

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Análisis económico de la inversión en una
explotación minera mediante opciones reales

Autor: Alberto Gutiérrez Salas

Tutor: José Miguel León Blanco

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis económico de la inversión en una explotación minera mediante opciones reales

Autor:

Alberto Gutiérrez Salas

Tutor:

José Miguel León Blanco

Profesor contratado Doctor

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I Escuela Técnica Superior
de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Análisis económico de la inversión en una explotación minera mediante opciones reales

Autor: Alberto Gutiérrez Salas

Tutor: José Miguel León Blanco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mi tutor

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia, amigos y tutor por todo el apoyo, paciencia y confianza que me han dado durante toda mi etapa universitaria.

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla por hacerme crecer de manera intelectual, profesional y personal.

Alberto Gutiérrez Salas

Sevilla, 2024

Resumen

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado es explorar y desarrollar las metodologías existentes para el análisis de inversiones, centrándose particularmente en las opciones reales. Este estudio demuestra el potencial de este método en comparación con enfoques más tradicionales como el Valor Actual Neto (VAN), habitualmente utilizado en la evaluación de inversiones.

Este análisis se aplica a inversiones industriales, específicamente en el sector minero, un ámbito crucial para la economía, pero lleno de incertidumbres y fluctuaciones. La versatilidad de las opciones reales se ilustra simulando diversas situaciones de toma de decisiones, evaluando y comparando los resultados obtenidos, lo que permite una comprensión más profunda que la ofrecida por métodos tradicionales como el VAN.

Para alcanzar estos objetivos, se desarrolla un caso práctico centrado en una explotación minera real denominada 'Las Cruces', ubicada en España. Utilizando datos sobre la volatilidad de los precios de los minerales y la incertidumbre operacional, se emplea el método binomial para ofrecer diferentes perspectivas sobre la inversión. Este enfoque proporciona una visión más amplia y detallada de la inversión, destacando las ventajas significativas de aplicar opciones reales en la evaluación de viabilidad de proyectos mineros. El caso práctico pretende subrayar las importantes ventajas de las opciones reales, no solo en energías renovables, sino también en la minería, resaltando su valor en la optimización de decisiones estratégicas en proyectos de alto riesgo e incertidumbre.

Abstract

The objective of this Final Degree Project is to explore and develop existing methodologies for investment analysis, focusing particularly on real options. This study demonstrates the potential of this method compared to more traditional approaches such as Net Present Value (NPV), commonly used in investment evaluation.

This analysis is applied to industrial investments, specifically in the mining sector, a crucial area for the economy but fraught with uncertainties and fluctuations. The versatility of real options is illustrated by simulating various decision-making situations, evaluating and comparing the outcomes obtained, thereby providing a deeper understanding than that offered by traditional methods like NPV.

To achieve these objectives, a practical case is developed focusing on a real mining operation named 'Las Cruces', located in Spain. Using data on the volatility of mineral prices and operational uncertainty, the binomial method is employed to offer different perspectives on the investment. This approach provides a broader and more detailed view of the investment, highlighting the significant advantages of applying real options in the feasibility evaluation of mining projects. The case study aims to underscore the substantial benefits of real options, not only in renewable energies but also in mining, highlighting their value in optimizing strategic decisions in high-risk and uncertain projects.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Tablas	16
Índice de Ilustraciones	17
1 Introducción y objeto del trabajo	19
2 Opciones financieras y opciones reales	11
2.1 <i>Contexto de las opciones</i>	11
2.2 <i>Alcance de las Opciones</i>	12
2.3 <i>Errores comunes en la valoración de opciones reales</i>	14
2.4 <i>Métodos de valoración de opciones reales</i>	16
3 Situación actual de la minería	20
3.1 <i>Historia del sector minero</i>	20
3.2 <i>Agentes transformadores del sector minero</i>	20
3.2.1 <i>Hechos históricos</i>	20
3.2.2 <i>El cambio climático y su incidencia</i>	21
3.2.3 <i>La incertidumbre</i>	21
3.3 <i>Las explotaciones mineras</i>	21
3.4 <i>Factores que influyen en las explotaciones mineras</i>	23
3.5 <i>Evaluación de los proyectos mineros</i>	24
4 Volatilidades	26
5 Caso de ejemplo - Cobre Las Cruces SA	31
5.1 <i>Datos y resultados financieros</i>	31
5.1.1 <i>Ingresos</i>	31
5.1.2 <i>Costes de explotación</i>	32
5.1.3 <i>Beneficio bruto</i>	33
5.1.4 <i>Beneficio antes de impuestos y resultado neto</i>	34
5.1.5 <i>Flujos de efectivo y evaluación de la rentabilidad</i>	35
5.2 <i>Construcción del árbol binomial de decisión</i>	36
5.2.1 <i>Volatilidad del proyecto y coeficientes del árbol binomial</i>	36
5.2.2 <i>Tasa libre de riesgo y probabilidades</i>	36
5.2.3 <i>Construcción del árbol de ingresos</i>	37
5.2.4 <i>Construcción del árbol de flujos de caja</i>	37
5.2.5 <i>Construcción del árbol de decisión para la opción de cierre</i>	39
5.3 <i>Comparación del análisis por árbol binomial con el cálculo del VAN</i>	40
5.3.1 <i>Cálculo del VAN</i>	41
5.3.2 <i>Conclusión de la comparación</i>	41

6	Conclusiones	43
7	Bibliografía	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costes anuales ajustados por inflación (Elaboración propia)	38
Tabla 2. Coste de cierre ajustado por inflación (Elaboración propia).....	39

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ejemplo de mina a cielo abierto (Eadic, 2017).....	22
Ilustración 2. Ejemplo de mina subterránea (Eadic, 2017).....	22
Ilustración 3. Evaluación de un proyecto minero antes de la explotación (Ortiz, J.M. 2010).....	24
Ilustración 4. Evolución del precio del cobre (Elaboración propia, Fuente: Indexmundi, 2023).....	28
Ilustración 5. Evolución del precio del zinc (Elaboración propia, Fuente: Indexmundi, 2023).....	28
Ilustración 6. Evolución de los ingresos (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	32
Ilustración 7. Evolución de los costes de explotación (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	32
Ilustración 8. Evolución de los costes de personal (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	33
Ilustración 9. Evolución de otros costes de explotación (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	33
Ilustración 10. Evolución del beneficio bruto (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	34
Ilustración 11. Evolución del beneficio antes de impuestos (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	34
Ilustración 12. Evolución del EBITDA y resultado neto (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	35
Ilustración 13. Evolución del flujo de efectivo (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	35
Ilustración 14. Evolución de ratios de resultados 2022, 2021 y 2020 (Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023).....	35
Ilustración 15. Árbol de ingresos (Elaboración propia).....	37
Ilustración 16. Árbol de flujos de caja (Elaboración propia).....	38
Ilustración 17. Árbol binomial de decisión para la opción de cierre (Elaboración propia).....	40

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL TRABAJO

La evaluación de proyectos mineros es un proceso crítico para las empresas en la industria extractiva. La toma de decisiones informadas en entornos caracterizados por la incertidumbre y la variabilidad de factores económicos y técnicos es esencial para garantizar la rentabilidad y la sostenibilidad de las operaciones (Milano, 2018).

En este contexto, este trabajo se enfoca en la aplicación de un árbol de decisión binomial como herramienta de valoración de opciones reales en el contexto de proyectos mineros.

Las razones para realizar este trabajo se fundamentan en que la evaluación de proyectos mineros implica considerar diversas opciones reales, como la expansión, la adaptación a cambios en los precios de los minerales, la flexibilidad geográfica y la posibilidad de cerrar operaciones.

Precisamente, estas decisiones estratégicas pueden tener un impacto significativo en la rentabilidad a largo plazo y la gestión de riesgos. Por lo tanto, es fundamental explorar y comprender cómo las técnicas de valoración, como el árbol de decisión binomial, pueden contribuir a la toma de decisiones óptimas en la industria minera.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Explorar y explicar el concepto de opciones reales y su relevancia en la evaluación de proyectos mineros.
- Demostrar el proceso de construcción de un árbol de decisión binomial en el contexto de un proyecto minero.
- Analizar la aplicación de esta técnica para la toma de decisiones estratégicas en situaciones de "mina abierta" y "mina cerrada".
- Destacar la importancia de asignar probabilidades y valores adecuados en la valoración de opciones reales.
- Discutir las limitaciones y suposiciones que acompañan a este enfoque.

Este trabajo se enfoca en la aplicación de un árbol de decisión binomial en el contexto de la evaluación de proyectos mineros. Se abordarán aspectos teóricos y prácticos relacionados con la valoración de opciones reales en situaciones de incertidumbre y se aplicará un ejemplo hipotético para ilustrar el proceso.

Se ha aplicado un enfoque práctico utilizando un caso de estudio basado un proyecto de inversión real para la empresa 'Cobre Las Cruces SA', simulando la gestión de su mina durante un periodo de siete años. Este análisis se ha fundamentado en datos extraídos directamente de su informe anual de resultados, proporcionando un contexto realista y relevante para la aplicación de teorías de opciones reales y métodos de valoración dinámica. Este también ha permitido comparar estos enfoques avanzados con métodos tradicionales como el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) ajustado al WACC y la inflación. A través de este análisis, se ha demostrado cómo el uso de modelos de decisiones binomiales proporciona una comprensión más profunda y matizada de las decisiones estratégicas en condiciones de incertidumbre, ofreciendo así una herramienta valiosa para optimizar la rentabilidad y minimizar los riesgos en proyectos de minería. Este enfoque detallado refuerza la relevancia del árbol de decisiones binomial en la práctica moderna de evaluación de proyectos, subrayando su capacidad para adaptar las estrategias de inversión a las fluctuaciones del mercado y las condiciones económicas cambiantes.

2 OPCIONES FINANCIERAS Y OPCIONES REALES

Ahora exploraremos en profundidad las opciones financieras y su analogía con las opciones reales, fundamentales en la valoración de proyectos en entornos inciertos. Abordaremos el contexto y el alcance de las opciones, identificaremos errores comunes en su valoración y discutiremos los métodos avanzados utilizados para evaluar opciones reales, proporcionando así una base teórica y práctica esencial para su aplicación efectiva en decisiones de inversión.

2.1 Contexto de las opciones

Las Opciones corresponden al derecho, mas no la obligación de la realización de una acción determinada en un horizonte de tiempo establecido por anticipado. En este sentido, se denomina Activo Subyacente al objeto tangible o intangible sobre el que se ejerce tal derecho. En el campo de los negocios, la acción a la que se accede con este derecho consiste en el valor monetario ejercido sobre el activo en cuestión, razón por la cual, se denomina el Precio de Ejercicio (Strike Price), con lo cual, la fecha de vencimiento se denomina Fecha de Expiración.

Por consiguiente, en el caso que lo que se desee es Comprar el activo subyacente, este se denomina como Call Option. Si, por el contrario, lo deseado es Vender tal activo, esta se denomina como Put Option. De esta forma, dado que la concesión del derecho representa un aumento del riesgo para el emisor de la Opción, la contraparte debe pagar una Prima por tal derecho (Mascareñas, 2010).

En lo referente a la fecha en la que se puede ejercer el derecho en mención, las opciones se pueden clasificar en tres categorías principales (Mascareñas, 2010):

- Opciones europeas

La opción solo se puede ejercer en la fecha de vencimiento previamente acordada.

- Opciones americanas

Existe la posibilidad de ejercer la opción en cualquier momento dentro del ámbito de aplicación de la fecha de vencimiento.

- Opciones bermuda

Consiste en un punto intermedio entre las dos anteriores, pues, aunque permite como las Opciones Americanas la ejecución de la opción previo a su vencimiento, estipula que esto solo se puede realizar en momentos predefinidos de antemano.

Adicionalmente, desde la perspectiva de las acciones que podrían tomarse en una opción real para un proyecto de inversión, se podría escoger lo siguiente (Finacoteca, 2021) :

- Crecimiento, expansión o ampliación.
- Abandono o reducción.
- Diferir, prorrogar o posponer.
- Producción de la cadena de suministro.

Por otra parte, en la aplicación de la correlación entre el precio del activo subyacente y el precio de ejercicio de la Opción, se encuentran los siguientes escenarios:

- In The Money (ITM)

Representan una ganancia al ejercer la opción en el momento presente. En este sentido, en el caso de las Call corresponde al caso en el que el Strike Price es inferior al precio del activo subyacente, cuestión inversamente aplicada para el caso de las Put Options.

- Out The Money (OTM)

Para este caso, implica una pérdida en el ejercicio de la Opción, por cuanto el precio de ejercicio es superior al precio del activo subyacente para las Call; lo inverso es aplicable para las Put.

- At The Money (ATM)

En este caso, se puede afirmar que no hay ni pérdida ni ganancia, por cuanto el precio de ejercicio es igual o muy similar al del precio del activo subyacente salvo la prima que se ha pagado por opción.

De esta forma, se puede inferir, que la evaluación del precio del subyacente se convierte en el eje determinante si tiene sentido la opción. Para esto, se han de tomar en consideración las siguientes variables (Fernández, 2008):

- El precio del subyacente.
- El precio de ejercicio.
- El tiempo hasta el vencimiento.
- La volatilidad del subyacente.
- La tasa de interés libre de riesgo.
- La prima de riesgo.

La principal diferencia entre las Opciones Financieras y las Opciones Reales estriba en el tipo de activo subyacente al que apuntan. De esta forma, mientras que las Opciones Financieras tienen como activo subyacente un activo intangible de evaluación en el mercado de valores, como lo es, por ejemplo, una acción de una empresa, un índice bursátil o una divisa, en el caso de las Opciones Reales, su activo subyacente está relacionado a un activo tangible, el cual, en su general, está inmerso en algún tipo de proyecto que implica tomar decisiones sobre las acciones a tomar respecto a este (Mascareñas, 2010).

2.2 Alcance de las Opciones

Uno de los principales factores para evaluar un proyecto de inversión consiste en la determinación de su valor a través del descuento de sus flujos de caja, lo que se conoce como VAN (Valor Actual Neto). No obstante, la interpretación de este se sustenta en supuestos que pueden no ser ciertos:

- Los flujos de caja son ciertos y predecibles, ignorando que, en el desarrollo del proyecto, pueden ser modificados según las condiciones cambiantes del mercado.
- La tasa de descuento es constante y conocida de antemano, lo cual es una asunción que no tiene sustento por cuanto el riesgo y volatilidad del proyecto es variable.
- La determinación de los flujos de caja previamente exige la toma en consideración de facto de todos los posibles escenarios que se pueden presentar en el desarrollo del proyecto, elemento que no corresponde a la realidad, pues no es posible que se logre tomar en cuenta todas las variables conexas en medio de la incertidumbre del negocio.
- La decisión de aceptar o rechazar un proyecto con base en su retorno por encima del coste de adquisición, ignora las consideraciones conexas al coste de oportunidad como consecuencia de las modificaciones que se realicen en la vida del proyecto en los casos, por ejemplo, que se tenga que esperar para tomar la decisión.

Dado lo anterior, con el objeto de considerar elementos más cercanos a la realidad de los proyectos de inversión empresariales, las Opciones Reales permiten:

- Incorporar las consideraciones de flexibilidad operativa por cuanto existen múltiples opciones en el desarrollo del proyecto entre las que se cuenta el aplazamiento o cancelación del proyecto en sí, o la ampliación o disminución del alcance del proyecto. Las opciones reales incrementan el valor del proyecto. En este sentido, el valor del proyecto con Opciones Reales es la suma del

Valor Actual Neto (VAN) y el valor de la opción; de este modo permiten incorporar una valoración potencial de retorno de inversión aplicado a la acción de retrasar la decisión.

- Incorporar los casos particulares de proyectos de tipo contingente; es decir, proyectos que dependen de decisiones tomadas sobre otros proyectos en materia de asunción de riesgos transversales entre proyectos y decisiones estratégicas no mutuamente excluyentes.
- La incorporación las irregularidades inherentes a la volatilidad afecta directamente la valoración final del proyecto en la medida que, a mayor volatilidad, se tiende a una mejor evaluación del proyecto con el método de las opciones reales.

Por consiguiente, el mayor valor de las Opciones Reales está dado en la medida que haya mayor probabilidad de variabilidad en los proyectos en lo relacionado a la reversibilidad de estos, así como de la incertidumbre del contexto en el que este se desempeñará y el margen de maniobra de los tomadores de decisiones.

De esta forma, en función de cómo vaya transcurriendo el escenario en el caso que una estimación posterior del escenario de negocios muestre un aumento en el nivel de riesgo del proyecto, el proyecto puede utilizar la opción real que más le convenga: expansión, ampliación o crecimiento, abandonar o posponer.

El proyecto podrá tener mayor probabilidad de éxito si la decisión de inversión se aplaza hasta que exista una mayor certeza de éxito ante las inversiones de capital, teniendo en cuenta una elaboración previa de presupuestos financieros y operativos para que el proyecto tenga mayor probabilidad de éxito. La elaboración de presupuestos de capital son figuras clave para una más certera evaluación de proyectos de inversión pues facilitan información disponible para los distintos escenarios y así poder valorar la rentabilidad y la viabilidad de cualquier proyecto.

Un ejemplo de esto se ve en lo que se conoce como Opciones Arcoíris en los cuales se cuenta con más de una fuente de incertidumbre como lo son las explotaciones petrolíferas, en las cuales el éxito del proyecto no solo está dado por el precio del petróleo, sino también por la variabilidad de barriles explotados y la incertidumbre de los costes de extracción (Fernández, 2008).

Dado lo anterior se puede inferir, que el uso práctico de las Opciones Reales resulta de mayor utilidad en la ideación de proyectos y no tanto en la evaluación de estos desde la perspectiva de alternativas estratégicas. Esta es la razón por la que es preferible su utilización en sectores como el de energías, minería e inmobiliario.

Ahora bien, el uso de las Opciones Reales resulta menos útil o práctico, por decirlo de algún modo, en áreas de biotecnología, farmacéutico, diseño de software y dispositivos electrónicos, pues en estos últimos no puede inferirse claramente, como tal, el activo subyacente.

Sin embargo, también tiene su aplicación en proyectos mucho más pequeños; por ejemplo, si se desea abrir un local comercial, lo usual es calcular los flujos esperados de caja para los próximos 5 años y luego evaluar el negocio a perpetuidad para luego compararlo con la recuperación de la inversión a través del VAN.

En el caso que este VAN diese un valor negativo, podría descartarse el proyecto. No obstante, en el caso que se ofreciese la opción de recompra del negocio a los 5 años, el escenario cambiaría drásticamente, pues en el caso que el negocio no rindiera lo suficiente, podría ejercerse la opción de recompra del negocio y, así, eliminar el riesgo de quiebra (Finacoteca, 2021).

Así, las consideraciones de análisis en las opciones reales pueden ir en contravía de la teoría económica. Por ejemplo, según la academia, la producción ha de detenerse en el particular que el ingreso marginal se encuentre por debajo de su coste variable unitario marginal. No obstante, en el caso que exista un coste implicado en el cierre de la operación y otro en la reapertura de esta, se permite que este se aplase hasta que haya un mejor escenario proyectado, lo que hace que la Opción Real pueda ser positiva.

Por consiguiente, el principal objetivo del uso de las Opciones Reales estriba en incorporar flexibilidad en la toma de las decisiones empresariales. Por tanto, en el caso que la empresa se esté enfrentando a un proyecto que carece de flexibilidad en sus premisas y está parametrizado en constantes no modificables, no es posible aplicar los principios de las Opciones Reales (Méndez-Suárez, 2013).

2.3 Errores comunes en la valoración de opciones reales

Aunque utilizar la metodología de Opciones Reales para evaluar proyectos de inversión se parece más a cómo las empresas manejan sus negocios cotidianos, eso no quiere decir que esté libre de posibles problemas en las suposiciones que hace. Por tanto, los siguientes corresponden a algunos de los principales problemas que se presentan con este tipo de planteamientos (Fernández, 2008):

- Se asume que las Opciones Reales son replicables

La toma de decisiones ejercida sobre un proyecto, dadas las condiciones particulares y el marco de circunstancias que rodeó tal proyecto en sus factores, no es necesariamente extrapolable a otro tipo de proyectos, aun cuando se intente mitigar este error al aplicar la fórmula de Black & Scholes para su determinación.

Algunos autores han intentado atenuar el alcance de la definición de las Opciones Reales a fin de corregir este posible error de aplicabilidad. En este aspecto, Amram y Kulatilaka han redefinido las Opciones Reales como el conjunto de opciones de tipo estratégico acotadas a los instrumentos financieros o bienes cotizados en mercado (Amram & Kulatilaka, 2000). El problema con este acercamiento es que reduce la aplicabilidad de las Opciones Reales solo a empresas con apalancamiento directo en los mercados financieros abiertos como lo son, por ejemplo, las empresas petrolíferas o las mineras porque en estas megaempresas se puede posponer una decisión debido al alto riesgo y rango de incertidumbre que implica poner el proyecto en marcha y de este modo se reduce el coste de oportunidad. Se desaconseja, entonces en empresas con bajos niveles de incertidumbre que tienen que tomar decisiones a corto plazo, al tener bajos niveles de incertidumbre y bajo riesgo el VAN sería medida suficiente para valorar iniciarse o no en el proyecto.

- La estimación de la volatilidad no goza de fundamento matemático

Tomando como base que el factor principal en la cuantificación de las Opciones Reales descansa sobre el principio de incertidumbre, la cual es explicada por su nivel de volatilidad, una consideración de facto del porcentaje de esta variable lleva a posibles sesgos de juicio en el valor actual de los flujos esperados del proyecto. Esto se da por el hecho que, a mayor incertidumbre, el valor de las opciones reales se verá aumentado, haciendo más atrayente el proyecto.

Dado lo anterior, el análisis de prefactibilidad de la volatilidad de un proyecto ha de analizarse bajo modelos estadísticos que permitan, -con base en los análisis de macro y microentorno- determinar cuánta volatilidad matemática puede llegar a presentarse en el proyecto. Todo esto hay que sumarlo a que la volatilidad no es un valor determinístico sino probabilístico y variable en el tiempo, por lo que el resultado será una batería de umbrales de volatilidad que sean más cercanos a la realidad del proyecto.

Por otra parte, la volatilidad total del proyecto no es la suma de la variabilidad puntual de cada una de las variables explicativas del proyecto como sugiere Damodaran (Damodaran, 2000). Es evidente que el efecto compuesto de la sumatoria dará como resultado una mayor volatilidad, lo que crea un sesgo en el modelo por cuanto se infiere en la teoría de Opciones Reales que, a mayor volatilidad, más atrayente será el proyecto.

Por tanto, la cuantificación de la volatilidad del proyecto vía modelos estadísticos incorpora elementos de ponderación por peso de la variable a fin de correlacionar una variabilidad total que crea un contrapeso entre sus variables explicativas.

- Información asimétrica por falta de arbitraje

La presencia de información asimétrica, atribuible a la falta de arbitraje, introduce un elemento de riesgo en la cuantificación de los valores futuros de un proyecto. Este proceso de evaluación se sustenta principalmente en las expectativas y la aversión al riesgo de la empresa. En este escenario, existe la posibilidad de que surja un riesgo de modelo, manifestándose en la sobrevaloración de los escenarios optimistas del proyecto (Abc, s.f.).

En general, esto podría ser resultado de la consideración selectiva o exclusión de información asimétrica relacionada con variables tanto exógenas como endógenas, las cuales influyen en los flujos futuros. Aquí, la parte no informada podría estar limitada en su capacidad para discernir completamente la información disponible, lo que podría conducir a una percepción sesgada de la situación, al solo tener acceso a lo que la organización decide mostrar.

Como han señalado los economistas, en ambos contextos, la asimetría de la información ejerce un impacto significativo tanto en las decisiones individuales como en los resultados del mercado (Abc, s.f.).

- Incongruencia entre la tasa de descuento y la construcción de valor

Usualmente, la tasa de descuento para aplicar a los proyectos bajo la metodología de Opciones Reales y, de acuerdo con los principios de Black & Scholes, corresponde a la tasa sin riesgo. No obstante, esta aproximación es menos que certera por cuanto:

- El hecho que se decida ejecutar el proyecto solo hasta que se resuelva parcialmente su incertidumbre no significa que el proyecto se lleve a cabo sin riesgo alguno.
- Los proyectos no están directamente correlacionados, con lo que el éxito de un proyecto, o la ausencia de riesgos materializados en un proyecto no son indicación de resultados futuros en los proyectos similares que le sigan.
- La valoración de calidad y eficiencia de un negocio, lo cual incluye la valoración de proyectos dentro de estos negocios, no es explicado por una tasa libre de riesgo ajena al negocio, sino por su capacidad de crear valor respecto a la estructura financiera del proyecto.

Dado lo anterior, resulta mejor indicador como tasa de descuento en un proyecto, su Coste de Capital y, conexo a este, su Valor Económico Agregado (EVA).

- Se asume certitud respecto a los costes iniciales del proyecto

El mismo principio de incertidumbre respecto a los flujos futuros del proyecto, es extrapolable a los costes iniciales del proyecto, por lo cual, no es correcto afirmar que invariablemente estos son montos constantes, pues el solo hecho de posponer el proyecto implica una variación sustancial en el presupuesto definido para el proyecto como consecuencia de, entre otros, pérdida de valor del poder adquisitivo de la moneda, variaciones en la tasa de cambio o interrupciones en el suministro de materiales para el proyecto.

- Inferir que un aumento en los tipos de interés implica un aumento en el valor de las Opciones Reales

Contrario a lo que la teoría de Opciones Reales dicta y, de acuerdo, con las relaciones de contrapeso entre variables según indica la Estructura Temporal de Tipos de Interés (ETTI), los efectos contractivos de un aumento en los tipos de interés, implica un efecto negativo en los flujos de caja esperados de, tanto los proyectos, como las economías nacionales.

Lo anterior se explica por el hecho que un aumento en los tipos de interés corresponde a una medida macroeconómica para reducir el consumo en las naciones a fin de coartar el crecimiento de la inflación. Así, mayores tasas implican un mayor coste en el apalancamiento financiero de las empresas, lo que provoca que muchos proyectos de inversión se aplacen o se cancelen definitivamente. En este sentido, habría que incorporar una mayor prima de tasa de descuento para alentar a una empresa a invertir en un proyecto a fin de paliar, en parte, el aumento de su Estructura de Capital.

- Valorar como una Opción Real, proyectos que no lo necesitan

El uso de la metodología de Opciones Reales solo tiene sentido para el caso de proyectos con baja probabilidad de quedar In The Money; por tanto, no es una metodología que deba aplicarse a todo tipo de proyecto indiscriminadamente. Esta sería una desventaja ya que no se puede usar en empresas que tienen que tomar una decisión rápida, por ejemplo, en una inversión, que no disponen de tiempo para valorar el retraso, o elegir la mejor opción pues el riesgo es alto y alto es el coste de oportunidad de elegir la opción errónea, por eso en estos casos es desaconsejable.

Tienen mayor incidencia en sectores que trabajen con intangibles pues es un método idóneo para cuantificar los valores, lo que es una ventaja a la hora de valorar la volatilidad o el alto riesgo ya que un análisis financiero no tiene muy en cuenta esta alta volatilidad.

2.4 Métodos de valoración de opciones reales

Visto de una forma simplificada, las Opciones Reales en su correlación con el VAN, está dado por la siguiente regla de decisión (Méndez-Suárez, 2013):

- Opción Real de Compra $\text{Max}(\text{Valor actual} - \text{Inversión}, 0)$
- Opción Real de Venta $\text{Max}(\text{Inversión} - \text{Valor actual}, 0)$

Por tanto, de lo anterior se infiere que solo se iniciará el proyecto en el caso que el VAN sea positivo. Además, se han de considerar las siguientes características para aplicar las opciones reales (Méndez-Suárez, 2013):

- Debe existir un espacio temporal que permita la alteración de los factores del proyecto en lo relacionado al horizonte de tiempo entre la decisión y el desembolso de facto de la inversión. Así, en el caso que no exista tal distancia temporal, se limitará al VAN.
- El monto de inversión hasta el desembolso final, pues la realidad de los negocios indica que la ejecución presupuestal se realiza en fases según avance del proyecto.
- Existe volatilidad en la determinación de los flujos de caja del proyecto.

En general, el método utilizado para evaluar una Opción Real es el que extrapola la aplicación de la fórmula de Back & Scholes que tradicionalmente se usa para valorar Opciones Financieras, en el particular (Fernández, 2008):

$$\text{Call} = \text{VAN}[\max(S_t - K, 0)] = \text{VAN}[S_t / S_t > K] P[S > K] - \text{VAN}[K / S_t > K] P[S_t > K] \quad (1)$$

Donde,

K	Precio de ejercicio.
t	Horizonte de tiempo.
S_t	Precio del activo subyacente en t.
$\text{VAN}[S_t / S_t > K]$	Valor actual del precio del subyacente siempre que este sea superior a K.
$P[S_t > K]$	Probabilidad de que el precio del subyacente sea superior a K.
$\text{VAN}[K / S_t > K]$	Valor actual del precio de ejercicio ($K r^{-t}$).
r	Tasa de interés sin riesgo o valor temporal del dinero.

La primera parte de la fórmula evalúa el valor actual del beneficio de ejercer la opción si el valor del subyacente es mayor que el precio de ejercicio (K).

La segunda parte evalúa el valor actual del precio de ejercicio si el precio del subyacente es mayor que K. Esto se multiplica por la probabilidad de que el precio del subyacente sea mayor que K.

La diferencia entre estas dos partes representa el valor actual neto (VAN) de la opción de compra (Call).

De esta forma, es posible afirmar que, al aplicar lo anterior a una cartera de opciones a escoger, se puede inferir lo siguiente:

$$Call = \Delta S - B \quad (2)$$

$$\Delta = N(x) = \frac{VAN[S_t / S_t > K] P[S_t > K]}{S} \quad (3)$$

$$B = K r^{-t} N(x - \sigma \sqrt{t}) \quad (4)$$

$$x = \left[\frac{\ln \frac{S}{K r^{-t}}}{\sigma \sqrt{t}} \right] + \frac{\sigma \sqrt{t}}{2} \quad (5)$$

Donde,

σ Volatilidad del valor actual del precio del subyacente, medida como su desviación típica.

La fórmula representa el valor actual neto de una opción de compra (Call) en el contexto de opciones reales, considerando la probabilidad de que el precio del subyacente supere el precio de ejercicio y descontando los flujos de efectivo futuros al presente. La notación Δ representa la tasa de cambio del precio del subyacente y B representa el valor actual del precio de ejercicio descontado.

Es de destacar los factores implícitos en las Opciones conocidos como las letras griegas. Uno de estos es la Delta del proyecto, la cual correlaciona la variación del valor de la opción al variar el precio del activo subyacente (Méndez-Suárez, 2013).

Como se puede apreciar, el componente matemático exigido para la cuantificación de Opciones Reales mediante la metodología de Black & Scholes hace que su determinación sea más que compleja; dado esto, pueden encontrarse variaciones metodológicas basadas en los siguientes modelos:

- Por simulación de Montecarlo
Permite la extrapolación de información incorporando sensibilidad al modelo considerando los efectos compuestos de miles de iteraciones del modelo.
- Fórmula binomial
Esta aproximación que fue desarrollada por Cox, Ross & Rubinstein (Cox, Ross, & Rubinstein, 1979) resalta por su versatilidad, simpleza y fácil adaptación a los entornos objeto de estudio.
- Por resolución de ecuaciones diferenciales
- Método de Longstaff & Schwartz (Longstaff & Pérez-Somalo, 2006)
Este acercamiento metodológico tiene su aplicación principal para las Opciones Americanas en las cuales el ejercicio de la opción puede realizarse en cualquier momento antes de su vencimiento. Al igual que sucede con la simulación de Montecarlo, resulta muy eficaz para el análisis de las opciones de abandono.

Tras explorar diversos métodos de valoración de opciones reales, hemos elegido el árbol binomial de decisión como el método más adecuado para evaluar nuestro proyecto minero en Cobre Las Cruces SA.

Esta técnica se ajusta particularmente bien a la naturaleza del proyecto, permitiendo el uso de datos históricos reales para proyectar los flujos de caja futuros y manejar eficazmente las opciones de mantener

abierta o cerrar la operación minera. Este enfoque es preferible en nuestro caso, donde la inversión inicial es fija y se realiza en un momento específico, y no se consideran opciones de expansión o postergación típicas de otros escenarios de opciones reales.

El árbol binomial nos ofrece la flexibilidad para ajustar las decisiones año tras año, adaptándonos a la dinámica cambiante del mercado y optimizando así la gestión de riesgos y la rentabilidad del proyecto.

3 SITUACIÓN ACTUAL DE LA MINERÍA

Este capítulo ofrece una exploración detallada de la situación actual de la minería, abarcando desde sus raíces históricas hasta los desafíos contemporáneos que enfrenta el sector. Se analizarán los agentes transformadores clave, como el impacto del cambio climático y la inherente incertidumbre del mercado, así como los factores cruciales que influyen en las explotaciones mineras actuales. A través de este estudio, se busca comprender cómo estas dinámicas afectan la evaluación y la viabilidad de los proyectos mineros en el contexto moderno.

3.1 Historia del sector minero

Al hablar del sector minero y de la materia prima que se obtiene, cabe recordar que la minería ya está presente en el ser humano desde los inicios de la humanidad. Ya en la época prehistórica estaba siendo usada, de algún modo, la minería; por ejemplo, para la elaboración de utensilios como lanzas u otras herramientas.

La minería sigue presente hoy en día, en nuestra vida cotidiana: electrodomésticos, joyas, coches, maquinaria, paneles solares, chocolate (La farga yourcoopersolutions, s.f.), cables, energías renovables..., en resumen, en la mayoría de los objetos y utensilios que usamos y vemos a diario. Su importancia siempre ha sido y sigue siendo muy relevante, sobre todo ahora que nos movemos hacia una nueva era de transición hacia las energías renovables.

Con la revolución industrial el sector primario de la minería se convirtió en un sector punta y su actividad económica se ha convertido en primordial para la economía de cualquier país.

(minería sostenible de galicia, 2022) En la convención internacional de CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum) en mayo de 2021 Mark Cutifani, director ejecutivo de Anglo American PLC “El 45% de la economía mundial, de su actividad, está impulsada por el sector minero”. Este dato ya nos da una idea de la importancia de la minería en la economía mundial.

3.2 Agentes transformadores del sector minero

3.2.1 Hechos históricos

El COVID-19 y la guerra de Ucrania son eventos históricos que marcan la era posterior a la pandemia. A pesar de la esperanza de que la calma y la unión mundial prevalecieran, especialmente evidente en la lucha contra el cambio climático, se ha producido una desunión global inesperada después del COVID-19, exacerbada por el sorprendente conflicto en Ucrania.

Durante los años de la pandemia, la colaboración entre gobiernos para desarrollar vacunas, la adopción de modelos de confinamiento y el objetivo común de preservar la especie humana parecían señales de una dirección hacia la unidad. Sin embargo, la situación cambió drásticamente con la guerra en Ucrania. Este evento inesperado ha vuelto a transformar el panorama mundial, generando tensiones políticas entre los países cercanos a Rusia y el resto del mundo.

La guerra ha destacado la enorme dependencia del comercio exterior y la necesidad de que cada país pueda autoabastecerse. A nivel nacional, el gobierno español se ha visto obligado a reconsiderar su enfoque, evaluando las cartas disponibles en casa y visionando estrategias aplicadas al sector minero.

En respuesta, España ha diseñado un plan circular hasta el 2030, orientado a facilitar la transición hacia las energías renovables, la descarbonización y un sistema más eficiente y sostenible en el uso de materias primas. Este enfoque refleja la necesidad urgente de fortalecer la autonomía nacional y adaptarse a las dinámicas geopolíticas cambiantes, subrayando la importancia de la planificación estratégica y la sostenibilidad en el sector minero en el contexto actual (gobierno de España, 2022).

La inestabilidad política que se experimenta a nivel interno en España emerge como un factor determinante en la volatilidad inherente al sector minero. Esta inestabilidad se refleja en una cautela evidente por parte de los posibles inversores, especialmente en proyectos de envergadura que implican considerables inversiones, como la puesta en marcha de una explotación minera.

Las diversas corrientes políticas de derecha e izquierda en España, así como las dificultades para llegar a consensos, junto con las demandas persistentes de los movimientos nacionalistas, contribuyen a la parálisis legislativa. Esta situación dificulta la implementación de muchas leyes y complica el proceso de otorgamiento de licencias. En consecuencia, la incertidumbre política se convierte en un obstáculo adicional para la viabilidad y el avance de proyectos mineros, generando un entorno que demanda una gestión cuidadosa y estratégica por parte de los actores involucrados.

Aparte de los factores legales cabe destacar las trabas ecológicas que se imponen a las explotaciones mineras las cuales tienen que remar hacia las nuevas tecnologías, hacia la energía verde, lo que nos lleva a un nuevo modo de explotación minera “explotaciones mineras inteligentes”.

3.2.2 El cambio climático y su incidencia

El mundo ha cambiado y su sostenibilidad depende de lo que se haga en él ahora, y el sector minero tiene un papel fundamental. Los proyectos mineros de gran magnitud, la apertura de una nueva explotación minera es un proceso con fecha de caducidad. Son concesiones a 30 años vista y una vez se agote la materia prima los pioneros del proyecto tienen que reparar los destrozos acontecidos por la actividad como puede ser la destrucción ecológica que se lleva a cabo en el proceso. La reforestación, entre otros son uno de los requisitos exigibles al cierre de la explotación. Las explotaciones mineras que se sumen a la utilización de las energías renovables serán las que tengan mayores posibilidades de que puedan abrir, pues en la actualidad existen muchas pegas y presiones por parte de los grupos ecologistas, así como por parte de las explotaciones ya construidas, la competencia, que constantemente ponen denuncias para que sea más difícil abrir nuevas explotaciones mineras, y los gobiernos están cediendo a estas presiones. En España hay 30 proyectos parados, aunque se está acelerando la necesidad de nuevos modos nacionales de autoabastecimiento tras la guerra de Ucrania. La guerra ha dejado patente la gran dependencia del comercio exterior y que son necesarios más recursos propios para solventar las crisis futuras.

3.2.3 La incertidumbre

No se pueden perder de vista los cambios de gobierno, normativas antimonopolios, acuerdos internacionales, cambios en las legislaciones movimientos políticos, estabilidad o inestabilidad de los gobiernos... y como todo ello afecta a la incertidumbre en el sector minero.

La incertidumbre es un factor determinante con el que tiene que lidiar el sector minero, así como su explotación. Esta incertidumbre también se traslada e influye en la puesta en marcha o no, en el llevar a cabo o no un proyecto de explotación minera. Esta incertidumbre se traduce en la mayor o menor volatilidad que se encuentra en el sector en función de cómo transcurran las circunstancias. De este modo no hay garantía ni las matemáticas son tan exactas como puede parecer en un análisis financiero. Todo esto nos lleva a reiterar las opciones reales como la mejor opción una vez que se quiere llevar adelante la apertura de una explotación minera.

3.3 Las explotaciones mineras

Las explotaciones mineras son operaciones que involucran la extracción de minerales valiosos, metales, piedras preciosas, materiales de construcción y otros recursos geológicos de la Tierra. Estas operaciones pueden variar en tamaño y complejidad y se pueden clasificar en diferentes tipos según varios criterios. (Oyarzún, 2021) (Equipo editorial, 2023)

- Explotaciones Mineras a Cielo Abierto: En las explotaciones mineras a cielo abierto, se remueve la capa superficial de tierra o roca para acceder a los minerales. Se utilizan maquinaria pesada y se crean grandes pozos o terrazas en la superficie y son utilizadas para minerales como carbón,

hierro, oro, cobre y bauxita. Su principal ventaja se refiere al menor coste de operación, acceso más sencillo a depósitos grandes.



Ilustración 1. Ejemplo de mina a cielo abierto (Eadic, 2017)

- **Explotaciones Mineras Subterráneas:** En este tipo de explotaciones, se accede a los minerales bajo la superficie de la tierra mediante pozos, galerías y túneles. Se utilizan métodos de excavación y refuerzo de túneles. Se emplean para minerales como oro, plata, diamantes, uranio y minerales industriales, siendo su principal ventaja la de minimizar el impacto ambiental en la superficie, permite la extracción de minerales a mayor profundidad.



Ilustración 2. Ejemplo de mina subterránea (Eadic, 2017)

La elección del tipo de explotación depende de factores como la geología del yacimiento, la viabilidad económica, la tecnología disponible y las consideraciones ambientales. Cada tipo de explotación minera tiene ventajas y desventajas, y la selección del método adecuado es esencial para el éxito y la sostenibilidad de la operación.

El número de etapas en la explotación minera puede variar dependiendo de diversos factores, como el tipo de mineral, la ubicación del yacimiento, la tecnología disponible y las regulaciones ambientales. Sin embargo, se pueden identificar varias etapas comunes en el proceso de explotación minera. Estas etapas suelen incluir:

1. **Exploración:** Búsqueda y evaluación de posibles yacimientos. Incluye la recopilación y análisis de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos para identificar áreas con potencial mineral.
2. **Desarrollo:** Una vez identificado un yacimiento con potencial económico, se procede al desarrollo de la mina. Esto implica la construcción de infraestructuras como caminos, instalaciones de procesamiento, sistemas de drenaje y acceso a energía.
3. **Extracción:** En esta etapa, se extrae el mineral del yacimiento. Se utilizan equipos y maquinaria especializados para la extracción eficiente del mineral.
4. **Procesamiento:** Después de la extracción, el mineral se somete a procesos de trituración, molienda y concentración para separar los minerales de interés de la ganga (material no deseado).

5. Producción: Una vez procesado, el mineral concentrado se transporta, almacena, y vende a las industrias consumidoras o se procesa aún más para obtener productos finales como metales refinados.
6. Rehabilitación y cierre: Al finalizar la vida útil de la mina, se llevan a cabo actividades de rehabilitación para restaurar el área afectada por la explotación minera a un estado seguro y estable.

3.4 Factores que influyen en las explotaciones mineras

- Factores económicos

Los factores económicos desempeñan un papel crucial en el contexto de las explotaciones mineras. Las políticas monetarias, tasas de empleo, crecimiento económico, PIB, regulaciones bancarias e impuestos influyen significativamente en este sector. Las materias primas, actualmente en alta demanda, son consideradas commodities, activos que pueden comprarse, venderse o intercambiarse en mercados abiertos.

Estos commodities son elementos productivos básicos y se negocian en mercados al contado y de futuros. Las opciones reales se presentan como una alternativa efectiva para mitigar riesgos asociados con fluctuaciones, inestabilidades políticas e inflación. Su atractivo radica en su capacidad para facilitar transacciones rápidas, dada su importancia vital en la producción de bienes y servicios, lo que resulta atractivo para los inversionistas.

Ejemplos prácticos, como la minería de las Cruces en España, ilustran la relevancia económica de estas operaciones, con inversiones significativas, creación de empleo y oportunidades de inversión sustanciales. Además, se destaca la influencia de tensiones geopolíticas, como las relaciones entre Estados Unidos y China, en el mercado minero europeo. A pesar de estas tensiones, la necesidad de flujo económico sigue atrayendo a inversores privados hacia el sector minero, según la CONFEDEM (Confederación Nacional de Empresarios de la Minería y la Metalurgia) en España.

- Factores sociales

Demografía, estilo de vida, hábitos y tendencias, nivel educativo o de ingresos, nivel cultural, factores religiosos y creencias, entre otros.

Asimismo, las operaciones mineras pueden tener un impacto significativo en las comunidades locales, lo cual incluye consideraciones sobre empleo, relaciones con las comunidades y el acceso a recursos básicos. La aceptación social y la cooperación de las comunidades locales son cruciales. Los conflictos y la resistencia pueden retrasar o interrumpir las operaciones mineras. (minería sostenible de galicia, 2022)

- Factores tecnológicos

La adopción de tecnologías avanzadas, como la automatización y la minería de datos, puede aumentar la eficiencia y reducir los riesgos en las operaciones mineras. (Oyarzún, 2021)

La era 5G y de la IA, así como la constante investigación en I+D nos lleva a la explotación minera inteligente.

Las técnicas de exploración y prospección mejoradas pueden llevar a la identificación de depósitos minerales más ricos y accesibles.

- Factores ecológicos para afrontar la nueva era de transacción energética

Cambio climático, cultura de reciclaje, políticas medioambientales, riesgos naturales...

Contar con una industria minera fuerte asegura la independencia en el aprovisionamiento de materiales que son esenciales para impulsar la economía que viene, la economía verde. Cabe mencionar la importancia del pacto verde de las naciones en los próximos 10 años.

La seguridad energética para reducir el cambio global y garantizar la obtención de materia prima para las energías renovables para esta nueva era también es importante no perderla de vista. Hay que destacar también la importancia del hidrógeno limpio y como las explotaciones mineras son fundamental para ello y para reducir las emisiones del CO₂.

- Factores legales

La industria minera está sujeta a regulaciones específicas que abarcan concesiones, permisos y derechos de tierras, siendo esenciales para la legalidad y operación de las minas. Los acuerdos con gobiernos y socios comerciales, como contratos de concesión, también influyen en la estructura y viabilidad financiera de las operaciones mineras. La seguridad energética y los aspectos legales son cruciales para la realización de proyectos mineros.

Como ventaja competitiva, destaca la creciente demanda futura de materias primas para la sostenibilidad de energías renovables, construcción de aerogeneradores y paneles solares, impulsando la necesidad de España de ser autosuficiente. Sin embargo, desafíos como la disrupción de la cadena de suministro, daños ambientales, deforestación, amenazas a la fauna y flora, desertización y pérdida de suelo fértil, junto con la incertidumbre geopolítica, plantean desventajas y complejidades en el desarrollo de proyectos mineros.

3.5 Evaluación de los proyectos mineros

(Herbert, Madrid, 2018) Este recorrido por la situación minera actual orienta la investigación hacia la revisión de los proyectos que se pretenden poner en marcha. No obstante, son fundamentales los estudios previos y las diferentes etapas por las que se pasa, entre las que se encuentran: etapas en la evaluación de un proyecto, etapa de descubrimiento, estudio conceptual, estudio de pre-viabilidad, estudio de viabilidad (estudio de mercado, análisis económico del proyecto, determinación del Cash Flow, determinación de la rentabilidad, análisis de riesgo, estudio jurídico financiero e informe final de viabilidad), costes de los estudios entre otros.

Para el desarrollo del proyecto, su construcción y puesta en marcha hay que remitirse a la ingeniería básica de proyectos, ingeniería de desarrollo e ingeniería de detalle junto con el proyecto constructivo, el plan de construcción y la gestión de la construcción.

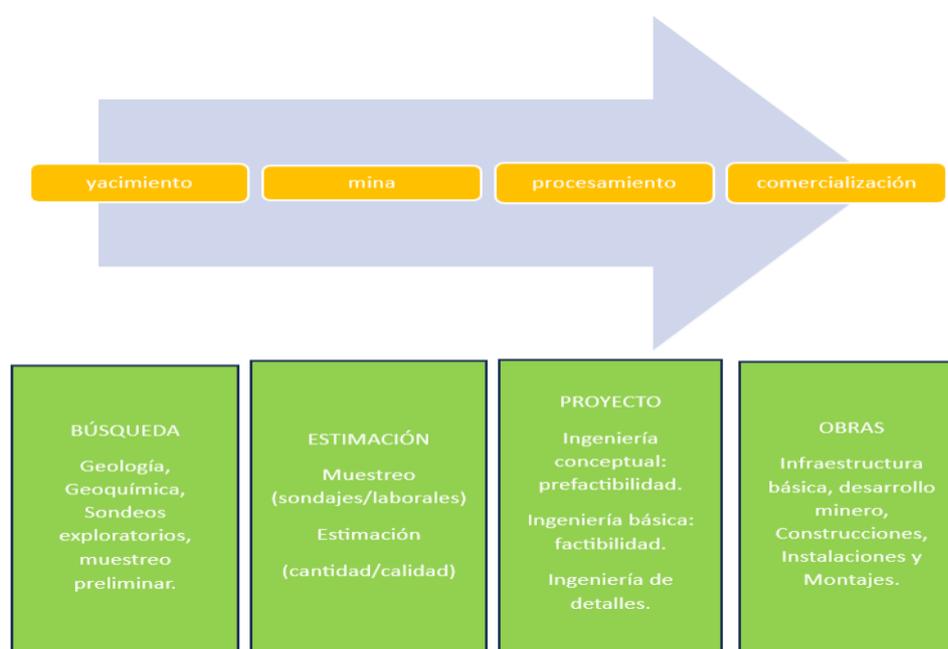


Ilustración 3. Evaluación de un proyecto minero antes de la explotación (Ortiz, J.M. 2010)

Otros elementos para tener en cuenta a la hora de iniciar un proyecto (Conexión esan, 2021) :

- Tasa de minería o tasa de extracción: cantidad de mineral que se extrae al año.
- Gastos de capital o inversiones para llevar el proyecto a cabo: inversiones que realiza una empresa minera para incrementar el valor de sus activos fijos
- Gastos de Operación: costes recurrentes.
- Precio de las materias primas: antes del inicio del proyecto.
- Disposiciones ambientales: para la reparación del daño ambiental.

Habiendo explorado la evolución y los desafíos actuales del sector minero, este capítulo ha establecido las bases para comprender los múltiples factores que influyen en la operación y evaluación de las explotaciones mineras. La historia del sector, combinada con los agentes transformadores como el cambio climático y la incertidumbre económica, resalta la necesidad de adaptar las estrategias de inversión y evaluación a un entorno en constante cambio.

Esta comprensión sienta las bases para los próximos capítulos, donde se aplicarán estos conocimientos al análisis de un caso práctico específico, utilizando las herramientas de valoración discutidas anteriormente para determinar la mejor estrategia de inversión frente a los retos identificados.

4 VOLATILIDADES

En anteriores capítulos, se ha señalado que las opciones reales se presentan como el enfoque de valoración más apropiado al decidir la ejecución o no de un proyecto de explotación minera. Se llegó a la conclusión de que el resultado deseado surge de combinar la opción real del proyecto con el valor actual neto de sus flujos, proporcionando así el valor total del proyecto. Antes de explorar la opción real y su capacidad para influir en decisiones futuras de inversión (ya sea para expandir, abandonar, diferir, prorrogar, posponer, reducir o producir), es crucial abordar otros conceptos fundamentales en el análisis de una explotación minera. En este contexto, se desarrolla el concepto clave de volatilidad.

La volatilidad es crucial a la hora de llevar a cabo una inversión pues es un término que se refiere a la variación o fluctuación del precio o de la rentabilidad de un activo financiero en un periodo de tiempo. En función de esta variación o fluctuación si es mucha o poca, es decir, si se aleja mucho o no de media, se puede decir que dicho activo es muy volátil o no tanto.

Asimismo, la volatilidad se asocia al riesgo pues a mayor volatilidad mayor riesgo de que la rentabilidad esperada o los beneficios que se esperan obtener no sean los que se había previsto desde un inicio. La volatilidad financiera es un indicador del riesgo de un activo: a más volatilidad, es decir, mayores movimientos bruscos en su cotización, mayor riesgo de que la rentabilidad se desvíe de lo esperado.

Ahora bien, el alto riesgo es lo que atrae a este tipo de inversionistas que buscan la alta volatilidad para así obtener grandes ingresos y crea más oportunidades para la especulación a un corto plazo de tiempo. Se suele unir una alta volatilidad a los cambios significativos como los que están teniendo lugar en estos últimos años con el COVID y la guerra de Ucrania.

Resulta importante aclarar, que cuando se habla de activos financieros como pueden ser acciones, commodities u otros, no se puede conocer a ciencia cierta su rentabilidad ni garantizar que ésta se cumpla, siendo necesario pasar por el proceso de compraventa para ver cómo va evolucionando su mercado.

En el ciclo que transcurre desde que se compra hasta que se cumple el tiempo estipulado hay muchos factores que pueden influir en los precios, que los lleva a una variabilidad y volatilidad que va a ayudar a entender los cambios producidos desde la previsión inicial. Estos cambios se pueden incluir dentro de la incertidumbre que acompaña a los activos financieros y fundamentalmente, en la volatilidad. Ya se han mencionado ejemplos de esta incertidumbre en la situación actual de la minería, como pueden ser los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos o legales, entre otros.

Es de suma importancia en la volatilidad de un producto, la liquidez, pues si hay cantidad de oferta y demanda es menos probable que si va mal una sola transacción, el resto de las transacciones puedan contrarrestar esa caída de precio y el mercado seguir siendo estable. De aquí podemos inferir que los mercados que tienen poca liquidez suelen ser más inestables o volátiles ya que no se pueden prever los cambios de precio.

Citando un fragmento de un artículo referido a las características de la volatilidad (Enrique Castellanos, s.f.): Las características especiales de la volatilidad son:

- Persistencia. - También conocida como el efecto “memoria”. Se manifiesta en la autocorrelación.
- Clústeres. - Los días de altos/bajos rendimientos tienden a estar agrupados.
- Asimetría. - El impacto de los retornos sobre la volatilidad es más fuerte en mercados bajistas que alcistas.
- Reversión a la media. - Robert Engle (premio nobel 2003) incorporó esta característica en su modelo ARCH, ya que la experiencia indicaba que las volatilidades suelen revertir a la volatilidad a largo plazo (incondicional).

En el artículo se concluye que:

- La volatilidad es la medida de la desviación de los rendimientos con respecto a la media. Se suele calcular con la desviación típica.
- La volatilidad se expresa en términos anuales y para pasarla a datos diarios, semanales o mensuales se utiliza la raíz(t).
- La volatilidad va cambiando, no permanece estable. Los rendimientos altos se generan por un “shock” de mercado y permanecen durante cierto tiempo hasta que se olvida.
- La volatilidad es asimétrica, “cuando suben los mercados baja y cuando éstos bajan sube”.

Con los puntos de este artículo queda claro el significado de la volatilidad y su importancia a la hora de evaluar riesgos y en la toma de decisiones.

Para poder medir la volatilidad como algo tangible y no etéreo, para poder compararla con otros activos, se usa la desviación típica o desviación estándar. El dato que se obtiene indica la información sobre la dispersión media de una variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - x)^2 + (x_2 - x)^2 + \dots + (x_n - x)^2}{N}} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{N}} \quad (7)$$

Con los datos de los últimos 20 años que se registraron en Excel para el análisis del caso práctico (Junio 2003 - Abril 2023) y aplicando esta fórmula se ha obtenido una desviación típica mensual referente al precio del cobre de 0,066 y referente al precio del zinc de 0,069, similar.

Se puede interpretar que se encuentre dentro del intervalo +/- 1 desviación estándar (σ) y el 68% de los valores se encuentran dentro de este intervalo, así que hay una probabilidad de que el rendimiento del cobre y del zinc se sitúe en un 68% en una distribución normal dentro de una campana de Gauss. Este dato se puede extraer la volatilidad del precio del cobre y del zinc en los últimos 20 años.

Se sabe que los precios de los metales son volátiles y están sujetos a cambios debido a factores como la oferta y la demanda, condiciones económicas globales, eventos geopolíticos y otros factores. Como se puede observar en la Ilustración 4, a lo largo de las últimas dos décadas, el precio del cobre ha experimentado fluctuaciones significativas. En la primera mitad de la década de 2000, el precio del cobre aumentó considerablemente debido a la creciente demanda de China y otros países en desarrollo.

Sin embargo, en 2008, se produjo una caída brusca de los precios debido a la crisis financiera global, mientras que luego, el precio se recuperó y alcanzó niveles récord en 2011. Posteriormente, hubo fluctuaciones más moderadas en el precio del cobre, con picos y valles asociados con eventos económicos y comerciales.

A medida que las economías se recuperaron de la recesión global, la demanda de cobre siguió siendo fuerte debido a su uso en la construcción, la electrónica y la infraestructura.



Ilustración 4. Evolución del precio del cobre (Elaboración propia, Fuente: Indexamundi, 2023)

Al igual que el cobre, el precio del zinc ha experimentado fluctuaciones significativas en las dos últimas décadas.

En la Ilustración 5 se muestra las fluctuaciones del precio del zinc en los últimos 20 años. Se puede observar que, durante la década de 2000, el zinc experimentó aumentos de precio, impulsados por la demanda global y restricciones en la oferta.

Sin embargo, al igual que otros metales, el zinc también se vio afectado por la recesión global de 2008 y experimentó una disminución en su precio.

En años posteriores, el precio del zinc se recuperó gradualmente a medida que la demanda se estabilizó y se aplicaron medidas para aumentar la oferta.

El precio del zinc puede verse influenciado por factores como la producción de automóviles (debido a su uso en galvanización) y las condiciones económicas globales.

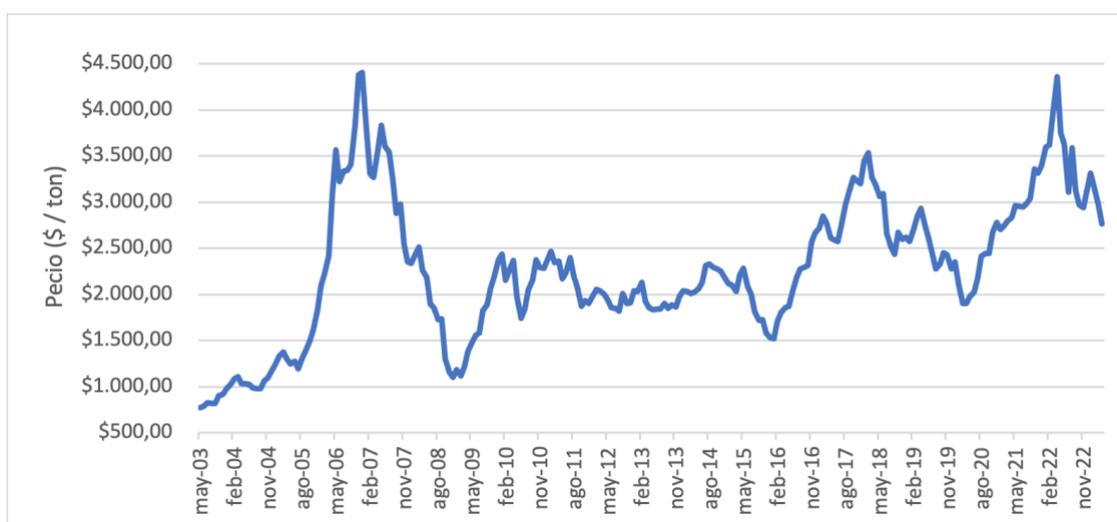


Ilustración 5. Evolución del precio del zinc (Elaboración propia, Fuente: Indexamundi, 2023)

En un análisis financiero, se partiría desde la comprensión de estas cotizaciones para valorar la volatilidad, pero como se ha mencionado, se estaría trabajando con intangibles, por lo que se tendría que introducir el concepto de volatilidad implícita del activo subyacente (Estrategias de inversión, s.f.), es decir, aquella que sirve para determinar el valor temporal o extrínseco de una operación. Es el importe de la prima que excede al valor intrínseco de dicha opción. Cuanto mayor sea el período de tiempo hasta ejercicio y cuanta más volatilidad haya en el precio del activo subyacente, mayor es el valor temporal. Esta volatilidad implícita se usa en el modelo Black Scholes para valorar las opciones.

No obstante, un análisis financiero para la valoración de un proyecto se queda corto, o podría ser impreciso, pues solo se centra en los flujos de caja y no se tienen en cuenta variables exógenas o endógenas importantes para la toma de decisiones de la organización o compañía y pueden ser cruciales a la hora de tomar una decisión como puede ser: ampliar, prorrogar, reducir o abandonar el proyecto, tenemos que partir de él.

Entonces teniendo en cuenta tanto la valoración mediante opciones reales y el análisis financiero, se podría decir que el Valor del proyecto = VAN + Valor de opción (Francisco, s.f.)

No hay que perder de vista que el VAN actualiza el valor futuro y lo trae al presente y la importancia que tiene que este sea positivo. Un VAN positivo en una empresa es indicador de que la empresa es rentable. Aquí los directivos de la organización ya tienen el primer escalón para en un principio continuar con el proceso de valoración, pero no pueden dejar de lado el paso del tiempo y el riesgo financiero al que están sometidos.

Desde aquí la importancia de elegir la decisión más provechosa por parte de la dirección y del equipo a su cargo. Con referencia al estudio que se realiza, es importante destacar la importancia de un buen estudio de todas las opciones de inversión y financiación, teniendo en cuenta que la inversión debe producir beneficios económicos que aumenten el valor de la empresa y que esta pueda pasar por todas las fases, desde su nacimiento-crecimiento-madurez y declive, tomando en cuenta que con el declive podría llegar a perecer o a embarcarse en un nuevo proyecto.

5 CASO DE EJEMPLO - COBRE LAS CRUCES SA

La metodología de estudio de caso es un enfoque de investigación que se utiliza para analizar detalladamente un caso particular, ya sea un evento, una situación, una organización o un individuo. Esta metodología es especialmente útil cuando se desea explorar en profundidad un caso específico y comprenderlo en su contexto. Proporciona una comprensión detallada y contextualizada que puede ayudar a informar la teoría, la toma de decisiones y la solución de problemas en una variedad de campos de estudio.

El primer paso es seleccionar un caso específico que sea relevante para la investigación. El caso seleccionado es el del complejo minero “Cobre las Cruces SA” dedicado a la extracción de cobre, ubicado en los términos municipales de Gerena, Salteras y Guillena, con infraestructuras de apoyo en La Algaba, en la provincia de Sevilla.

En el caso de la empresa Cobre Las Cruces SA se ha seguido el proceso típico de evolución de una empresa, pues desde sus inicios en 1990 según fue creciendo ha llegado un momento que tuvo que valorar crecer o estancarse por no poder cumplir y abarcar todo, debido a su crecimiento y optó por expandirse a través de la fusión con otra empresa. Esta minería se fusionó en 2013 con la multinacional canadiense First Quantum Minerals.

Hasta ahora Las Cruces SA ha trabajado en una minería de cielo abierto, pero ya se ha sacado todo el provecho que se podía y de nuevo se ha enfrentado a la decisión de continuar o no su bagaje como empresa. Llegado a este punto ha optado por continuar con una transformación en su proceder, así ha surgido el nuevo proyecto PMR (Polymetallurgical Refinery) (Junta de Andalucía, 2021) pues en vez de trabajarse en cielo abierto se apuesta por una minería subterránea. Puesto que en cielo abierto se ha agotado los minerales como el cobre, se continuará con la extracción de este en un 1% pero el fin de explotación en esta nueva etapa se centrará en la obtención de minerales como la plata, plomo, y el zinc.

La ventaja competitiva de este proyecto es el uso de minería inteligente y energías renovables, el apoyo de ayudas Next Generation y la inversión inicial de 500 millones de euros en un horizonte de 14 años, hasta 2034 tiene la concesión y ya se ha dado luz verde a sus licencias para continuar con la puesta en marcha del proyecto.

A continuación, se expondrán los resultados financieros de la explotación en cuestión, Cobre Las Cruces SA, obtenidos del informe anual de resultados de empresa de 2023 (eInforma, 2023), donde se muestra el balance y cuenta de resultados de los años 2020 al 2022.

5.1 Datos y resultados financieros

5.1.1 Ingresos

La empresa tuvo ingresos por 80,8 millones de euros a diciembre 2022, observándose una disminución del 27% con respecto a diciembre 2021 cuando se ubicó en 110 millones de euros. La tendencia pues ha sido descendente.

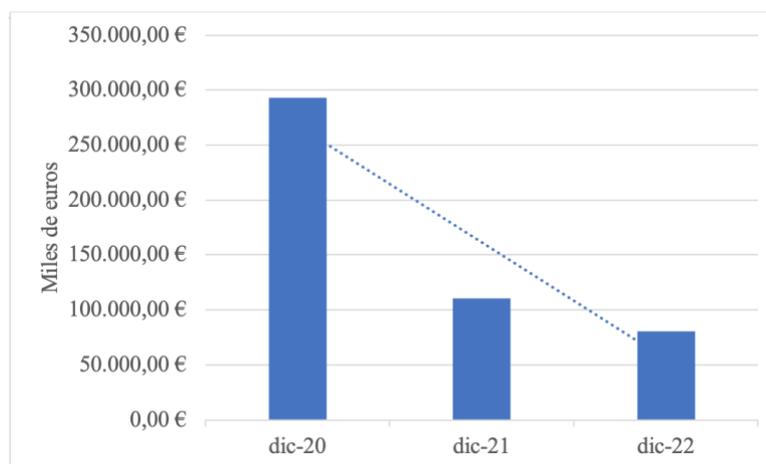


Ilustración 6. Evolución de los ingresos (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

Es importante mencionar los fenómenos específicos acontecidos en esta minería que tuvo un impacto adverso en las ventas de la empresa, por una parte, el agotamiento de la mina (pasando de ventas de 293 millones de euros a 110 millones de facturación) [24] y por otro, la pérdida de un tercio del cobre por un derrumbe o deslizamiento de tierras ocurrido en la corta minera, que ocasionó que la actividad extractiva estuviera parada desde finales de enero hasta finales de julio de 2019.

Ahora bien, la empresa mantiene su proyecto a 2034 [25]. De ahí que también se acelerara el fin de la era de la minería de cielo abierto de las cruces y tenga que embarcarse en un nuevo proyecto de refinería poli metalúrgica de minería subterránea con la explotación de otros minerales como ya hemos dicho: plata, plomo, zinc.

Todo ello ha repercutido en los beneficios del último año y aun así la empresa tiene posibilidad de continuar y obtener financiación europea al transformar su estrategia con el proyecto PMR.

5.1.2 Costes de explotación

El aprovisionamiento pasó de 77,2 millones de euros en 2020 a 28,05 millones de euros en 2021, similar a los 28,2 millones de euros del año 2022. La mayor proporción de estos costes, se originaron del consumo de materias primas y otras materias consumibles (88% del aprovisionamiento total en ese año).

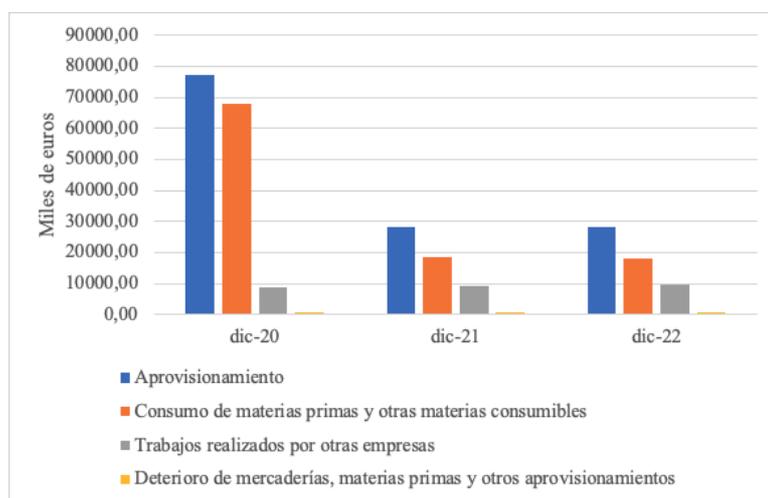


Ilustración 7. Evolución de los costes de explotación (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

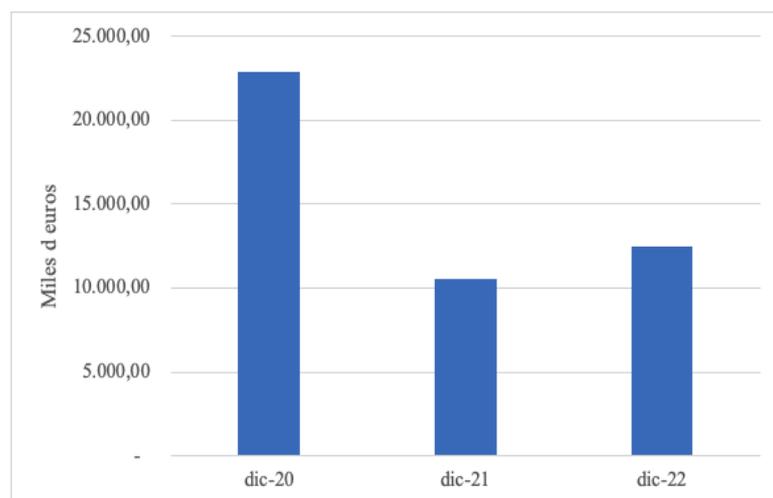


Ilustración 8. Evolución de los costes de personal (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

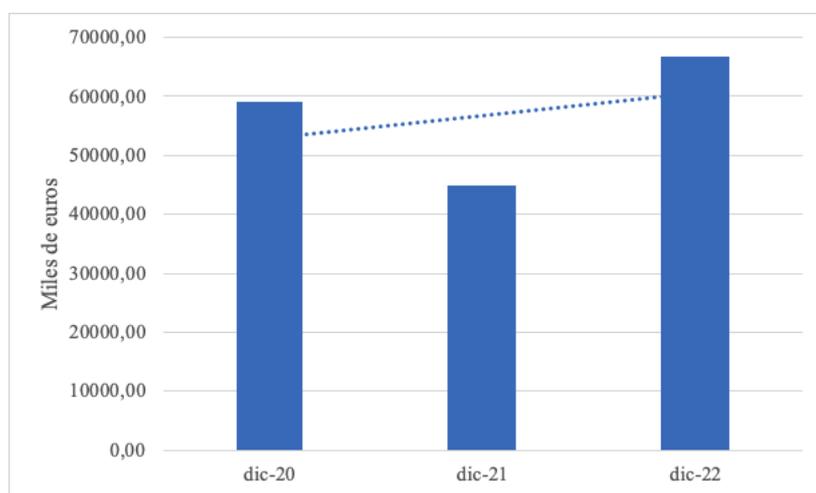


Ilustración 9. Evolución de otros costes de explotación (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

En la Ilustración 11 se observa, que el aumento de los Otros gastos de explotación, explican los números rojos de la minería Las Cruces. En efecto, estos otros gastos aumentaron en los últimos años en 66,5% y 64,3%, por lo que continuar con la minería abierta, cuando los costes superan los ingresos no tenía sentido.

No obstante, para el proyecto futuro se puede tomar como referencia los gastos de explotación del año 2020 y 2021 pues son años cruciales debido a los acontecimientos mundiales acontecidos y aun así la minería arrojó números positivos, siendo el sector minero uno de los que se han mantenido a flote durante la pandemia.

5.1.3 Beneficio bruto

Como consecuencia de la reducción de los ingresos, se observa, además, una disminución del margen bruto a -35% en el período 2021 – 2022, pasando de 80 millones de euros a 52 millones de euros.

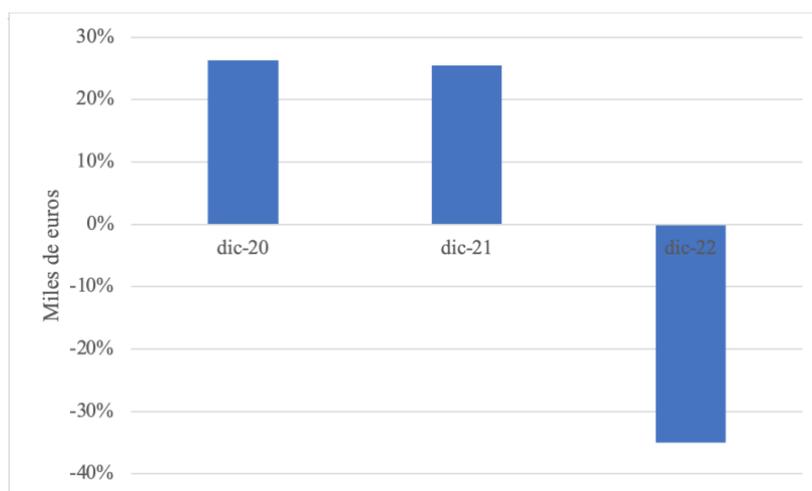


Ilustración 10. Evolución del beneficio bruto (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

5.1.4 Beneficio antes de impuestos y resultado neto

Para diciembre 2021 el EBITDA se ubicó en 26,8 millones de euros y para diciembre 2022 el EBITDA disminuyó significativamente ubicándose en negativo, en -25,7 millones de euros.

Los beneficios antes de impuestos, que para diciembre 2021 se ubicaron en 22 millones de euros, se redujeron significativamente, pasando a -18,9 millones de euros.

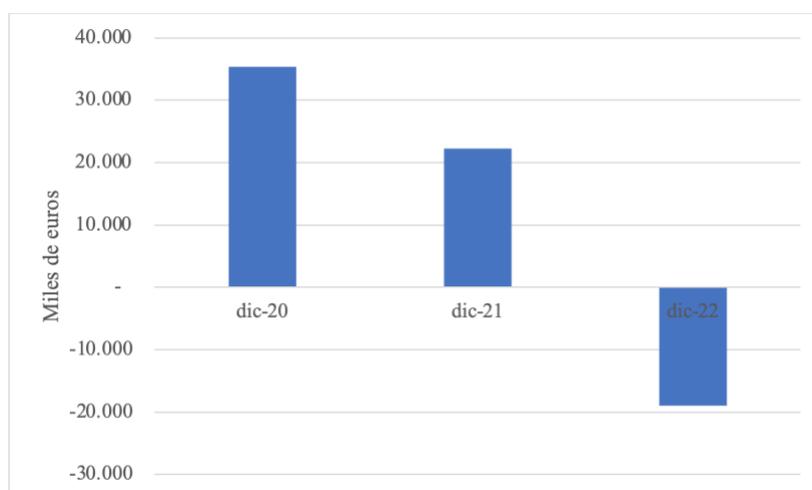


Ilustración 11. Evolución del beneficio antes de impuestos (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

El Beneficio a diciembre 2022 fue de -18,9 millones de euros, que se compara desfavorable con la obtenida por 22,2 millones de euros a diciembre 2021. El margen neto fue de 20,1% en diciembre 2021 que desmejora a -23,4% en diciembre 2022. Es implicó una disminución de la rentabilidad económica.

Todas estas imágenes tomadas del informe anual de la empresa reflejan lo dicho hasta ahora. Vemos en el Gráfico 10 como el EBITDA en el ejercicio 2022 ha sido negativo lo cual es indicador de que la empresa no es rentable.

Como se ha comentado anteriormente, este resultado adverso también se puede explicar por la influencia de factores económicos, como la inflación, que también ha sumado puntos negativos al EBITDA del año 2022.

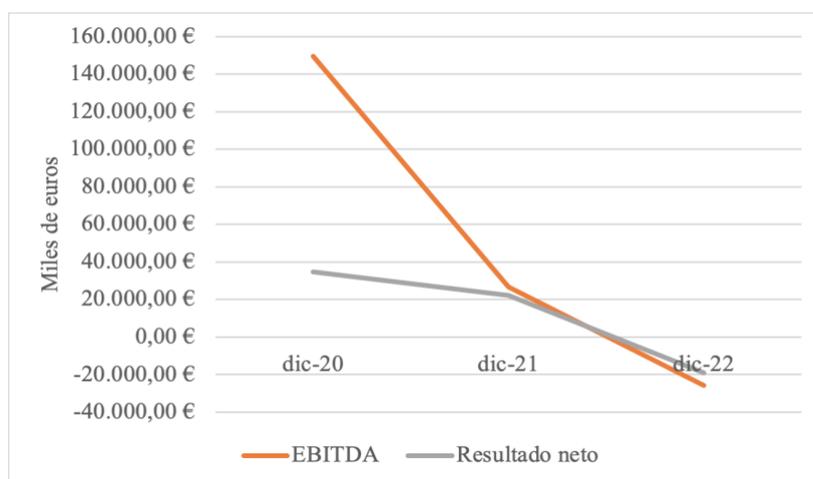


Ilustración 12. Evolución del EBITDA y resultado neto (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

5.1.5 Flujos de efectivo y evaluación de la rentabilidad

Como se observa en la Ilustración 13, mientras en el año 2020 la empresa generaba flujo de efectivo en sus actividades de explotación, registrando 150 millones de euros, la caída en los resultados, en 2021 y 2022, muestra un flujo de caja negativo, incluso el de financiación (que debería ser positivo), de ahí la necesidad de la empresa de tomar una nueva dirección y enfocarse en una nueva estrategia para no perecer, como, por ejemplo, iniciar con la minería subterránea.

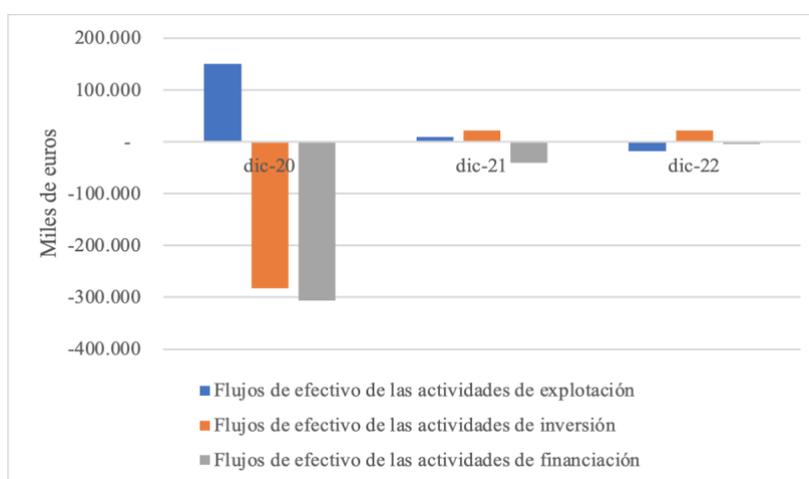


Ilustración 13. Evolución del flujo de efectivo (Elaboración propia, Fuente: Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

Finalmente, las ratios de resultados arrojan nuevamente que tanto la rentabilidad económica, financiera y de explotación son negativos al término del año 2022, por lo que los accionistas no obtienen retorno por su inversión.

RATIOS DE RESULTADOS			
Rentabilidad Económica (ROA) (%)	-8,62	8,4	10,15
Rentabilidad de Explotación (%)	-8,62	8,4	41,08
Rentabilidad Financiera (ROE) (%)	-13,04	13,03	15,27

Ilustración 14. Evolución de ratios de resultados 2022, 2021 y 2020 (Informe anual Cobre Las Cruces SA, 2023)

5.2 Construcción del árbol binomial de decisión

En el contexto del proyecto PMR, que implica una inversión significativa de 500 millones de euros a lo largo de 14 años, se ha planteado un análisis para evaluar la viabilidad económica durante la primera mitad del horizonte del proyecto. Para esto, se construirá un árbol binomial que evaluará los primeros siete años del proyecto. Este análisis permitirá determinar si, a mitad de camino, el proyecto está en camino de rentabilizar la inversión inicial. Utilizando dos escenarios principales, 'mina abierta' y 'mina cerrada', se explorarán las decisiones financieras y estratégicas año tras año, suponiendo que en el séptimo año se cerrará la mina definitivamente, independientemente de las circunstancias. Este enfoque proporciona una estructura para evaluar de manera proactiva la rentabilidad del proyecto y las decisiones óptimas de cierre, adaptándose a las fluctuaciones del mercado y las proyecciones futuras.

5.2.1 Volatilidad del proyecto y coeficientes del árbol binomial

Recordando los cálculos previos realizados en el capítulo 4, la volatilidad anualizada del precio del cobre la determinamos a partir de la volatilidad mensual obtenida en el periodo mencionado (0,066). Utilizaremos la volatilidad del cobre ya que ha sido el principal mineral obtenido históricamente en la mina y nos servirá como referencia para el proyecto PMR. Anualizaremos la desviación típica según la fórmula:

$$\sigma_{anual} = \sigma_{mensual} \sqrt{12} \quad (8)$$

Obteniendo así una desviación típica de $\sigma = 0,23$, más exactamente del 22,84%, lo que reflejará las variaciones que se esperarían a lo largo de un año completo.

A partir de esta volatilidad podemos obtener los coeficientes de ascenso y descenso, que se utilizarán como multiplicadores de los ingresos esperados para el año el año próximo:

- Coeficiente de ascenso (u): Se calcula como $u = e^{\sigma}$, lo que proporciona una medida de cuánto podría aumentar el valor del proyecto en un escenario favorable en el próximo año.
- Coeficiente de descenso (d): De manera similar al de ascenso, se calcula como $d = e^{-\sigma}$, indicando cuánto podría disminuir el valor del proyecto en un escenario desfavorable.

Estos cálculos dan como resultado un coeficiente de ascenso $u = 1,26$, lo que significa que si un nodo experimenta un ascenso el valor del proyecto en el siguiente nodo aumentaría en un 25,66%, y un coeficiente de descenso $d = 0,80$, lo que supone que en caso de descenso se reduciría el valor en 20,42%.

5.2.2 Tasa libre de riesgo y probabilidades

Para este análisis, se ha adoptado una tasa libre de riesgo (R_f) del 3.35%, correspondiente al rendimiento actual del bono español a 10 años (Expansion.com, 2024). Esta tasa se seleccionó debido a su consideración como un referente de retorno sin riesgo, lo que proporciona una base realista y conservadora para el modelado financiero del proyecto, asegurando que el análisis refleje adecuadamente el entorno económico y financiero actual.

Con esta tasa libre de riesgo establecida, podemos obtener las probabilidades de ascenso y descenso, ajustada al riesgo, del valor del proyecto en el próximo año:

- Probabilidad de ascenso (p): Se calcula utilizando la fórmula $p = \frac{e^{R_f} - d}{u - d}$.
- Probabilidad de descenso (q): Es simplemente $q = 1 - p$, complementando la probabilidad de ascenso y reflejando la posibilidad de que el proyecto disminuya en valor debido a condiciones desfavorables.

Estos cálculos dan como resultado unas probabilidades de ascenso y descenso $p = 51,71\%$ y $d = 48,29\%$ respectivamente.

5.2.3 Construcción del árbol de ingresos

Para determinar el valor inicial de referencia para los ingresos esperados en el primer nodo del árbol binomial, se ha calculado el promedio de los ingresos de los últimos tres años, que se muestran en la Ilustración 6. Aunque el año 2022 muestra ingresos significativamente más bajos en comparación con los años anteriores, se ha optado por utilizar este promedio para mantener un enfoque conservador en la proyección de ingresos futuros. Este método proporciona una estimación prudente y equilibrada que minimiza el riesgo de sobreestimar los ingresos potenciales, lo cual es crucial para una evaluación realista del proyecto bajo condiciones de incertidumbre del mercado.

Teniendo en cuenta los ingresos iniciales comentados, y los coeficientes calculados anteriormente, multiplicándolos ascendente y descendientemente cada año, obtenemos el siguiente árbol de ingresos en millones de euros:

Ingresos iniciales	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
							798,85 €
						635,74 €	
					505,93 €		505,93 €
				402,63 €		402,63 €	
			320,42 €		320,42 €		320,42 €
		255,00 €		255,00 €		255,00 €	
	202,93 €		202,93 €		202,93 €		202,93 €
161,50 €		161,50 €		161,50 €		161,50 €	
	128,53 €		128,53 €		128,53 €		128,53 €
		102,28 €		102,28 €		102,28 €	
			81,40 €		81,40 €		81,40 €
				64,78 €		64,78 €	
					51,55 €		51,55 €
						41,03 €	
							32,65 €

Ilustración 15. Árbol de ingresos (Elaboración propia)

5.2.4 Construcción del árbol de flujos de caja

Para calcular los flujos de caja esperados en cada nodo del árbol binomial, se resta a los ingresos proyectados del árbol los costes totales estimados. La estructura de costes considera varios componentes clave:

- **Inversión inicial:** Se realiza una inversión inicial de 500 millones de euros al comienzo del proyecto, la cual se refleja como un desembolso adicional a los costes en el nodo inicial del árbol
- **Costes anuales:** Se estiman basándose en aprovisionamiento, personal y otros gastos. Para el personal, se ha optado por mantener constante la plantilla del año 2022 durante todo el período del proyecto, y por ende su coste asociado. En cuanto al aprovisionamiento y otros gastos, se toman en cuenta la media de los costes de 2020 y 202, como se detalla en el apartado 5.1.2, excluyendo los del año 2022 debido a que estos no son representativos por ser excepcionalmente altos en relación con los ingresos más bajos de ese año.
- **Ajuste por Inflación:** Todos los costes anuales se ajustan por una tasa de inflación del 2.2%, correspondiente a la inflación acumulada en España desde el inicio del año 2024 (Expansion.com, 2024). Este ajuste asegura que los costes reflejen el valor actual del dinero y proporciona una estimación más precisa de los flujos de caja futuros.

Año	Costes (Millones de euros)
Inicial	116,88 €
1	119,45 €
2	122,08 €
3	124,77 €
4	127,51 €
5	130,32 €
6	133,19 €
7	136,12 €

Tabla 1. Costes anuales ajustados por inflación (Elaboración propia)

La diferencia entre los ingresos ajustados por los factores de subida y bajada y los costes ajustados a la inflación, junto con la inversión inicial, resulta en los flujos de caja netos proyectados para cada año, dando lugar al siguiente árbol, en millones de euros:

Flujo de caja inicial	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
							662,73 €
						502,55 €	
					375,62 €		369,82 €
				275,12 €		269,45 €	
			195,66 €		190,11 €		184,31 €
		132,92 €		127,49 €		121,82 €	
	83,48 €		78,17 €		72,62 €		66,82 €
-455,38 €		39,42 €		33,99 €		28,31 €	
	9,07 €		3,76 €		-1,79 €		-7,59 €
		-19,80 €		-25,23 €		-30,90 €	
			-43,37 €		-48,92 €		-54,72 €
				-62,73 €		-68,41 €	
					-78,77 €		-84,56 €
						-92,16 €	
							-103,47 €

Ilustración 16. Árbol de flujos de caja (Elaboración propia)

Estos flujos de caja forman la base para las decisiones en cada nodo del árbol, donde se evalúa si continuar con la operación o cerrar el proyecto en función de la rentabilidad proyectada y las condiciones del mercado.

5.2.5 Construcción del árbol de decisión para la opción de cierre

Para determinar la viabilidad de mantener o cerrar la mina en cada año del análisis se construye con todos los datos expuestos anteriormente el árbol de decisión binomial. Para ello, lo primero que necesitamos es calcular el coste de cierre de la mina, el cual se ha supuesto de 155,11 dólares por hectárea (Aduvire, Diciembre 2022).

Según el estudio consultado, se estima ese coste de cierre por hectárea para minas subterráneas, como es el caso del proyecto PMR, y al cambio de 1,05 dólares por euro en 2022, equivaldría a aproximadamente 147,72 euros por hectárea. Dado que la mina tiene un diámetro de 900 metros, el coste inicial de cierre se calcula en alrededor de 38.000 euros. Este valor también se ajustará anualmente por la tasa de inflación del 2,2%, reflejando el aumento en los costes a lo largo del tiempo.

Año	Inicial	1	2	3	4	5	6	7
Coste (miles de euros)	37,59	38,42	39,26	40,13	41,01	41,91	42,83	43,78

Tabla 2. Coste de cierre ajustado por inflación (Elaboración propia)

Ahora ya se puede construir el árbol de decisión con un cálculo retrospectivo iniciando en el último año del análisis (año 7), donde se asume que la mina se cierra definitivamente. El valor de la opción de cierre (C_7) en este año es simplemente el flujo de caja neto después de restar el coste de cierre ajustado por inflación. Esto se representa como:

$$C_7 = \text{Flujo de caja}_{7j} - \text{Coste de cierre}_7 \quad (9)$$

Para calcular el valor del proyecto (C_t) en cada año anterior al año 7, utilizamos la siguiente fórmula para todos los escenarios de derecha a izquierda hasta obtener C_0 :

$$C_t = \frac{p * C_u + q * C_d}{1 + Rf} \quad (10)$$

donde C_u y C_d son los valores del proyecto en los escenarios de subida y bajada respectivamente para el año siguiente. Esto calcula el valor presente esperado del proyecto basado en los posibles resultados del año siguiente.

Una vez calculado C_t para cada año, determinamos el valor de la opción de cierre (S_t) como:

$$S_t = \text{Flujo de caja}_{tj} + \max(C_t, \text{Coste de cierre}_t) \quad (11)$$

Valor actual al inicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
						504,34 €	662,69 €
					756,36 €	1.006,89 €	
				835,10 €	1.131,97 €	271,11 €	369,77 €
			798,08 €	1.110,22 €	385,03 €	540,56 €	
		688,13 €	993,73 €	391,71 €	575,14 €	123,39 €	184,27 €
	539,52 €	821,05 €	330,47 €	519,20 €	149,86 €	245,21 €	
378,98 €	623,00 €	236,06 €	408,64 €	117,31 €	222,48 €	29,84 €	66,78 €
-121,02 €	134,92 €	275,48 €	63,89 €	151,30 €	14,64 €	58,16 €	
	143,99 €	13,56 €	67,65 €	-16,45 €	12,85 €	-29,41 €	-7,63 €
		-6,24 €	-41,98 €	-25,27 €	-47,47 €	-30,95 €	
			-43,41 €	-61,32 €	-48,96 €	-66,93 €	-54,76 €
				-62,77 €	-77,33 €	-68,45 €	
					-78,81 €	-90,70 €	-84,61 €
						-92,20 €	
							-103,51 €

Glosario de colores	Ct
Ejecutar cierre	St

Ilustración 17. Árbol binomial de decisión para la opción de cierre (Elaboración propia)

Este valor S_t se considera luego como C_u o C_d en el cálculo de C_t para el año anterior, avanzando de derecha a izquierda en el árbol. La decisión de cerrar o continuar cada año se basa en si es más rentable cerrar la mina (tomando el coste de cierre) o continuar operando (tomando el valor del proyecto C_t). Aplicando todos los cálculos expuestos, obtenemos el siguiente árbol binomial en millones de euros:

El análisis mediante el árbol binomial de decisión para los primeros siete años del proyecto PMR revela que, con una inversión inicial de 500 millones de euros, un cierre anticipado del proyecto al final de este período resultaría en una pérdida neta ($S_0 = -121,02$ millones de euros). Este resultado destaca los desafíos asociados con los altos costos iniciales y enfatiza la necesidad de una gestión de costes eficaz y una optimización de operaciones desde el inicio.

A pesar de las pérdidas proyectadas en esta fase inicial, el valor del proyecto ($C_0 = 378,98$ millones de euros) sugiere un potencial económico significativo. Este potencial indica que con ajustes estratégicos y una gestión operativa cuidadosa, el proyecto podría alcanzar y superar el umbral de rentabilidad durante la segunda mitad del período planeado, incluso sin una evaluación explícita de esos años adicionales.

Por lo tanto, el proyecto PMR, aunque presenta riesgos financieros iniciales, ofrece una perspectiva optimista para generar valor a largo plazo. Las decisiones tomadas en los próximos años serán cruciales para capitalizar las oportunidades y minimizar las pérdidas, asegurando así que la inversión inicial conduzca a resultados positivos y sustentables.

5.3 Comparación del análisis por árbol binomial con el cálculo del VAN

Tradicionalmente, el Valor Actual Neto (VAN) ha sido la herramienta estándar para evaluar la rentabilidad de proyectos de inversión. Sin embargo, el VAN, al utilizar una tasa de descuento estática y suponer un escenario de flujos de caja fijos, puede no capturar completamente la flexibilidad operativa y las decisiones en tiempo real que caracterizan a proyectos complejos y a largo plazo.

En este contexto, la comparación entre el cálculo tradicional del VAN y el análisis más dinámico proporcionado por el árbol binomial de opciones reales no solo ilustrará las limitaciones del primero, sino también cómo el segundo puede ofrecer una visión más profunda y precisa de la viabilidad financiera del proyecto. Esperamos obtener una perspectiva clara sobre los beneficios de aplicar un enfoque de opciones reales, especialmente en términos de captura de la incertidumbre y la flexibilidad estratégica.

5.3.1 Cálculo del VAN

Para evaluar el proyecto PMR mediante un enfoque más tradicional, se ha calculado el Valor Actual Neto ajustando la tasa de descuento para reflejar tanto el Costo Medio Ponderado de Capital (WACC) como la tasa de inflación. El WACC, obtenido como el promedio de la rentabilidad sobre el activo total de los últimos siete años para empresas extractoras de minerales en España con una facturación similar a Las Cruces (SABI, 2024), es del 4,97%. La tasa de inflación aplicada es del 2,2%, lo que ajusta el WACC a 2,77% para reflejar el efecto real del dinero en el tiempo.

Utilizando esta tasa de descuento ajustada, se ha calculado el VAN de los flujos de caja proyectados para los primeros siete años del proyecto, que previamente fueron estimados en el análisis del árbol binomial. Después de descontar estos flujos de caja con la tasa del 2,77%, y restando la inversión inicial de 500 millones de euros, el resultado es un VAN de -194,53 millones de euros.

5.3.2 Conclusión de la comparación

Este resultado contrasta significativamente con el valor de la opción de cierre S_0 de -121,02 millones de euros obtenido mediante el árbol binomial. Mientras que el VAN ajustado al WACC y la inflación sugiere una pérdida considerablemente mayor, el árbol binomial, que incorpora la flexibilidad de decisiones estratégicas año tras año, presenta un panorama menos negativo.

Esto ilustra cómo el método del árbol binomial, al permitir la adaptación a las condiciones cambiantes del mercado y las decisiones operativas en cada nodo, puede ofrecer una visión más optimista y realista del valor potencial del proyecto.

6 CONCLUSIONES

En el transcurso de este trabajo, se han explorado varios aspectos fundamentales relacionados con la valoración de opciones reales en proyectos mineros, siendo los puntos clave:

La valoración de opciones reales en proyectos mineros es esencial para tomar decisiones estratégicas informadas. Permite a las empresas mineras evaluar de manera integral los escenarios y riesgos asociados con sus operaciones.

Se han presentado varios métodos de valoración de opciones reales, como el modelo binomial y el modelo Black-Scholes, que son herramientas valiosas para cuantificar el valor de mantener opciones de inversión en proyectos mineros.

Se ha destacado que las decisiones de cierre de minas se ven influenciadas por factores económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales. Estos factores deben ser considerados en la toma de decisiones.

A través de un estudio de caso, de la empresa Cobre Las Cruces SA, se construyó un árbol binomial con dos escenarios, uno de mina abierta y mina cerrada, ilustrándose cómo se puede aplicar la valoración de opciones reales en un contexto minero, considerando probabilidades y costes asociados.

Asimismo, se subrayó la importancia de la sostenibilidad y la responsabilidad social en las operaciones mineras. La restauración ambiental y la consideración de las comunidades locales son fundamentales en las decisiones de cierre de minas.

En resumen, la valoración de opciones reales en proyectos mineros es una herramienta esencial para la toma de decisiones estratégicas, permitiendo a las empresas mineras evaluar los beneficios y riesgos de mantener opciones de inversión, considerando múltiples factores que van más allá de los aspectos puramente financieros.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Milano, Sector extractivo y sociedad civil. Cuando el trabajo de comunidades, gobiernos e industrias es sinónimo de desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo, 2018.
- [2] J. Mascareñas, «Opciones Reales: Introducción», Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [3] Finacoteca, «Métodos de Valoración de Inversiones: Opciones Reales,» Finacoteca, 2021.
- [4] P. Fernández, «Valoración de Opciones Reales: Dificultades, Problemas y Errores,» IESE Business School, Barcelona, España, 2008.
- [5] M. Méndez-Suárez, «Opciones Reales: Métodos de Simulación y Valoración,» ESIC Business & Marketing School, Madrid, España, 2013.
- [6] M. Amram y N. Kulatilaka, «Real Options,» Harvard Business School Press, 2000.
- [7] A. Damodaran, «The Promise and Peril of Real Options,» Stern School of Business, New York, U.S.A., 2000.
- [8] Villanova, A. «La Dinámica de la Estructura de Capital. Evidencia para la empresa industrial española,» [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8066/Tavv1de1.pdf?sequence=1>.
- [9] Cristóbal Martínez, «Fynsa,» 24 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.fynsa.com/newsletter/opciones-exoticas-una-alternativa-unica-en-el-mercado-financiero/>.
- [10] J. Cox, S. Ross y M. Rubinstein, «Option Pricing: A simplified Approach,» Journal of Financial Economics, 1979.
- [11] F. Longstaff y M. Pérez-Somalo, «Valuing American Options by Simulation: A simple Least-Squares Approach,» The Review of Financial Studies, 2006.
- [12] «La farga yourcoopersolutions,» [En línea]. Available: <https://www.lafarga.es/es/el-cobre/aplicaciones/el-abc-del-cobre>. [Último acceso: 2023].
- [13] «minería sostenible de galicia,» 06 junio 2022. [En línea]. Available: <https://minariasostible.gal/es/economia-mundial-y-el-sector-minero/>.
- [14] «gobierno de España,» 08 03 2022. [En línea]. Available: <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/el-gobierno-aprueba-el-pte-de-economia-circular-para-acelerar-la-transicion-hacia-un-sistema-productivo>.
- [15] J. Oyarzún, Principios de geología y exploración minera, Editorial Universidad de La Serena, 2021.
- [16] e. Equipo editorial, «Enciclopedia de humanidades,» 23 enero 2023. [En línea]. Available: <https://humanidades.com/mineria/>.

- [17] Blog, «Universidad europea,» 12 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://universidadeuropea.com/blog/que-son-los-commodities/>.
- [18] J. H. Herbert, Madrid, 2018. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/70265/3/ESTRUCTURA_PROCESO_EVALUACION_DE_UN_PROYECTO_MINERO_DPMB1T2_R6-20180924.pdf.
- [19] «Conexión esan,» 21 julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/que-aspectos-se-deben-considerar-en-la-evaluacion-financiera-de-un-proyecto-minero>.
- [20] d. e. I. B. Enrique Castellanos, «Braindex,» [En línea]. Available: <https://braindex.academy/volatilidad-interpretacion-caracteristicas/>.
- [21] «Estrategias de inversión,» [En línea]. Available: <https://www.estrategiasdeinversion.com/herramientas/diccionario/trading/volatilidad-implicita-del-activo-subyacente-t-567>.
- [22] F. F. Francisco, «Expansión.com,» [En línea]. Available: <https://www.expansion.com/diccionario-economico/opciones-reales.html>.
- [23] «Junta de Andalucía,» 07 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/presidencia/portavoz/economiaempleo/161572/TransformacionEconomica/Mineria/Mina/CobrelasCruces>.
- [24] M. J. Pereira, «ABC de Sevilla,» 26 agosto 2022. [En línea]. Available: <https://sevilla.abc.es/economia/cobre-cruces-reduce-ventas-agotamiento-mina-20220826071256-nts.html>.
- [25] C. P. d. Silva, «El confidencial,» 19 febrero 2019. [En línea]. Available: Las Cruces pierde un tercio del cobre por el derrumbe pero mantiene su proyecto a 2034.
- [26] Página eadic.com, consultada el 18/10/2023
<https://eadic.com/blog/entrada/obras-subterranas-en-explotaciones-mineras/>
- [27] Página cincodias.com, consultada el 19/10/2023
https://cincodias.elpais.com/cincodias/2020/06/04/companias/1591296825_543317.html
- [28] O. Aduvire, «Costos de cierre en depósitos de desmontes y presas de relaves generadores de acidez» Revista de medio ambiente minero y minería, Perú, Diciembre 2022.
- [29] Página indexmundi.com, consultada el 5/09/2023
<https://www.indexmundi.com/commodities/>
- [30] Base de datos SABI, consultada el 18/06/2024
- [31] Página expansión.com, consultada el 19/06/2024
<https://datosmacro.expansion.com/bono/espana?dr=2024-04>
<https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/espana>
- [32] eInforma (2023). «Balance y cta. De Resultados Cobre Las Cruces SA» (C.I.F.: A28814135)

