamaño porque como Hayek (1945) remarcaba la información se degrada con el tiempo. No hay ninguna razón por la que la información sobre la estructura del mercado del cobre en un punto muy lejano de tiempo sea relevante para la formación de los precios del cobre en el mercado actual. Por ello, queremos limitar el tamaño de la ventana para no recaer en este error. Al mismo tiempo, el empleo de una ventana muy

pequeña provocaría inestabilidad en el modelo y correría el riesgo de eliminar información potencialmente significativa para entender la situación del mercado del cobre actual. En el fondo, lo que nos estamos preguntando es ¿Cuál es la velocidad con la que la información útil se erosiona?

Resultados

En esta sección presentamos tres resultados: los resultados de la reversión a la media de los márgenes de ebitda, los resultados de las dos regresiones dentro y fuera de muestra para crear la estrategia de trading.

Como los resultados indican, el mejor indicador del precio que podemos encontrar son los márgenes de ebitda, ya que estos revierten a la media en el largo plazo. Ello significa que, en el largo plazo, si el coste de minar el cobre aumenta el precio del cobre deberá aumentar. Como establecimos al principio del presente trabajo en la industria minera los costes han aumentado con el paso de la historia como resultado de la “minería selectiva”. Por lo tanto, no es correcto decir que los precios del cobre revierten respecto a la media en el corto plazo, sino que el efecto combinado de precio y costes es el que revierte, y generalmente lo hace en el largo plazo. Por ello, si nos hubiéramos focalizado en el precio únicamente no hubiésemos sido capaces de llegar a una conclusión relevante. Por ejemplo, Geman (2005) sugerían que muchos analistas financieros usan a reversión a la media para pronosticar los precios de las commodities. La idea de este método es que tanto los precios altos como los bajos son temporales y que en el largo plazo el precio tenderá a su precio medio histórico ajustado por la inflación. El problema es que la oferta de commodities no renovables crece más lento que su demanda. Por tanto, los precios de las commodities se deberán incrementar en el largo plazo y no mantenerse constantes como asume la teoría de la reversión a la media de los precios.

El gran error fue que estaban estudiando el dato erróneo. Mientras que es verdad que los precios desde que Estados Unidos abandonó el patrón oro en 1972 están en constante crecimiento, no ocurre lo mismo con los márgenes de Ebitda.

Éstos históricamente han tendido a mantenerse en torno a la media por la falta de ventajas competitivas en la industria del cobre y minera en general. La única ventaja que se puede

alcanzar en este sector es poseer minas de mayor calidad o bajo coste que permitan alcanzar un mayor margen en la operación, pero no existen grandes ventajas competitivas en el proceso. De ahí el término “mercado comoditizado” para referirse a aquellos mercados en el que las ventajas competitivas son escasas.

De hecho, uno de los grandes problemas en la industria minera actual es el bajo incentivo para innovar, ya que mientras que el coste de innovar lo soporta solo un actor, las ventajas se reparten entre todos los actores del mercado algo que genera una desventaja competitiva y un desincentivo para el innovador. Por ejemplo, el grupo Sudafricano Harmony Gold ha innovado en el empleo de la energía solar y está pilotando un programa para usar las áreas mineras para destinarlas a la producción de biocombustibles que posteriormente produzcan gas natural para propulsar su maquinaria. Como podemos ver, este sistema circular les ayudaría a reducir los costes operacionales y minimizar su impacto medioambiental. El problema es que sus competidores, al darse cuenta de que Harmony Gold ha reducido sus costes aplicando un nuevo proceso le imitarían. Al final, Harmony Gold acabaría sin ninguna ventaja competitiva frente a sus competidores y con un coste extra provocado por ser el “innovador”. El ejemplo que antes mencionábamos de Rio Tinto con el empleo de tractores autónomos es igualmente aplicable a esta situación.

Los resultados de la primera regresión sugieren que aplicando esta estrategia podríamos generar un rendimiento anual del 12,25%. Esto significa que si hubiéramos invertido 1.000 euros en enero de 2011 y hubiéramos vendido en noviembre de 2018 tendríamos 3.521 euros.

Aunque este resultado parece espectacular no lo es tanto si se tienen en cuenta dos objeciones

La primera objeción es que en el mundo real se deberían incluir los costes de transacción y los costes de financiación de una actividad de trading. Los costes de transacción son al menos de 0.1% para un inversor institucional y más del doble para un inversor particular. Los costes de financiación de una actividad de trading en un banco son de alrededor del 9% anual y es casi imposible para un particular lograr financiación para fines especulativos. De lograrlo sería a un coste superior al 12% mencionado arriba. Por tanto, podemos concluir que nuestro modelo de trading sí sería viable para un inversor

institucional pero no para un inversor particular a menos que disponga de capital propio y no tenga alternativas de inversión más rentables ajustadas por riesgo

La segunda objeción es que nuestro modelo incluye un “look-ahead bias”. Los resultados del modelo de back-testing demuestran que el modelo anterior incluye un “look-ahead bias” que hace parecer que la estrategia genera riqueza. Pero lo más probable es que si aplicamos la estrategia anterior fuera de muestra no generaríamos tal riqueza. Este modelo nos ayuda a comprender la dificultad de generar un modelo de trading que funcione fuera de la muestra propuesta. Con el modelo de somos capaces de acertar la dirección del precio del cobre en un 54,7% de los casos, lo cual parece atractivo. Sin embargo, si sumamos los beneficios logrados al acertar la dirección y las pérdidas sufridas al equivocarnos, el resultado es ligeramente negativo. Es decir, cuando nos equivocamos, aunque sea menos veces, perdemos más dinero de lo que ganamos en las ocasiones en que acertamos la dirección del mercado. En concreto perderíamos un 0.6% anual en el periodo 2011 a 2018

Conclusiones

El trabajo nos permite alcanzar tres conclusiones muy significativas. En primer lugar, frente al reciente movimiento de “financiarización de las commodities”, podemos afirmar que el precio de los metales está basado en sus fundamentales. En segundo lugar, conseguimos descomponer el crecimiento de la demanda del cobre en crecimiento de la PIB, crecimiento de la población y crecimiento de la intensidad de los metales. Esto nos permite realmente entender que variables afectan a la demanda y poder hacer mejores estimaciones futuras de la demanda de cobre. Por último, observamos que se va a producir un déficit de oferta provocado por la falta de inversión de las mineras, ya que a los precios actuales no es rentable invertir en descubrir nuevas minas. Uniendo el lado de la oferta y la demanda nos damos cuenta de que si no suben los precios del cobre no tendremos suficiente cobre para posibilitar nuestras ambiciones de que siga creciendo la población mundial y su nivel de vida, así como la “revolución eléctrica” que nos permita descarbonizar nuestras economías, mejorar el medio ambiente y reducir la amenaza del calentamiento global.

Estos resultados nos permiten establecer que hay un “precio fundamental” del cobre en el largo plazo. Como hemos demostrado que los márgenes de Ebitda revierten a su media histórica, las únicas variables a despejar son precio y coste marginal. Además, dado que el coste marginal de extraer el cobre tiende a crecer históricamente desde el año 1928 podemos concluir que el precio del cobre continuará creciendo de modo estructural a largo plazo, al igual que lo ha hecho históricamente para que el margen de Ebitda y retorno de capital sean sostenibles.

Una de las contribuciones más importantes de este trabajo es aportar y explotar una fuente de información única con una serie de datos mensual de precios, costes y márgenes de Ebitda de más de 90 años.

Muchos inversores evitan invertir en commodities porque opinan que los precios de las materias primas son muy volátiles, sujetos a elevada especulación y poco predecibles. Esto puede ser en parte cierto a corto plazo. Sin embargo, este trabajo demuestra que los fundamentales de la industria siguen siendo la clave para explicar el precio del cobre a medio y largo plazo.

En este trabajo proponemos una estrategia de trading de cobre basada en un modelo econométrico multivariable. Los resultados nos permiten adoptar una estrategia de trading rentable pero solo para inversores institucionales de gran tamaño que puedan minimizar los costes de transacción y de financiación. Para inversores particulares es muy difícil que sea rentable tras asumir esos costes. La principal objeción es que los resultados son cuestionables fuera de la muestra. Es decir que empleando un modelo de back testing no se puede demostrar que la estrategia genere beneficios de manera sistemática. El modelo predice bien la dirección del precio en un 54,7% de los casos, pero los errores suelen ser de mayor cuantía que los aciertos, por lo que el neto es cercano a cero.

Sin embargo, nuestro modelo de trading sí puede ser útil para identificar oportunidades de inversión puntuales es momentos de extrema infravaloración o sobrevaloración del precio del cobre. Por ejemplo, cuando el precio está muy por debajo de una desviación estándar de la media del margen de Ebitda, comprar cobre. O a la inversa cuando está muy por encima de una desviación estándar ponerse corto en cobre apostando porque

caerá. El problema es que esto sólo sucede de manera excepcional. En total unas 10 veces en los últimos 90 años.

Opinamos que cuatro líneas de investigación para mejorar este trabajo. Una primera vía para mejorar el trabajo sería encontrar más variables explicativas que lideren el precio del cobre.

Otra vía interesante involucraría el estudio e inclusión en el modelo de trading de los retornos de capital empleado de la industria. Esto es interesante porque dos minas con el mismo Ebitda pueden tener una rentabilidad sobre el capital empleado muy diferentes. Por ejemplo, si una de las minas requiere la construcción de una red de ferrocarril de 20 km mientras que otra idéntica requiere 2000km de ferrocarril, el retorno sobre el capital empleado de la primera mina será mayor que el de la segunda, aunque el Ebitda de ambas fuese muy similar.

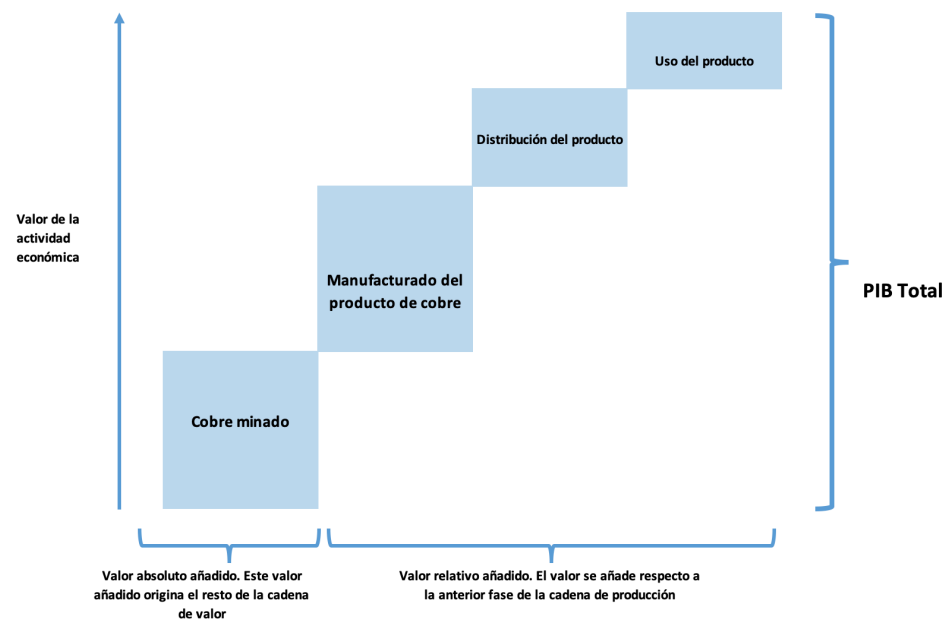
Una tercera vía de continuación lógica de este trabajo involucraría investigar el funcionamiento del “dilema del prisionero” en la industria minera mediante la aplicación de modelos matemáticos de la teoría de juegos. Profundizar más en este tema nos permitiría entender mejor las dinámicas competitivas del sector minero y cómo funciona el sistema competitivo del sector del cobre en particular. Como hemos explicado las compañías mineras tienen que tomar decisiones de incrementar su producción o no en momentos en el que los precios de los metales están al alza. Por lo tanto, si una minera decide no aumentar su producción mientras que el resto de las mineras sí lo hacen el precio se reducirá, sus márgenes se estrecharán y sus beneficios caerán. En cambio, si todas deciden aumentar su producción, los márgenes se estrecharán aún más pero cada empresa a nivel quedará en mejor situación que si decidiera no producir más mientras que el resto de minera aumenta su oferta. Este argumento es una de las claves que fundamenta la reversión a la media de los márgenes de Ebitda.

Por último, una cuarta vía para expandir este trabajo sería estudiar cómo afecta la variación del precio de los subproductos del cobre en el precio del cobre. Uno de los subproductos más importantes del cobre es el cobalto, que es clave para la fabricación de baterías de los coches eléctricos. Sería interesante estudiar en que medida afecta el

incremento esperado del precio del cobalto en los niveles de producción del cobre y por tanto en su precio.

Anexos

Anexo i. Empleo de la cadena de valor para calcular el PIB de una nación. Como podemos observar la extracción de los materiales es el primer paso de la cadena de valor.



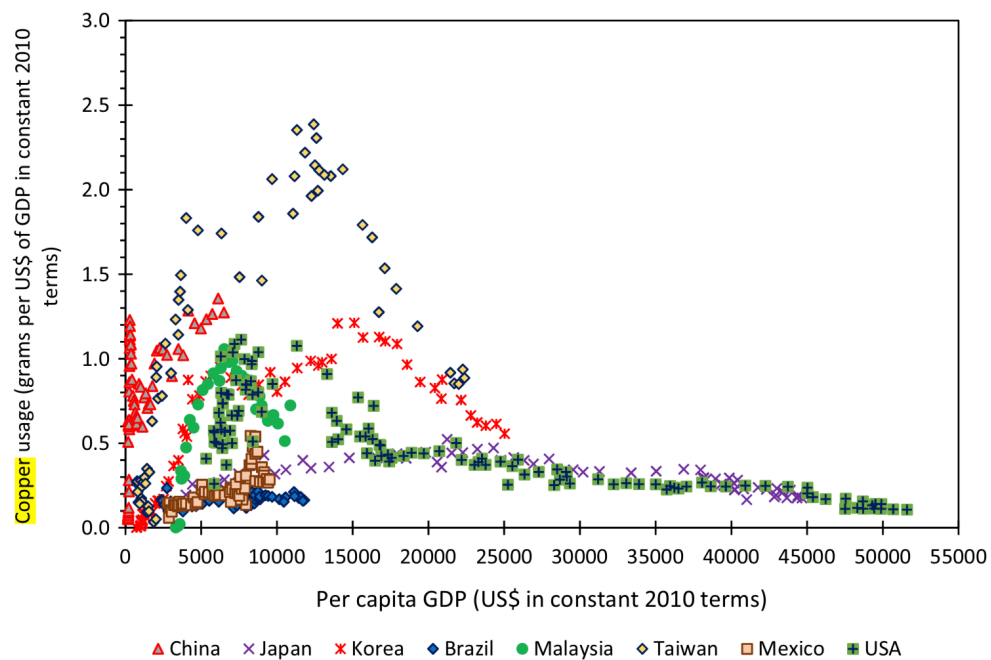
Fuente: Elaboración propia en base a Skousen (1990)

El mundo de los materiales siempre ha venido determinado por la naturaleza, que es la mayor diferencia entre la industria minera y otras industrias de consumo como la tecnológica, automovilística, la medicina, etc. Por ello podemos afirmar que “cada etapa de la cadena de valor, excepto la primera, tiene un fin de transformación y solo la primera etapa de la producción es verdaderamente de creación” (Skousen, 1990). Según esta afirmación es solo en el primer paso de la cadena de valor cuando la materia es “creada” en vez de transformada. Gracias a ello, podemos afirmar que mientras la industria minera sufre de una escasez absoluta, ya que solo se puede minar lo que hay en la corteza terrestre, el resto de las industrias experimentan una escasez relativa. Con escasez relativa nos referimos a que, si la industria automovilística tuviera acero y hierro hasta el infinito, podríamos construir tantos automóviles como quisiéramos. Por lo tanto, escasez relativa significa que la escasez en esa industria depende de otra industria que tiene una escasez absoluta, como en este caso la industria minera. Este

hecho, es la principal razón por lo que la reversión en los márgenes de EBITDA solo se podrá encontrar en industrias comoditizadas y no en industrias de consumo.

Por lo tanto, el flujo de metales en la economía es lo que realmente limita el crecimiento de los productos de consumo y por lo tanto del Producto Interior Bruto utilizado para medir el crecimiento de las economías. De forma simplificada, si el flujo de cobre en la economía global es 2% al año, entonces el flujo de productos que contienen cobre no podrá superar este número (suponiendo que no tenemos en cuenta los ciclos de inventarios). Por lo tanto, este análisis muestra que sólo hay dos formas de alcanzar crecimiento económico sostenible: incrementar el abastecimiento de productos y servicios en la economía o incrementar la velocidad a la que los productos existentes son consumidos, es decir acelerar el flujo

Anexo ii. La intensidad del cobre varía según la fase de desarrollo.



Fuente: Crowson (2018)

Generalmente siguen una forma de U invertida que se debe a que al principio de las fases de desarrollo una economía es muy intensiva en cobre debido a la electrificación del país y la construcción de infraestructuras. Pero conforme avanza en sus fases de desarrollo la intensidad del cobre se aplanan debido a la predominancia de una economía de servicios.

Nosotros esperamos que si las expectativas actuales en los coches eléctricos y del empleo de una energía más limpia se cumplen la intensidad del cobre experimentará otro repunte.

Como podemos observar en el gráfico Estados Unidos se encuentra en una fase avanzada de desarrollo económico caracterizada por una baja intensidad de cobre. En cambio, otros países como China o India aún se encuentran en su fase de desarrollo ya que la intensidad del cobre está en constante crecimiento.

Anexo 3. Augmented Dickey Fuller Test values

Table 12.2 Critical Values for the Dickey–Fuller Test

Model	1%	5%	10%
$\Delta y_t = \gamma y_{t-1} + v_t$	-2.56	-1.94	-1.62
$\Delta y_t = \alpha + \gamma y_{t-1} + v_t$	-3.43	-2.86	-2.57
$\Delta y_t = \alpha + \lambda t + \gamma y_{t-1} + v_t$	-3.96	-3.41	-3.13
Standard critical values	-2.33	-1.65	-1.28

Estos valores son cogidos de MacKinnon (1993) *Estimation and inference in econometrics*, New York: Oxford University Press, p.708

Fuentes de datos:

Hay numerosas fuentes para la obtención de datos:

1. Los precios mensuales del cobre entre 1960 y 2018 se encuentran World Bank commodity prices “Pink Sheet”
2. Los precios mensuales del cobre entre 1928 y 1960 se encuentran en la página web del USGS. En concreto son parte de una colección especial de los anuarios del Ecology and Natural Resources Collection. Para el cálculo de los precios mensuales se emplea el precio medio del cobre.
3. Los datos del 90 percentil de la curva de costes están extraídos del London Metal Exchange, CRU, Wood Mackenzie, MineSpans, MineLens.

Referencias

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 716-723.
- Antofagasta PLC. (2018, marzo 13). Retrieved febrero 20, 2019, from <https://seekingalpha.com/article/4156032-antofagastas-anfgf-ceo-ivan-arriagada-2017-full-year-results-earnings-call-transcript>
- Balvers, R., Gilliland, E., & Wu, Y. (2000). Mean Reversion across National Stock Markets and Parametric Contrarian Investment Strategies . *The Journal of Finance*, 745-772.
- Balvers, R., Wu, Y., & Gilliland , E. (2002). Mean Reversion across National Stock Markets and Parametric Contrarian Investment Strategies. *The Journal of Finance*, 55(2).
- Banco Mundial. (2019, enero). Retrieved enero 14, 2019, from <https://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-prospects>
- Barker, C., & Page, B. (1974, October). OPEC as a model for other mineral exporters. *IDS Bulletin*, pp. 81-90.
- Bessembinder, H., Coughenour, J., Seguin, P., & Smoller, M. (1995). Mean Reversion in Equilibrium Asset Prices: Evidence from the Futures Term Structure. *The Journal of Finance*.
- Bloomberg. (2019). Bloomberg database.
- Body, Z., Kane, A., & Marcus, A. (2017). *Investments*.
- Bookstaber, R. (2017). *The End of Theory: Financial Crises, the Failure of Economics, and the Sweep of Human Interaction*. Princeton University Press.
- Bookstaber, R., & Roger, C. (1984). Option Portfolio Strategies: Measurement and Evaluation. *The journal of business*, 469-492.
- Bureau of Mines. (1950). (L. L. Fischman, Ed.) Retrieved diciembre 2018, 12, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1950>
- Bureau of Mines. (1959). Retrieved Enero 12, 2019, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1958v2>

- Bureau of Mines. (1988). Retrieved diciembre 21, 2018, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1988v1>
- Bureau of Mines. (1990). Retrieved diciembre 2018, 20, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1990v1>
- Bureau of the Census. (1949). U.S. Department of Commerce.
- Commodity Markets, W. B. (2018, October 02). *World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet)*. Retrieved November 1, 2018, from <http://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets#1>
- Conrad, J., & Clark, C. (1987). *Natural Resource Economics: Notes and Problems*. Cambridge University Press.
- Copper Development Association. (2017). *Copper Development Association*. Retrieved 12 9, 2018, from Copper drives Electric Vehicles: <https://www.copper.org/>
- Crowson, P. (2018). Intensity of use reexamined. *Mineral Economics*, 61-70.
- CRU. (2018). Retrieved octubre 2018, from <https://www.crugroup.com>
- Ecology and Natural Resources Collection. (2019). Retrieved febrero 2019, from <https://uwdc.library.wisc.edu/collections/econatres/>
- Economipedia. (2019). Retrieved from <https://economipedia.com/historia/escuela-austriaca.html>
- Elshkaki, A. T. (2018). Resource Demand Scenarios for the Major Metals. *Environmental Science & Technology*, 2491-2497.
- Engle, R., & Granger, C. (1987). *Co-integration and error correction: Representation, estimation and testing*. *Journal of the Econometric Society*.
- Fama, E., & French, K. (1988). *Business cycles and the behaviour of metals prices*. *Journal of Finance*.
- Fama, E., & French, K. (1988). *Business cycles and the behaviour of metals prices*. *Journal of Finance*.
- Fama, E., & French, K. (1988, Apr). Permanent and Temporary Components of Stock Prices. *Journal of Political Economy*, 246-273.
- Fattouh, B. (2007). *OPEC Pricing Power The Need for a New Perspective*. Oxford Institute for Energy Studies .

- Figuerola-Ferretti, I., & Gilbert, C. L. (2001). *Price variability and marketing method in non-ferrous metals: Slade's analysis revisited*. Resources Policy.
- Figuerola-Ferretti, I., & Gonzalo, J. (2010). *Modelling and measuring price discovery in commodity markets*. Journal of Econometrics.
- Figuerola-Ferretti, I., & Gonzalo, J. (2010). *Modelling and measuring price discovery in commodity markets*. Journal of Econometrics.
- Financial Times. (2018, julio 9). Retrieved enero 14, 2019, from <https://www.ft.com/content/30f7e328-8372-11e8-96dd-fa565ec55929>
- Fleet, D. (2007, febrero 9). Retrieved enero 2019, from https://es.wikipedia.org/wiki/Cami%C3%B3n_minero#/media/File:CamionFermont.png
- Fondo Monetario Internacional. (2018, octubre). Retrieved enero 14, 2019, from https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOORLD
- Fuse, M., Yamasue, E., Reck, B. K., & Graedel, T. (2011, February 15). Regional development or resource preservation? A perspective from Japanese appliance exports. *Ecological Economics*, 70, 788-797.
- Gait, P. (2018, July). (E. Valverde, Interviewer, & E. Valverde, Translator) London.
- Gait, P. (2018). *Metals & Mining Bernstein Summer School*. Sanford C. Bernstein. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., & Absolon, J. (2018). "Active" or "Passive" management in mining, what is superior management worth? (Or, What does Glencore get right?). Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., & Absolon, J. (2018). *Ivanhoe: Two new puzzle pieces and the whole picture begins to emerge*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., & Absolon, J. (2018). *Metals & Mining: On the role of mined commodities in economic growth*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.

- Gait, P., & Absolon, J. (2018). *Metals & Mining: Why anyone who has ever flown in a plane, bought an iPhone or wants a Tesla needs to care about the DRC*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., & Absolon, J. (n.d.). *Metals & Mining: The dramatic implications of what the world gets wrong about Chinese Iron ore and steel production*. Metals & Mining Equity Research. 2018: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Chuhay, A. (2017). *The long-view: Moore's Law in mining: what it is, what it did and why it matters... a little christmas reading!* Metals & Mining Equity Research. London: Sanford c. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Chuhay, A. (2018). *"Thoughts from our copper seminar, and the structure of global copper demand growth"*. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Chuhay, A. (2018). *Metals & Mining: An inflection point? What mean reversion implies about the potential upside from here*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Chuhay, A. (2018). *Metals & Mining: Facebook, mining and the value of growth: What does it mean for Anglo's Quellaveco project?* Metals & Mining Equity Research. London: Sanford c. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Chuhay, A. (2018). *The long-view: Can the global economy grow without mining? An inquiry concerning the potential for dematerialised growth*. Metals & Mining: Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Absolon, J., & Tubb, C. (2017). *Metals & Mining: IRResponsible capital management? Lithium economic returns and "fair" commodity prices*. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Floris, M. d., & Absolon, J. (2017). *Metals & Mining: Forecasting the future - Developing an integrated econometric model of the copper industry*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Floris, M. M., & Absolon, J. (2016). *European Metals & Mining: A quantity theory of growth - Towards a Hylomorphic description of the economy*. Sanford C. Bernstein, Equity Research. AB Bernstein.

- Gait, P., Floris, M. M., & Absolon, J. (2016). *Global Metals & Mining: What Happened in 2015 & Why will 2016 be different - Mining the art of Nephelococcygia*. Metals & Mining Equity Research. London: Sanford C. Bernstein.
- Gait, P., Megel, M., & Absolon, J. (2015). *The Long view: Metals & Mining: Making a margin call - The case for mean-reverting EBITDA margins in mining*. London: Sanford C. Bernstein.
- Garcia-Oliveres, A., Ballabrera-Poy, J., Garcia-Ladona, E., & Turiel, A. (2012). A global renewable mix with proven technologies and common materials. *Energy Policy*, 561-574.
- Geman, H. (2005). Energy Commodity Prices: Is Mean-Reversion Dead? *The Journal of Alternative Investments*.
- Graedel, T. (2011, August). On the Future Availability of the Energy Metals. *Center for Industrial Ecology, Yale University*.
- Graedel, T. E. (2011). The prospects for urban mining. *The Bridge*, 43-50.
- Graedel, T. E. (n.d.). *A Circular Economy of Metals: Towards a Sustainable Societal Metabolism*. Retrieved from Coursera:
<https://www.coursera.org/lecture/circular-economy-metals/criticality-of-metals-by-thomas-e-graedel-part-1-PM94X>
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., . . . Sonnemann, G. (2011). What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, 355-366.
- Graedel, T. E., Bertram, M., Kapur, A., Reck, B., & Spatari, S. (2004, January 16). Exploratory Data Analysis of the Multilevel Anthropogenic Copper Cycle. *Center for Industrial Ecology*.
- Graedel, T., & Erdmann, L. (2012, April 09). Will metal scarcity impede routine industrial use? *Materials Research Society Bulletin*, 37(4), 325-331.
- Graedel, T., Beers, D. v., Bertram, M., Fuse, K., Gordon, R., Gritsinin, A., . . . Vexler, D. (2004). The multilevel cycle of anthropogenic copper. *Environmental Science & Technology*, 1253-1261.
- Haldane, J., & Price, C. (1928). *Possible worlds*. Routledge.

- Harvey, A., & Todd, P. (1983). Forecasting Economic Time Series With Structural and Box-Jenkins Models: A Case Study. *Journal of Business & Economic Statistics*, 299-307.
- Hayek, F. (1945). The Use of Knowledge in Society. *The American Economic Review*, 519-530.
- Herbert, H. (1938). Retrieved febrero 2019, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1937>
- Hui, H., & Xi-huai, Y. (2009). 2009 Chinese Control and Decision Conference. *A game theory analysis of international iron ore manufacturers strategic alliance*. Guilin, China: IEEE.
- Hume, N. (2015, enero 29). Retrieved from <https://www.ft.com/content/678f78f8-a714-11e4-8a71-00144feab7de>
- Humphreys, D. (2013). *Long-run availability of mineral commodities*. Springer Berlin Heidelberg.
- International Monetary Fund. (2019). Retrieved enero 2019, from <https://www.imf.org/en/data>
- Jamasmie, C. (30 de enero de 2018). Obtenido de <http://www.mining.com/rio-tinto-autonomous-trucks-now-hauling-quarter-pilbara-material/>
- Johnson, J., & Graedel, T. (2008). The 'Hidden Trade' of metals in the United States. *Journal of Industrial Ecology*.
- Julihn, C., & Meyer, H. (1933). Minerals Yearbook 1932-1960. pp. 27-52.
- Kapur, A., & Graedel, T. (2006). Copper mines above and below the ground. *Environmental Science and Technology*, 135-3141.
- KGHM Polska Miedz. (2019). Retrieved from <https://kghm.com/es/negocio/procesos/sx-ew>
- Kiessling, O. E. (1934). Retrieved diciembre 9, 2018, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1933>
- Kiessling, O. E., & Hughes, H. H. (1936). Retrieved Enero 2, 2018, from <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1936>

- Kowalski, C. (2019, enero 25). Retrieved from <https://www.thebalance.com/how-the-dollar-impacts-commodity-prices-809294>
- Kreps, D., Milgrom, P., Robert, J., & Wilson, R. (1982). *Journal of Economic Theory*, 245-252.
- Leung, T., Li, J., Li, X., & Wang, Z. (2015). Speculative Futures Trading under Mean Reversion. *Journal Asia-Pacific Financial Markets*.
- London Metal Exchange. (2019, enero 26). Retrieved from <https://www.lme.com/en-GB/About/History>
- Lutz, B. (2010). Pricing of derivatives on mean-reverting assets.
- M.L.C.M.Henckens, Ierlandb, E., P.P.J.Driessen, & E.Worrella. (2016). *Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations* (Vol. 49). Elsevier.
- Mackinnon, J. (1990). Critical Values for Cointegration Tests. 267-276.
- Maddison project. (2018). Retrieved febrero 2019, from <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2018>
- Malthus, T. (1798). *An essay on the principle of population*.
- McKinsey. (2009, abril). *Enduring Ideas: The industry cost curve*. Retrieved from <https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/enduring-ideas-the-industry-cost-curve>
- Mining Weekly. (2017, febrero 8). Retrieved enero 14, 2019, from <http://m.miningweekly.com/article/enormous-global-demand-on-way-for-copper-platinum-zinc-friedland-2017-02-08>
- Minister for the Ecological and Inclusive Transition of France. (2017, julio 6). Retrieved enero 14, 2019, from <https://www.gouvernement.fr/en/climate-plan>
- Naciones Unidas. (2017, junio). Retrieved enero 14, 2019, from <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- Nguyen, R. T. (2018). Analyzing critical material demand: A revised approach. *Science of the Total Environment*, 1143-1149.

- Piketty, T. (2013). *Capital in the Twenty-First Century*. The Belknap Press of Harvard University Press.
- Poterba, J., & Summers, L. (1987, Aug.). Mean reversion in stock prices: Evidence and implications. *National Bureau of Economic Research*.
- Prior, T. G. (2007). Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management.
- Reck, B., & Graedel, T. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, 690-695.
- Rio Tinto. (2018). Retrieved enero 15, 2019, from <http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx>
- Rouwenhorst, K., Gatev, E., & Goetzmann, W. (2006). Pairs trading: Performance of a relative value arbitrage rule. *Yale ICF Working Paper*.
doi:<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.141615>
- S&P Global Market Intelligence. (2018, marzo). Retrieved febrero 2019, from <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/2018-World-Exploration-Trends-Report-2018-SP-Global-Market-Intelligence.pdf>
- Self Bank. (2019). Retrieved from <https://blog.selfbank.es/roce-retorno-del-capital-empleado/>
- Singer, D. A., Berger, V. I., & Moring, B. C. (2002). *Porphyry copper deposits of the world: database, maps, and preliminary analysis*. USGS, Geology, Minerals, Energy and Geophysics Science Center. Reston, VA: U.S. Geological Survey. Retrieved November 1, 2018, from U.S. Geological Survey:
<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr02268>
- Skousen, M. (1990). *The structure of production*. NYU Press.
- Smil, V. (1994). *Energy and civilization: a history*. Cambridge: The MIT Press.
- Smil, V. (2004). *Making the Modern World*. Chichester: Wiley.
- Spierdijk, L., & Bikker, J. (2012). *Mean Reversion in Stock Prices: Implications for Long-Term Investors*. Utrecht School of Economics.
- Stratfor Analysis. (2013, octubre 29). Retrieved febrero 1, 2019, from <https://worldview.stratfor.com/article/bringing-central-africas-minerals-port>

- Strishkov, V. (1984). Retrieved from
https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5336497.pdf
- Sweeney, R. (2006). Mean Reversion in G-10 Nominal Exchange Rates. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 685-708.
- Tilton, J. E. (2003). *Assesing the threat of mineral depletion*. Minerals and Energy - Raw Materials.
- Tilton, J. E., & Lagos, G. (2007). *Assessing the long-run availability of copper* (Vol. 32). Elsevier.
- USGS. (2019). Retrieved 2019, from <https://www.usgs.gov>
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1967). *Theory of games and economic behavior*. Wiley.
- Wang, T., Müller, D. B., & Graedel, T. E. (2007). Forging the anthropogenic iron cycle. *Environmental Science & Technology*, 5120-5129.
- wiki-finanzas. (2019). Retrieved from <http://wiki-finanzas.com/index.php?seccion=Contenido&id=2012C0382>
- Wood Mackenzie. (2017). *Is 'value over volume' the new mantra for miners?* Wood Mackenzie Research.
- Wood Mackenzie. (2019). Retrieved febrero 2019, from <https://www.woodmac.com>
- World Bank. (2019). Retrieved febrero 2019, from
<http://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>
- World Bureau of Metal Statistics. (2019). Retrieved from <https://www.world-bureau.com/services.asp>
- Zhou, C. A., & Graedel, T. E. (2018). Global Human Appropriation of Net Primary Production and Associated Resource Decoupling: 2010-2050. *Environmental Science & Technology*, 1208-1215.